

HİDROJENLENDİRİLMİŞ AMORF SİLİSYUM FİMLERİN SiH₄-He KARIŞIMI KULLANILARAK BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

A. SERTAP KAVASOĞLU

ÖZ

Bir PECVD sisteminin altaş sıcaklık kontrolcüsü ve RF güç kaynağı yenilenmiş ve bu sistemde çeşitli oranlarda silan gazı helyum ile seyreltilerek herbiri 5-7 örnekten oluşan 6 set hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) cam ve tek kristal silisyum tabanlar üzerine büyütülmüştür. He/(He+SiH₄) oranı dışında hasas bir şekilde kontrol edilen ve sistematik olarak değiştirilen diğer film büyütme parametreleri altaş sıcaklığı, toplam gaz basıncı ve plazmaya uygulanan RF gücüdür. Elde edilen filmler, optik geçirgenlik, karanlık iletkenlik, fotoiletkenlik tepki zamanı, kırmızıaltı spektroskopisi, sıcaklığın fonksiyonu olarak foton akısına bağımlı fotoiletkenlik ve CPM ölçümleri ile karakterize edilmiş ve en uygun a-Si:H büyütme parametreleri belirlenmiştir.

Helyumla seyreltilerek hazırladığımız a-Si:H filmlerin optik bant aralıkları hazırlama koşullarına bağlı olarak 1,55-1,76 eV arasında değişmektedir. Optik bant aralığının Helyum seyreltme oranına ve diğer film hazırlama koşullarına bağlı olarak, herhangi bir katkılama yada alaşım gazı kullanmaksızın değiştirilebilmesi, hazırlanan örneklerin heteroeklem aygıt yapımına uygun bir malzeme olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Set-5 örneklerinden % 85 seyreltme oranında elde edilen filmin büyüme hızı 9,5 Å/s kusur yoğunluğu ise 10^{16} cm^{-3} düzeyindedir. Fakat Set-5 örnekleri içerisinde, kusur yoğunluğu açısından en düşük kusur yoğunluğu ($2,6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) ve Urbach enerjisi (43,5 meV) sergileyen örneğin, % 99 helyum seyreltme oranında, 1,8 Å/s büyüme hızı ile hazırlanabileceği gözlemlenmiştir. Bu örnek şu ana kadar literatürde kaydedilmiş en düşük kusur seviyesine ve en küçük Urbach enerjisine sahip olan örnektir (Cabarrocas et. al., 1998, 2000, 2003, Matsuda et. al., 2003,

2004). Diğer bir önemli sonuç ise; Tauc bant aralığının helyum seyreltme oranıyla (% 85-% 99) artmasıdır.

Optik ve elektriksel özellikleri tanımlanan örneklerden beş tanesi üzerinde, yarı kararlı, ışııl kusur yaratılma ve tavlama deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneysel ölçümler, helyum ile seyreltilerek hazırlanan a-Si:H örneklerin, standart a-Si:H (SiH_4 , He ile seyreltilmeden büyütölmüş a-Si:H filmler) örneklerden oldukça farklı özellikler sergilediğini ve bu örneklerde ışııl kusur yaratılma mekanizmasının şu ana kadar literatürde rapor edilenlerden farklı olduğunu ortaya koyulmuştur. Helyumla seyreltilerek hazırlanan a-Si:H filmlerin fotoiletkenlikleri yüksek ışık şiddetlerinde ($\leq 100 \text{ mW/cm}^2$) çok çabuk bir şekilde doyuma ulaşabilmekte bu bakımdan daha kararlı oldukları fakat kusurların tavlama süreçlerinin tersinmez bir süreç sergileyebilecekleri görölmüştür.

Anahtar Kelimeler: a-Si:H, Helyum ile seyreltme, PECVD, , Staebler Wronski etkisi.

Danışman: Prof. Dr. Özcan ÖKTÜ,Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliğı Bölümü, Fizik Anabilim Dalı.

Eş Danışman: Doç. Dr. A. Osman KODOLBAŞ, Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliğı Bölümü, Fizik Anabilim Dalı (Yeni adresi: TÜBİTAK,Ulusal Metroloji Enstitüsü, Gebze)

PREPERATION AND CHARACTERIZATION OF HYDROGENATED AMORPHOUS SILICON FILMS USING SiH₄-He GAS MIXTURE

A. SERTAP KAVASOĞLU

ABSTRACT

Helium diluted amorphous silicon films were deposited onto Corning-7059 and crystalline silicon substrates in a homemade PECVD system operating at 13.56 MHz by decomposing silane (SiH₄), and helium gas mixture. Six set of hydrogenated amorphous silicon films were prepared, each set consists of five or seven films. Helium dilution ratio was defined to be the ratio of helium partial pressure to the total chamber pressure. Helium dilution ratio (He/(He+SiH₄)), substrate temperature, rf power and total chamber pressure were systematically changed to obtain optimum growth parameters for high quality hydrogenated amorphous silicon films exhibiting low defect density and high photoconductivity. Samples prepared were characterized by optical transmission, dark conductivity, photoconductivity response time, FTIR, temperature and photon flux dependent photoconductivity and CPM measurements.

Our result indicate that the Tauc gap of our helium diluted films can be tunable between 1.55-1.76 eV by changing helium dilution ratio. Tunable Tauc gap without using any alloying gas mixtures may find use in device applications, especially for the manufacturing of heterojunction devices. While the sample grown by 99% helium dilution exhibits the lowest defect density ($2.6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) and the smallest Urbach energy (43.5 meV), the highest deposition rate (9.5 Å/s) was observed for the a-Si:H film prepared with %85 helium dilution. $2.6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ and 43,5 meV are the lowest recorded values in the literature (Cabarrocas et. al., 1998, 2000, 2003, Matsuda et. al., 2003, 2004). These results indicate that the He-dilution may become an alternative method to deposit device quality a-Si:H films at high growth rates.

In order to investigate Staebler Wronski effect on our He diluted a-Si:H samples, we have selected 5 samples from the 6 set of samples of which their electrical and

optical properties have already been determined. Light induced degradation and subsequent annealing experiments indicate that He diluted a-Si:H films are more stable. Helium diluted a-Si:H films exhibit quite different behavior for the metastable light induced defect creation and annealing when compared to the standard a-Si:H samples. Therefore light induced metastable defect creation and recovery processes could not be explained with the use of usual models. We have also notice that saturation time of photoconductivity for he diluted a-Si:H are much shorter than that of standard a-Si:H. Helium diluted a-Si:H films are more stable than other type of a-Si:H and lifght induced defects is irreversible process in helium diluted a-Si:H. These effects have not been observed before).

Keywords:a-Si:H, Helium dilution , PECVD, Staebler Wronski effect.

Advisor: Prof. Dr. Özcan ÖKTÜ, Hacettepe Üniversity, Faculty of Engineering, Physics Engineering Department.

Co-advisor: Assoc. Prof. Dr. A. Osman KODOLBAŞ, Hacettepe Üniversity, Faculty of Engineering, Physics Engineering Department. (New address : TÜBİTAK National Metrology Institutes, Gebze)

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın gerçekleşmesinde destek olan tez danışman hocalarım Prof. Dr. Özcan ÖKTÜ'ye ve Doç. Dr. A.Osman KODOLBAŞ'a teşekkür ederim.

Benim en yakın mesai arkadaşım olan sevgili eşim Araş. Gör. Neşe KAVASOĞLU'na her türlü desteği için teşekkür ederim.

FTIR ölçümlerinin alınmasında öncelikle Dr. Berna KESİMLİ'ye ve kızamızıaltı spektroskopisi araştırma labortuavarı kurucusu hocalarım Prof. Dr. Cafer TOPAÇLI ve Prof.Dr. Arzu TOPAÇLI'ya teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Hacettepe Üniversitesi Araştırma Fonu Projelerinin (01.02.602.004 ve 01.01.602.007) katkılarıyla gerçekleştirilmiştir.

Deney düzeneklerinin yapımında emeği geçen Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü Mekanik Atölye çalışanları Çetin KARADOĞANER ve Uygur TOMBULOĞLU, Elektronik araştırma Laboratuvarı çalışanları Levent ÖZTÜRK, Hüseyin GANİOĞLU, Yener ORAL ve Yavuz ÜNAL'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen benim ve eşimin saygıdeğer ailelerimize sonsuz teşekkürler ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	Sayfa
ÖZ.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL BİLGİLER.....	7
2.1. Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyumun Fiziksel Özellikleri.....	7
2.2. PEVCD Yöntemi İle a-Si:H Filmlerin Hazırlanması.....	9
2.3. PECVD Yöntemi İle Hazırlanan a-Si:H İnce Filmlerin Oluşum Süreci.....	10
2.4. Helyum ve Silan Gazı Karışımı Kullanılarak Hazırlanan a-Si:H İnce Filmlerin Optik ve Elektriksel Özellikleri.....	16
2.5. Optik Geçirgenlik.....	30
2.6. Optik Soğurma.....	31
2.7. Karanlık iletkenlik.....	32
2.8. Fotoiletkenlik.....	34
2.9. CPM (sabit fotoakım yöntemi).....	37
2.10. Çift Monokromatik Demet Fotoiletkenlik Ölçümü İle Yakın Kırmızıaltı Soğurma Değerinin Hesaplanması.....	38
2.11. Fotoiletkenlik Tepki Süresi.....	39
2.12. Kırmızıaltı Spektroskopisi (FTIR).....	43
3. DENEYSEL YÖNTEMLER VE TEZ SÜRESİNDE KURULAN ÖLÇÜM DÜZENEKLERİ.....	47
3.1. PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) Sistemi.....	47
3.1.1. PECVD sistemi sıcaklık kontrolcüsünün tasarımı ve gerçekleştirilmesi.....	49
3.1.1.1. 8-bit 0-5 V paralel port kontrollü A/D çevirici.....	50
3.1.1.2. 8-bit 0-5 V paralel port kontrolü dijitalden analoga (D/A) çevirici.....	51
3.1.1.3. Termoçift gerilim yükselteci.....	52
3.1.1.4. Soğuk eklem dengeleyicisi.....	54
3.1.1.5. Isıtıcı güç anahtarlama devresi.....	55
3.1.2. 13,56 MHz RF jeneratörü tasarımı, yapımı ve test sonuçları.....	58
3.1.2.1. dc besleme ünitesi.....	58
3.1.2.2. Osilatör.....	60
3.1.2.3. Tampon RF (Buffer) yükselteci.....	61
3.1.2.4. RF güç yükselteci.....	62
3.1.3. RF Jeneratörünün Test düzeneği güç ölçümü ve kalibrasyonu.....	64
3.1.4. RF empedans uyuşturucusunun tasarımı.....	71
3.2. Optik Yansıma ve Geçirgenlik Ölçüm Düzeneği.....	73
3.2.1. Bilgisayar kontrollü detektör çoklayıcı devrenin tasarımı ve uygulaması.....	75
3.3. Bilgisayar Kontrollü Karanlık İletkenlik Ölçüm Düzeneği.....	78
3.3.1. dc yüksek gerilim kaynağının tasarımı ve test aşamaları.....	78
3.4. Bilgisayar Kontrollü Fotoiletkenlik Tepki Süresi Ölçüm Düzeneği.....	82
3.4.1. Keskin geçişli (high rise and fall time) kare dalgaların üretilmesi.....	84
3.4.2. Hızlı anahtarlama süresine sahip LED akım kaynağının tasarımı.....	91
3.4.3. İşlemsel yükselteçli akımdan gerilime dönüştürücü.....	92

3.4.4. Tepki süresi düzeneğinin test edilmesi	95
3.5. Sabit Fotoakım ölçüm düzeneği	98
3.6. Işıl Kusur Yaratma ve Tavlama Kinetiği Ölçüm Düzeneği	99
3.6.1. Bilgisayar kontrollü monokromatör lamba güç kaynağı	103
3.6.1.1. 12 bit D/A.....	105
3.6.1.2. Güç elektronığı ve test süreci.....	106
4. DENEYSEL SONUÇLAR	112
4.1. Set-1 Örnekleri	114
4.1.1. Optik geçirgenlik	114
4.1.2. CPM sonuçları	118
4.2. Set-2 Örnekleri	121
4.2.1. Optik geçirgenlik	121
4.2.2. Fourier dönüşümü kırmızıaltı (KA) spektrumları	126
4.2.3. CPM sonuçları	130
4.2.4. Karanlık iletkenlik ölçümleri	133
4.2.5. Fotoiletkenlik tepki (response) süresinin ölçülmesi ve elektronların sürüklenme mobilitesinin hesaplanması	135
4.2.5.1. Set-2 örnek-7 fotoiletkenlik tepki süresi ölçüm sonuçları	136
4.2.5.2. Set-2 örnek-3 fotoiletkenlik tepki süresi ölçüm sonuçları	141
4.2.6. Oda sıcaklığında (293 K) sabit foton akısında fotoiletkenlik ölçümleri	145
4.2.7. Sıcaklığın fonksiyonu olarak foton akısına bağlı fotoiletkenlik ölçümleri	146
4.3. Standart Örnek Setinde Altaş Sıcaklık Optimizasyonu	149
4.3.1. Optik geçirgenlik	150
4.3.2. Fourier dönüşümü kırmızıaltı (KA) spektrumları	153
4.3.3. CPM sonuçları	155
4.3.4. Fotoiletkenlik tepki süresinin ölçülmesi ve elektronların sürüklenme mobilitesinin hesaplanması	158
4.3.5. Sıcaklığın fonksiyonu olarak foton akısına bağlı fotoiletkenlik ölçümleri	162
4.4. Set-3 Örnekleri	164
4.4.1. Optik geçirgenlik	164
4.4.2. Fourier dönüşümü kırmızıaltı (KA) spektrumu ölçümleri	169
4.4.3. CPM sonuçları	174
4.4.4. Karanlık iletkenlik ölçümleri	177
4.5. Set-4 Örnekleri	178
4.5.1. Optik geçirgenlik	178
4.5.2. Fourier dönüşümü kırmızıaltı (KA) spektrumları	183
4.5.3. CPM sonuçları	187
4.5.4. Karanlık iletkenlik ölçümleri	190
4.6. Set-5 Örnekleri	192
4.6.1. Optik geçirgenlik	192
4.6.2. Fourier dönüşümü kırmızıaltı (KA) spektrumları	196
4.6.3. CPM sonuçları	201
4.6.4. Karanlık iletkenlik ölçümleri	203
4.6.5. Fotoiletkenlik tepki süresinin ölçülmesi ve elektronların sürüklenme mobilitesinin hesaplanması	205
4.6.6. Sıcaklığın fonksiyonu olarak foton akısına bağlı fotoiletkenlik ölçümleri	209
4.7. Set-6 Örnekleri	211
4.7.1. Optik geçirgenlik	212
4.7.2. CPM sonuçları	215
4.7.3. Karanlık iletkenlik ölçümleri	217

4.8. Helyum ile seyreltilerek hazırlanan a-Si:H ince filmlerde Staebler-Wronski etkisinin 293 K'de incelenmesi	220
4.8.1. Set-5 örnek-5.....	225
4.8.1.1. Işıl kusur kinetiğinin incelenmesi	225
4.8.1.2. Tavlamanın ışıl kusur kinetiğine etkisi	228
4.8.2. Set-2 örnek-3.....	231
4.8.2.1. Işıl kusur kinetiğinin incelenmesi	231
4.8.2.2. Tavlamanın ışıl kusur kinetiğine etkisi	233
4.8.3. Set-3 örnek-2.....	235
4.8.3.1. Işıl kusur kinetiğinin incelenmesi	235
4.8.3.2. Tavlamanın ışıl kusur kinetiğine etkisi	237
4.8.4. Set-3 örnek-5.....	238
4.8.4.1. Işıl kusur kinetiğinin incelenmesi	238
4.8.4.2. Tavlamanın ışıl kusur kinetiğine etkisi	240
4.8.5. Set-5 örnek-3.....	241
4.8.5.1. Işıl kusur kinetiğinin incelenmesi	241
4.8.5.2. Tavlamanın ışıl kusur kinetiğine etkisi	242
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	247
KAYNAKLAR.....	265

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. pin eklem yapısında düzenlenen a-Si:H'dan üretilen güneş pilinin kontak geometrisi.....	2
Şekil 1.2. Heteroyapıdaki a-Si:H/ZnO:Al kontağı ile elde edilen ışık demeti konumuna duyarlı sensör.	2
Şekil 1.3. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumdan üretilen çeşitli elektronik aygıtların dünya teknoloji marketinde sunulmuş hali.	3
Şekil 1.4. Farklı fotovoltaik malzemelerin dünya teknoloji marketinde kapladığı oranlar.	4
Şekil 2.1.a) Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun ve b) kristal silisyum örgünün karşılaştırılması.	7
Şekil 2.2. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun (a-Si:H) bant yapısı.	8
Şekil 2.3. Kapasitif elektrotlu PECVD sisteminin vakum odacığı.	10
Şekil 2.4. a-Si:H ince filmin oluşum süreci.	15
Şekil 2.5. Helyum gazı ile seyreltilerek hazırlanan a-Si:H örneklerin film büyüme hızlarının toplam gaz basıncına bağlı değişimi.	17
Şekil 2.6. HSRs adı verilen parçacık türlerinin etkin olduğu plazma reaksiyonu ...	19
Şekil 2.7. Standart a-Si:H örnek ile helyum ile seyreltilerek hazırlanmış iki örneğin ışıl kusur yaratma sürecinde kaydedilmiş normalize fotoiletkenlik değerlerinin zamana bağlı değişimi.	21
Şekil 2.8. Hidrojen ve helyum ile seyreltme yöntemi ile hazırlanan örneklerin, film biriktirme hızının silan akış oranına bağlı değişimi.	22
Şekil 2.9. Toz formasyonun makroskopik boyuta ulaşma süreci.	23
Şekil 2.10. Hidrojen ile seyreltilerek hazırlanan örneklerin film büyüme hızının, toplam reaktör basıncına bağlı değişimi.	24
Şekil 2.11. $\mu\text{c-Si:H}$ 'de farklı mikro yapı özelliklerinin şematik gösterimi.	26
Şekil 2.12. HWCVD yöntemi le hazırlanan $\mu\text{c-Si:H}$ iki örneğin kırmızıaltı soğurma spektrumları.	27
Şekil 2.13. $\mu\text{c-Si:H}$ 'nin kesit morfolojisi ve TEM görüntüsü.	28
Şekil 2.14. HWCVD yöntemi ile hazırlanan örneklerin tavlama ve bekletme adımları sonrası ölçülen karanlıkiletkenliklerinin sıcaklığa bağlı değişimleri.	29
Şekil 2.15. a) $h\nu = E_g$, b) $h\nu > E_g$, c) $h\nu < E_g$ durumları için optik soğurma.	31
Şekil 2.16. Isıl elektronik geçişlerin şematik gösterimi.	33
Şekil 2.17. Farklı karakteristik sıcaklık değerleri (T_0) için çizilmiş Rose faktörü değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri.	36
Şekil 2.18. Çoklu tuzaklamalı iletim (Multiple trapping transport) modelinin şematik gösterimi.	39
Şekil 2.19. SiH_2 , $(\text{SiH}_2)_n$ ve SiH_3 grupları için Si-H bağı titreşim modlarının temsili.	45
Şekil 3.1. PECVD sisteminin blok diyagramı.	48
Şekil 3.2. PECVD sıcaklık kontrolcüsü blok diyagramı.	49
Şekil 3.3. 8-bit 0-5 V paralel port kontrollü A/D dönüştürücü devre şeması.	51
Şekil 3.4. 8-bit 0-5 V paralel port kontrollü D/A dönüştürücü devre şeması.	52
Şekil 3.5. Termoçift gerilim yükselteç devresi.	53
Şekil 3.6. Termoçift soğuk eklem dengeleyici devresi.	55
Şekil 3.7. PECVD sisteminde kullanılan ısıtıcı anahtarlama devresi.	56
Şekil 3.8. Bilgisayar kontrollü sıcaklık kontrolcüsünde 100 °C'lik oturma sıcaklığında zamana bağlı olarak kaydedilen sıcaklık değişimleri.	57

Şekil 3.9. 13,56 MHz'lik RF jeneratörünün blok diyagramı.	59
Şekil 3.10. 13,56 MHz'lik RF jeneratöründe kullanılan dc güç kaynağının açık devre şeması.	60
Şekil 3.11. 13,56 MHz'lik RF jeneratöründe kullanılan dijital osilatör devresinin açık devre şeması.	61
Şekil 3.12. 13,56 MHz'lik RF jeneratöründe kullanılan tampon RF (Buffer) yükseltici devresinin açık devre şeması.	61
Şekil 3.13. 13,56 MHz'lik RF güç yükseltici.	63
Şekil 3.14. 13,56 MHz'lik RF güç yükseltici.	64
Şekil 3.15. RF jeneratörünün testi sırasında alınan görüntüler.	64
Şekil 3.16. Tamamlanan RF jeneratörünün test ve güç kalibrasyon test düzeneği.	65
Şekil 3.17. RF jeneratörünün çıkış uçlarında 50 Ω 'luk taklit yükün bağlı olduğu durumda osiloskopta kaydedilmiş dalga formları.	66
Şekil 3.18 a) RF güç ölçeri modeli b) RF güç ölçerinin tamamlanmış hali.	67
Şekil 3.19. RF güç ölçüm düzeneği.	68
Şekil 3.20. RF güç seviye çıkış sayılarına karşılık gelen ölçülmüş rms gerilim değerleri ve bu değerlere karşılık gelen RF gücü değerleri.	69
Şekil 3.21. RF güç ölçer kutusu ile kaydedilen çıkış gerilimi değerlerine karşılık gelen rms RF çıkış gücü değerleri.	70
Şekil 3.22. Etkin RF çıkış gücü değerlerine karşılık gelen yansıyan RF sinyali gerilim değerleri.	70
Şekil 3.23. PEVCD sisteminde kullanılmakta olan π filtreli empedans uyuşum ünitesinin tamamlanmış hali.	72
Şekil 3.24. PEVCD sisteminde hazırlanan beş a-Si:H ince filmin yakından çekilmiş resimleri.	73
Şekil 3.25. Optik geçirgenlik ve yansıma ölçümlerinde kullanılan deney düzeneğinin blok diyagramı.	74
Şekil 3.26. Optik geçirgenlik ve yansıma ölçümlerinde kullanılan detektör çoklayıcı devrenin açık devre şeması.	75
Şekil 3.27. Kuvartz halojen lambanın bilgisayar kontrollü detektör çoklayıcı devre yardımıyla ölçülmüş spektrumu.	76
Şekil 3.28. Bilgisayar kontrollü detektör çoklayıcı devre yardımıyla ölçülmüş a-Si:H ince filmin optik yansıma ve geçirgenlik spektrumu.	77
Şekil 3.29. Karanlık iletkenlik ölçüm düzeneği.	78
Şekil 3.30. Tasarımı yapılan ayarlı dc yüksek gerilim kaynağının açık devre şeması.	79
Şekil 3.31. Sıradan bir gerilim kaynağının iç direncinin hesaplanmasında kullanılan teorik eşdeğer devre modeli.	80
Şekil 3.32. Yüksek gerilim kaynağının oda sıcaklığında 100 V çıkış değerine ayarlanmış durumdaki zamansal değişimi.	81
Şekil 3.33. a-Si:H örneklerin elektriksel ve optiksel özelliklerinin ölçülmesinde kullanılan güç kaynağının görüntüsü.	81
Şekil 3.34. Bilgisayar kontrollü fotoiletkenlik tepki süresi ölçüm düzeneği.	82
Şekil 3.35. Fotoiletkenlik tepki zamanı ölçümünde basit bir düzenek.	83
Şekil 3.36. Bilgisayar kontrollü hale getirilmiş fotoiletkenlik tepki zamanı ölçüm düzeneği.	84
Şekil 3.37. Yüksek kararlılıkta keskin yükseliş ve iniş süresi sergileyen kare dalga osilatör devresi.	85
Şekil 3.38. Duty-cycle değiştirme özelliğine sahip kare dalga osilatörü.	87

Şekil 3.39. Dijital bilgi ile duty-cycle değiştirme özelliğine sahip kare dalga osilatörü.....	88
Şekil 3.40. Programlanabilen duty cycle kare dalga jeneratörünün dijital osiloskopta kaydedilen, kare dalga yükseliş ve iniş bölgeleri.	90
Şekil 3.41. Bilgisayar kontrollü duty cycle programlanabilen kare dalga jeneratörü ve LED akım sürücünün toplu devre gösterimi.	92
Şekil 3.42. Kazanç seviyesi bilgisayarla kontrol edilebilen işlemsel yükselteçli akımdan gerilime dönüştürücü yükselteç devresinin açık devre şeması.	93
Şekil 3.43. Farklı kazanç seviyesi değerlerinde osiloskopta kaydedilen eğriler.	94
Şekil 3.44. Fotoiletkenlik tepki süresi ölçüm düzeneğinin deney anında alınmış görüntüsü.	94
Şekil 3.45. BPW-34 pin foto diyodun osiloskopta gözlenen kısa devre akımı tepki süresinin değişimi.....	96
Şekil 3.46. BPW34 pin foto diyodun osiloskopta gözlemlenen kısa devre akımı tepki süresinin zamana göre bir kez türevinin alınmasıyla elde edilmiş eğri.	97
Şekil 3.47. CPM ölçü düzeneği.....	99
Şekil 3.48. Işıl kusur yaratma ve tavlama düzeneği.....	100
Şekil 3.49. Kırmızı LED guruplarının LED akımına karşı fotodiyot kısa devre akım değişimi.	101
Şekil 3.50. Işıl kusur yaratma düzeneğinde kullanılan LED gurupların elektrolüminesans değişimleri.	102
Şekil 3.51. Işıl kusur yaratma süreci sırasında kreostat bölgesinden bir fotoğraf.	103
Şekil 3.52. Geliştirilen güç kaynağının blok diyagramı.	104
Şekil 3.53. Geliştirilen güç kaynağının 12 bitlik D/A kesiminin açık devre diyagramı..	105
Şekil 3.54. Monokromatör lamba güç kaynağının güç elektroniği kısmı.	107
Şekil 3.55. Fanları açıp kapatan sıcaklık kontrol devresi.	108
Şekil 3.56. Tasarlanan monokromatör lamba güç kaynağını test etmek amacıyla kullanılan deney düzeneği.	108
Şekil 3.57. Bilgisayar kontrollü ve sıradan bir güç kaynağı ile sürülen monokromatör lambasının fotodiyotta oluşturduğu kısa devre akımının zamana göre değişimi.	109
Şekil 3.58. Fotodiyodun kısa devre akımının zamana karşı değişimi.	110
Şekil 3.59. Tasarımı ve uygulaması tamamlanmış bilgisayar kontrollü monokromatör lamba güç kaynağı.	111
Şekil 4.1. Set-1 örneklerinin optik geçirgenlik spektrumunun seyreltme oranına bağlı değişimi.	114
Şekil 4.2. Set-1 örneklerinin Tauc çizimleri.....	115
Şekil 4.3. Tauc yaklaşımından elde edilen bant aralığı enerji değerlerinin seyreltme oranına bağlı değişimi.	115
Şekil 4.4. Film büyüme hızının helyum seyreltme oranı ile değişimi.....	116
Şekil 4.5. Filmlerin kırma indisi değerlerinin helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.	118
Şekil 4.6. Farklı miktarda helyum içeren a-Si:H örneklerin soğurma spektrumları.	119
Şekil 4.7. Set-1 örneklerinin kusur yoğunluğunun helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.	120
Şekil 4.8. Set-1 örneklerinin Urbach kenarının helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.	121

Şekil 4.9. Set-2 örneklerinin optik geçirgenlik spektrumunun seyreltme oranına bağlı değişimi.	122
Şekil 4.10. Set-2 örneklerinin Tauc çizimleri.....	123
Şekil 4.11. Tauc yaklaşımından elde edilen bant aralığı enerji değerlerinin seyreltme oranına bağlı değişimi.....	123
Şekil 4.12. Set-2 örneklerinin film büyüme hızının helyum seyreltme oranı ile değişimi.	124
Şekil 4.13. Set-2 örneklerinin film kırma indisi değerlerinin helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.	125
Şekil 4.14. Set-2 örneklerinin kırmızıaltı soğurma spektrumları.....	127
Şekil 4.15. Set-2 örneklerinin, 630 cm^{-1} bandındaki titreşim modu kullanılarak hesaplanan bağlı hidrojen oranları.	128
Şekil 4.16. Set-2 örneklerinin kırmızıaltı soğurma spektrumları.....	129
Şekil 4.17. Set-2 örneklerinin, 2000 cm^{-1} bandındaki titreşim modu kullanılarak hesaplanan bağlı hidrojen oranları.	130
Şekil 4.18. Set-2 örneklerinin soğurma spektrumları.	131
Şekil 4.19. Kusur yoğunluğunun helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.	132
Şekil 4.20. Urbach kenarının, helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.	133
Şekil 4.21. Set-2 örneklerinin karanlık iletkenlik ölçüm sonuçları.	134
Şekil 4.22. Aktivasyon enerjisinin, helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.	134
Şekil 4.23. Fotoiletkenlik sönüm süresi ölçümlerinde kullanılan mavi ve kırmızı LED'lerin elektroluminesans spektrumları.	136
Şekil 4.24. Dijital osiloskop yardımıyla ölçülen fotoiletkenlik tepki süresi verilerinin .. birkaç sıcaklık değeri için gösterimi.	137
Şekil 4.25. Fotoiletkenlik sönüm zamanı verilerinin zamana göre nümerik olarak alınmış birinci dereceden türev değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri.	138
Şekil 4.26. Kararlı durum fotoiletkenliğinin $1/T$ ile değişimi.	139
Şekil 4.27. Fotoiletkenlik tepki süresinin $1/T$ ile olan değişimi.	139
Şekil 4.28. Set-2 örnek-7'nin elektronların sürüklenme mobilitesinin $1/T$ ile değişimi.....	140
Şekil 4.29. Dijital osiloskop yardımıyla ölçülen fotoiletkenlik tepki süresi verilerinin .. birkaç sıcaklık değeri için gösterimi.	142
Şekil 4.30. Fotoiletkenlik sönüm zamanı verilerinin zamana göre nümerik olarak alınmış birinci dereceden türev değerlerinin zamana bağlı değişimleri.	142
Şekil 4.31. Kararlı durum fotoiletkenliğinin $1/T$ ile değişimi.....	143
Şekil 4.32. Fotoiletkenlik tepki süresinin $1/T$ ile olan değişimi.	144
Şekil 4.33. Elektronlarının sürüklenme mobilitesinin $1/T$ ile değişimi.	144
Şekil 4.34. Set-2 örneklerinin oda sıcaklığındaki $\eta\mu\tau$ değerlerinin helyum seyreltme oranına bağlı değişimleri.	145
Şekil 4.35. Farklı sıcaklık değerlerinde kaydedilen foton akısına bağlı fotoiletkenlik değerleri.	147
Şekil 4.36. Foton aksına bağımlı fotoakım değerleri kullanılarak hesaplanan Rose.. faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişimi.	148
Şekil 4.37. Standart set a-Si:H örneklerinin optik geçirgenlik spektrumu.....	150
Şekil 4.38. Standart set a-Si:H örneklerinin Tauc bant aralığının alttaş sıcaklığına bağlı değişimi.	151
Şekil 4.39. Film kalınlıklarının alttaş sıcaklığına bağlı değişimi.	151
Şekil 4.40. Optik geçirgenlik spektrumdan faydalanılarak bulunan kırmızıaltı film kırma indisi değerlerinin alttaş sıcaklığına bağlı değişimi.	152

Şekil 4.41. Standart set a-Si:H örneklerinden 300 °C alttaş sıcaklığında hazırlanan örneğin kırmızıaltı soğurma spektrumu.	153
Şekil 4.42. Standart set a-Si:H örneklerinden 300 °C alttaş sıcaklığında hazırlanan örneğin kırmızıaltı soğurma spektrumu.	154
Şekil 4.43. Standart set a-Si:H örneklerinin CPM spektrumları.	156
Şekil 4.44. Standart set a-Si:H örneklerinin alttaş sıcaklığına bağlı olarak sergiledikleri kusur yoğunluğu değerleri.	157
Şekil 4.45. Standart set a-Si:H örneklerinin alttaş sıcaklığına bağlı olarak sergiledikleri Urbach enerji değerleri.	158
Şekil 4.46. Örnek-7'nin (T=300 °C alttaş sıcaklığında hazırlanan) 6 farklı sıcaklık.... değeri için çizilmiş fotoiletkenlik tepki süresi değişimleri.	159
Şekil 4.47. Fotoiletkenlik tepki süresi verilerinin zamana göre nümerik olarak alınan birinci dereceden türev değerlerinin, zamana bağlı değişimleri.	159
Şekil 4.48. Kararlı durum fotoiletkenliğinin 1/T ile değişimi.	160
Şekil 4.49. Fotoiletkenlik tepki süresinin 1/T ile olan değişimi.	161
Şekil 4.50. Örnek-7'nin sürüklenme mobilitesinin 1/T ile değişimi.	161
Şekil 4.51. Farklı sıcaklık değerlerinde kaydedilmiş foton akısına bağımlı iletkenlik . değerleri.	163
Şekil 4.52. Foton akısına bağlı fotoakım değerleri kullanarak hesaplanan Rose. Faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişimi.	164
Şekil 4.53. Set-3 örneklerinin optik geçirgenlik spektrumunun toplam gaz basıncına bağlı değişimi.	166
Şekil 4.54. Set-3 örneklerinin Tauc çizimleri.	167
Şekil 4.55. Set-3 örneklerinin Tauc optik aralıklarını toplam gaz basıncına bağlı değişimi.	168
Şekil 4.56. Set-3 örneklerinin büyüme hızının toplam gaz basıncına bağlı değişimi.	168
Şekil 4.57. Set-3 örneklerinin kırma indisi değerlerinin değişimi.	169
Şekil 4.58. Set-3 örneklerinin kırmızıaltı soğurma spektrumları.	170
Şekil 4.59. Set-3 örneklerinin, 630 cm ⁻¹ bandındaki titreşim modu kullanılarak hesaplanan bağlı hidrojen oranları.	171
Şekil 4.60. Set-3 örneklerinin kırmızıaltı soğurma spektrumları.	172
Şekil 4.61. Set-3 örneklerinin, 2000 cm ⁻¹ bandındaki titreşim modu kullanılarak hesaplanan bağlı hidrojen oranları.	173
Şekil 4.62. Set-3 örneklerinin CPM spektrumları.	175
Şekil 4.63. Set-3 örneklerinin kusur yoğunluğu değerlerinin helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.	175
Şekil 4.64. Set-3 örneklerinin Urbach enerjisi değerlerinin helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.	176
Şekil 4.65. Set-3 örneklerinin karanlık iletkenliklerinin değişimleri.	177
Şekil 4.66. Karanlık aktivasyon enerjisi değerlerinin, toplam gaz basıncına bağlı değişimi.	178
Şekil 4.67. Set-5 örneklerinin RF gücüne bağlı olarak optik geçirgenliklerinin değişimi.	179
Şekil 4.68. Set-4 örneklerinin Tauc çizimleri.	180
Şekil 4.69. Set-4 örneklerinin Tauc optik bant aralıklarının RF gücüne bağlı değişimi.	181
Şekil 4.70. Film büyütme hızının sisteme sürülen RF gücüne bağlı değişimi.	182
Şekil 4.71. Set-4 örneklerinin kırmızıaltı kırma indisi değerlerinin değişimi.	183
Şekil 4.72. Set-4 örneklerinin kırmızıaltı soğurma spektrumları (620-700 cm ⁻¹). .	184

Şekil 4.73. Set-4 örneklerinin bağlı hidrojen oranları (630 cm^{-1}).....	185
Şekil 4.74. Set-4 örneklerinin kırmızıaltı soğurma spektrumları ($1920\text{-}2130 \text{ cm}^{-1}$).186	
Şekil 4.75. Set-4 örneklerinin bağlı hidrojen oranları (2000 cm^{-1}).....	187
Şekil 4.76. Set-4 örneklerinin CPM spektrumları.	188
Şekil 4.77. Set-4 örneklerinin kusur yoğunluklarının RF gücüne bağlı değişimi. .	189
Şekil 4.78. Set-4 örneklerinin Urbach enerjilerinin RF gücüne bağlı değişimi.....	190
Şekil 4.79. Set-4 örneklerinin karanlık iletkenliklerinin RF gücüne bağlı değişimi.191	
Şekil 4.80. Set-4 örneklerinin aktivasyon enerjilerinin RF gücüne bağlı değişimleri... ..	191
Şekil 4.81. Set-5 örneklerinin optik geçirgenlik spektrumları.	193
Şekil 4.82. Set-5 örneklerinin Tauc optik aralıklarının değişimleri.	194
Şekil 4.83. Set-5 örneklerinin Tauc bant aralıklarının helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.	194
Şekil 4.84. Set-5 örneklerinin büyüme hızlarının helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.	195
Şekil 4.85. Set-5 örneklerinin kırmızıaltı kırma indisi değerlerinin değişimi.	196
Şekil 4.86. Set-5 örneklerinin kırmızıaltı soğurma spektrumları.....	197
Şekil 4.87. Set-5 örneklerinin bağlı hidrojen oranları (630 cm^{-1}).....	198
Şekil 4.88. Set-5 örneklerinin kırmızıaltı soğurma spektrumları(1900- 2200cm^{-1}).....	199
Şekil 4.90. Farklı helyum seyreltme oranlarında elde edilen örneklerin CPM spektrumları.....	201
Şekil 4.91. Set-5 örneklerinin kusur yoğunluğunun helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.	202
Şekil 4.92. Set-5 örneklerinin Urbach enerjisinin helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.	202
Şekil 4.93. Set-5 örneklerinin sıcaklığa bağlı karanlık akım ölçüm sonuçları.....	204
Şekil 4.94. Set-5 örneklerinin karanlık akım aktivasyon enerjilerinin değişimi.	205
Şekil 4.95. Set-5 örnek-5'in fotoiletkenlik tepki süresinin birkaç sıcaklık değeri için gösterimi.....	206
Şekil 4.96. Set-5 örnek-5'in fotoiletkenlik tepki süresi verilerinin zamana göre nümerik olarak alınmış birinci dereceden türev değerlerinin zamana bağlı değişimleri.	207
Şekil 4.97. Kararlı durum fotoiletkenliğinin $1/T$ ile değişimi.....	208
Şekil 4.98. Fotoiletkenlik tepki süresinin $1/T$ ile olan değişimi.	208
Şekil 4.99. Set-5 örnek-5'in (%99)'in sürüklenme mobilitesinin sıcaklıkla ($1/T$) değişimi.	209
Şekil 4.100. Set-5 örnek-5'in farklı sıcaklıklarda foton akısına karşı fotoakımdaki değişimleri.	210
Şekil 4.101. Set-5 örnek-5'in Rose faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	211
Şekil 4.102. Set-6 örneklerinin optik geçirgenlik spektrumu.	212
Şekil 4.103. Set-6 örneklerinin Tauc çizimleri.....	213
Şekil 4.104. Set-6 örneklerinin Tauc bant aralıklarının alttaş sıcaklığına bağlı değişimleri.	214
Şekil 4.105. Set-6 örneklerinin büyüme hızlarının alttaş sıcaklığına bağlı değişimleri.....	214
Şekil 4.106. Set-6 örneklerinin kırmızıaltı kırma indisi değerlerinin alttaş sıcaklığına bağlı değişimleri.	215
Şekil 4.107. Set-6 örneklerinin CPM spektrumları.....	216

Şekil 4.108. Set-6 örneklerinin kusur yoğunluklarının ve Urbach enerjilerinin alttaş sıcaklığına bağlı değişimleri.	217
Şekil 4.109. Set-6 örneklerinin karanlık akım değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri.	218
Şekil 4.110. Set-6 örneklerinin karanlık akım aktivasyon enerjilerinin alttaş sıcaklığına bağlı değişimleri.	219
Şekil 4.111. Işıl kusur yaratma adımları.	222
Şekil 4.112. Işıl kusur tavlama kinetiği adımları	222
Şekil 4.113.a) 105mW/cm ² şiddetinde beyaz ışıkla aydınlatılan örneklerin deney sürecince kaydedilen karanlık ve fotoiletkenlik verilerinin zamana bağlı değişimi.	223
Şekil 4.113.b) 105mW/cm ² şiddetinde beyaz ışıkla aydınlatılan örneklerin fotoiletkenlik değerinin zamanla değişimi.	223
Şekil 4.114 a). CPM spekturumunun aydınlanma sürelerine bağlı değişimi.	226
Şekil 4.114.b) Normalize kusur yoğunluklarının aydınlanma süresine bağlı değişimleri.	227
Şekil 4.114.c) Normalize soğurma ve $\tau_{\mu\eta}$ değerlerinin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.	227
Şekil 4.114 .d) Rose Faktörlerin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.	228
Şekil 4.115. a) CPM spekturumlarının tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri....	229
Şekil 4.115.b) Normalize soğurma ve $\tau_{\mu\eta}$ değerlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.	229
Şekil 4.115. c) Rose Faktörlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.	230
Şekil 4.116.a) CPM spekturumunun aydınlanma sürelerine bağlı değişim.....	232
Şekil 4.116.b) Normalize soğurma ve $\tau_{\mu\eta}$ değerlerinin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.	232
Şekil 4.116.c) Rose Faktörlerin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.....	233
Şekil 4.117.a) CPM spekturumlarının tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri....	234
Şekil 4.117.b) Normalize soğurma ve $\tau_{\mu\eta}$ değerlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.	234
Şekil 4.117.c) Rose Faktörlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.	235
Şekil 4.118.a) Normalize soğurma ve $\tau_{\mu\eta}$ değerlerinin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.	236
Şekil 4.118.b) Rose Faktörlerin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.	236
Şekil 4.119.a) Normalize soğurma ve $\tau_{\mu\eta}$ değerlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.	237
Şekil 4.119.b) Rose Faktörlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.	237
Şekil 4.120.a) Normalize soğurma ve $\tau_{\mu\eta}$ değerlerinin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.	239
Şekil 4.120.b) Rose Faktörlerin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.	239
Şekil 4.121.a) Normalize soğurma ve $\tau_{\mu\eta}$ değerlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.	240
Şekil 4.121. b) Rose Faktörlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.	241
Şekil 4.122.a) Normalize soğurma ve $\tau_{\mu\eta}$ değerlerinin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.	241
Şekil 4.122.b) Rose Faktörlerin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.	242
Şekil 4.123.a) Normalize soğurma ve $\tau_{\mu\eta}$ değerlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.	243
Şekil 4.123.b) Rose Faktörlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.	243
Şekil 5.1. Film büyüme hızının toplam gaz basıncına bağlı değişimi.....	249

Şekil 5.2. Set-3 örnek setinin hazırlanma sürecinde CCD kamera ile alınmış plazma görüntüleri.....	250
Şekil 5.3. Set-3 örnek setinin hazırlanma sürecinde CCD kamera ile alınıp dijital filtrelerden geçirilmiş plazma görüntüleri (Adobe Photosohpe).	251
Şekil 5.4. Çizelge 5.1’de verilen örneklerin Tauc çizimleri.....	253
Şekil 5.5. Çizelge 5.1’de verilen örneklerin CPM spektrumları.	254
Şekil 5.6. Çizelge 5.1.’de verilen örneklerin oda sıcaklığındaki foton akısına bağlı fotoiletkenlik değişimleri.	255
Şekil 5.7. Çizelge 5.1.’de verilen örneklerin sıcaklığa bağlı olarak Rose faktörlerinin değişimi.	256
Şekil 5.8. Çizelge 5.1’de verilen örneklerin sıcaklığa karşı sürüklenme mobilitelerinin değişimi.	256
Şekil 5.9 Çizelge 5.1’de verilen örneklerin, helyum seyreltme oranına bağlı olarak Urbach enerjilerinin ve sürüklenme mobilitesi aktivasyon enerjilerinin değişimi.	257
Şekil 5.10. % 95 helyum seyreltme oranında ve 230 °C alttaş sıcaklığında hazırlanan örneklerin film büyüme hızlarının, RF gücüne ve toplam gaz basıncına bağlı değişimi.....	258
Şekil 5.11. %95 helyum seyreltme oranında ve 230 °C alttaş sıcaklığında hazırlanan örneklerin kusur yoğunluklarının , RF gücüne ve toplam gaz basıncına bağlı değişimi.....	259
Şekil 5.12. % 95 helyum seyreltme oranında ve 230 °C alttaş sıcaklığında hazırlanan örneklerin Urbach enerjilerinin , RF gücüne ve toplam gaz basıncına bağlı değişimi.....	260

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Asal gazların yarı kararlı enerji değerleri ve iyonizasyon enerji değerleri.	13
Çizelge 2.2. (111) doğrultusunda kristal silisyum üzerine hazırlanmış hidrojenlendirilmiş mikrokristal silisyumunun karakteristik soğurma çizgileri.	44
Çizelge 3.1. Farklı kontak türlerine sahip themoçiftlerin seebeck parametreleri.	54
Çizelge 3.2. 4 bitlik adres bilgisine göre hangi kanalların aktifleşeceğini belirten çizelge.....	89
Çizelge 3.3. Komütatör dişi değerlerine bağlı olarak Duty-cyle zaman sürelerinin değişimi.....	89
Çizelge 4.1. Optik ve elektriksel ölçümlerle incelenen filmlerin hazırlama koşulları.	112
Çizelge 4.2. Kusur kinetiği incelenen örneklerin, optik geçirgenlik ve CPM ölçümleri sonucunda elde edilen, E_g^T Tauc optik bant aralığı, E_o Urbach parametresi ve N_{do} kusur yoğunlukları değerleri.	220
Çizelge 4.3. Fotoiletkenliğin azalış gösterdiği erken ve son zamanlarda elde edilen sönüm (decay) parametreleri.....	224
Çizelge 5.1. Saf silan gazı ve helyum ile seyreltilerek hazırlanmış örnekleri karşılaştırmak amacıyla seçilen örnekler.....	253
Çizelge 5.2. Seçilen örneklerin karakterizasyonu sonucunda elde edilen bazı film parametreleri.....	253
Çizelge 5.3. 2100 cm^{-1} titreşim bandı belirgin olan örneklerin FTIR spektrumlarından hesaplanan mikroyapı faktörlerinin diğer film parametreleriyle birlikte verilen değerleri.....	262

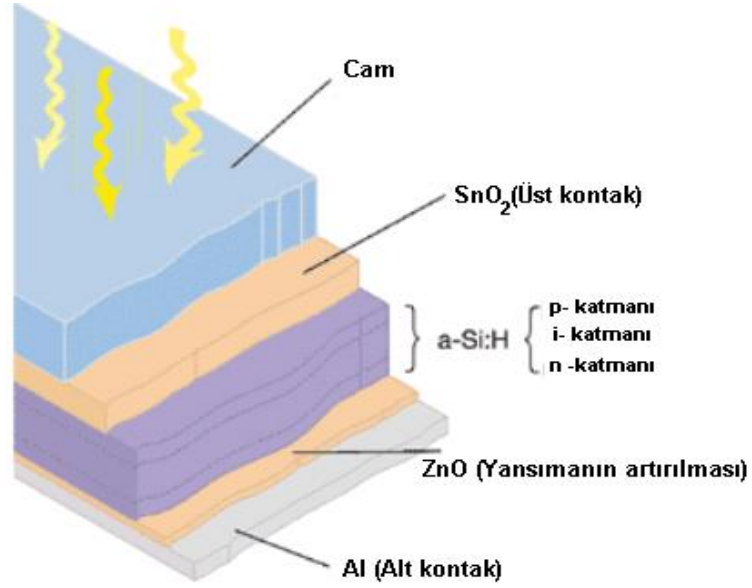
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

d : Kalınlık D : Grain büyüklüğü, damlacık çapı
 F : Foton akısı
 E_a : Aktivasyon enerjisi
 E_c : İletkenlik bandı kenarı
 E_F : Fermi enerji düzeyi
 E_g : Optik bant aralığı
 E_v : Değerlik bandı kenarı
 E_0 : Urbach enerjisi
 f : Ultrasonik titreştiricinin frekansı
 G : Elektron-hol üretim hızı,
 h : Planck sabiti
 k_B : Boltzman sabiti
 K : Kelvin
 l : Kontak uzunluğu
 L : İki kontak arası mesafe, iletkenin boyu
 n : Tamsayı, kırma indisi
 R : Optik yansıma
 s : alttaşın kırma indisi
 T : Optik geçirgenlik
 ρ : Özdirenç
 σ : İletkenlik
 σ_0 : İletkenlik önçarpanı
 σ_p : Fotoiletkenlik
 λ : Dalgaboyu
 α : Soğurma katsayısı
 μ : Mobilite
 η : Kuantum verimliliği
 τ : Taşıyıcı ömür süresi
 τ_n : Elektronların ömür süresi
 τ_p : Hollerin ömür süresi
 n : Elektron konsantrasyonu
 p : Hollerin konsantrasyonu
 T : Optik geçirgenlik
 T_M : Optik geçirgenlik spektrumunda maksimum geçirgenlik
 T_m : Optik geçirgenlik spektrumunda minimum geçirgenlik
a-Si: Amorf silisyum
c-Si: Kristal silisyum
a-Si:H: Hidrojenlendirilmiş silisyum
PECVD: Plasma enhanced chemical vapor deposition
CVD: Chemical vapor deposition
MOCVD: Metal organic chemical vapor deposition

CPM: Constant photocurrent method
RF: Radio frequency
DAC: Digital to analog converter
ADC: Analog to digital convertor
PLD: Pulsed laser deposition
FPD: Flat panel display
LED: Light emitting diode

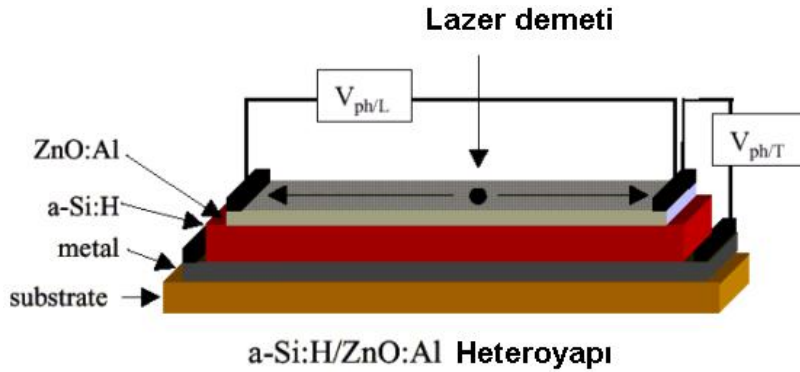
1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasına şiddetle ihtiyaç duyulan dünyamızda, sonsuz enerji kaynağı olan güneşin enerjisinden faydalanmak çok büyük bir önem taşımaktadır. Bu nedenle büyük yüzeylere düşük maliyette ve kısa sürelerde fotovoltaiik malzeme büyütülmesine olanak sağlayan yöntemler ve bu yöntemlerin geliştirilmesine yönelik teknolojik çalışmalar hız kazanmaya başlamıştır. Az miktarda malzeme kullanarak geniş alanlara biriktirilme yapılmasına olanak sağlayarak üretim maliyetinin düşürülmesi, ince film teknolojisini tercih edilir hale getirmiştir. Bundan başka, hacimli (bulk) malzemelerde çoğunlukla kristal silisyum alttaban olarak kullanılırken ince film teknolojisinde cam, paslanmaz çelik veya polimer gibi alttaşlar da kullanılabilir. PECVD (plazma enhanced chemical vapor deposition) yöntemi ile üretilen a-Si:H ince filmlerin üretim maliyetinin düşük olması, hidrojenlendirilmiş amorf silisyuma olan ilginin devam etmesini sağlamaktadır. PECVD sisteminde hidrojenlendirilmiş amorf silisyum üretimde kullanılan temel gaz silan gazıdır. 20 litrelik bir silan gazı tüpünün bugün Türkiye'ye giriş maliyeti yaklaşık 3000 \$ 'dır. Sadece silan gazının tek başına kullanılması ile hazırlanacak olan ince filmler katkısız (undoped) diğer bir deyişle has (intrinsic) yarıiletken özellikleri sergilemektedir. Silan gazı fosfin (PH_3) ya da diboran (B_2H_6) gazı ile belirli oranlarda karıştırılarak n ya da p-türü amorf silisyum hazırlanabilir (Street, 1991). Katkılamayla iletkenlikleri bir kaç meretebe artarak n yada p tipi formuna gelen a-Si:H, ancak bu şekilde aygıt uygulamalarında (pn yada pin yapıda) yer alabilmektedir. Ancak bu alaşımların hepsinde, malzemeye katılan yabancı atomların konsantrasyonları arttıkça kusur yoğunlukları da artar. Bunun sonucunda da serbest taşıyıcıların mobilite ve ömür süresi çarpımları hızla azaldığından, bu malzemelerin uygulama alanları da azalır. Bundan başka, kullanılan katkı gazları üretim maliyetini arttırmakta ve uygun gaz arıtma sistemleri kurulmadığında çevreye zarar verebilmektedirler. Bu yüzden katkısız türde, büyük yüzeylere kısa sürede hazırlanabilecek a-Si:H örneklerin daha etkin olarak değerlendirilebileceği, aygıt teknolojileri araştırılmaya başlanmıştır. Bu amaca uygun a-Si:H için önerilebilecek bir aygıt uygulaması Şekil 1.1'de gösterilen pin yapılı güneş pilidir (Valizadeh, 1998).



Şekil 1.1. pin eklem yapısında düzenlenen a-Si:H'dan üretilen güneş pilinin kontak geometrisi.

Şekilde verilen pin yapısındaki güneş pilinde “i” katmanı olarak gösterilen optik soğurulmanın gerçekleştiği has hidrojenlendirilmiş amorf silisyum tabaka, güneş pilinin kuvantum verimliliğinin, doluluk faktörünün (fill factor) ve güneş pili verimliliğinin değerinin büyümesine neden olur (Valizadeh, 1998). Bu bağlamda üretilen katkısız türdeki a-Si:H malzemenin elektronik özelliklerinin aygıt yapımına uygun hale getirilmesi için yapılacak malzeme optimizasyon çalışmaları büyük önem kazanmaktadır. Amorf silisyum kullanılarak hazırlanabilecek bir başka aygıt yapısı ise a-Si:H/ZnO/Al yapısıdır. Şekil 1.2’de verilen aygıt geometrisi lazer demetinin bulunduğu konuma göre orantılı bir gerilim üreten konum duyarlı sensör olarak çalışmaktadır.



Şekil 1.2. Heteroyapıdaki a-Si:H/ZnO:Al kontağı ile elde edilen ışık demeti konumuna duyarlı sensör.

Özellikle bugünkü CD okuyucu teknolojisinde, optik yöntemle güdümlene prensibine göre çalışan mekatronik sistemlere alternatif olabilecek aygıtların üretiminde kullanılacak ana malzeme yine a-Si:H'dur. Şekil 1.3'te amorf silisyumun alaşımlarından elde edilen teknolojik ürünler sergilenmektedir. Bu şekilde soldan sağa doğru, bükülebilir amorf silisyumdan üretilmiş ince film güneş pilli paneli, oldukça esnek bir alttaş malzeme üzerine hazırlanan güneş pillinin bir montajı üzerine yerleştirilmiş hali ve amorf silisyum ince film transistörlerin kullanıldığı sıvı kristal monitör görülmektedir.

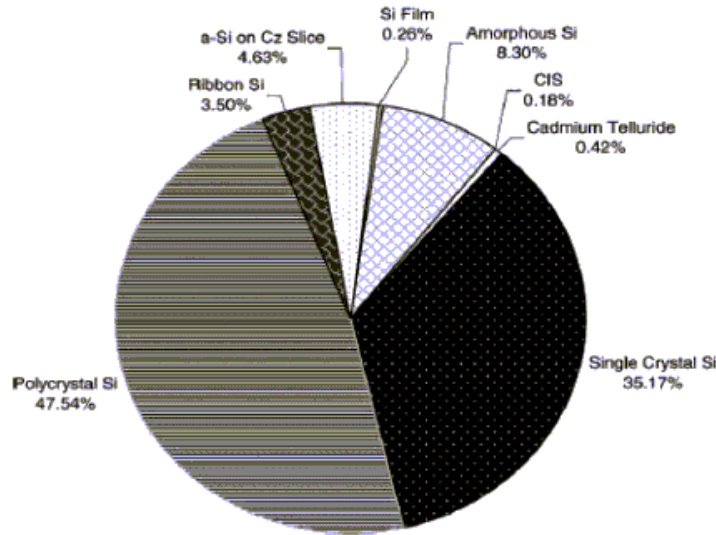


Şekil 1.3. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumdan üretilen çeşitli elektronik aygıtların dünya teknoloji marketinde sunulmuş hali.

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun, özellikle heteroeklem aygıt üretiminde kullanıma uygun hale getirilebilmesi için, engel potansiyeli dışında süresiz elektrostatik potansiyel engeli (spike) oluşumunun önlenmesi bakımından, kontak yapılacak malzemenin optik bant aralığının ve iş fonksiyonunun uygun seçilmiş olması gerekmektedir. Bu nokta, a-Si:H'un hazırlanma koşullarına bağlı olarak optik bant aralığının değiştirilebilmesi talebinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Yapılan bir çalışmada, çift katmanlı güneş pilinde yüksek verim elde edebilmesi için 1,6 eV ile 1,75 eV aralığında katkısız tür a-Si:H örnekler kullanılması gerektiği rapor edilmiştir (Banerjee et. al., 2002). Sadece silan gazı kullanılarak hazırlanan a-Si:H'nun optik bant aralığı yapıdaki hidrojen miktarına bağlıdır. Ancak, aygıt yapımına uygun olarak belirtilen yüksek fotoiletkenlik, düşük karalılık iletkenlik ve düşük kusur yoğunluğuna sahip hidrojenlendirilmiş amorf silisyum örneklerin optik bant aralıkları 1,72 eV civarındadır (Street, 1991). Bu çalışmada düşük optik bant aralığına sahip örneklerin silan gazının helyum ile seyreltilerek elde edildiği

vurgulanmaktadır. Helyum ile seyreltilerek hazırlanan örneklerin sadece silan gazı kullanarak hazırlanan örneklerle kıyasla büyüme hızlarının oldukça yüksek olduğuda rapor edilmektedir (1,8 Å/s) (Middya et. al., 1999).

Farklı fotovoltaik malzemelerin dünya teknoloji marketinde kapladığı oranlar belirlenmiştir (Goetzberger et. al., 2003). Elde edilen sonuçların sergilendiği Şekil 1.4. incelendiğinde amorf silisyumun dünya fotovoltaik malzeme marketinde kapladığı oranın % 8,5 olduğu görülmektedir. Azımsanmayacak bir yüzdeye sahip olan amorf silisyumun polykristal silisyum (% 47,54) ile kıyaslandığında düşük bir değer sergilemesinin başlıca iki neden vardır. Bunlardan biri kararlık problemi diğeri ise üretim maliyetidir. Bu yüzden, hem üretim maliyetinin düşürülmesi hem de kararlılık probleminin çözülmesi amacıyla, hidrojenlendirilmiş amorf silisyum üzerine araştırmalar hızla devam etmektedir.



Şekil 1.4. Farklı fotovoltaik malzemelerin dünya teknoloji marketinde kapladığı oranlar (Goetzberger et. al., 2003).

Bu anlamda literatürde önerilen en basit yöntem silan gazının bir asal gaz (helyum) yada hidrojen gazı ile seyreltilmesidir. Silan gazının hidrojen ile seyreltilmesiyle, amorf yapı içindeki kopuk bağlar hidrojen ile doyurularak kopuk bağ oranı azaltılmaktadır. Bu şekilde daha düşük kusur yoğunluğuna sahip, yüksek fotoiletkenlik ve soğurma değerlerine sahip filmler hazırlayabilmek mümkündür. Kopuk bağ yoğunluğu azaltılmış olan örnekler Staebler Wronski etkisine karşı daha kararlı özellikler sergileyebilmektedirler. Silan gazının hidrojen ile

seyreltilmesiyle hazırlanan örneklerde yapı içindeki hidrojen oranına bağlı olarak optik bant aralığını ve filmleri büyüme hızlarını da kontrol edebilmek mümkün olmuştur. Fakat hidrojenle seyreltme yöntemi ile elde edilen filmlerin büyüme hızları, silan gazının helyum gazı ile seyreltilmesiyle hazırlanan filmlerin büyüme hızı değerlerine ulaşamamıştır. Bu bakımdan üretim maliyeti konusunda hidrojen cazibesini yitirebilmektedir. Diğer taraftan heteroeklem aygıt yapımına uygunluk açısından, amorf silisyum malzemelerin optik bant aralıklarının düşük olması (1,6 eV) isteniyordu. Fakat hidrojenle seyreltme tekniği ile optik bant aralığını küçültmek imkansızdı. Bu çıkmazda silan gazının helyum ile seyreltilmesiyle hazırlanan a-Si:H filmler önem kazanmaya başlamıştır. Çok az miktarlardaki silan gazının helyum ile seyreltilmesiyle hazırlanan a-Si:H filmlerin oldukça yüksek büyüme hızına sahip olduğu ve aygıt yapımına uygun elektronik ve optik özellikler sergilediği yapılan çalışmalarla ortaya koyulmuştur. Literatürde helyum gazı ile seyreltilerek hazırlanacak olan a-Si:H örneklerin optik ve elektriksel özelliklerinin temel hazırlama koşulları ile nasıl değiştiğini tam olarak ortaya koyan bir çalışmaya rastlanamamıştır. Bu yüzden, yapılan tez çalışmasında silan gazının helyum ile seyreltilmesiyle hazırlanan a-Si:H ince filmlerin optik ve elektriksel özelliklerin film hazırlama koşullarına bağımlılığı araştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında, ev yapımı bir PECVD sisteminin yarı otomasyon hale getirilmesi amacıyla birçok elektronik ekipman tasarlanmış ve sisteme eklenmiştir. Bu sayede, PECVD sisteminde üretilen filmlerin hazırlama parametreleri daha kontrollü bir hale getirilmiştir. Geliştirilen PECVD sisteminde silan gazının helyum gazı ile seyreltilerek ve RF plazmasında parçalanması ile 6- set örnek üretilerek elde edilen filmlerin alttaşı sıcaklıkları, seyreltme oranı, toplam gaz basıncı, RF gücü gibi optimizasyon parametreleri belirlenerek, düşük kusur yoğunluklu ve yüksek fotoiletkenlik gösteren malzeme eldesine çalışılmıştır. Elde edilen filmler, amorf yarıiletkenler laboratuvarının sahip olduğu deneysel olanaklar çerçevesinde karakterize edilerek elektriksel ve optiksel özellikleri ortaya konulmuştur.

Tez çalışmasında helyumla seyreltilerek hazırlanan katkısız a-Si:H ince filmlerin optik bant aralıkları hazırlama koşullarına bağlı olarak 1,55-1,76 eV arasında değiştirilebilmektedir. Optik bant aralığının film hazırlama koşullarına bağlı olarak, herhangi bir katkılama yada alaşım gazı kullanmaksızın değiştirilebilmesi,

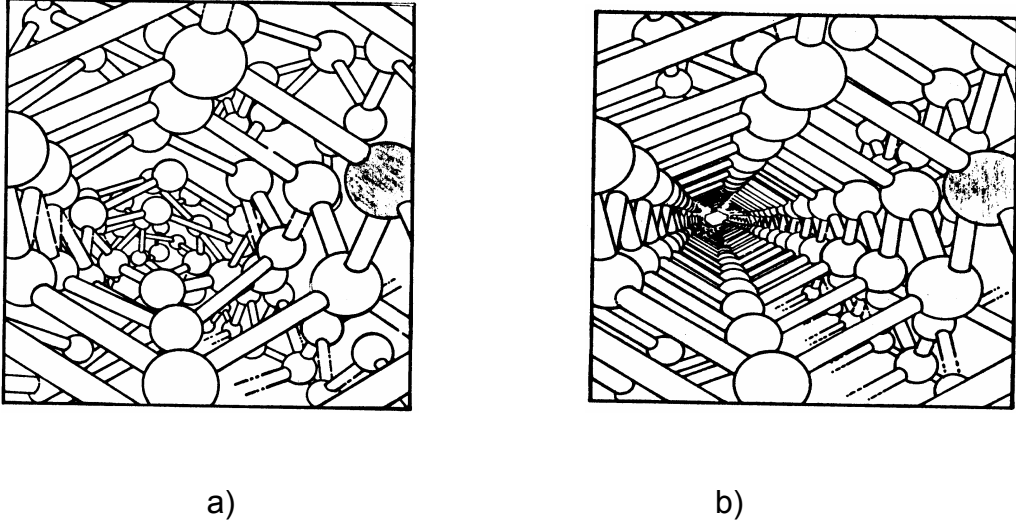
hazırlanan örneklerin heteroeklem aygıt yapımına uygun bir malzeme olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

Optik ve elektriksel özellikleri tanımlanmış 5 örnek üzerinde, yarı kararlı, ısı kusur yaratılma ve tavlama kinetiği ölçümleri yapılmıştır. Yapılan bu ölçümler helyumla seyreltilerek hazırlanan örneklerin Staebler Wronski etkisine karşı standart a-Si:H filmlere oranla daha kararlı olduklarını ve bazı durumlarda yaratılan ısı kusurların tavlama ile azalmadığı (tersinmez süreç) göstermiştir.

2. KURAMSAL BİLGİLER

Bu bölümde hidrojenlendirilmiş amorf silisyum tanıtılacak, a:Si-H filmlerin büyütülme sürecindeki plazma reaksiyonları ve elde edilen filmlerin optik ve elektriksel özelliklerini incelemeye kullanılan deneysel yöntemlerle ilgili kuramsal bilgi verilecektir.

2.1. Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyumun Fiziksel Özellikleri



Şekil 2.1.a) Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun ve b) kristal silisyum örgünün karşılaştırılması.

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumda (a-Si)'da, kristal silisyumda olduğu gibi tetrahedral birimler korunmaktadır. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumda tetrahedral koordinasyona sahip atomlar, atomlar arası mesafe ve bağ açılarında küçük değişimler yaparak bir araya gelmektedirler. Bağ açılarındaki bozulmanın çok fazla olduğu durumda iki komşu atom bir araya gelemmez ve bağ yapamaz. Bu durumda kopuk bağ çifti oluşur ve bu kopuk bağ, etrafında başka bağ bulunmadığından bu bağa izole kopuk bağ denir (Güngör, H.Ü. Doktora Tezi, 2001).

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumda değerlik bandı uzantısı, iletkenlik bandı uzantısından daha geniştir. a-Si:H'nun enerji bant diyagramı Şekil 2.2'de verilmektedir. Bant uzantısı ve kopuk bağ düzeylerine ait dalga fonksiyonları yerleşmiş özellik gösterdiklerinden bu düzeyler üzerinden iletkenlik sadece fonon uyarımlı tünelleme şeklindedir. Bu nedenle, amorf yarı iletkenlerde yasak enerji

2.2. PEVCD Yöntemi İle a-Si:H Filmlerin Hazırlanması

PECVD tekniği ismini, plazma destekli kimyasal buharlaştırma yöntemi ile film biriktirme kelimelerinin İngilizce karşılığının baş harflerinden almaktadır. Kritik bir basınç altında, termal enerjiye veya yeterince yüksek elektromanyetik radyasyona maruz bırakılan bir gaz molekülü, uygulanan enerjinin büyüklüğüne bağlı olarak sahip olduğu elektronları en dış yörüngesinden itibaren elektron kaybetmeye başlar. Elektron kaybeden atomda pozitif yüklerin sayısı, negatif yüklere göre daha fazla olduğundan bu atoma iyonize olmuş atom yada pozitif iyon adı verilmektedir. Plazma fazına geçen bir gaz, atomik yörüngesinde bulunan elektronları kaybetmesinden dolayı belirli frekanslarda ışımlar yapar. Işımların frekansı görünür bölgedeki dalga boyuna karşılık geldiğinde çıplak göz bunu, plazmadan yayımlanan bir parıldama olarak algılar. Bu yüzden plazma bazen “iyonlaşmış gaz” olarak da adlandırılır. Bu durumda, ortamda pozitif iyonlar, negatif yüklü elektronlar, moleküller ve radikal adını verdiğimiz parçacık türleri serbest halde bulunur.

PECVD tekniğinde ac elektrik alan kullanılır. Bunun için genellikle, birbirine paralel olarak yerleştirilmiş iki elektrota yüksek frekanslı ve yüksek genlik değerine sahip RF sinyali uygulanır. Plazma oluşturmak amacıyla RF gücünü kullanmanın birçok avantajları vardır. Bu avantajlar kısaca şöyle özetlenebilir.

1. Gelişmiş güç çiftlenimi elde etmek: RF gerilim sinyali, plazma reaktörü içerisinde elektromagnetik dalga oluşturur. Reaktör içerisinde oluşan elektromagnetik dalgalar, doğru akım (DC) ile oluşturulacak plazmadan daha verimli bir güç çiftlenimi yaratır.

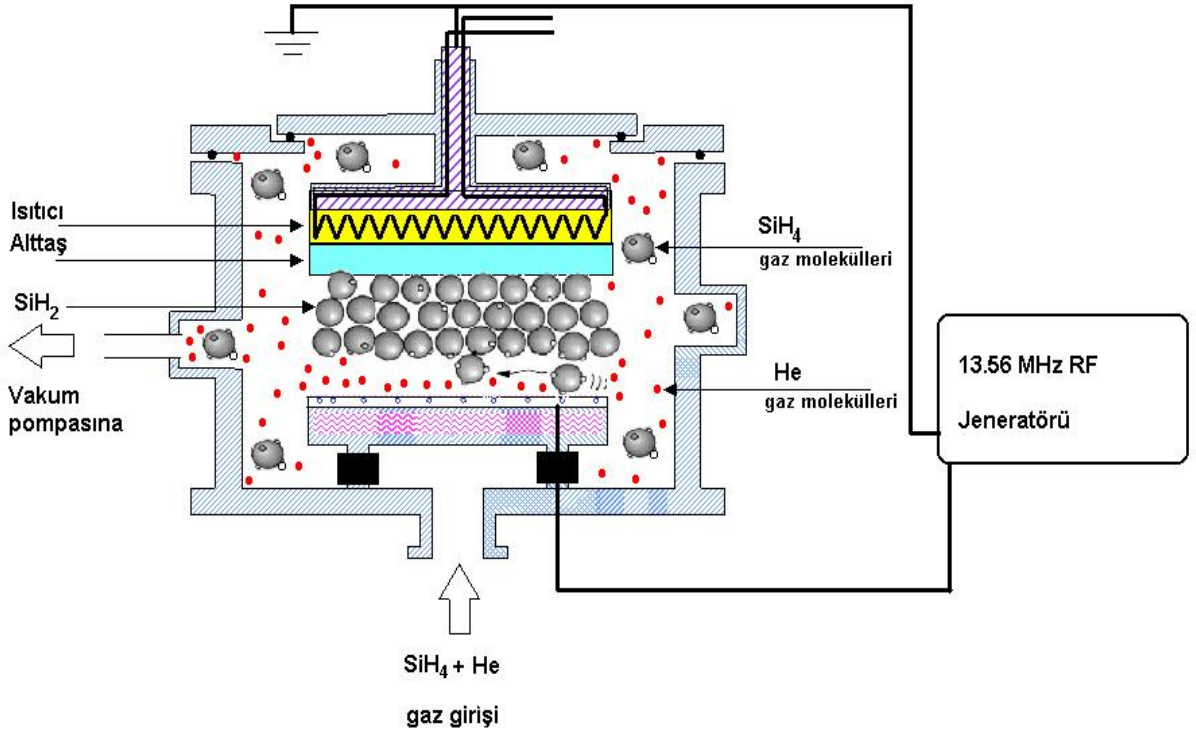
2. Verimli iyonizasyon: Diğer plazma eldesi yöntemleriyle karşılaştırıldığında, RF plazması daha verimli bir iyonizasyon gerçekleştirir. Aynı miktardaki güçle, daha fazla iyon elde etmek mümkündür. Düşük gaz basınçlarında dahi RF gücü ile plazma elde etmek oldukça kolaydır.

3. Azaltılmış iyon bombardımanı : DC plazma yönteminde oluşan iyon bombardımanı, yarıiletken üretim teknolojisinde istenmeyen bir etki olabilir. DC plazma yönteminde iyon bombardımanının oldukça etkin olması sebebiyle, özellikle katmanlı yapılarda alt katmanlar zarar görebilir. Eğer iyon

bombardımanının azaltılması arzu ediliyorsa, RF yöntemiyle elde edilen plazmada oluşacak DC gerilim bu iş için yeterlidir. Bu yüzden, iyon bombardımanı RF plazması ile kısmen azaltılabilir yada tamamen yok edilebilir.

2.3. PECVD Yöntemi İle Hazırlanan a-Si:H İnce Filmlerin Oluşum Süreci

Gaz fazındaki bir maddenin molekülleri, çok geniş bir alanda rahatça hareket edebilme kabiliyetine sahiptir. Çünkü gaz moleküllerinin ortalama serbest yolu oldukça büyüktür. Çözünme olayının gerçekleşmesi için kullanılan enerji, RF enerjisidir. Şekil 2.3'te kapasitif elektrotlu PECVD sisteminin vakum reaktör bölgesinin çizimi verilmektedir.



Şekil 2.3. Kapasitif elektrotlu PECVD sisteminin vakum odacığı.

Şekil 2.3'de verilen çizimde, kritik bir basınçta bulunan kapasitif elektrotlu vakum odacığına, silan ve helyum gazı karışımları sürülmektedir. Elektrotlara uygulanan 13,56 MHz değerindeki yüksek güçlü radyo frekans sinyali, silan gaz moleküllerinin elektronlarla etkileşerek silan gazının kısmen radikallerine ayrışmasına sebep olur. Bu olaya çözünme adı verilir. Radikal adı verilen parçacıklar, yüksek enerjili

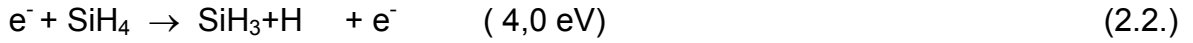
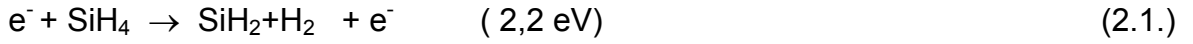
kimyasal parçacıklardır. Kararsız ve elektriksel olarak yüksüz olan bu parçacıklar, daha kararlı hale geçebilmek için diğer parçacık türleri ile etkileşmeye girerler.

RF sinyalinin uygulandığı elektrotlar arasındaki elektronlar ve iyonlar ivmelenirler ve kinetik enerjileri kayda değer bir miktarda artar. Yüksek kinetik enerjiye sahip olan iyon ve çoğunlukla elektronlar, karşılıklarına çıkan diğer atom ve moleküller ile çarpışarak onlardan elektron koparırlar. Bu süreç boyunca vakum odacığı içindeki iyon ve elektron sayısı sürekli olarak artar. Silan gazı ile dolu vakum odacığı içerisinde gerçekleşen bu çarpışmalar süresince silan gazını oluşturan atom türleri belirli frekanslarda ışıma yaparlar. Eğer bu ışımaların dalga boyu insan gözünün algılayabileceği düzeyde ise, plazma odacığının camından yayılan farklı renkte ışıdamalar olarak algılanabilirler. Işımanın rengi radyasyon sonucu kaybedilen enerjinin miktarıyla ilişkilidir. Örneğin ; Azot pembe, Helyum mavi, Sodyum sarı, Boron yeşil, Neon ise kırmızı renkte ışıldar.

Silan gazının plazma fazına geçişinde oldukça karmaşık kimyasal reaksiyonlar ortaya çıkar. Fakat bu reaksiyonlardan sadece birkaçı başat olarak a-Si:H yapının oluşumundan sorumlu temel mekanizmadır. Silan gazının iyonizasyon enerjisi 10-20 eV arasındadır. Yüksek gaz basıncında gaz moleküllerinin ortalama serbest yolu küçülür. Bu durumda iyonizasyonun gerçekleşebilmesi için küçük genlikli bir RF sinyali yeterlidir. Düşük gaz basınçlarında elektronların elektroda ulaşmadan önce herhangi bir molekülle çarpışma olasılığı çok zayıftır. Bu nedenle iyonizasyonun gerçekleşmesi yada plazmanın korunması için yüksek RF gücü değerlerine gereksinim artar. Bu tanımlama plazmanın kritik bir basınç aralığı değerinde gerçekleşeceğini söylemektedir. Tartışılan bu kritik nokta, Paschen eğrisi adıyla tanımlanan grafik üzerinde 13,56 MHz'te uyarılan silan gazı için uygulanan RF gücüne ve gazın sıcaklığına bağlı olarak 0,1-1 Torr arasında değerler alabilmektedirler. Kütleleri elektronlarla karşılaştırıldığında daha büyük olan iyonlar, plazma içindeki elektrik alan sebebiyle ihmal edilebilecek düzeyde ivmelenirler. Bu sebeple plazmanın enerjisi elektronlar tarafından toplanır. Bu farklılaşım elektrotlara AC gerilim uygulamamıza rağmen, plazma içerisinde elektriksel asimetriye neden olarak, elektrotlar arasında kendiliğinden doğru akım indüklenmesine (self dc bias) neden olur. Elektrotlarda oluşan dc potansiyel farkın

değeri 200-400 V değerine kadar ulaşabilir. Bu elektrik alan, büyüyen a-Si:H'nun özelliklerini büyük ölçüde etkiler.

Silan gazının RF sinyali ile uyarılması sonucu gerçekleşmesi en muhtemel reaksiyon denklem (2.1.)'de verilmektedir. Denklem (2.1.)'de verilen reaksiyon amorf silisyumun kuluçka dönemi olarak adlandırılır. Kuluçka döneminde alttaş üzerine yapışmaya çalışan radikaller en yüksek yapışma sabiti değerine sahip olan parçacık türleridir ve iyonizasyon enerjisi en küçük olan reaksiyon sonucunda açığa çıkarlar. Gerçekleşebilecek ikinci en muhtemel reaksiyon da denklem (2.2.)'de verilmektedir. Denklem (2.1.)'deki reaksiyonunun gerçekleşmesiyle, a-Si:H alttaş üzerinde katı formda birikmeye başlar ve denklem (2.2.) aktif reaksiyon haline gelir. Denklem (2.2.)'de verilen reaksiyonun simgesel anlatımı Şekil 2.4' de verilmektedir (Street, 1991).



Denklem (2.2.) reaksiyonun oluşum süreci kısaca şöyle özetlenebilir. Silan gazının SiH₃ ve H'e ayrışması sonucu tek başına kalan hidrojenin mobilitesi oldukça yüksektir. Bu sebeple plazma reaksiyonundan atılımı oldukça kolaydır.

Amorf silisyumun yüzeyinde özgürce hareket edebilme yeteneğine sahip olan SiH₃, yüzey difüzyonu yoluyla yüzeye en yakın bulunduğu ve en zayıf Si-H bağına sahip, silisyum atomuyla hemen bağ kurar. Si-H bağının kurulması sırasında, bir hidrojenini serbest bırakan silisyum, yüzeyden daha uzakta bulunan ve kararlı duruma geçmeye çalışan başka bir SiH₃ molekülü ile bağ kurarak o molekülü SiH₄ durumuna getirir. Oluşan SiH₄ moleküllerinin bir kısmı vakum pompası tarafından sistemden atılır.

Yeterince yüksek RF güç değerlerinde silan gazı helyum gazı ile karıştırılarak vakum odacığına sürülürse, çok sayıda yarı kararlı ve iyonize olmuş helyum oluşabilir. Denklem (2.3.)'te ifade edilen kimyasal reaksiyon sonucunda yarı kararlı (He^{*}) ve iyonize olmuş (He⁺) helyum atomlarının reaktör içerisinde tekrar uyarılması, enerjilerini elektron ve iyonlara transfer etmesine neden olur.



Yüksek hıza sahip olan elektronlar, yarı kararlı helyum atomları ve yüksek enerjili iyonlar, farklı parçacık türlerinin (SiH_3 , SiH_2) kinetik enerjilerinin ve sayıca yoğunluklarının artmasına neden olurlar. Diğer bir deyişle yarı kararlı He atomları inelastik çarpışmalar ile enerjilerini reaktif gaz türlerine transfer ederler. Bu olay Penning etkisi adını alır. Çizelge 2.1’de asal gazların yarı kararlı enerji değerleri ve iyonizasyon enerjileri verilmektedir. Yüksek mobilité değerine ve daha büyük yarı kararlı enerji seviyesine sahip olan asal gazlarda Penning etkisinin daha etkin olarak gözlemlendiği rapor edilmektedir (Nguyen et. al., 1983).

Çizelge 2.1. Asal gazların yarı kararlı enerji değerleri ve iyonizasyon enerji değerleri.

Asal gaz	Yarı kararlı enerji Seviyesi(eV)	İyonizasyon enerjisi(eV)
He	19.8	24.53
Ne	16.6	21.56
Ar	11.5	15.76
Kr	9.9	14
Xe	8.32	12.13

Reaktif olan silan gazının helyum gazı ile etkileşmesi sonucu plazmada ortaya çıkan Penning etkisi aşağıda verilen kimyasal formda gerçekleşmektedir.



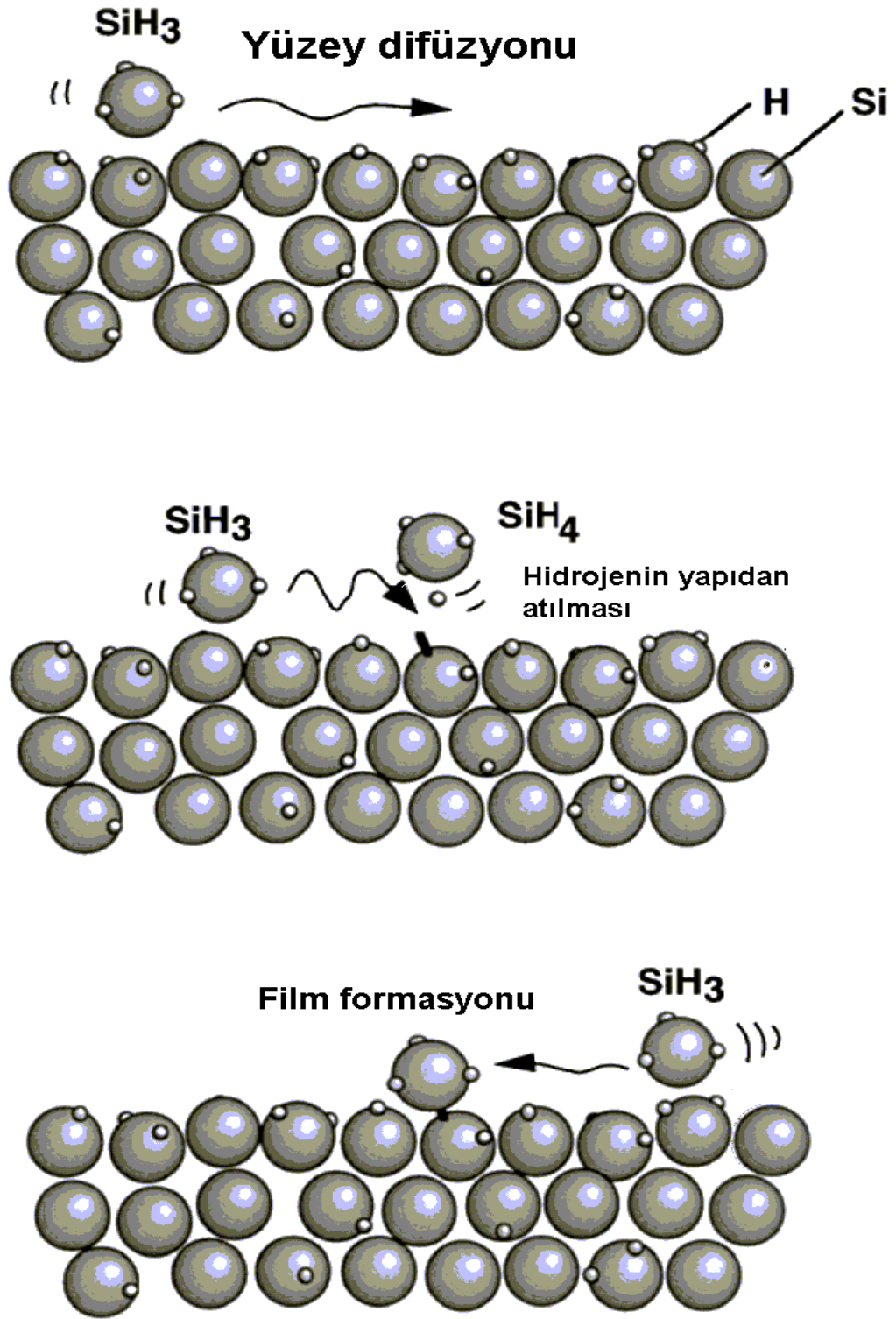
B_2 : SiH_4 gazının taban durumdaki enerjisindeki durumu.

B_2^+ : SiH_4 gazının iyonlaşmış hali.

B : SiH_4 gazının radikallerinden birisi.

Penning etkisi plazma reaksiyonunun hızlanmasına neden olarak film büyüme hızının artmasına neden olur. Yarı kararlı helyumun, iyonize olmuş helyumun, diğer iyonik türlerin (H^+ , SiH_3) ve yeniden bir araya gelmiş radikallerin geri uyarılması ve nötralizasyonu, bunların elektronik enerjilerinin büyük bir

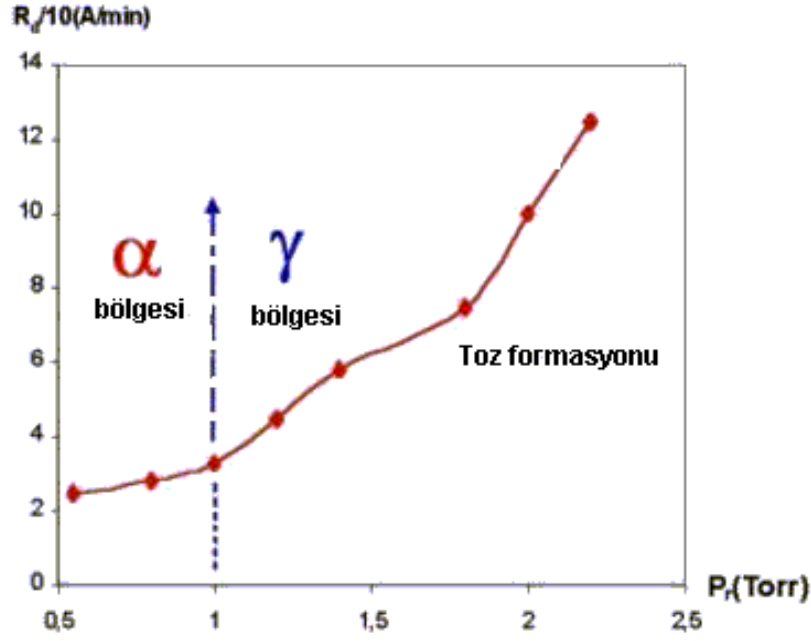
çoğunluğunu film büyüme sürecinin gerçekleştiği bölge olan a-Si:H yüzeyine transfer ederek, bir tür zincirleme ekzotermik reaksiyonun başlamasına neden olur. Tüm bu etkiler amorf silisyum matrisin etkin sıcaklığının artmasına yol açar. Etkin matris sıcaklığının büyümesi plazma reaksiyonu içinde, film büyüme işlemi süresince işleme girmemiş paraçacık (ağır ve yapışkan olan Si-ilişkili radikal türleridir.) türlerinin yüzey mobilitelerinin büyümesine neden olur (Middya et. al.,1994). Artık SiH₃ yapı içersinde gözlemlenen başat radikal türü değildir. SiH₃'ün yanında Si, SiH ve SiH₂ radikal türleri de yüzeyde oluça etkin olarak bulunurlar. Bu olay Si-H ile ilişkili radikal türlerinin yüksek yapışma sabiti değerine sahip olmalarını sağlar. Sözü geçen radikal türlerinin her biri, hidrojenin terk ettiği bölgelerde Si-H bağı kurarak etkileşmeye elverişlidir. Bu şekilde, ağır ve yapışkan olan Si-ilişkili radikal türleri, daha kararlı enerji siteleri bulup filmin katı formda oluşumuna katkıda bulunmaya başlarlar. Yarıkararlı helyum atomları film yüzeyinde termal enerjinin tetiklediği kimyasal reaksiyonların başlamasına neden olur. Bu olay yapısal rölaksasyon sürecinin hızlanmasına katkıda bulunurak, düşük kusur yoğunluklu ve daha rijit bir amorf yapının oluşumuna neden olur.



Şekil 2.4. a-Si:H ince filmin oluşum süreci (Matsuda et. al.,2003).

2.4. Helyum ve Silan Gazı Karışımı Kullanılarak Hazırlanan a-Si:H İnce Filmlerin Optik ve Elektriksel Özellikleri

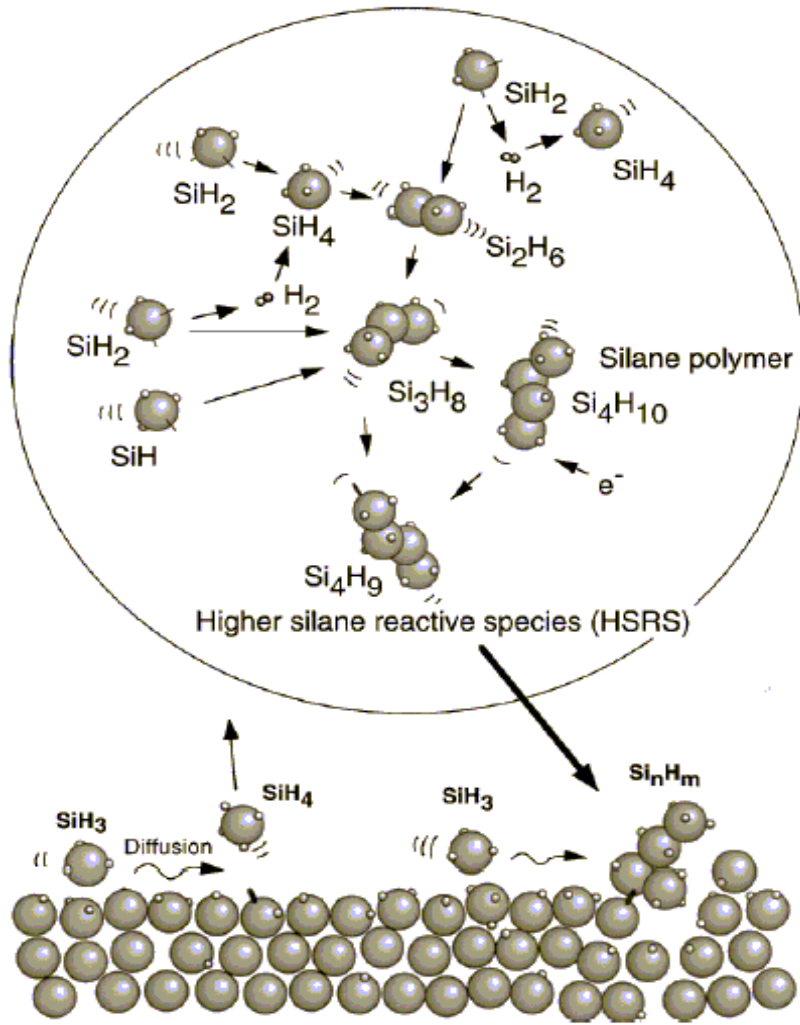
Sadece silan gazı kullanılarak, toplam reaktör gaz basıncı değiştirilerek hazırlanan örneklerin film büyüme hızları Şekil 2.5'te görüldüğü gibi alfa ve gama bölgeleri olmak üzere iki bölgede incelenebilir. Düşük RF gücü ve düşük silan basıncı değerinde film biriktirme işleminin gerçekleştiği bölge α bölgesi olarak adlandırılır (Middya et. al.,1996). Litertürde yapılan çalışmalarda, α bölgesinde sadece silan gazı kullanılarak farklı film hazırlama koşullarında büyütülen filmlerin düşük kusur yoğunluğuna sahip oldukları rapor edilmektedir. Bu bölgede hazırlanan filmlerin en büyük dezavantajı film büyüme hızlarının oldukça düşük olmasıdır. Film büyüme hızlarının düşük olması, büyük yüzeylere a-Si:H kaplamak için harcanak zaman, enerji ve gaz miktarlarının fazla olmasını gerektirmektedir. Kullanılan gaz miktarı ya da RF gücü artırılarak film büyüme hızı artırılabilir (Street, 1991). RF gücünün artırılmasıyla silan molekülü başına düşen toplam RF gücü arttırılacak bu sayede de parçalanmamış silan molekülleri varsa bunlarında aktif olarak film oluşum sürecine katkıda bulunmaları sağlanacaktır. Fakat bu çözümler fazla güç ve gaz tüketimi gerektirerek üretim maliyetini arttırmakta, daha az yoğun ve kalitesiz a-Si:H filmlerin oluşmasına neden olmaktadır. Büyüme hızının yüksek olduğu γ bölgesinde hazırlanan örnekler, yüksek kusur yoğunluğu sergilemekteydi. Bunu üzerine yüksek büyüme hızlarında ve düşük kusur yoğunluğuna sahip a-Si:H filmler elde etmek amacıyla silan gazı farklı reaktif gaz türleri ile (hidrojen ve helyum) seyreltilerek plazma odacığına sürülmeye başlandı. Bu anlamda çalışmalar yapan başlıca iki gurup vardır. Bunlardan biri helyum gaz ile seyreltilerek hazırlanmış a-Si:H örneklerin üstünlüğünü savunan Middya ve gurubu diğeri ise hidrojen gazı kullanılarak hazırlanmış a-Si:H örneklerin üstünlüğünü savunan P. Roca i Cabarrocas ve gurubudur. Middya ve gurubu silan gazını helyum ile sabit bir oranda seyreltip, RF gücünü sabit bir değerde tutarak, toplam gaz basıncını değiştirmek suretiyle örnekler hazırlamıştır. Toplam gaz basıncına bağlı olarak elde edilen film büyüme hızı Şekil 2.5'te verilmektedir.



Şekil 2.5. Helyum gazı ile seyreltilerek hazırlanan a-Si:H örneklerin film büyüme hızlarının toplam gaz basıncına bağlı değişimi (Middya et.al., 1996).

Grafikteki değişim incelendiğinde, 1 Torr'dan daha büyük toplam gaz basıncı değerlerinde hazırlanan örneklerin büyüme hızlarında belirgin artış gözlenmektedir. Yapılan çalışmalarda, film büyüme sürecinde gerçekleşen plazma reaksiyonunun, 1 Torr'dan büyük toplam basınç değerlerinde farklılaştığı vurgulanmaktadır. Alfa bölgesinden gama bölgesine geçiş bölgesi olarak adlandırılan bölge, plazma enerji transfer mekanizmasının değişim gösterdiği bölge olarak adlandırılmaktadır. α - γ geçiş bölgesinin sadece silan gazı kullanılarak hazırlanan örneklerde daha düşük toplam gaz basınçlarında olduğu (300 mTorr-500 mTorr) rapor edilmektedir (Capezzuto et. al., 1988). Fakat helyumun seyreltme gazı olarak kullanılmasıyla birlikte bu geçiş noktası daha yüksek basınç değerlerine kaymaktadır. Alfadan gamaya geçiş bölgesinde hazırlanan a-Si:H örneklerde toz (powder) formasyonu süreci başlamaktadır (Cabarrocas, 2000). Toz formasyonundan sorumlu olan mekanizma filmin oluşum sürecindeki yüzey polimerizyonudur. Yüzey polimerizasyonun kısaca şöyle açıklanabilir. Plazma içindeki elektron sayı yoğunluğu yükseldiği zaman (bu iki yöntemle gerçekleştirilebilir bunlardan birisi asal gaz kullanmaktır, diğeri ise RF gücünü yükseltmektir) film büyüme hızı belirgin şekilde artar ve daha sonra, vakum odacığı içindeki silan gaz moleküllerine ilişkin parçacık türlerinin tükenmesinden dolayı film büyüme hızı sabit bir değerde doyuma ulaşır. Bunun nedeni kısa yaşam süresine sahip olan SiH_2 ,

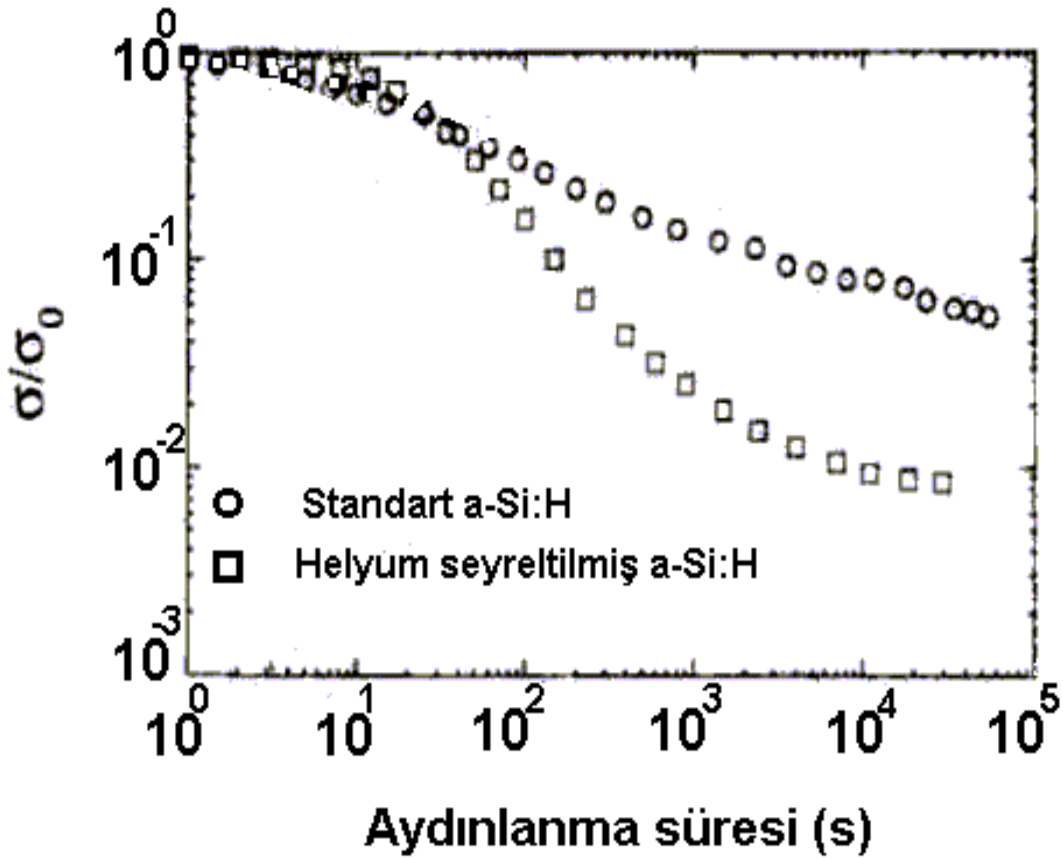
SiH ve Si gibi radikal türlerinin SiH₄ ile daha az çarpışma yapmaları sebebiyle hayatta kalmayı başarmasıdır. Bu olay film oluşum sürecinin gerçekleştiği film yüzeyinde daha karmaşık bir reaksiyonun başlamasına neden olur. Küçük yaşam süresine sahip fakat yüksek reaktiviteli radikallerin film yüzeyinde difüzyona uğramamaları, alttaş üzerine biriken filmin yüksek kopuk bağ yoğunluğu sergilemesine neden olur. SiH₂'nin SiH₄ ile etkileşmesinden Si₂H₆ açığa çıkar. Ortamdaki SiH₂'lerin plazma içindeki Si₂H₆ ile reaksiyona girmesi sonucunda ise sırası ile Si₃H₈, Si_{n-1}H_{2n} ve Si_nH_{2n+2} molekülleri ortaya çıkar. Plazma içinde oluşan Si_nH_{2n+2} molekülleri (film yüzeyinde reaktiviteye sahip değildirler, fakat plazma parametreleri için önemli) silan polimeri olarak adlandırılır. Si₄H₉ türündeki yüksek reaktiviteye sahip ve filmin yüzey reaksiyonunda oldukça etkin rol alan parçacık türlerini silan polimeri ile karıştırmamak maksadıyla bunlara HSRS (higher silane related reactive species) denilmektedir. Plazma içindeki silan polimerleri kritik bir değere ulaştıktan sonra katı formda gözlemlenmeye başlarlar. Katı fazda gözlemlenen bu yapı, negatif yük kazanarak plazma içinde hapsolmayı başarır. Plazma içerisinde katı fazda hapsolmuş silan polimeri büyük boyutlardaki toz taneciği yapısına ulaşarak pıhtılaşma sürecini başlatır. Pıhtılaşma süreci içinde bir araya gelen silan polimerleri daha büyük boyuttaki toz taneciklerini oluşturma yolunda ilerlemeye başlamışlardır. Şekil 2.6'da HSRS radikal türlerinin etkin olduğu a-Si:H film oluşum sürecindeki evreler gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi HSRS reaktif radikal parçacık türleri Şekil 2.4'te vurgulanan SiH₃'ün yüzey difüzyonunu engelleyerek film yüzeyindeki kopuk bağlarla doğrudan reaksiyona girer. Bu reaksiyon film yüzeyinin dihidrat yönünden zenginleşmesini sağlayarak, Si-H₂ bağ yapısı yönünden bereketli bir duruma dönüşmesine neden olur. Eğer hedef daha kararlı a-Si:H örnekler hazırlamaksa, HSRS parçacık türlerinin plazma reaksiyonu içindeki sayılarının küçültülmesi gerektiği rapor edilmektedir (Matsudda et. al., 2003).



Şekil 2.6. HSRS adı verilen parçacık türlerinin etkin olduğu plazma reaksiyonu (Matsudda et. al., 2003).

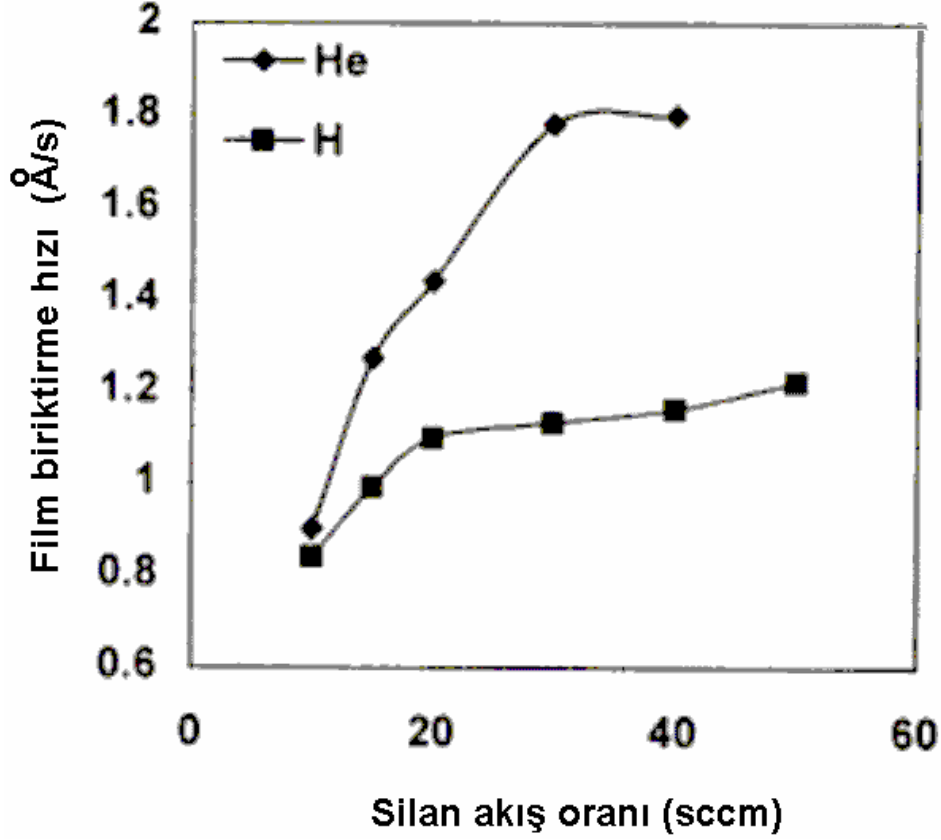
Middya ve gurubu α 'dan γ bölgesine geçişi gözlemledikleri örneklerde (özellikle gama bölgesi içerisinde kalan örneklerde (<1,8 Torr) yaptıkları kırmızıaltı soğurma spektrumu ölçümleri sonucunda kayda değer oranda polihidrid (polyhydride) bağlarına rastlamışlardır (Middya et. al., 1996). (SiH₂)_n kimyasal bağ yapısı ile verilen polihidrid bağların gözlemlendiği a-Si:H örneklerde bu bağların sayılarının artması ile birlikte optik bant aralığında küçülmeye başladığını gözlemlenmektedir. Kırmızıaltı soğurma spektrumunu kullanılarak hesaplanan bağlı hidrojen oranlarının optik bant aralığındaki azalmayı takip etmesi, optik bant aralığı değerinin yapı içindeki hidrojen oranının tarafından kontrol edildiğini göstermektedir. a-Si:H filmler içerisinde kayda değer miktarda bulunan hidrojenin plazma reaksiyonu sırasında oluşan tozların (powder), mikroyapıyı etkilemediğinin

bir göstergesi olduğu düşünülmektedir (Middya et. al., 1994). Plazma içerisinde bulunan tozların diğer bir deyişle silan polimerlerinin film özelliklerinin iyileşmesine katkıda bulunduğu rapor edilmektedir. Bu sayede toplam gaz basıncına bağlı olarak elde edilen örneklerin optik bant aralığı 1,5 eV ile 1,75 eV arasında değişmektedir. Ayrıca yapılan fotoiletkenlik ölçümleri sonunda helyum gazı ile seyreltilerek γ bölgesinde hazırlanan düşük optik bant aralığına sahip örneklerin $\eta_{\mu\tau}$ çarpanlarının $5 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-2} \text{ V}^{-1}$ civarında olduğu gözlemlenmiştir. Standart a-Si:H örneklerle kıyaslandığında oldukça yüksek olan bu değerler helyum ile seyreltilerek hazırlanacak filmlerin standart a-Si:H örneklerle iyi bir alternatif olacağı yönünde bilgiler vermektedir (Middya et. al., 1994). Şekil 2.7’de helyum ile seyreltilerek ve saf silan gazı kullanılarak hazırlanmış iki örneğin ısı kusur yaratma sürecinde kaydedilmiş normalize fotoiletkenlik değerlerinin aydınlatma zamanına bağlı değişimleri verilmektedir. Örnekler 400 mW/cm^2 ışık altında oda sıcaklığında tutulmuşlardır. Fotoiletkenliğin doyuma ulaşma süreçleri incelendiğinde helyum ile seyreltilerek hazırlanan örneğin oldukça kısa sürede doyuma (3 saat) ulaştığı gözlenmektedir. Standart a-Si:H örneğin fotoiletkenlik değerinin doyuma ulaşma süresi ise günler almıştır (Middya et. al., 1996). Middya ve gurubunun takip eden çalışmalarında gama bölgesi içerisinde hazırlanan örneklerin pin aygıt yapımında i katmanın oluşturulmasında iyi bir alternatif olacağı yönünde deneysel gözlemler yer almaktadır (Middya et. al., 1999). Literatürde, silan gazının helyum ile seyreltilmesi ile hazırlanan i katmanına sahip güneş pillerinin sadece silan gazı kullanılarak hazırlanan i katmanına sahip güneş pillerine kıyasla elektronik performanslarının üstün olduğu belirtilmektedir. (Banerjee et. al., 2002).



Şekil 2.7. Standart a-Si:H örnek ile helyum ile seyreltilerek hazırlanmış iki örneğin ışıl kusur yaratma sürecinde kaydedilmiş normalize fotoiletkenlik değerlerinin zamana bağlı değişimi .

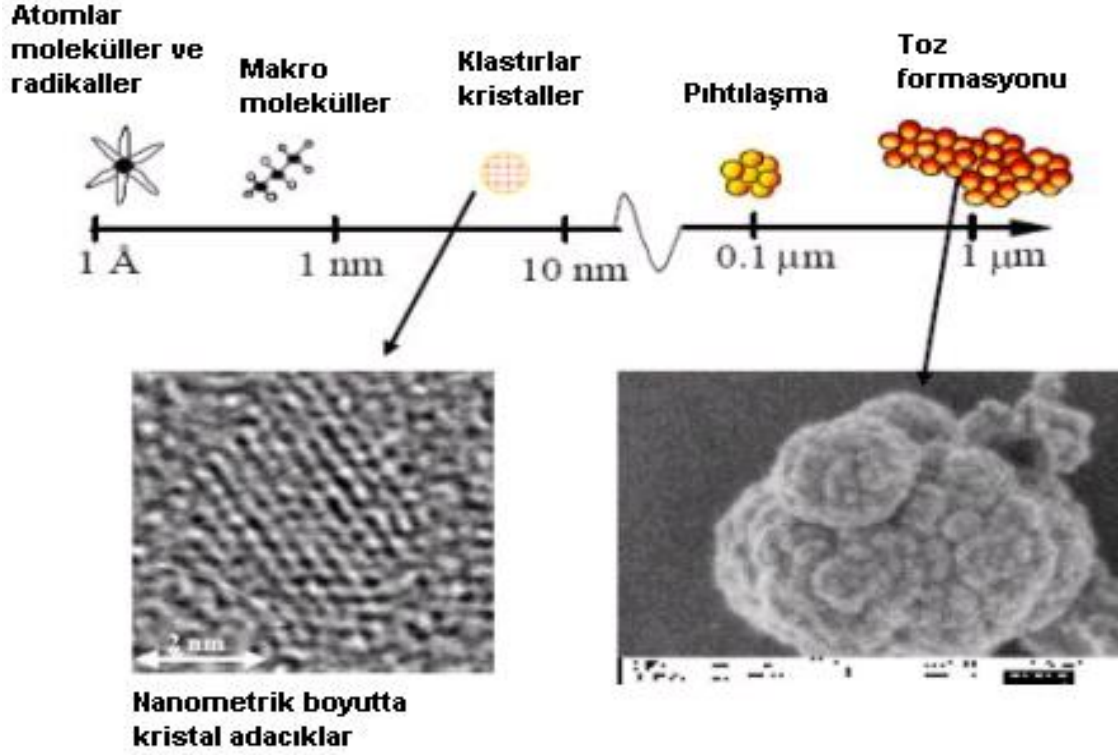
Konu üretim maliyeti, enerji tasarufu ve çevre dostu bir süreç olduğunda tercih edilen seyreltme gazı helyum gazıdır. Şekil 2.8’de hidrojen ve helyumun seyreltme gazı olarak kullanılması sonucu elde edilen örneklerin silan gazı akış oranına bağlı olarak büyüme hızı değişimi verilmektedir. Şekildeki değişim incelendiğinde hidrojen ile seyreltmede 30 sccm’lik silan akışı oranında büyüme hızı 1,1 Å/s iken helyum ile seyreltmede bu değer 1,8 Å/s civarındadır. Görüldüğü gibi helyum ile seyreltilerek hazırlanan örneklerdeki film büyüme hızı hidrojen ile seyreltilerek hazırlanan örneklerin film büyüme hızından neredeyse iki katı fazladır (Middya et. al., 1999).



Şekil 2.8. Hidrojen ve helyum ile seyreltme yöntemi ile hazırlanan örneklerin, film biriktirme hızının silan akış oranına bağlı değişimi (Middya et. al., 1999).

Cabarrocas ve gurubu yaptıkları çalışmalarda PECVD yöntemi ile hazırladıkları a-Si:H örnekleri, silan gazının hidrojen ile seyreltilmesi ile hazırlamışlardır (Cabarrocas et. al., 1998, 2000, 2003). Middya ve gurubunun gözlemlediği alfadan gamaya geçiş bölgesini Cabarrocas ve arkadaşları da gözlemlemişlerdir. Yapılan literatür çalışmaları Cabarrocas ve arkadaşlarının asıl hedefinin, aygıt yapımına uygun μ c-Si:H aygıt oluşturmak ve bu yönde hidrojenle seyreltme tekniğinin plazma reaksiyonuna getirdiği fiziksel değişim süreçlerini anlamak olduğu görülmüştür. Cabarrocas'a göre düşük alttaş sıcaklıklarında, düşük film büyüme hızlarında hazırlanan örnekler, düşük kusur yoğunluğu sergilemektedir. Bu tip örneklerin üretilmesinde daha çok iyon bombardımanının neden olduğu gizlenmiş yüzey polimerizasyonu sebebiyle gerçekleştiği doğrultusunda öneriler vardır (Cabarrocas, 2002). Film büyüme hızının artması ile birlikte toz formasyonu (powder fromation) adı verilen etkinin daha belirgin olmaya başladığı, aslında bunların düşük film büyüme hızlarında da var olduğu ama yüksek film büyüme hızlarına gidildiğinde bu yapılaşmanın daha etkin olduğu rapor edilmektedir

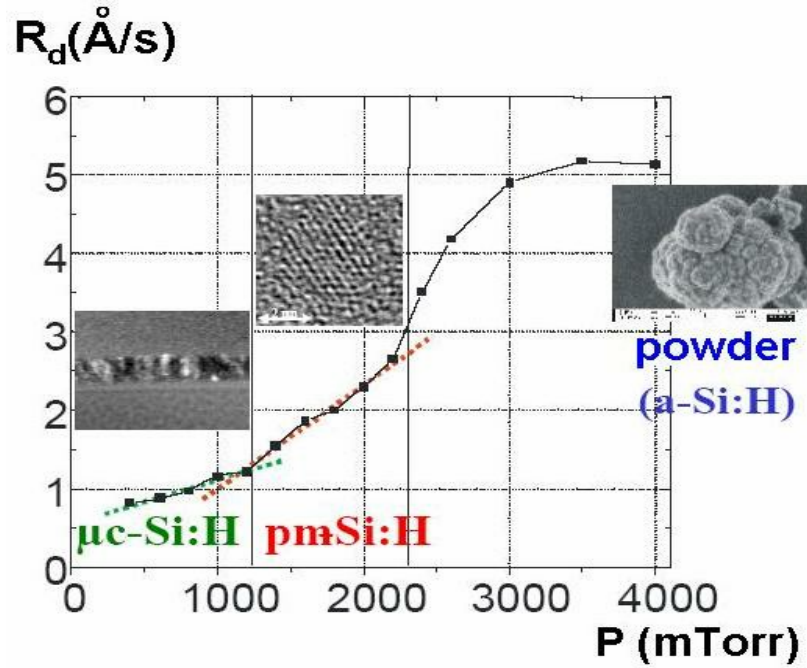
(Cabarrocas, 2002). Şekil 2.9'da açıklanan toz formasyonunun oluşum sürecindeki aşamalar verilmektedir. Nanometrik boyuttaki taneciklerin örnek üzerinde yapılaşması makroskopik kusurlar yaratarak (pin hole), yarıiletken aygıt yapımı için önemli bir etki ortaya çıkartmaktadır. Bilindiği gibi toz formasyonu plazma içine hapsolmuş negatif yüklü taneciklerdir (Cabarrocas, 2002).



Şekil 2.9. Toz formasyonunun makroskopik boyuta ulaşma süreci.

Bu yüzden elektrostatik bir kuvvet (yer çekimi, iyon sürüklenmesi, gaz akışı vb. gibi) onları plazma içerisinden koparacak düzeye gelinceye kadar, plazma içinde hapsolurlar. Tozlar elektrostatik kuvvetin etkisinden kurtulunca pin-hollere benzer makroskopik kusurlar yaratarak amorf silisyum oluşumuna katkıda bulunurlar. Bu durumdan kurtulmanın en iyi yolu, RF gücünü ve toplam basıncı küçültmek, gaz akış hızını artırmaktır. Bu şekilde tozların alttaş üzerinde birikmesi engellenip, plazmanın dışına süpürebilir (Cabarrocas et. al., 1998). Toz formasyonunun alttaş üzerinde birikmesi mikroyapının bozunumuna neden olarak örneklerin hidrojen yönünden yoksun ve yüksek kopuk bağ yoğunluğu sergilemelerine neden olur. Toz formasyonunun plazma reaksiyonu içerisindeki varlığı arzu edilen bir durumdur. Çünkü toz formasyonu reaktöre sürülen RF enerjisinin plazma ile daha verimli bir şekilde etkileşmesini sağlamaktadır. Diğer bir deyişle daha verimli bir güç çiftlenimi yaratılabilmektedir. Şu halde plazma reaksiyonu içerisinde bulunan toz

formasyonunu nasıl yönetebileceğimizi anlamış olmamız gerekir (Cabarrocas, 2000). Takip eden çalışmalar, daha çok plazma spektroskopisi yada plazma yayılım spektroskopisi adı altında rapor edilen çalışmalardır (Cabarrocas et.al., 2000, 2002, 2003). PECVD sisteminde a-Si:H biriktirme sürecinde yapılan eş zamanlı spektroskopik ölçümler, plazma içerisinde oluşan parçacık türleri hakkında net bulgular orataya koymakta ve bu sayede oluşan filmin optik ve elektriksel özellikleri daha iyi kontrol edilebilmektedir. Bugüne kadar a:Si-H filmlerin oluşum sürecinin anlatılmasına ile ilgili birçok çalışma rapor edilmiş olmasına rağmen, en net bulgular P. Roca i Cabarrocas tarafından açıklanmıştır. Cabarrocas plazma reaksiyonunu iki temel adımda açıklamaktadır (Cabarrocas, 2000).

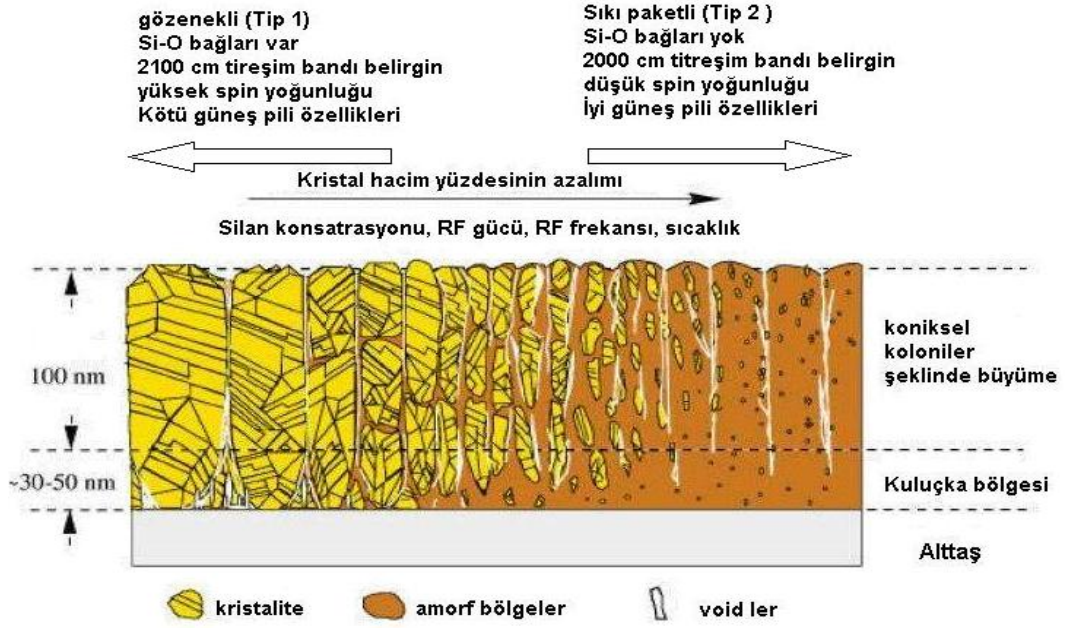


Şekil 2.10. Hidrojen ile seyreltilerek hazırlanan örneklerin film büyüme hızının, toplam reaktör basıncına bağlı değişimi.

Film oluşum süreci, birincil ve ikincil reaksiyon adı altında verilen iki aşamada açıklanmaktadır. Matsuda'nın tanımladığı standart hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun oluşum sürecinde başat olarak gözlemlenen plazma reaksiyonun birincil sürecini tanımlamada oldukça yeterlidir. Ne varki yüksek film biriktirme hızlarına ulaşmayı hedefleyen çalışmalar, reaktör içerisinde ihmal edilemeyecek düzeyde gerçekleşen ikincil reaksiyonun tetiklenmesine neden olmaktadır (Cabarrocas, 2000). Toz formasyonu olarak adlandırılan film yapılaşmasının, ikincil reaksiyon etkileşimleri sonucunda oluştuğu rapor edilmektedir. Şekil 2.10'da Cabarrocas ve gurubunun 22 W RF gücünde 250 °C alttaş sıcaklığında, 900 sccm

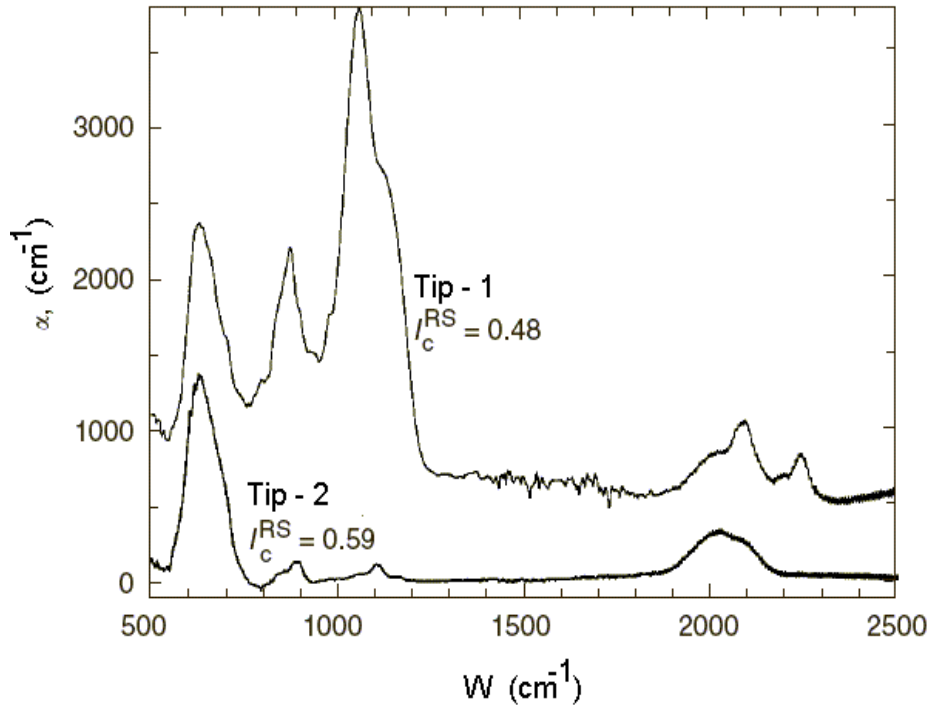
hidrojen ve 10 sccm silan akış oranında ve farklı toplam reaktör gaz basıncında hazırladığı örneklerde gözlemlendiği film büyüme hızının değişimi verilmektedir (Kharchenko et. al., 2003). Şekildeki değişim Middy ve gurubunun Şekil 2.5’de verilen gözlemiyle oldukça uyumludur. Fakat daha önce de vurgulandığı gibi buradaki asıl amaç amorf silisyuma alternatif olabilecek ve amorf yapı içerisine gömülmüş kristalite faz barındıran $\mu\text{c-Si:H}$ veya pm-Si:H (polimorfus silisyum) adıyla anılan filmler hazırlayabilmektir. Şekilde verilen farklı bölgeler aslında alfa ve gama bölgesi olarak adlandırılan bölgeden başka birşey değildir. Cabarrocas’a göre yüksek kararlılıkta, düşük kusur yoğunluğunda ve aygıt yapımına uygun (TFT: ince film transistor, veya fotovolataik aygıt) örneklerin grafikte kırmızı harflerle belirtilen, pm-Si:H bölgesindeki toplam reaktör basıncı bölgesinde hazırlanabileceği rapor edilmiştir (Cabarrocas et. al., 2000, 2002, 2003). Bu bölgede hazırlanan örnekler üzerinde yapılan deneylerde, örneklerin yüksek oranda nanometrik boyutlarda kristal adacık barındırdığı gözlemlenmiştir. Polimorfus silisyumun Staebler Wronski olayına karşı oldukça kararlı olmasının, yüksek fotoiletkenlik ve aygıt yapımında arzu edilen karaktersitikler sergilemesinin yapı içinde nanometrik boyutlarda kristal adacıklar barındırmasından kaynaklanıldığı rapor edilmektedir (Cabarrocas et.al., 1998, 2000, 2002, 2003).

Literatürde, PECVD sisteminde silan gazının hidrojen ile seyreltilmesiyle hazırlanan $\mu\text{c-Si:H}$ ve nc-Si:H filmlerin oluşum süreci detaylı olarak incelenmiştir. (Finger et. al., 2003, Cabbarocas et. al., 2000). Şekil 2.11’de film büyütme koşullarının değiştirilmesiyle beraber $\mu\text{c-Si:H}$ ’dan nc-Si:H ’a geçiş sürecindeki mikro yapı özellikleri şematik olarak gösterilmiştir.



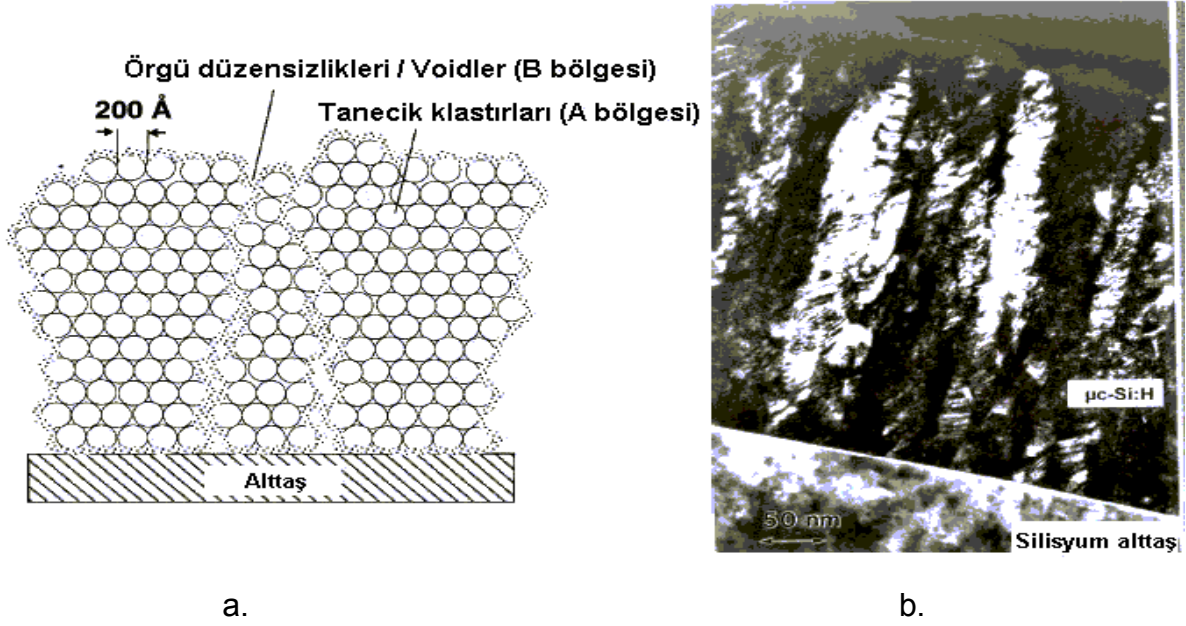
Şekil 2.11. $\mu\text{c-Si:H}$ 'de farklı mikro yapı özelliklerinin şematik gösterimi.

Filmlerin mikro yapısı üç temel bölgede incelenebilir. Bunlar; homojen olmayan konik biçimli kristal silisyum topaklar, void'ler ve amorf bölgelerdir. Şekil 2.11'de soldan sağa doğru gidildiğinde kristal faz azalır, amorf faz artmaktadır. Kullanılan hidrojen gazı miktarı değiştirilerek içinde her iki fazın ayrı ayrı yada beraber bulunduğu örnekler elde etmek mümkündür. Bundan başka, kullanılan rf sinyalinin gücü değiştirilerek yapı içinde konik koloniler şeklinde büyüyen kristal adacıkların çapı da kontrol edilebilmektedir (rf sinyalinin gücü arttırıldığında kristal kolonilerinin çapı büyümektedir). Finger arkadaşları hidrojen ile seyreltilerek hazırlanan filmlerin Tip 1 ve Tip 2 olmak üzere iki farklı grupta incelenebileceğini göstermişlerdir. Tip 1, yapısında ağırlıklı olarak kristal faz barındırarak $\mu\text{c-Si:H}$ özellikler sergileyen ve kırmızıaltı spektroskopisi ölçümlerinde büyük oranda Si-O bağına ait piklere sahip olan örneklerdir. Tip 2 ise yapısında ağırlıklı olarak amorf fazı barındıran, daha çok nc-Si:H olarak değerlendirilebilecek filmlerdir. Şekil 2.12.'de Finger ve gurubunun yaptığı çalışmadan alınan Tip 1 ve 2 adı altındaki iki örneğin FTIR spektrumları verilmektedir.



Şekil 2.12. HWCVD yöntemi le hazırlanan $\mu\text{c-Si:H}$ iki örneğin kızılötesi soğurma spektrumları.

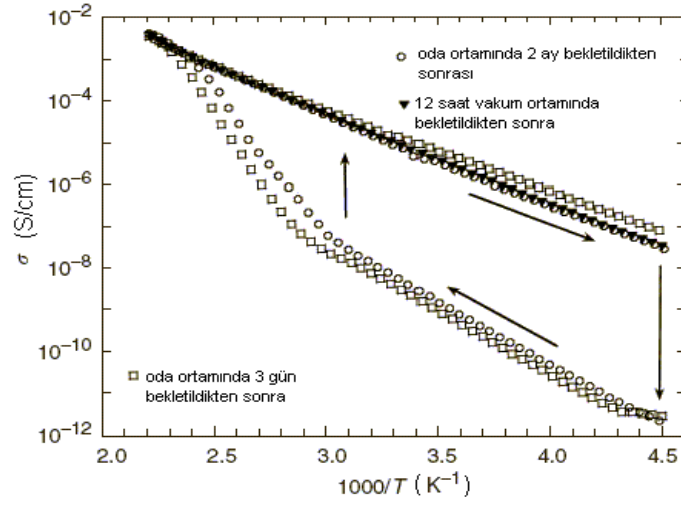
Şekil 2.13.b'de, yapısında büyük oranda kristal faz barındıran bir örneğin 1997'de Luysberg ve gurubun yaptığı bir TEM ölçümü resmi verilmektedir (Finger et. al.,1998). Şekil 2.13.b incelendiğinde kristal fazlar, beyaz renkli koniksel koloniler şeklinde kendilerini göstermektedirler. Şekil 2.13.a'da ise nano kristal silisyum gruplarının etrafını çevreleyen amorf fazları ve voidlerin mikroskopik yapı içindeki yerleri adreslenmektedir.



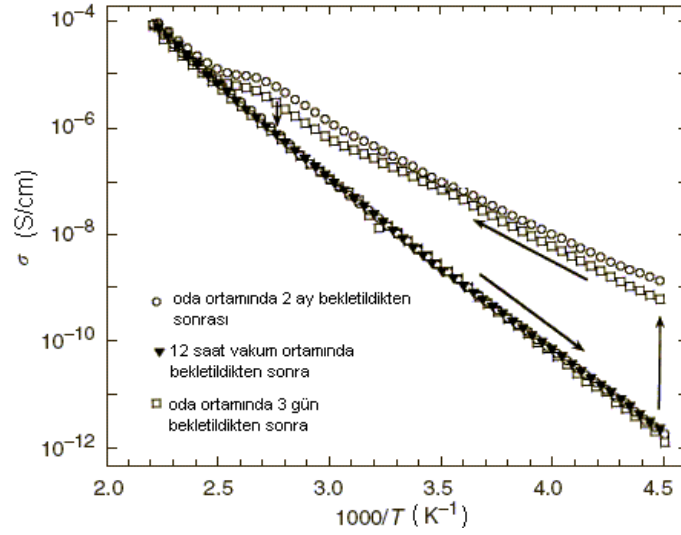
Şekil 2.13. $\mu\text{c-Si:H}$ 'nin kesit morfolojisi ve TEM görüntüsü.

Tip 1 ve 2 özellikleri taşıyan örneklerin atmosferdeki serbest oksijeni soğurmasının elektriksel özelliklere etkisi incelenmiştir. 50 °C sıcaklıktaki serbest atmosfer ortamına bırakılan bu örnekler ESR ve FTIR ölçümleri ile incelenmişlerdir. FTIR ölçümleri, Tip 1 örneklerinin Tip 2 örnekleri ile kıyaslandığında, atmosferden ciddi miktarlarda oksijen soğurduğunu göstermiştir. Bundan başka ESR ölçümleri de, soğurulan oksijen miktarının yüksek olduğu örneklerde kopuk bağ yoğunluğuna ait rezonans sinyalinin büyük olduğunu ortaya koymaktadır (Finger et. al.,2003).

Tip 1 ve 2 örnekleri üzerinde gerçekleştirilen FITIR ve ESR ölçümlerinden, kristallenme oranı yüksek örneklerde (Tip 1) oksijen soğurma mekanizmasının oldukça etkin olduğu ve yapı içindeki damar sınırlarından difüz eden yabancı atom ve moleküllerin, örneğin elektronik özelliklerini büyük ölçüde etkileyebileceği ve amorf fazından kristal fazına geçiş örnekleri olarak düşünülen Tip 2 örneklerinin ise oksijene daha az duyarlı olduğu söylenebilir. Karanlık iletkenlik ölçümleri, ESR ölçümlerinde elde edilen bulguları doğrular niteliktedir. Şekil 2.14.a ve b' de Tip 1 ve 2 örneklerinin aynı çalışmadan alınmış karanlık iletkenlik ölçüm sonuçları verilmektedir. Şekildeki değişimler incelendiğinde 2 ay süre ile serbest atmosfer ortamına bırakıldıktan sonra vakum ortamda tavlanaarak tekrar atmosfer ortamına terkedilen örneklerin sıcaklığa bağlı karanlık iletkenlik eğrileri (ölçüm öncesi tekrar tavlama yapılıyor) bir hysteresis göstermektedir.



a.)



b.)

Şekil 2.14. HWCVD yöntemi ile hazırlanan örneklerin (tip 1 ve 2) tavlama ve bekletme adımları sonrası ölçülen karanlıkiletkenliklerinin sıcaklığa bağlı değişimleri. a.) Tip 1 örneğinde yapılan ölçümleri b.) tip 2 örneğinde yapılan ölçümleri göstermektedir.

Tip 2 örneklerindeki hysteresis eğrisinin karın genişliğinin Tip 1 örneklerinde gözlenenden dar olması, karın genişliğinin yapı içine alınan oksijen miktarı ile doğrudan ilintili olduğunu ortaya koymaktadır.

Tip 1 ve 2 örneklerinden elde edilecek güneş pillerinin Staebler Wroski etkisine karşı kararlılığının anlaşılabilmesi amacıyla farklı kristalite oranlarına sahip örnekler üzerinde deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucu Tip 2 örnekleri kullanılarak hazırlanan güneş pillerinde FF, V_{oc} ve I_{sc} değerlerinin neredeyse hiç

değişmediği gözlemlenmiştir. Buna karşın en verimli güneş pilleri Tip 1 – Tip 2 sınırında hazırlanmıştır (Finger et.al.,2003). Bu çalışmalar, $\mu\text{-Si:H}$ ve nc-Si:H 'da Staebler Wronski işleyişine yapı içerisindeki kristalite faz, void'ler ve amorf faz yüzdesinin de etkili olabileceğini göstermiştir.

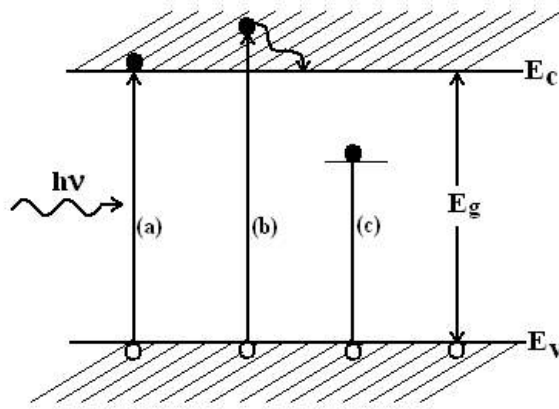
2.5. Optik Geçirgenlik

Dielektrik ve yarıiletken malzemelerin bir çok uygulamalarında malzemenin temel soğurma kenarına karşılık gelen foton enerjileri civarındaki optik özellikleriyle ilgilenilir. Uygulamalar ara yüzeylerdeki çoklu yansımalarından faydalanmaya başladıkça film kalınlığı çok önemli bir dizayn ve karakterizasyon parametresi olmaya başlamıştır. Buradan yola çıkılarak ince filmlerin optik bant aralıkları, kusur seviyeleri, fonon ve plazma frekansları hakkında bilgi edinilebilir. Bundan başka kırma indisinin bilinmesi optik parçaların ve optik kaplamaların modellenmesi ve dizaynı açısından da önem taşımaktadır.

Optik geçirgenlik ölçümü tamamen opak malzemelerden kısmen transparent malzemelere kadar geniş bir aralıkta malzemenin spektrumu hakkında hızlı ve doğru bilgi edinmemizi sağlar. Sonuç olarak kırılma indisi (n) ve kalınlığın (d) optik geçirgenlik spektrumunun kullanılarak bulunması önem taşımaktadır. Optik geçirgenlik eğrilerinin, geçirgenliğin yüksek olduğu bölgede girişim saçakları sergilemesi durumunda, kullanışlı bir çok yöntem geliştirilmiştir (Kodolbaş, 1999). 1976 yılında ,Manifacier, optik geçirgenlik spektrumundan faydalanarak kırılma indisinin gerçel ve sanal (n ve k) kısımlarını hesaplayan bir yol önermiştir. Bu metod daha sonraları Swanepoel tarafından geliştirilmiştir. Bu model yeterli sayıda girişim saçığı sergileyen her türlü optik geçirgenlik spektrumuna uygulanabilir. Optik geçirgenlik spektrumu kullanılarak geçirgenlik eğrisinin maksimum ve minumumlarından oluşan zarf eğrileri oluşturulur. Oluşturulan zarf eğrilerinin dalga boyunun sürekli bir spektrumu olduğu farzedilerek n (kırılma indisinin gerçel kısmı) ve k (kırılma indisinin sanal kısmı), zarf eğrisinin kullanılarak her bir dalgaboyu için hesaplanır. Envelope metodu oldukça kullanışlı ve açık bir metottur. Literatürde envelope metodu hesaplamaları ile ilgili ayrıntılı bilgilere ulaşmak mümkündür (Güngör, H.Ü. Doktora Tezi, 2000, Kodolbaş, H.Ü. Doktora Tezi, 1999).

2.6. Optik Soğurma

Yarı iletken bir malzeme aydınlatıldığında gelen fotonların enerjisi ($h\nu$) bant aralığına (E_g) eşit ise soğurulan fotonlar Şekil 2.15.a' da görüldüğü gibi elektron-hol çifti oluştururlar. Eğer gelen fotonun enerjisi örneğin yasak enerji aralığından büyükse elektron hol çifti yaratılır ve fazlalık enerji de Şekil 2.11.b'de görüldüğü gibi ısı enerjisi olarak yayılır. Her iki süreç de banttandır. Diğer taraftan gelen fotonun enerjisi malzemenin bant aralığından küçükse bu foton yalnızca bant aralığındaki kimyasal safsızlıklar veya fiziksel kusurlardan kaynaklanan uygun enerji seviyelerinde soğurulabilir.



Şekil 2.15. a) $h\nu = E_g$, b) $h\nu > E_g$, c) $h\nu < E_g$ durumları için optik soğurma.

A-Si:H'nun optik aralığını bulmak için iki temel yöntem önerilmiştir. Bunlar, optik geçişler için, sabit momentum matrisinin önerildiği Tauc yöntemi (Tauc, 1972) ve sabit dipol matris elemanının önerildiği Cody yöntemidir (Cody, 1984). Her iki yöntemde de parabolik bant yaklaşımı $(E)^{1/2}$ kullanılmıştır. Optik bant aralığı, Tauc yönteminde, $(\alpha(h\nu)h\nu)^{1/2}$, Cody yönteminde ise $(\alpha(h\nu)h\nu)^{1/2}$ 'nin foton enerjisine ($h\nu$) bağımlılığı bulunabilir.

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = B(h\nu - E_g^{opt}) \quad (2.6.)$$

formülü yardımıyla, $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ grafiğinin doğrusal olan bölgesinin ekstrapolasyonundan bulunur. Bu ifadedeki B değeri en küçük metalik iletkenliğin σ_0 , bant uzantısı düzeylerinin genişliğine oranını (ΔE) verir.

$$B \approx \frac{\pi^2 \sigma_0}{nc\Delta E} \quad (2.7.)$$

Burada c , ışık hızı ve n kırma indisidir.

2.7. Karanlık iletkenlik

Amorf silisyum için sıcaklıkla değişen elektriksel iletkenlik üç ayrı bölgede incelenebilir (Şekil 2.16.). İletkenlik;

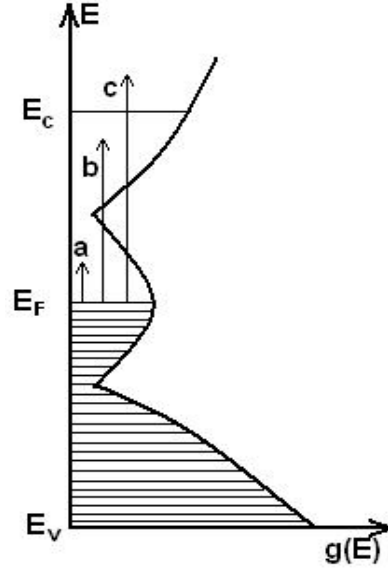
$$\sigma(E) = e \int g(E) \mu(E) f(E) dE \quad (2.8.)$$

şeklinde verilir ve $g(E)$ değişik bölgelerdeki değerleri için μ mobilitesinin değişiminin hesaba katılması ile hesaplanır. E enerji düzeyindeki elektronların doluluk değeri $f(E)$ ile ifade edilir.

Çok düşük sıcaklık değerlerinde, Fermi düzeyinin altındaki tüm düzeyler elektronlarla doludur ve üst düzeylere geçiş mümkün değildir. Alçak sıcaklıklarda dışarıdan termal olarak uyarılan elektronlar sadece E_F 'nin hemen üstündeki boş yerleşmiş enerji düzeylerine hopping yolu ile uyarılarak karanlık iletkenliğe katkıda bulunurlar (a), (Mott, Davis, 1979). Çok düşük sıcaklıklarda elektronun en yakın komşudaki boş enerji düzeyine hoplama olasılığı azdır ve bu olasılık enerjice en yakın ancak uzak mesafedeki düzeyler ile sınırlıdır. Bu tür hoplama değişken erimli hoplama (variable range hopping) olarak bilinir ve sıcaklık bağımlılığı;

$$\sigma = A \exp \left(- \left(\frac{T_0}{T} \right)^{1/4} \right) \quad (2.9.)$$

olarak verilir. Burada A ve T_0 , içinde yerleşik dalga fonksiyonunun sönüm sabiti (α) ve Fermi Düzeyindeki durum yoğunluğunu $g(E_F)$ içeren sabitlerdir.



Şekil 2.16. Isıl elektronik geçişlerin şematik gösterimi; düşük sıcaklıklarda Fermi düzeyinin hemen üzerindeki düzeylerde (a), mobilite kenarının altındaki yerleşmiş enerji düzeyleri arasında (b), ısıtılma ile yaygın düzeylerdeki iletkenlikle artma (c).

Sıcaklık arttıkça quasi Fermi düzeyleri E_{qF} bant uzantısı yerleşmiş enerji düzeyleri içerisine doğru hareket eder ve termal geçiş sadece Fermi düzeyi E_F 'den E_c 'nin altındaki bant uzantısı yerleşmiş enerji düzeylerine olur (b). Bu durumda elektronlar en yakınında bulunan (Nearest neighbour Hopping) boş enerji düzeyine hopping yolu ile hareket ederler ve iletkenliğe $\exp(-W/kT)$ şeklinde bir katkı getirirler. Böylece dışardan uygulanan bir elektrik alan altında elektronların mobiliteleri μ yaygın durum mobilitelerinden farklılık gösterir. Bu nedenle iletkenlik;

$$\sigma \propto \exp[-(E - E_F + W)/kT] \quad (2.10.)$$

ile verilir. W yerleşmiş enerji düzeylerindeki ortalama enerji olarak alınabilir.

Oda sıcaklığı ve yukarısında ise elektronlar termal olarak Fermi düzeyinden iletkenlik bandına, E_c enerji düzeyinin yukarısına uyarılırlar (c). Yaygın düzeylerde gözlenen bu iletkenlik ,

$$\sigma_c = \sigma_0 \exp[-(E_c - E_F)/kT] \quad (2.11.)$$

şeklindedir. Bu ifadede σ_0 , minimum metalik iletkenlik olarak isimlendirilir.

İletkenlik bandı ve Fermi enerji düzeyi arasındaki enerji aktivasyon enerjisi $E_a = |E_c - E_F|$ olarak tanımlanır. Bu durumda karanlık iletkenliğin sıcaklığa bağlılığı

;

$$\sigma_k = \sigma_0 \exp[-E / kT] \quad (2.12.)$$

olarak ifade edilir. Arrhenius çizimi $(\log \sigma_k) - 1/T$ ile iletkenlik bant kenarının Fermi enerjisine göre konumu belirlenebilir

2.8. Fotoiletkenlik

Fotoiletken bir malzeme optik formdaki bilgi ve enerjiyi elektronik forma dönüştürür. Fotoiletken bir malzeme sanki ışık sensörü olan bir fotodirenç gibi çalışır. Eğer örneğin aktif yüzeyine herhangi bir foton düşmüyorsa fotoiletken örnek, yapıldığı malzemeye, boyutlarına ve sıcaklığına bağlı olarak bir iletkenlik değeri sergiler bu iletkenlik değeri bir önceki bölümde tartışılan karanlık iletkenlik değeridir. Bir çok durumda özel bir dalga boyundan daha fazla bir enerjiye sahip foton örneğin üzerine düşürüldüğünde örnek çok daha fazla iletken olmaya başlar ve bu değer maksimuma ulaşır. Bir malzeme için maksimum iletkenliğe ulaşıldığında ışık şiddetindeki bir yükselme iletkenlikte değişime sebep olmaz.

Bir malzeme ışık şiddeti F (foton/cm² s) olan bir ışıkla aydınlatıldığında G (cm⁻³ s⁻¹) üretim hızıyla elektron hole çiftleri yaratılır. İletkenlik ve değerlik bantlarındaki serbest elektron ve hollerin yoğunluğu

$$\Delta n = G \tau_n \quad (2.13.a.)$$

$$\Delta p = G \tau_p \quad (2.13.b.)$$

bağıntısı ile verilir. Burada τ_n ve τ_p elektron ve hollerin ömür süreleridir.

Fotoiletkenlik aydınlık iletkenlikten karanlık iletkenliğin farkı olarak tanımlanır.

$$\sigma_p = \sigma_a - \sigma_k \quad (2.14.)$$

Aydınlatma ile yaratılan fototaşıyıcıların yoğunlukları Δn ve Δp olmak üzere fotoiletkenlik;

$$\sigma_p = (e\mu_n \Delta n + e\mu_p \Delta p) \quad (2.15.)$$

veya

$$\sigma_p = e[\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p] G \quad (2.16.)$$

ifadesi ile verilir. Bu ifadede μ_n ve μ_p elektron ve yaygın düzeylerdeki mobiliteleridir.

G elektron hole çifti üretim hızı,

$$G = F(1 - R)\eta(1 - \exp(-\alpha d)) \quad (2.17.)$$

eşitliğinden hesaplanabilir. Burada η , kuantum verimliliği, F, foton akısı, R yansımaya katsayısı, α , optik soğurma katsayısı ve d filmin kalınlığını göstermektedir.

Fotoiletkenliğe, hollere oranla mobilitesi daha büyük olan elektronların hakim olduğu kabul edilirse

$$\sigma_p = e[\mu_n \tau_n]G \quad (2.18.)$$

$$\sigma_p = eF(1 - R)\frac{1 - e^{-\alpha d}}{d}\eta\mu_n\tau_n \quad (2.19.)$$

yazılabilir. Çoğunluk taşıyıcılar olarak elektronlar kabul edildiğine göre, fotoiletkenlik elektronların sözde Fermi düzeyi (Quasi-Fermi Level) cinsinden tanımlanabilir:

$$\sigma_p = \sigma_0 \exp\left[-(E_c - E_q)/kT\right] \quad (2.20.)$$

veya

$$E_c - E_q \approx kT \ln(150 / \sigma_p) \quad (2.21.)$$

Bu eşitlikten σ_0 , a-Si:H için yaklaşıklık olarak $150 (\Omega \text{ cm})^{-1}$ olarak kabul edilmiştir (Stuke, 1987). Bir malzeme üzerine ışık düşürüldüğünde karanlık ortamda bant ortasında yer alan Fermi enerjisi elektronlar ve holler için olmak üzere iki sözde Fermi enerji düzeyi oluşmasına neden olur. Elektronlar ve holler için tanımlanan sözde Fermi enerjilerinin arası etkin yeniden birleşme merkezleridir. Dışarda kalan düzeyler ise, elektron ve deşikler için tuzak olarak davranırlar. Sıcaklığın düşürülmesi ya da ışık şiddetinin artırılması elektron ve hole sözde Fermi enerjisi düzeylerinin bant uzantılarına doğru kayarak yeniden birleşme merkezlerinin sayısının artmasına sebep olur. Fotoiletkenlik fototaşıyıcıların üretim hızına üstel olarak bağlıdır. Bu bağımlılık,

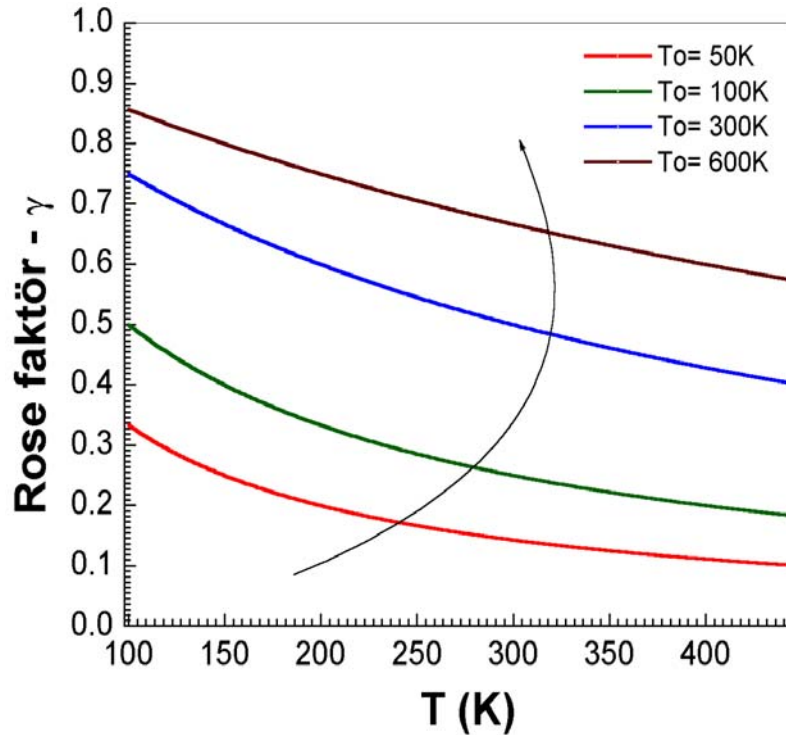
$$\sigma_p \propto G^\gamma \quad (2.22.)$$

şeklinde yazılabilir. γ , örneğe ve fotoiletkenliğin ölçüldüğü sıcaklığa bağlı olarak 0,5 ile 1 arasında değişir. Bant uzantıları yerleşmiş enerji düzey yoğunluğu enerji düzey yoğunluğuna üstel bir fonksiyonla bağlı ise fotoiletkenliğin fototaşıyıcıların üretim hızına yukarıdaki gibi bağlı olduğu Rose (1963) tarafından gösterilmiştir. Rose'un modelinde γ ,

$$\gamma = \left(\frac{T_0}{T_0 + T} \right) \quad (2.23.)$$

olarak hesaplanmıştır. Şekil 2.17.'de denklem (2.23.)'de verilen ifadenin fonksiyonel çizmi verilmektedir. Bu eşitlikte T deneyin yapıldığı sıcaklık, T_0 ise değerlik bandı uzantısının genişliğini ölçen ve bazen karakteristik sıcaklık olarak isimlendirilen sıcaklıktır (Andriaennes et. al., 1995). Ancak sadece enerjiye üstel bağlı bant uzantıları kullanılarak a-Si:H'da gözlenen γ 'nın değişimini açıklamak mümkün değildir.

Fotoiletkenliğin büyüklüğü taşıyıcıların üretimi ve yeniden birleşmesi arasındaki denge ile belirlenirken tuzaklanma bu büyüklük üzerinde sadece küçük değişimlere neden olur. Asimetrik bant uzantıları, farklı yük durumlarında kopuk bağlar ve taşıyıcı türüne hassas düzeylerin varlığı a-Si:H'da gözlenen fotoiletkenliğin sıcaklık bağımlılığının açıklanmasını güçleştirir (Tran, 1955, Smail and Mohammed-Brahim, 1991).



Şekil 2.17. Farklı karakteristik sıcaklık değerleri (T_0) için çizilmiş Rose faktörü değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri.

2.9. CPM (sabit fotoakım yöntemi)

Sabit fotoakım yöntemi, CPM, yasak enerji aralığında yerleşmiş enerji düzeyleri bulunan yarıiletkenlerin bantaltı bölgesinin optik ve elektriksel özelliklerinin belirlenebilmesinde kullanılan yöntemlerden biridir.

Sabit fotoakım yönteminde, düşük soğurma katsayılarının belirlenmesi için deneğin daldaboyuna bağlı foto iletkenliği kullanılır. İletkenliği baskın olarak elektronların belirlediği bir yarıiletkenin fotoiletkenliği,

$$\sigma_p = e\mu_n\tau_n F(1-R)\eta \frac{1-e^{-\alpha d}}{d} \quad (2.24.)$$

ile verilir. Düşük soğurma katsayıları için (2.24.)

$$\sigma_p = e\mu_n\tau_n F(1-R)\eta\alpha \quad (2.25.)$$

biçiminde yazılabilir.

CPM deneyinin yapıldığı foton enerjisi aralığında optik yansıma verisi, $R(E)$, foton enerjisine oldukça zayıf bağlıdır. Optik yansıma deneyi yaparak hesaplamalara katılabilir. Kuantum verimliliği η , 150-300 K sıcaklık aralığında, aynı foton enerjisi değerlerinde 1 olarak bulunmuştur. Diğer çarpanlar yanında $R(E)$ ve η için yapılan kabullerden gelecek hata yok sayılabilir.

Denklem (2.25.)'de foton enerjisine en çok bağlı değişken, ömür süresi, τ_n 'dir. Sözde Fermi enerji düzeyinin iletkenlik bandına göre konumu, deney değişmez sıcaklıkta yapıldığından, foton akısına bağlıdır. Sözde Fermi enerji düzeylerinin birbirine olan uzaklığının değişimi ile τ_n , ömür süresi, birbirine ters çalışır. τ_n 'in değerinin değişmemesi için sözde Fermi düzeylerinin konumlarının deney süresince değişmez tutulması gerekmektedir. Fotoakım değişmez tutularak sözde Fermi enerji düzeylerinin ölçüm süresince değişmez kalması sağlanır. Fotoakımın belirlenen bir değerde tutulması foton akısının ayarlanması ile elde edilebilir. Akımın deney boyunca değişmezliği sağlandığında,

$$\alpha(h\nu) = \frac{\text{sabit}}{F(h\nu)} \quad (2.26.)$$

yazılabilir. Bu eşitliğe göre, herbir dalgaboyunda, fotoakımı sabit tutmak üzere foton akısının ayarlanması, foton enerjisine bağlı soğurma katsayısının bulunmasını sağlar.

CPM deneyi ile ancak, $\alpha(h\nu)d \ll 1$ koşulunun sağlandığı bölge için, doğru soğurma katsayıları elde edilebilir. Fakat bu veri bağıldır, başka bir deyişle gerçek optik soğurma katsayıları ile orantılıdır. Orantı katsayısının bulunabilmesi için, spektrumun en az bir kaç noktasında gerçek soğurma katsayısı değeri bilinmelidir. Optik soğurma katsayısının yüksek soğurma bölgesi ($\alpha(h\nu)d > 1$), optik geçirgenlik ölçülerinden hesaplanabilir. Optik geçirgenlik ölçülerinden hesaplanan soğurma katsayıları kullanılarak CPM verilerinin mutlak değerlerine gidilebilir.

2.10. Çift Monokromatik Demet Fotoiletkenlik Ölçümü İle Yakın Kırmızıaltı Soğurma Değerinin Hesaplanması

Fotoiletkenlik genel olarak;

$$\sigma_p = e \tau_n \mu_n F (1 - R) \eta \left[\frac{1 - e^{-\alpha d}}{d} \right] \quad (2.27.)$$

ile ifade edilir. Denklem (2.27.)'de verilen fotoiletkenlik ifadesini farklı 2 dalga boyu değeri için yazıp oranlanırsa;

$$\sigma_p(\lambda_1) = e \tau_n \mu_n \eta F(\lambda_1) [1 - R(\lambda_1)] \left[\frac{1 - e^{-\alpha(\lambda_1)d}}{d} \right] \quad (2.28.a.)$$

$$\sigma_p(\lambda_2) = e \tau_n \mu_n \eta F(\lambda_2) [1 - R(\lambda_2)] \left[\frac{1 - e^{-\alpha(\lambda_2)d}}{d} \right] \quad (2.28.b.)$$

$$\frac{\sigma_p(\lambda_1)}{\sigma_p(\lambda_2)} = \frac{e \tau_n \mu_n \eta F(\lambda_1) [1 - R(\lambda_1)] \left[\frac{1 - e^{-\alpha(\lambda_1)d}}{d} \right]}{e \tau_n \mu_n \eta F(\lambda_2) [1 - R(\lambda_2)] \left[\frac{1 - e^{-\alpha(\lambda_2)d}}{d} \right]} \quad (2.29.)$$

elde edilir. Eğer $R(\lambda_1) \approx R(\lambda_2)$ olduğunu varsayarsak denklem (2.29.);

$$\frac{\sigma_p(\lambda_1) F(\lambda_2)}{\sigma_p(\lambda_2) F(\lambda_1)} = \frac{[1 - e^{-\alpha(\lambda_1)d}]}{[1 - e^{-\alpha(\lambda_2)d}]} \quad (2.30.)$$

halini alır. Denklem (2.30.)'daki $\alpha(\lambda_1)$ 'yı hesaplamak için her iki tarafın Ln logaritmasını alınır, $\lambda_2=656$ nm ve $\lambda_1=950$ nm değerleri için 950 nm deki soğurma katsayısı hesaplanabilir (denklem (2.31.)).

Bant üstü ve bant altı bölgede monokromatik bir kaynakla uyarma sonucu elde edilen foton akısına bağlı fotoiletkenlik ölçüm sonuçları kullanılarak, örneklerdeki

kusur yoğunluğu hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan fotoiletkenlik ifadesi denklem (2.31.)'de verilmektedir.

$$\alpha_{at\ 950\ nm} = -\frac{1}{d} \ln \left[1 - \frac{\sigma_{at\ 950\ nm} F_{at\ 656\ nm}}{\sigma_{at\ 656\ nm} F_{at\ 950\ nm}} \left(1 - e^{-\alpha_{at\ 656\ nm} d} \right) \right] \quad (2.31.)$$

2.11. Fotoiletkenlik Tepki Süresi

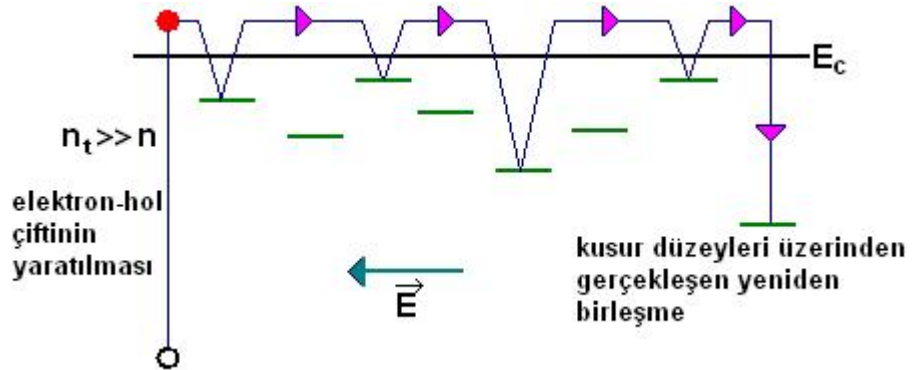
Fotoiletkenlik ve fotoiletkenlik sönüm zamanı ölçümlerinden gidilerek drift mobilitenin belirlenebilmesi için iki koşulun sağlanması gereklidir (Moustakas et. al., 1975, Hoheisel et. al., 1988). Bu koşullar:

- Fotoakıma yalnız elektron (veya hollerin) katkısı olmalıdır.
- Yeniden birleşme, başat olarak, iletkenlik bandındaki elektronların kopuk bağlar üzerinden hollerle birleşmesi ile olmalıdır ve tek bir zaman sabiti ile belirlenmelidir.

Homojen bir ışık kaynağı ile aydınlatılan bir örneğin fotoiletkenliği elektron-hol üretim hızı (G) cinsinden;

$$\sigma_p = e\mu\tau G \quad (2.32.)$$

ile ifade edilir. Bu ifade μ elektronun yaygın enerji düzeyi mobilitelerini, τ serbest elektronların yeniden birleşme zamanı (ömür süresi) dir.



Şekil 2.18. Çoklu tuzaklamalı iletim (Multiple trapping transport) modelinin şematik gösterimi.

Çoklu tuzaklamalı iletim modelinde (Şekil 2.18.), iletkenlik bandına uyarılan elektron, yeniden birleşmeye uğramadan önce yaygın enerji düzeylerindeki hareketi süresince bir çok kez bant uzantısı yerleşmiş enerji düzeylerinde tuzaklanırlar. Tuzaklanan elektron sıcaklığa ve tuzak enerji düzeyine bağlı olarak tuzaklandığı yerleşmiş enerji düzeyinde bir süre kalır. Elektronun tuzaklarda

kaldığı bu zaman “immobilization time” olarak bilinir ve tuzak derinliği ile attempt-to-escape frequency, ν , cinsinden aşağıdaki ifade ile tanımlanır:

$$t_{imb} = \nu^{-1} \exp[(E_c - E)/kT] \quad (2.33.)$$

Serbest elektron yeniden birleşme zamanı τ , elektronun uyarılması ile yeniden birleşmesi arasında yaygın enerji düzeylerinde kaldığı zamanı ifade eder. Elektronların uyarılmaları ile son yeniden birleşmesi arasında geçen zaman yani elektronun iletkenlik bandında ve tuzaklarda geçirdiği toplam süre bant uzantısı yeniden birleşme zamanı olarak tanımlanır. Elektronların bant uzantısı yeniden birleşme zamanı ile ilgili olan drift mobilite, μ_d ;

$$\mu_d = \mu \frac{\overline{t_{serbest}}}{\overline{t_{serbest}} + \overline{t_{tuzak}}} \quad (2.34.)$$

ifadesinde, $\overline{t_{serbest}}$ elektronun iki tuzaklama arasında yaygın enerji düzeylerinde ortalama bulunma ve $\overline{t_{tuzak}}$ elektronun bir tuzakta ortalama kalma süresidir. n iletkenlik bandına uyarılmış serbest, n_t iletkenlik bandı uzantısı yerleşmiş enerji düzeylerinde tuzaklanmış elektronların yoğunluğu olmak üzere, iletkenlik bandına uyarılmış serbest ve tuzaklanmış elektronların toplam sayısı;

$$(n + n_t) = G \tau_{BT} \quad (2.35.)$$

ile ifade edilir. 100-420 K sıcaklık aralığında $n_t \gg n$ 'dir (Hoheisel et. al., 1988).

Bant uzantısı yeniden birleşme zamanı (τ_{BT}) olmak üzere;

$$\mu_d = \mu \frac{\tau}{\tau_{BT}} = \mu \frac{n/G}{(n + n_t)/G} = \mu \frac{n}{n + n_t} \quad (2.36.)$$

$$\sigma_p = e \mu_d \tau_{BT} G = e \mu \tau G \quad (2.37.)$$

olarak ifade edilir.

Eğer yeniden birleşme yaygın enerji düzeylerinden oluyorsa ve tek bir zaman sabiti üzerinden tanımlanabiliyorsa fotoiletkenlik sönüm zamanı, τ_s , bant uzantısı yeniden birleşme zamanına eşittir;

$$\tau_s = \tau_{BT} = \tau \frac{n}{n + n_t} \quad (2.38.)$$

Yeniden birleşme tek bir zaman sabiti ile belirlenebiliyorsa, fotoakım;

$$I_p(t) = I_p(0) e^{-t/\tau_s} \quad (2.39.)$$

olarak ifade edilir. τ_s sönüm eğrisinin $t \rightarrow 0$ için eğiminden ölçülebilir.

$$\frac{1}{\tau_s} = - \frac{1}{I_p(0)} \left. \frac{dI_p}{dt} \right|_{t=0} \quad (2.40.)$$

Elektronların drift mobilitesi ölçülebilir büyüklükler cinsinden

$$\mu_d = \frac{\sigma_p / eG}{\tau_s} \quad (2.41.)$$

olarak ifade edilir. a-Si:H alaşımlarda fotoiletkenlik elektron ve hollerin üretim hızına bağlı olduklarından

$$\mu\tau = \frac{\sigma_p}{eG} \propto G^{\gamma-1} \quad (2.42.)$$

ve fotoiletkenlik sönüm zamanı da G'nin bir fonksiyonu olduğundan

$$\tau_s \approx G^{-\beta} \quad (2.43.)$$

olarak yazılabilir (Andriaennes et. al., 1995). Eğer μ_d 'nin, σ_p ve τ_s 'den hesaplanması için yapılan yaklaşım doğru ise denklem (2.41.)'in G'den bağımsız olması gerekir.

$$\beta = 1 - \gamma \quad (2.44.)$$

γ sıcaklığa bağlıdır (Fritzsche v.d. 1992) o halde β 'da sıcaklığa bağımlı olmalıdır.

Andriaennes drift mobilitenin G'ye bağımlılığını,

$$\mu_d \propto G^{2\gamma-1} \quad (2.45.)$$

olarak verilmektedir. Ölçülen fotoiletkenlik sönüm süresinin, bant uzantısı yeniden birleşme zamanına (τ_{BT}) eşit olması koşulu ise

$$\beta = \gamma \quad (2.46.)$$

olarak verilmektedir. Bu koşul diğer koşuldan farklıdır ve (2.46.) ifadesi sağlanırsa (2.41.) ifadesi ile verilen kararlı durum fotoiletkenlik ve fotoiletkenlik sönüm zamanı ölçümlerinden gidilerek elektronların drift mobilitesi bulunabilir.

τ_s , G ye ve sıcaklık bağımlıdır ve Dersch, Schweitzer ve Stuke (1983) tarafından önerilen modele göre yeniden birleşme kopuk bağlar üzerinden olmaktadır. Yeniden birleşme, yüksek sıcaklıklarda yaygın düzeylerdeki elektronların kopuk bağlar tarafından yakalanmasıyla gerçekleşirken, alçak sıcaklıklarda ise bant uzantısı yerleşmiş enerji düzeylerinde tuzaklanmış elektronların kopuk bağlara tünellemesi ile gerçekleşir. Tuzaklardan iletkenlik bandına uyarılma ve yeniden birleşme göz önüne alınarak birim hacimdeki serbest ve tuzaklanmış elektronların sayısının zamanla değişimi serbest elektronlar için:

$$\frac{dn}{dt} = G - \nu_0 \frac{N_t}{N_c} n + \nu_0 n_t e^{-[(E_c - E_t)/kT]} - \frac{n}{\tau} \quad (2.47.)$$

Burada, ν_0 , N_t ve E_t , sırasıyla “attempt to escape frequency”, birim hacimdeki tuzak sayısı ve tuzak enerjisidir. Bu eşitlikte ikinci ve üçüncü terimler sırasıyla, birim hacimde birim zamanda yakalanan ve tuzaklardan iletkenlik bandına uyrailan elektronların sayısını verir (Rose, 1963). Son terim ise elektronların kopuk bağlar üzerinden yeniden birleşmesini temsil ederve bu elektronların yeniden birleşme zamanı τ ’dur.

Benzer eşitlik birim hacimde tuzaklanan elektronlar için de yazılıp, iki denklem toplandığında,

$$\frac{d(n + n_t)}{dt} = G - \frac{n}{\tau} - \frac{n_t}{\tau_t} \quad (2.48.)$$

elde edilir. Işık kapatıldığında fotoakım τ_s ile üstel olarak azalırve bu da toplam elektron yoğunluğunun zamanla azalmasına bağlıdır.

$$\frac{d(n + n_t)}{dt} = - \frac{(n + n_t)}{\tau_s} \quad (2.49.)$$

(2.48.) ve (2.49.) birleştirilirse;

$$\frac{1}{\tau_s} = \frac{1}{\tau} \frac{n}{n + n_t} + \frac{1}{\tau_t} \frac{n_t}{n + n_t} \quad (2.50.)$$

bağıntısı elde edilir (Hoheisel ve Fuhs, 1988). Bu bağıntı yüksek ve alçak sıcaklıklarda incelenecek olursa;

i)Yüksek sıcaklıklarda serbest elektronların rekombinasyonu başattır ($\tau_t \gg \tau$)

Bu durumda

$$\tau_s \cong \tau \frac{n + n_t}{n} \cong \tau \frac{n_t}{n}, \quad n_t \gg n \quad (2.51.)$$

Etkin bir tuzak enerji düzeyi (E_t) tanımlanabiliyorsa;

$$\tau_s \cong \tau \frac{n_t}{n} \cong \tau \frac{N_t e^{[(E_c - E_t)/kT]}}{N_c} \quad (2.52.)$$

şeklinde yazılabilir. Yüksek sıcaklıklarda τ_s sıcaklığa Boltzmann faktörü ile bağlıdır.

ii) Düşük sıcaklıklarda tuzaklanmış elektronların tünelleme yolu ile kopuk bağlara geçişi başattır ($\tau \gg \tau_t$)

$$\tau_s \cong \tau_t \frac{n + n_t}{n_t} \cong \tau_t \quad (2.53.)$$

olur. Bu durumda tünelleme ile olan yeniden birleşme zaman sabiti τ_t , fotoakım sönüm zamanını belirler. τ_t sıcaklığa büyük ölçüde bağlı olmayacağı için düşük sıcaklıklarda τ_s 'nin doyuma gitmesi beklenir.

2.12. Kırmızıaltı Spektroskopisi (FTIR)

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum ince filmlerindeki hidrojen ve silisyumun, sayıca yoğunlukları ve farklı bağlanma konfigürasyonları, filmin optik ve elektriksel özelliklerinin şekillenmesinde önemli rol oynar. Bu bakımdan ince film olarak hazırlanan bir a-Si:H örneğin yapısında bulunana hidrojen miktarının yada olası Si-H bağlanma modlarının tahmin edilebilmesi amacıyla genellikle kırmızıaltı spektroskopisi yöntemine başvurulur. Bu yöntemde, örneğin kırmızıaltı geçirgenlik spektrumuna bakılarak yapıdaki atomlar arası bağ konfigürasyonları ve bu bağ yapılarına katılmış hidrojen oranı hakkında bilgi edilir. Örneğin kırmızıaltı spektroskopisi ve kalınlığı kullanılarak soğurma spektrumu hesaplanabilir. Kırmızıaltı soğurma spektrumu elde edilen örneğin içerisinde hangi titreşim modlarının aktif olduğu, spektrumdaki soğurma tepelerinin tanımlanmasıyla mümkündür (Shanks et. al., 1980). Bu amaçla Şekil 2.19'da Lucovsky, Nemanich ve Knights'in 1979 yılındaki çalışmasından alınmış, bağlanma konfigürasyonlarını tanımlayan atomik temsili ile çizilmiş bağ yapıları verilmektedir.

a-Si:H örgüde, yapıdaki hidrojenle ilişkili olarak Si-H bağı soğurma dalgasayısı değerleri genellikle 630cm^{-1} ve 2000cm^{-1} değerlerine karşılık gelir. Tanımlanan bu bantlara ek olarak a-Si:H örneklerde gözlemlenebilecek diğer titreşim bantlarının da hangi titreşim modlarında karşılık geldiği Şekil 2.19'da tanımlanmıştır. Tanımlanan bu soğurma bantlarına ek olarak 630 ve 2000cm^{-1} bandının farklı bantlara yarıldığı durumlar da literetürde rapor edilmiştir (Strayhilev et. al., 2000). (111) doğrultusunda kristal silisyum üzerine hazırlanan $\mu\text{c-Si:H}$ filmlerde yapılan kırmızıaltı spektroskopisi ölçümleri, veri tabanına yeni titreşim bantlarının eklenmesine neden olmuştur. Bu bantlar Çizelge 2.2'de sıralanmaktadır.

Çizelge 2.2. (111) doğrultusunda kristal silisyum üzerine hazırlanmış hidrojenlendirilmiş mikrokristal silisyumunun karakteristik soğurma çizgileri.

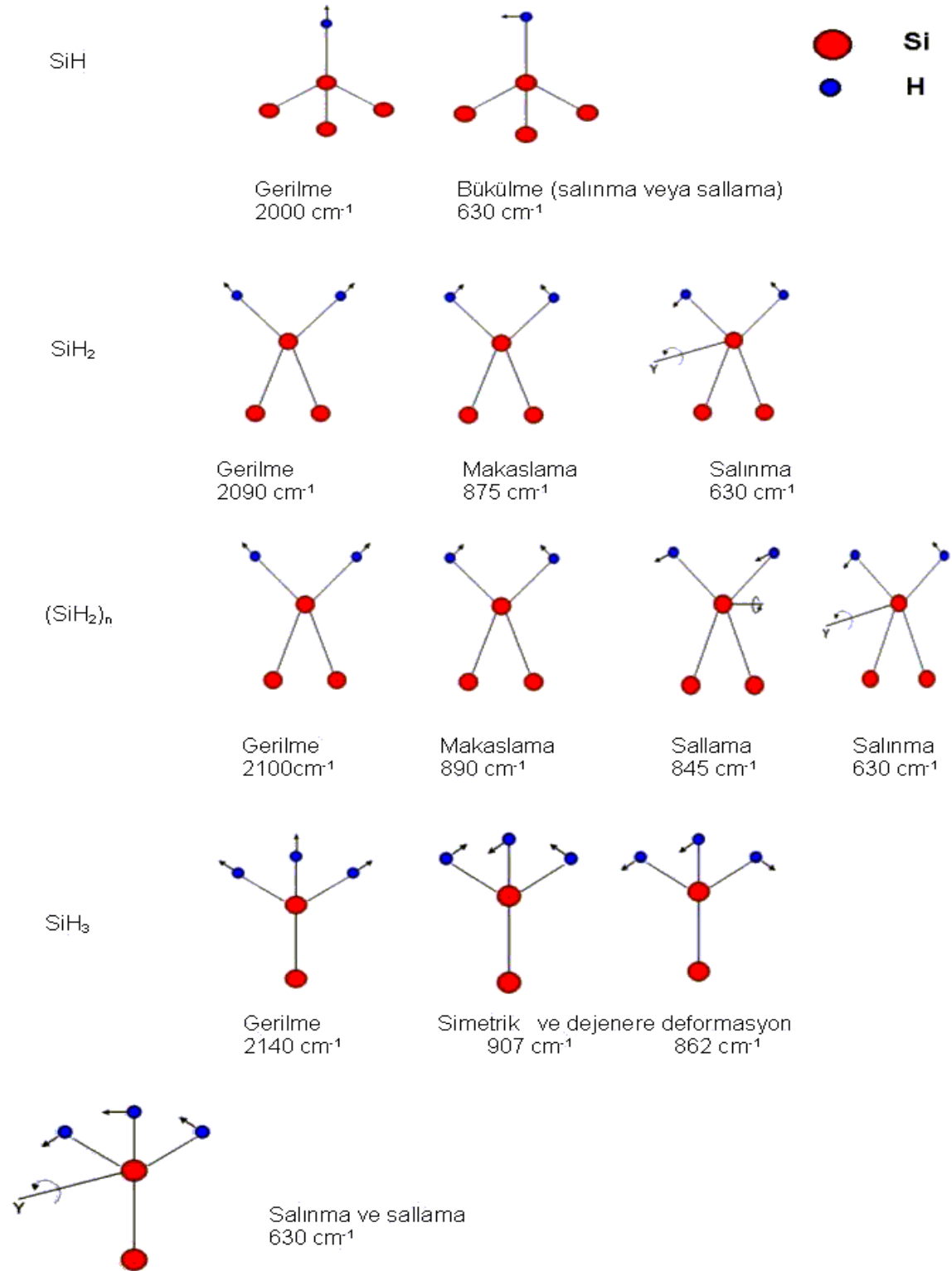
Soğurma tepesinin konumu dalgasayısı (cm ⁻¹)	Titreşim modu
620	SiH-(doğal rezonans) bükülme
660	SiH _n sallama, salınma ve SiH bükülme
855, 900, 910	SiH _n makaslama/ bükülme
2083	SiH ve SiH _n -(doğal rezonans) gerilme
2115,2135	SiH _n gerilme

Litertürde rapor edilen bir diğer çalışmada ise, a-Si:H örneklerde 2000 cm⁻¹ bandı civarında gözlemlenebilecek 2090 yada 2100 cm⁻¹ soğurma çizgisinin, amorf yapı içerisindeki void kesrinin artmasından yada hidrojenin yapıya multihidrat formunda (SiH₂ veya SiH₃) bağlanmasından kaynaklanabileceği yönünde gözlemler vardır (Lukovsky et. al., 1979). Bu bakımdan 2100 cm⁻¹ bandında gözlemlenecek bir soğurma tepesine yapılacak integrasyon işlemi yardımıyla, hazırlanan malzemenin paketlenme (compactness) miktarı hakkında bilgi edilebilir. Mikroyapı faktörü (R^{*}) ile verilen bu ifade ile paketleme kelimesine nicel bir tanım kazandırmıştır. I_i ilgilenilen soğurma bandındaki integrasyonun değerini temsil etmektedir.

$$I_i = \int_{Bant} \frac{\alpha_i(\omega)}{\omega} d\omega \quad (2.54.)$$

R^{*} ise denklem 2.55. ile verilir.

$$R^* = \frac{I_{2100}}{I_{2100} + I_{2000}} \quad (2.55.)$$



Şekil 2.19. SiH_2 , $(\text{SiH}_2)_n$ ve SiH_3 grupları için Si-H bağı titreşim modlarının temsili.

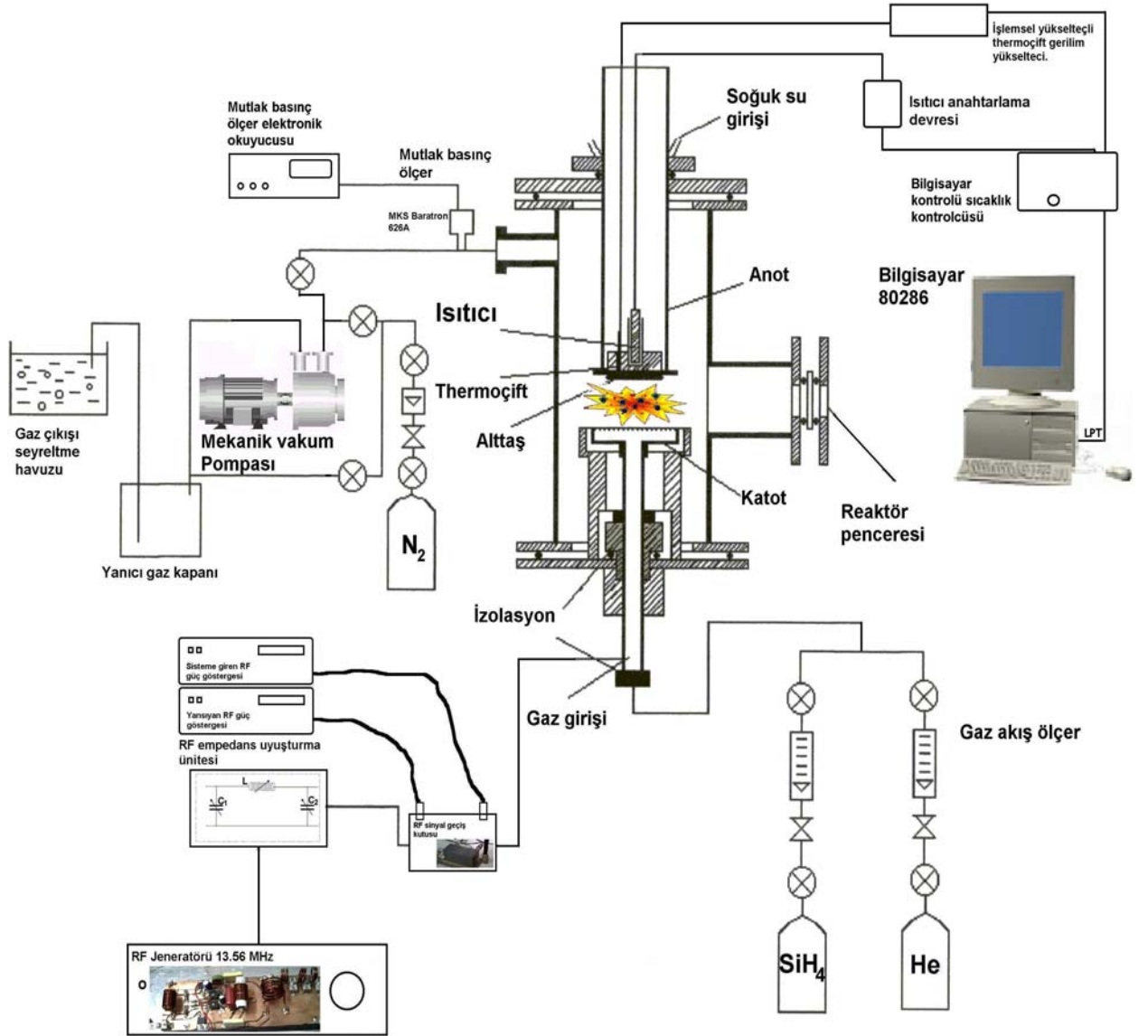
2100 cm⁻¹ soğurma çizgisinden yoksun olan bir spektrumda R^{*}'in sıfıra eşit olacağı açıktır. R^{*} < 0,1 olması arzu edilen bir durumdur. Çünkü bu durumda, mikro boşluk oranı oldukça küçülmüş ve bu şekilde de paketlenme faktörü daha büyük bir orana ulaşmış olacaktır. Bu nedenle 2100 cm⁻¹ soğurma bandının olmaması tercih edilen bir durumdur. Mikro boşluk oranının küçülmesi, paketlenme faktörünün büyüterek yapının daha rijit olabileceğini ifade etmektedir (Lukovsky et. al., 1979).

3. DENEYSEL YÖNTEMLER VE TEZ SÜRESİNDE KURULAN ÖLÇÜM DÜZENEKLERİ

3.1. PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) Sistemi

Bu tez çalışmasındaki tüm a-Si:H örnekler Şekil 3.1 ile tanıtılan plazma biriktirme sisteminde hazırlanmıştır. Sistem ana hatlarıyla içersinde plazmanın elde edildiği reaktör, silan gazının bileşenlerine ayrılması için RF gerilimi uygulayan RF jeneratörü, reaktör odacığına kontrollü bir şekilde gaz akışını sağlayan iğne vana, akış ölçerler ve regülatörler ile çıkıştaki mekanik vakum pompasından oluşmaktadır. Paslanmaz çelikten yapılan reaktör, kapasitif elektrotlu olup anottan ısıtılmalıdır (İlker Ay, H.Ü. Bilim Uzmanlığı Tezi, 2000). Silan ve diğer gazlar, katoda yerleştirilen duş başlığı şeklindeki paslanmaz çelikten yapılmış bir elektroda kılcal bir boru yardımıyla reaktöre sürülmektedir. İnce film örnekler, anot yüzeyi üzerine yerleştirilen bir maske yardımıyla, kuvarz ve corning7059 türü alttaşlar üzerine büyütülmüştür. Alttaş sıcaklığı, anot diskin arka yüzeyine yerleştirilmiş, oda sıcaklığındaki direnci yaklaşık 80 Ω olan Cr-Ni telden sarılmış bir ısıtıcı yardımıyla 25-400 °C arasında kontrol edilebilmektedir. Alttaş ısıtıcısının istenilen sıcaklık değerine ayarlanması, tez çalışması sürecinde tasarlanıp geliştirilen sıcaklık kontrolcüsü yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

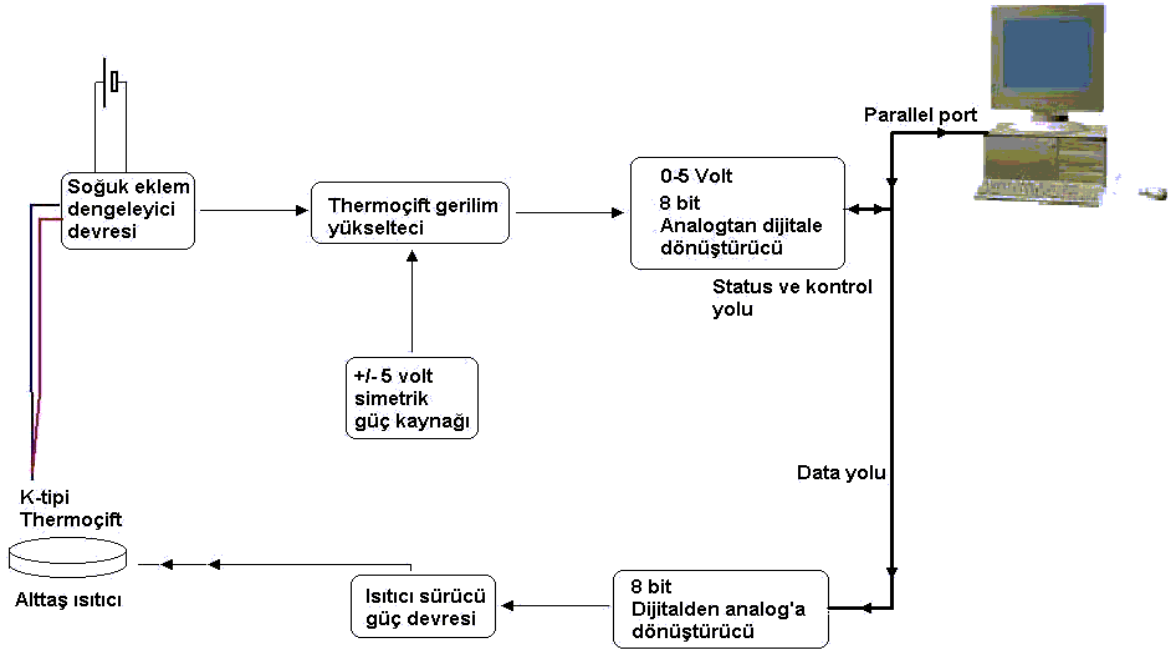
PECVD sisteminde kullanılan RF jeneratörü ve RF sinyal ekipmanları tez çalışması sürecinde tasarlanıp geliştirilmiş olup, RF jeneratörünün ürettiği sinüzoidal formdaki RF sinyallerinin osilasyon frekansı 13,56 MHz ve maksimum çıkış gücü yaklaşık 30 W'tır. Plazma reaktöründe silan gazı ile plazma elde edildiğinde, silan gazı bileşenlerine ayrılarak bir kısmı alttaş üzerinde film oluşumuna katkıda bulunurken, bir kısmı da açığa çıkan hidrojen gazı ile birlikte vakum pompasının egzozundan dışarıya atılır. Reaktördeki gazların akış hızı çok az da olsa, egzozdan çıkış silan gazının atılması söz konusudur. Bu sebeple, vakum pompasının egzoz çıkışına iğne vana, akış ölçer ve regülatörden oluşan ayrı bir gaz hattı ile bol miktarda azot verilmelidir. Egzozdan çıkan bu gaz karışımı, bir su kabı ve suyun vakum pompasına kaçmasını önleyen bir tuzaktan geçirilerek atmosfere atılır.



Şekil 3.1. PECVD sisteminin blok diyagramı.

3.1.1. PECVD sistemi sıcaklık kontrolcüsünün tasarımı ve gerçekleştirilmesi

Şekil 3.2’de plazma biriktirme sisteminde kullanılmakta olan sıcaklık kontrolcüsünün blok diyagramı verilmektedir. Sıcaklık kontrolcüsü oda sıcaklığıyla 400 °C sıcaklık aralığında kontrol yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Sistemde, sıcaklık sensörü olarak ısıtıcı içine gömülmüş K-tipi termoçift kullanılmaktadır. Termoçiftin ürettiği emk gerilimi öncelikle 273 kazanç değerine sahip termoçift gerilim yükseltici tarafından 273 kat yükseltgenerek, analogtan dijitale (A/D) dönüştürücü devresinin tam ölçüm sıklası aralığına uygun hale getirilmiştir. Bu şekilde, elde edilecek olan sıcaklık ölçüm çözünürlüğü ± 2 °C dir. Analogtan dijitale dönüştürücü devresi, Qbasic’te yazılan uygun yazılım yardımıyla, girişindeki gerilimle orantılı sıcaklık değerini hesaplayıp set (istenilen) sıcaklığına ulaşıp ulaşılmadığını test eder. Eğer set sıcaklığına ulaşılmadıysa dijitalden analog’a (D/A) dönüştürücü yardımıyla ısıtıcı anahtarlama devresine gerilim uygulayarak ısıtıcıya akım sürmeye başlar.

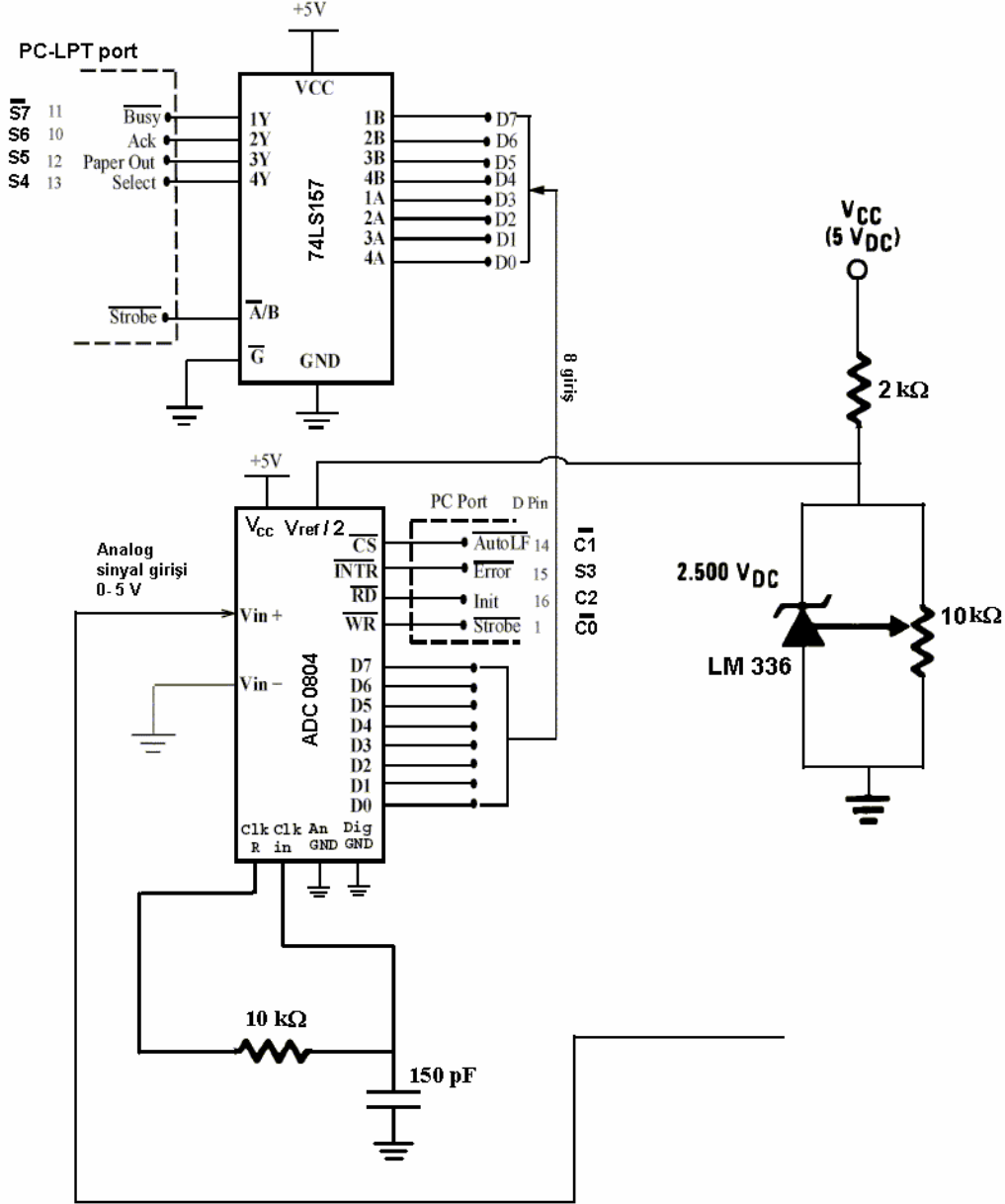


Şekil 3.2. PECVD sıcaklık kontrolcüsü blok diyagramı.

3.1.1.1. 8-bit 0-5 V paralel port kontrollü A/D çevirici

Bu devre Şekil 3.3'te verildiği gibi 8 bitlik paralel modda çalışan A/D (ADC0804), dörtlü iki girişli dijital çoklayıcı (multiplexer 74LS157) ve referans gerilim zener diyetundan oluşmaktadır. A/D dönüştürücü devreleri yardımıyla yapılan ölçümün hatasız ve az gürültülü olması, yapılan ölçümlerin güvenilirliği açısından tercih edilen bir özelliktir. Yapılan ölçümler bir referans gerilimi ile değerlendirileceğinden, referans geriliminin oldukça kararlı olması, oda sıcaklığındaki değişimlerden etkilenmemesi oldukça önemlidir. Bu nedenle referans gerilim kaynağı olarak LM336-2.5 zener diyet kullanılmıştır. National Semiconductor firması tarafından üretilen sıcaklıktan bağımsız (0-70 °C) çalışan zener diyetun karalılığı 6 mV ve maksimum akım verebilme kapasitesi de 10 mA'dir.

Paralel port kontrollü A/D dönüştürücü devre kısaca şöyle çalışmaktadır. 74LS157 entegresi 4 konumlu bir anahtar gibi çalışmaktadır. $\bar{A}/B$ giriş uçları sıfır mantık düzeyine ulaştığında 1A-4A uçları aktif hale geçerler ve kendilerini 1Y-4Y uçlarına anahtarlamış olurlar. $\bar{A}/B$ giriş uçları bir mantık düzeyine ulaştığında 1B-4B uçları aktif hale geçerler ve kendilerini 1Y-4Y uçlarına anahtarlarlar. Dijital çoklayıcının (multiplexer) uçları, paralel portun status (durum) veri yoluna bağlanmıştır. Analogtan dijitale çevrim işlemi W/R ucuna pozitif kenar tetik sinyalinin ulaşmasıyla başlar. ADC0804 veri okumaya başlar başlamaz, S_3 ucuna bağlı olan INTR ucu aktifleşerek sıfır mantık düzeyine kayar. Bu durumda 8 bitlik bilgi 74LS157 entegresinin girişinde mandallanmıştır (latched). $\bar{A}/B$ giriş uçlarının sırasıyla 1 ve 0 mantık düzeylerine kayması 8 bitlik bilginin 4 bitlik guruplar halinde sırayla okunarak, ADC0804'e gönderilmesini sağlar. Qbasic'te hazırlanan yazılım yardımıyla dizgeler içine yazdırılan 8 bitlik 0-1 bilgi düzeyleri desimal sayı sistemine çevrilerek, fitting fonksiyonları yardımıyla sıcaklık değerine ulaşılır.

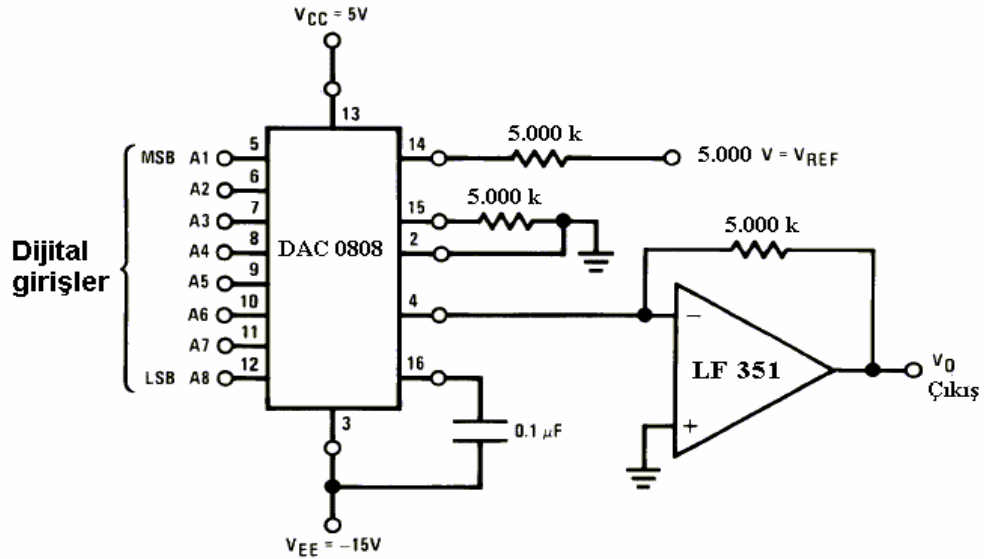


Şekil 3.3. 8-bit 0-5 V paralel port kontrollü A/D dönüştürücü devre şeması.

3.1.1.2. 8-bit 0-5 V paralel port kontrolü dijitalden analoga (D/A) çevirici

D/A dönüştürme işlemi National Semiconductor üretimi DAC0808 entegresi tarafından yapılmaktadır (Şekil 3.4.). Entegre, 8 bit paralel girişe sahiptir ve çıkışı akım kaynağı olarak çalışmaktadır. Paralel portun 8 bitlik data veri yolu bu entegre için rezerve edilmiştir. Qbasic'te hazırlanan program sayesinde öncelikle üretilmek istenen (0-5 V) gerilim, 0-256 arasındaki desimal sayıya çevrilir ve sonra da 8 bitlik veriye dönüştürülür. 8 bitlik sayı sistemine çevrilen veriler paralel portun data veri

yolu adresi kullanılarak çıkışa gönderilir. DAC0808 entegresinin çıkışı akım kaynağı olarak tasarlanmıştır. Bu yüzden üretilen akımın gerilime dönüştürülmesi gerekmektedir. LF351, akımdan gerilime dönüştürücü entegre olarak görev yapmakta olup, devrenin çıkışında elde edilen gerilim değeri $V_o = i_x R_f$ ile verilmektedir. Burada i_x işlemsel yükselteç entegresinin girişindeki akım değeri, R_f ($5\text{ k}\Omega$) ise geri besleme direncidir. LF 351 entegresi JFET girişli bir işlemsel yükselteç olarak üretilmiştir. Oldukça kararlı ve hızlı anahtarlama özelliği olan bu entegre daha sonra üzerinde sıkça duracağımız optoelektronik devre uygulamalarında kaçınılmaz bir ihtiyaç olarak kullanılacaktır. Şekil 3.4'de açık blok diyagramı verilen DAC0808 entegresinin temel çalışma prensibi toplayıcı işlemsel yükselteç devresi gibidir. 8 tane girişe sahip bir toplama devresinde, girişlerin 1 mantık düzeyinde olması 5 V, 0 mantık düzeyinde olması ise 0 V anlamına gelir. Doğrusal artım gösteren dirençler yardımıyla yükseltgenen gerilimler (0-5 V) sonuçta devrenin çıkışında elde edilecek gerilim değerini belirler.



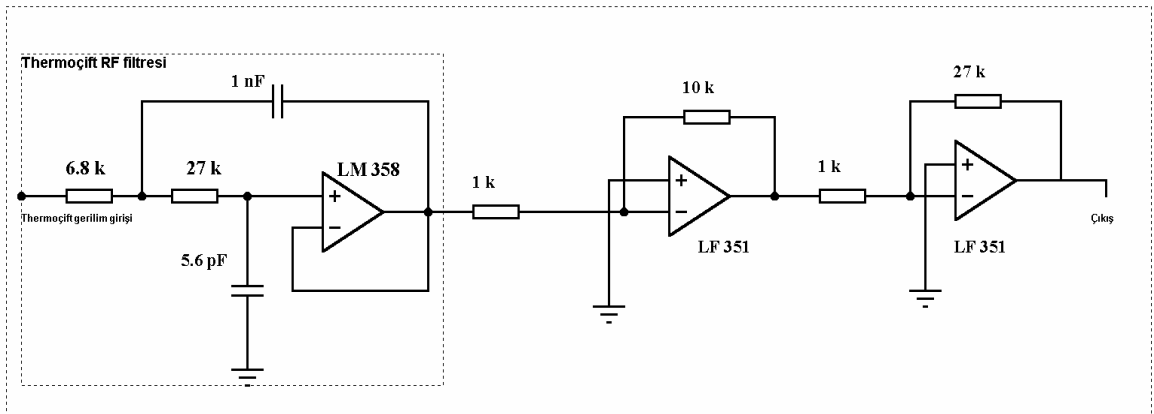
Şekil 3.4. 8-bit 0-5 V paralel port kontrollü D/A dönüştürücü devre şeması.

3.1.1.3. Termoçift gerilim yükseltici

Sıcaklık kontrolcüsünde kullanılan K tipi termoçiftin ürettiği gerilim mV mertebesinde. Oldukça düşük empedansa sahip olan K tipi termoçiftin ürettiği gerilimin A/D'nin aktif ölçüm aralığına yükseltgenmesi kaçınılmazdır. Bu durumda istenilen kontrol sıcaklığı aralığında ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $400\text{ }^{\circ}\text{C}$) termoçiftin ürettiği gerilimin yaklaşık 273 kat yükseltgenmesi gerekmektedir. PECVD sisteminde kullanılacak

olan termočiftin RF jeneratöründen yayılan elektromanyetik radyasyona alınan olması sıcaklık ölçümünü güçleştirmektedir. Böyle bir durumda, kullanılan RF jeneratörünün çıkış frekansındaki harmonik distorsiyon oranının düşük olması tercih edilen bir özelliktir. Sıcaklık ölçümü esnasında ortaya çıkabilecek RF girişim sinyallerini yükselticide filtrelemek en etkili yöntem olarak görünmektedir. Bunun yanı sıra, toprak hattı içine hapsedilmiş metalik bir kutu (faraday cage) istenmeyen elektronik gürültülerin filtrelenmesinde etkili olabilmektedir. Böyle bir durumda termočift gerilim yükseltecinin girişine, uygun seçilmiş geleneksel ters çeviren yükselteç devreleri ile tasarlanmış filtre devreleri kullanılabilir.

Şekil 3.5’de termočift gerilim yükselteci verilmektedir. Yükseltecin ilk kısmı LM358 entegresinden oluşmuş filtre devresidir. 13,56 MHz’lik filtreleme frekansına uygun olarak seçilmiş direnç ve kondansatörler, girişteki yüksek frekanslı sinyallerini söndürmektedir. İkinci kısımda kullanılan LF351 entegresi giriş gerilimini 10 kat, üçüncü kısımda kullanılan yükselteç ise 27,3 kat yükseltmektedir. Bu şekilde, toplam gerilim kazancı 273 kata ulaşmaktadır. Tasarlanan yükselteç devresi, termočift gerilimini, toprak gerilimini referans alarak değerlendirmektedir. Çoğu zaman dezavantaj gibi algılanan bu tür yükselteçler, RF sinyallerinin termočift gerilimi üzerine eklenmesini engelleyebilmektedir. Bu bakımdan ısıtıcı içine gömülen termočiftin sıcaklığa duyarlı noktasının toprak (şasi) ile elektriksel teması kesinlikle olmamalıdır. Aksi takdirde termočiftin ürettiği thermal emk gerilimin kısa devre olması durumuyla karşı karşıya kalınır.



Şekil 3.5. Termočift gerilim yükselteç devresi.

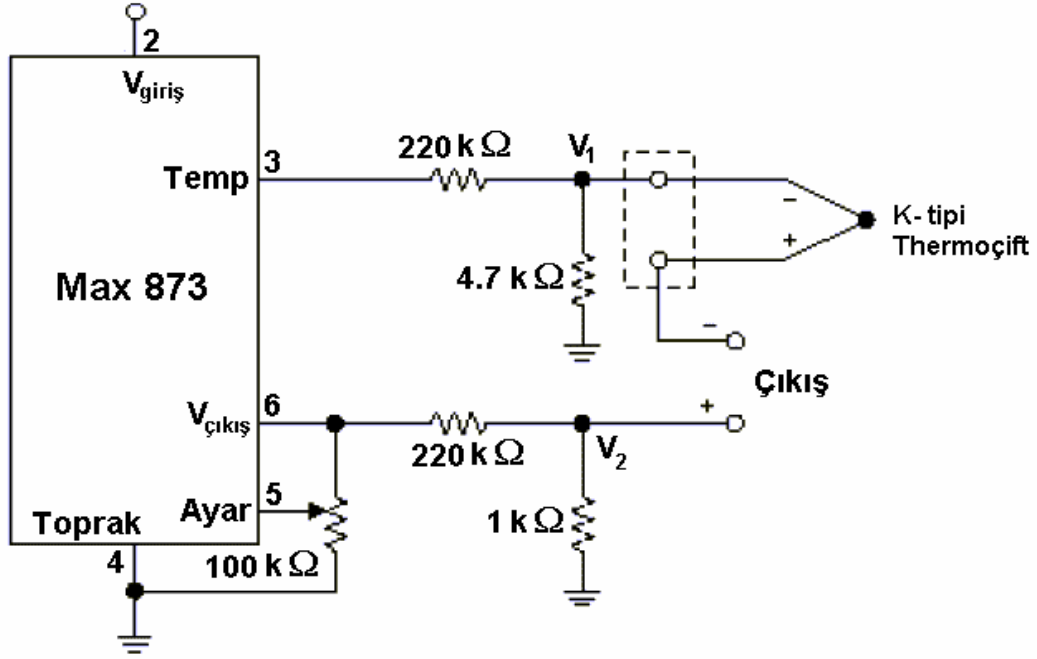
3.1.1.4. Soğuk eklem dengeleyicisi

K-tipi termoçift kromel ve alümel metal kontaklarından oluşturulur. Bu tür bir termoçiftin sıcaklığa karşı gerilim değerleri tezin en arka sayfalarındaki Çizelgede verilmektedir. Çizelge 3.1’de kullanılan metal türlerine göre sınıflandırılmış termoçiftler sıralanmaktadır.

Çizelge 3.1. Farklı kontak türlerine sahip termoçiftlerin seebeck parametreleri.

Termoçift Türü (ANSI standardı)	Seebeck parametresi
J (demir-konstantan)	52,3 μ V/°C
T (bakır- konstantan)	42,8 μ V/°C
K (kromel-alümel)	40,8 μ V/°C
S (platinyum-{ platinyum içinde % 10 rhodium})	6,4 μ V/°C

Termoçift gerilimin ölçülmesi sırasında karşılaşılan en büyük güçlük, kullanılan tüm iletken kontak noktalarının yarattığı termal emf gerilimidir. İstem dışı araya sokulan dc thermal emf gerilimleri, dış devre üzerinden zıt emk yaratılmasını sağlayarak gerçek termoçift geriliminin perdelenmesine neden olurlar. Bu yüzden sıfır V’luk referans emf’si yaratacak 0 derecedeki sıvıya gömülmüş ikincil bir termoçifte gereksinim duyulur. Sıcaklık ölçümüne bir külfet olarak giren bu gereksinim artık elektronik olarak araya sokulmuş soğuk eklem dengeleyicisi (cold junction compensation) devresiyle çok kolay bir duruma getirilmiştir. Dış ortamın sıcaklığındaki değişimlerle karşı, aynı periyotlu dc gerilim üreten bu devreler, kontak noktalarındaki thermal emf’yi ters polarize edecek yönde gerilim üretme kabiliyetine sahiptirler. Bu amaca uygun olarak Maxim firması tarafından üretilen MAX873 entegresi kullanıldı.



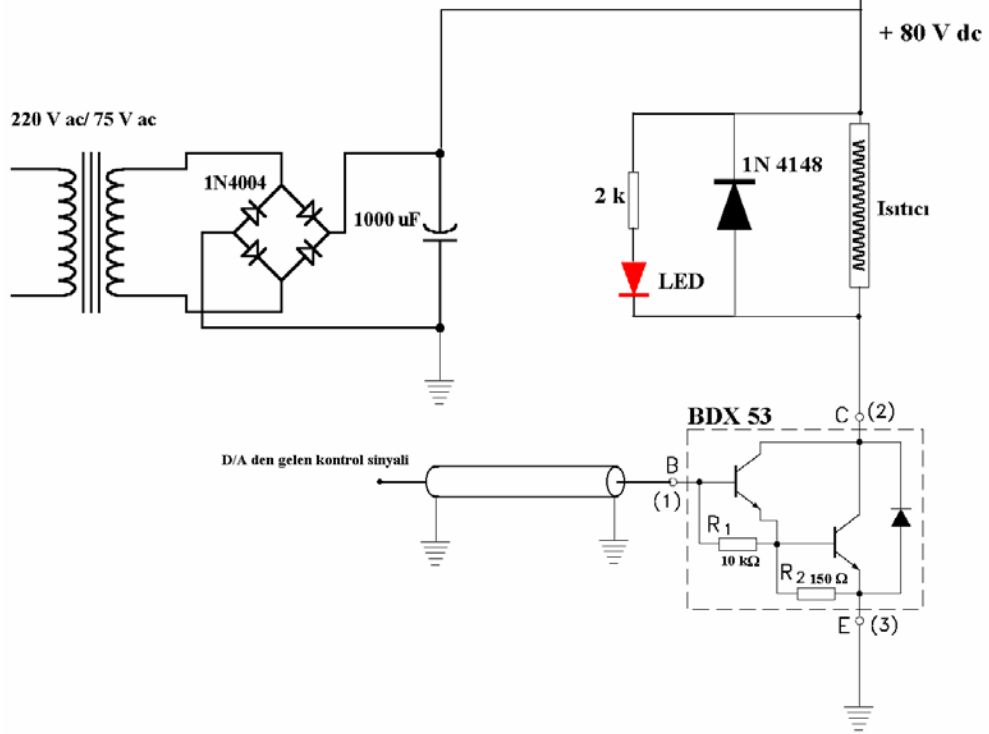
Şekil 3.6. Termoçift soğuk eklem dengeleyici devresi.

Hızlı sıcaklık değişimlerini takip edebilme yeteneğine sahip olan bu entegre, piyasada bu tür kullanım amacı için satışa sunulmuştur. Şekil 3.6'da MAX873 entegresi kullanılarak tasarlanmış soğuk eklem dengeleyici devresi verilmektedir. Entegrenin 2 nolu bacağına en az 4,5 V'luk bir pille beslenmesi gerekmektedir. Devrede kullanılan 4,7 ve 1 k Ω 'luk direçlerin değerleri, kullanılan termoçiftin Seebeck parametresi değerine uygun olarak seçilmiştir. Devrede verilen MAX873 entegresinin referans çıkışı 2,5 V olup, sıcaklık çıkış ucu ölçtüğü ortam sıcaklığı ile orantılı gerilim değerindedir. 25 $^{\circ}\text{C}$ 'lik oda sıcaklığında bu çıkış 608 mV'tur ve $^{\circ}\text{C}$ başına 2 mV (2 mV/ $^{\circ}\text{C}$) artar. Devre tasarladıktan sonra yapılacak ikinci işlem sıcaklık dengeleme kalibrasyon ayarıdır. Bunun için, V_1 ve V_2 noktaları arasındaki potansiyel farkı 0 V olacak şekilde, devrede verilen 100 k Ω 'luk ayarlı dirençle ayar yapılır.

3.1.1.5. Isıtıcı güç anahtarlama devresi

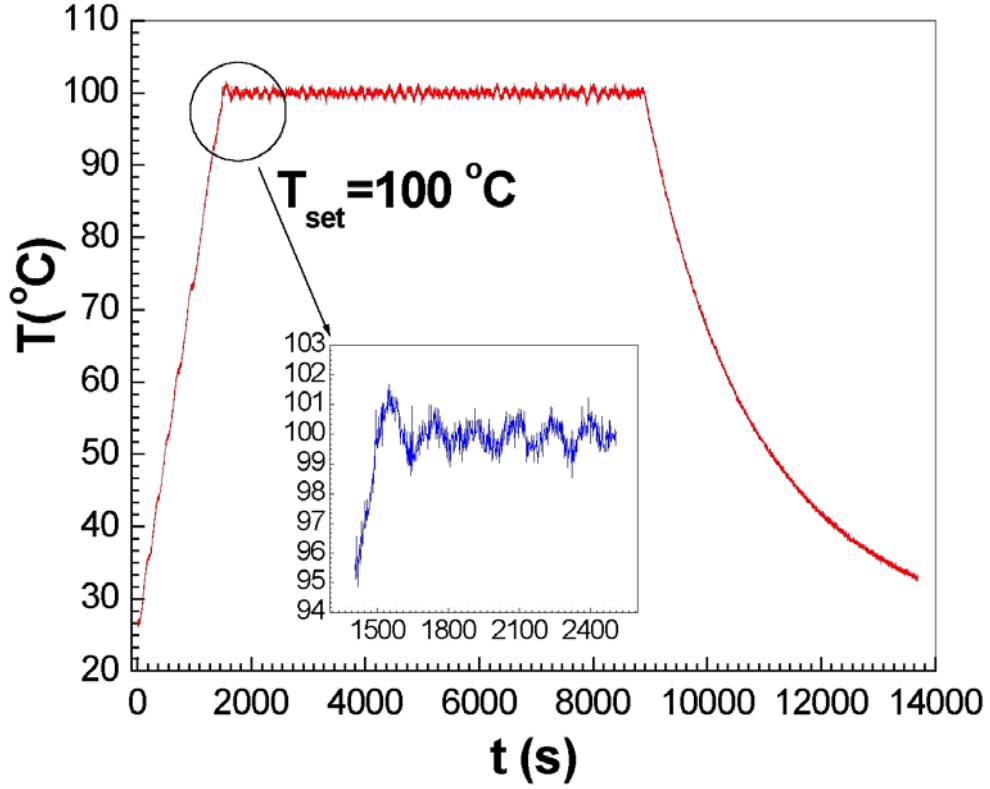
Güç anahtarlama devresi, D/A'den gelen kontrol sinyalinin 1-0 mantık düzeyine bağlı olarak bir tür hızlı röle (solid state relay) gibi görev yapmaktadır. Şekil 3.7'de güç anahtarlama devresinin açık şeması verilmektedir. Devrenin temel çalışma

prensibi tıpkı ortak emitörlü anahtarlama devresi gibidir. BDX 53 transistörü tek gövde içinde üretilmiş darlington transistördür.



Şekil 3.7. PECVD sisteminde kullanılan ısıtıcı anahtarlama devresi.

Devrede kullanılan bu darlingtonun yüksek kazanç değerine sahip olması, düşük V_{be} gerilimlerinde kollektörden yüksek akım çekilmesine olanak tanır. Isıtıcının 25 °C'deki direnci yaklaşık 100 Ω ve dc güç kaynağının ürettiği dc gerilim 83 V'tur. 83 V'luk gerilimin 20 V'u V_{CE} üzerine geriye kalan 63 V'u ise ısıtıcı üzerine düşmektedir. Böyle bir durumda V_{BE} uçlarındaki gerilim 0,67 V, I_c akımı ise 630 mA'dir.



Şekil 3.8. Bilgisayar kontrollü sıcaklık kontrolcüsünde 100 °C'lik oturma sıcaklığında zamana bağlı olarak kaydedilen sıcaklık değişimleri.

Şekil 3.8'de 25 W'lık RF gücü ile elde edilen plazma radyasyonunda, uygun bilgisayar yazılımıyla sıcaklık kontrolcüsünden toplanmış veriler sunulmaktadır. Yazılımda tanımlanmış parametreler şöyledir. Oturma sıcaklığı 100 °C, oturma sıcaklığında bekleme süresi 2 saat, sıcaklığın artım hızı (ramp) 0,25 °C/s'dir. Şekilde verilen grafik incelendiğinde sistemin yaklaşık 23 dakikada 100 °C oturma sıcaklığına ulaştığı ve beklenildiği gibi overshooting davranışı sergileyerek ± 2 °C'lik sıcaklık aralığında salınım yaptığı gözlemlenmektedir. PECVD sistemine tasarlanan böyle bir sıcaklık kontrolcünün avantajı, sıcaklığın istenilen ramp değerinde ve oturma sıcaklığında rahatça kontrol edilebilmesidir. Film hazırlama sürecinin bitiminde, ısıtıcının ani olarak kapatılıp sistemin oda sıcaklığına terk edilmesindense, tanımlanmış uygun ramp ve set sıcaklıklarında alttaşın kontrollü bir şekilde soğutulması hazırlanan örneklerin kalitesi açısından önem taşımaktadır.

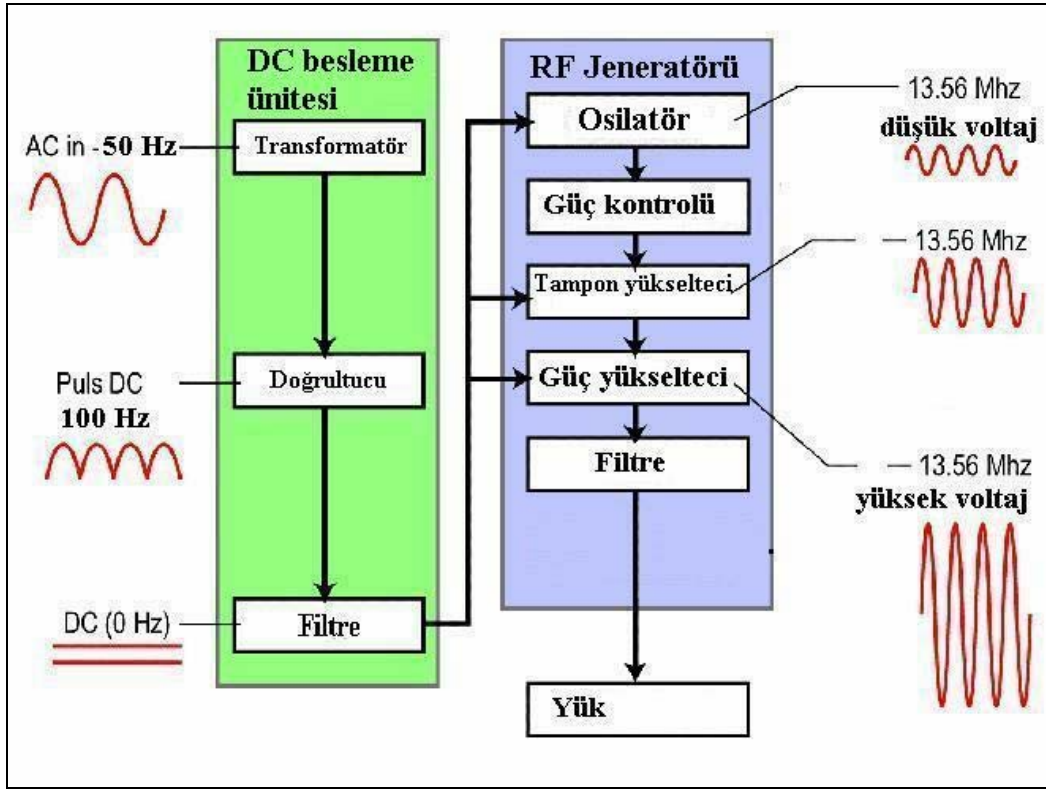
3.1.2. 13,56 MHz RF jeneratörü tasarımı, yapımı ve test sonuçları

Tasarlanan RF jeneratörünün blok diyagramı Şekil 3.9'da verilmektedir. RF jeneratörünün çıkış kalitesini etkileyen en önemli parametrelerden biri, jeneratör içinde kullanılan dc güç kaynağıdır. Bu bakımdan tasarım işlemine öncelikle dc güç kaynağından başlanılmıştır. Jeneratörün tasarımında aşağıda verilen adımlar izlenmiştir.

- 1- Dc besleme ünitesi
- 2- Osilatör
- 3- Tampon RF (Buffer) yükselteci
- 4- RF güç yükselteci
- 5- RF Güç ölçüm yöntemi
- 6- Empedans uyuşturucu

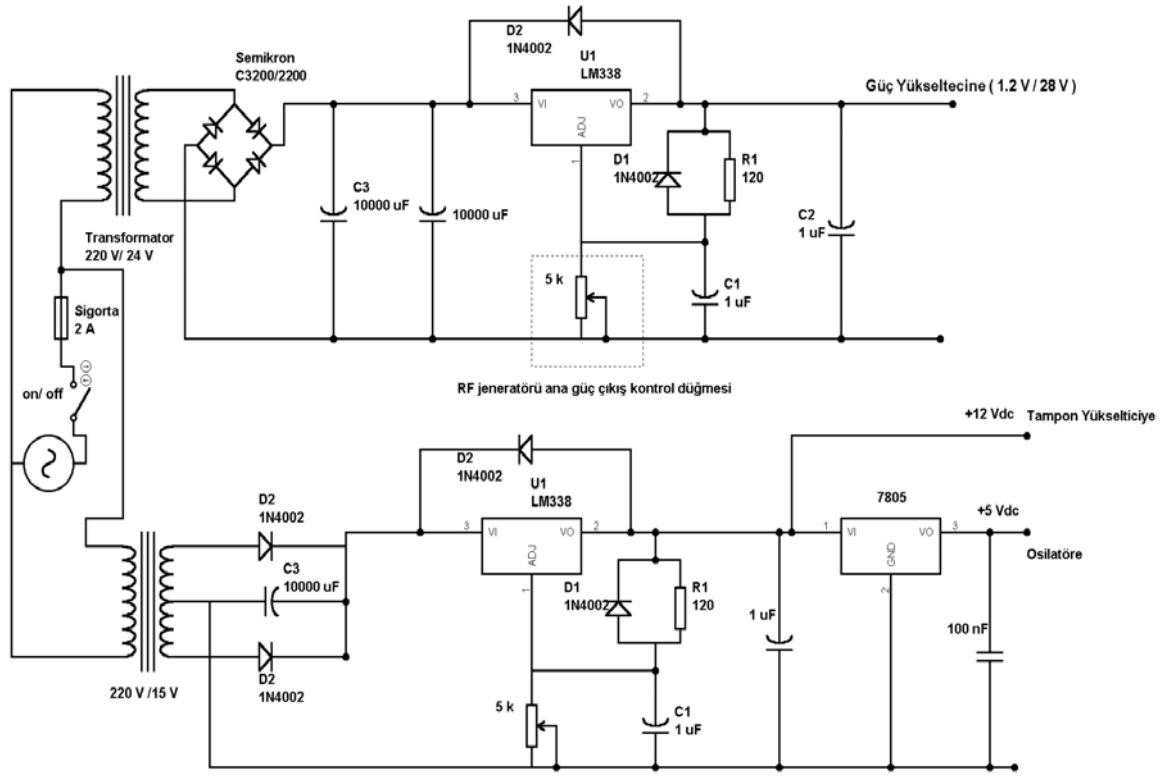
3.1.2.1. dc besleme ünitesi

Dc besleme ünitesinde 5 A'e kadar akım sürebilme kapasitesine sahip ayarlı voltaj regülatör entegresi kullanılmıştır (LM338). National Semiconductor firması tarafından üretilen LM338, kısa devre korumalı ve sıcaklık dengeleme çıkış kararlılığına sahiptir. Tasarlanan devrenin maliyetinin düşük ve sahip olduğu fiziksel boyutların küçük olması, tasarlan güç kaynağını cazip hale getirmiştir. Güç ünitesi temel olarak birbirinden bağımsız üç farklı gerilim çıkışından oluşmaktadır. Bu çıkışların RF jeneratöründe hangi bloklara fiziksel bağlantı yaptığı Şekil 3.10'da verilmektedir. Devrenin çıkış gerilimi, denklem (3.1.)'de verilen ifade yardımıyla R_1 ve ayarlı direncin değerine bağlı olarak teorik olarak hesaplanabilir. LM338 entegresine bağlı olarak kullanılan 1N4002 diyotları koruma diyotları olarak görev yapmaktadır.



Şekil 3.9. 13,56 MHz'lik RF jeneratörünün blok diyagramı.

$$V_{\text{çıkı}} = 1.25 \left(1 + \frac{R_{\text{ayarlı direnç}}}{R_1} \right) + I_{\text{adj}} R_{\text{ayarlı direnç}} \quad (3.1.)$$



Şekil 3.10. 13,56 MHz'lik RF jeneratöründe kullanılan dc güç kaynağının açık devre şeması.

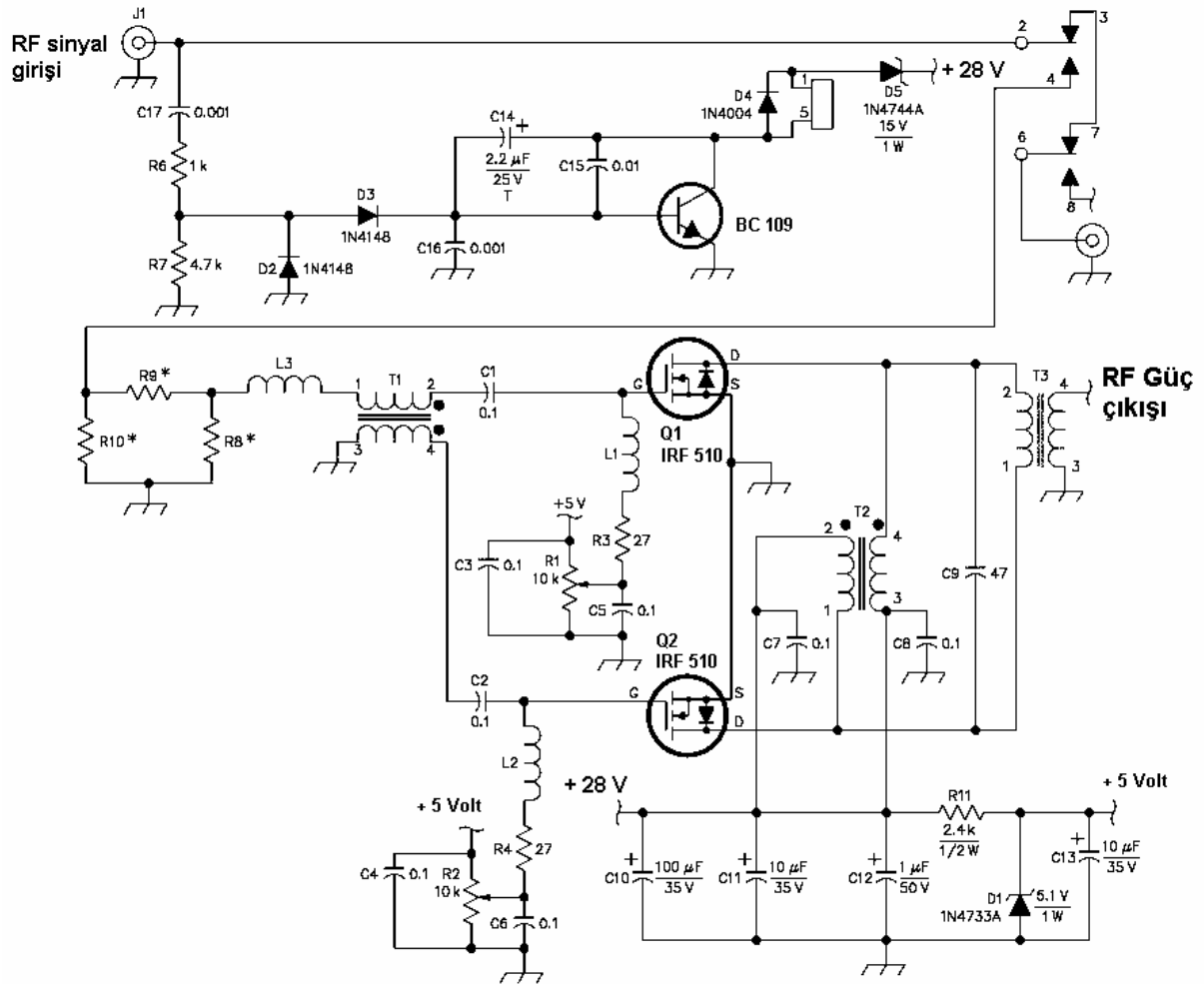
3.1.2.2. Osilatör

Osilatör, devreyi besleyen doğru akımı kullanarak sabit frekansta sinüs formunda düşük genlikli alternatif gerilim üreten devredir. Devrenin titreşim frekansı oldukça kararlı kristaller kullanılarak ayarlanır ve RF çıkış gücü 1-100 mW mertebelerindedir. Şekil 3.11'de PECVD sisteminin RF jeneratöründe kullanılan osilatör devresi verilmektedir. Devre 74HC240 CMOS onlu tampon / Üç durumlu hat sürücü (Octal Buffer/Line Driver with TRI-STATE Outputs) ve 13,56 MHz'lik kristalden oluşmaktadır. Devrenin çıkış genliği (çıkışında yük yokken) tepeden tepeye yaklaşık 10 V'tur.

3.1.2.4. RF güç yükselteci

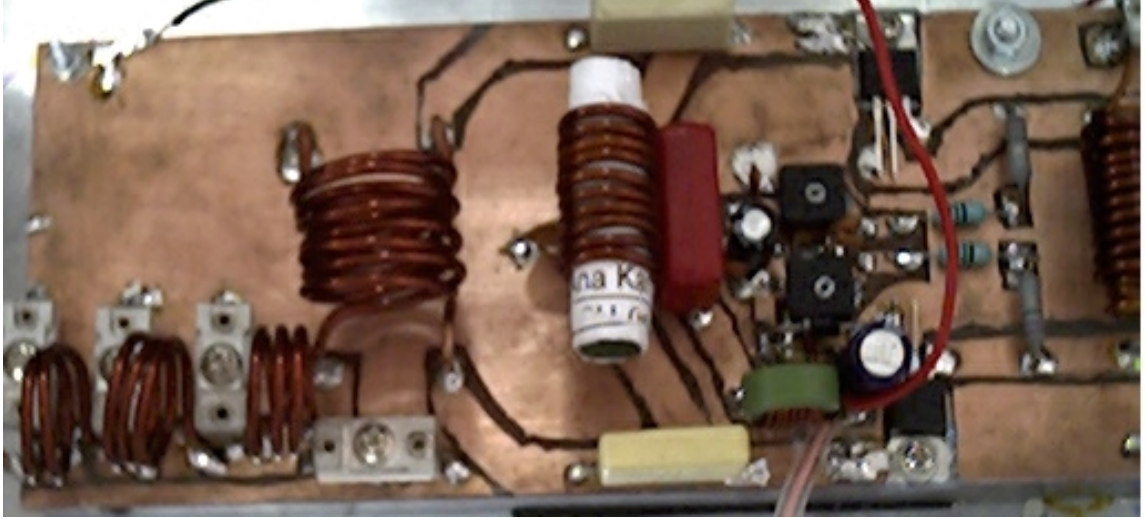
Bu devrenin asıl işlevi osilatörün ürettiği sinüs sinyalinin gücünü plazma üretmek için gerekli olan seviyeye çıkartmaktır. Şekil 3.12'de verilen yaklaşık 1 W'lık RF gücüne sahip sinüs formundaki sinyalin empedansı, Tr1 trafosu yardımıyla MOSFET transistörlerin giriş empedansına uyuşturularak, güç amplifikatörü içine gönderilir. Şekil 3.13'de 13,56 MHz'lik RF güç yükselteci açık devre şeması verilmektedir. Tr1 trafosunun sekonder uçlarına bağlı olan Q1 ve Q2 transistörlerinin gate uçları arasında 180°'lik faz farkı vardır. Push-Pull amplifikatörlerin çalışma prensibi de buna dayanmaktadır. MOSFET transistörlerin drain uçlarına, tek sarımlı Tr2 trafosunun primer sarımları bağlanmıştır. Burada her iki transistörün drain uçlarından gelen farklı fazdaki sinyaller birleşerek tek bir dalga formu oluşturur. Çıkıştaki RF sinyalinin gücü, sinyalin genliğinin karesiyle orantılı olduğundan, girişe oranla genliği oldukça yükselmiş olan RF sinyali, çıkış gücünün artmasında aktif rol oynar ($P = V^2/Z$).

Devrenin çıkışındaki Tr3 trafosu, çıkıştaki düşük empedanstan iletim hatlarında standart olan 50 Ω 'luk empedans dönüşümünü sağlar. Devrenin doğru akım beslemesi, transistörlerin source uçlarının toprağa bağlanması ve drain uçlarına bağlanan indüktörün orta ucuna pozitif besleme verilmesi ile gerçekleştirilir. Bu tarzdaki besleme, faz-terslemeli şoklamaya (phase-reversal choke) dayalı besleme olarak adlandırılır. Böylece geniş bir bant frekans aralığında devredeki RF sinyaline karşın büyük bir empedans gösterecek şekilde, Q1 ve Q2 transistörlerine dengeli ve kararlı bir şekilde güç verilmiş olur. Devrenin çıkış ucunda görülen indüktör ve kapasitörler 13,56 MHz'deki harmoniklerin filtrelenmesini sağlamaktadırlar.

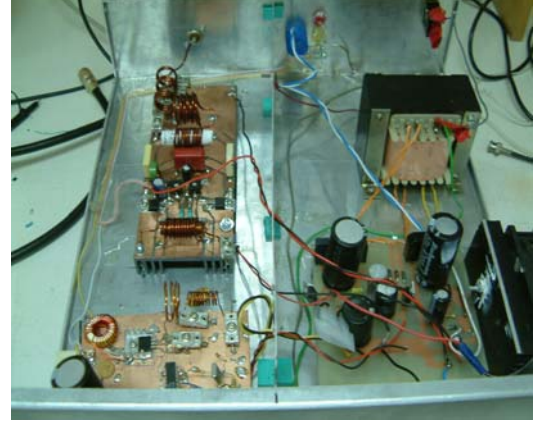
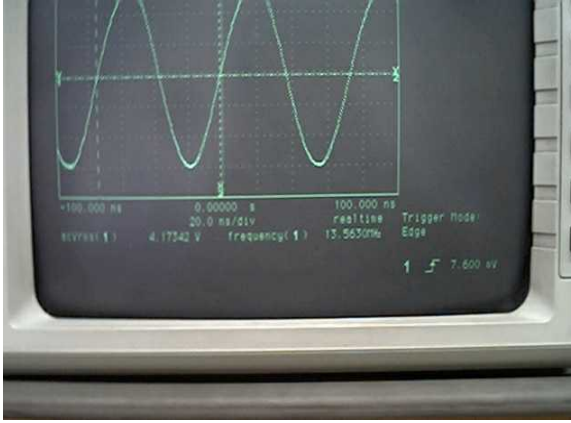


Şekil 3.13. 13,56 MHz'lik RF güç yükseltici.

Tasarımı tamamlanan ve alüminyum blok üzerine monte edilen pertinanks üzerindeki RF güç yükseltcinin yakından çekilmiş bir fotoğrafı Şekil 3.14'te verilmektedir.



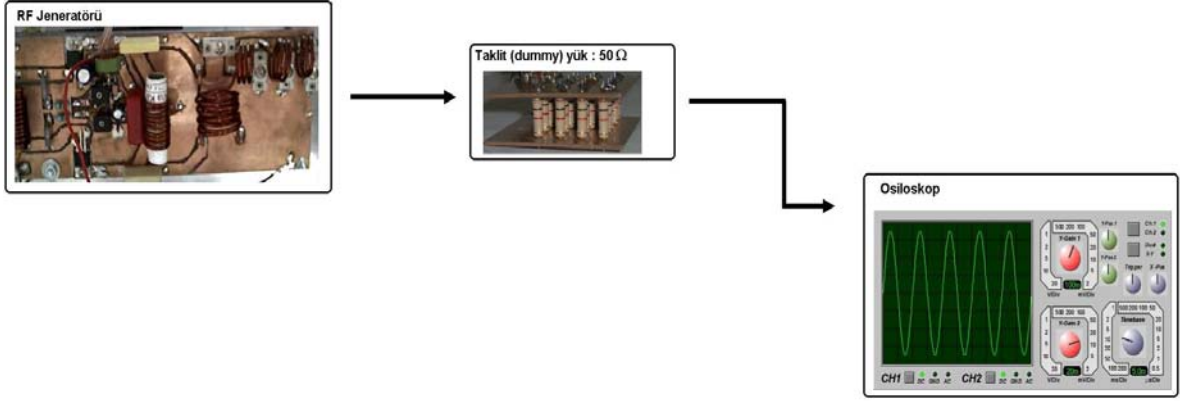
Şekil 3.14. 13,56 MHz'lik RF güç yükselteci.



Şekil 3.15. RF jeneratörünün testi sırasında alınan görüntüler a) osiloskopta elde edilen dalganın yakın bir görüntüsü, b) Tamamlanan RF jeneratörünün görüntüsü.

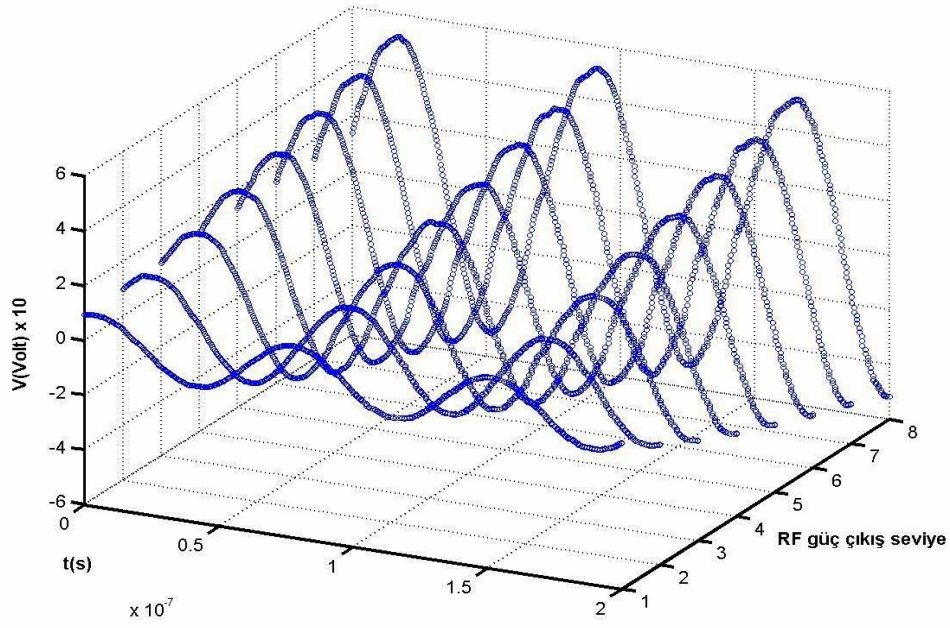
3.1.3. RF Jeneratörünün Test düzeneği güç ölçümü ve kalibrasyonu

RF jeneratörünün tasarımı tamamlandıktan sonra güç çıkış düğmesi maksimum seviyeye ayarlanarak çıkışındaki 50 Ω 'luk taklit (dummy) yükün uçlarındaki etkin (rms) değer osiloskop (HP54510B) yardımıyla ölçülmüştür. Çıkış sinyali ölçülürken, osiloskop probundaki gerilim atenatörü 10 kat küçültme moduna almıştır.

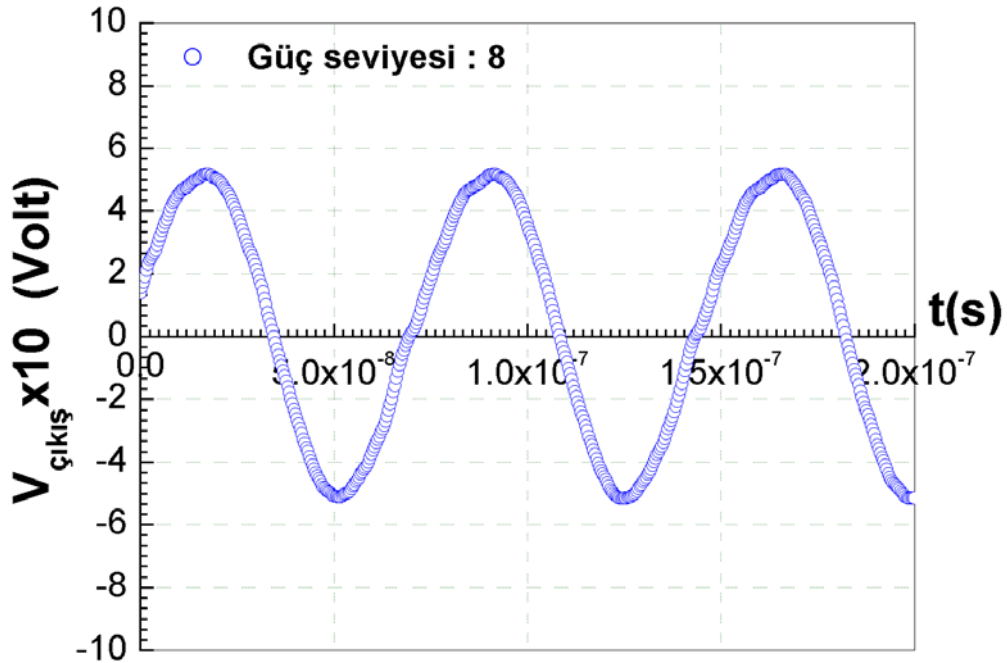


Şekil 3.16. Tamamlanan RF jeneratörünün test ve güç kalibrasyon test düzeneği.

Ölçüm sonucu kaydedilen görüntü Şekil 3.15'te verilmektedir. Kaydedilen V_{rms} , 41,6 V'tur. Ölçülen bu değer kullanılarak RF jeneratörünün çıkış gücü ($P = V_{rms}^2 / Z$) yaklaşık 34 W olarak hesaplanmıştır. RF jeneratörün dc besleme ünitesi üzerinde bulunan 1,2-28 V dc gerilim ayar çıkışı yardımıyla, güç yükseltecinin çıkış gücü istenilen değere ayarlanabilir. Henüz kalibre edilmemiş çıkış güç seviyelerine karşın dijital osiloskopta kaydedilmiş ac RF gerilimi değişimleri, Şekil 3.17'de verilmektedir. Potansiyometrenin sahip olduğu herhangi bir seviye durumunda çıkışına sürdüğü RF gücünü anlamak için, güç çıkış kalibrasyonu yapılmıştır.



a)

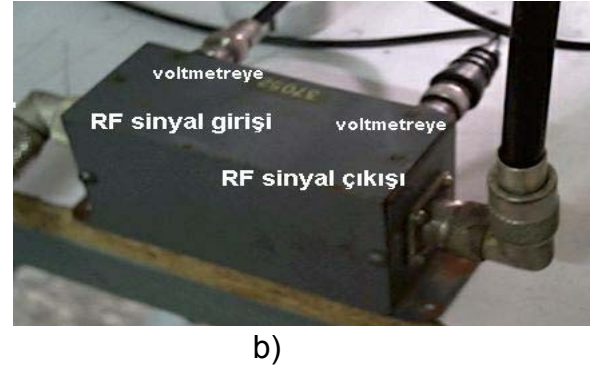
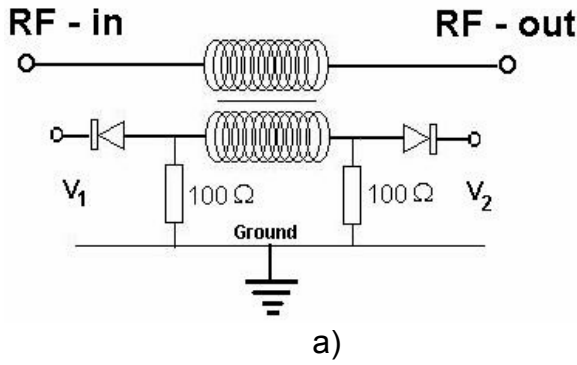


b)

Şekil 3.17. RF jeneratörünün çıkış uçlarında 50Ω 'luk taklit yükün bağlı olduğu durumda osiloskopta kaydedilmiş dalga formları a) Farklı güç çıkış seviyesi ayarlarında elde edilen dalga formu, b) çıkış güç seviyesi 8 nolu konumda iken ölçülen dalga formu.

PECVD sisteminde reaktörün içine sürülen gazın türüne ve basıncına bağlı olarak sistemin sahip olduğu empedans farklılaşabilmektedir. Böyle bir durumda RF

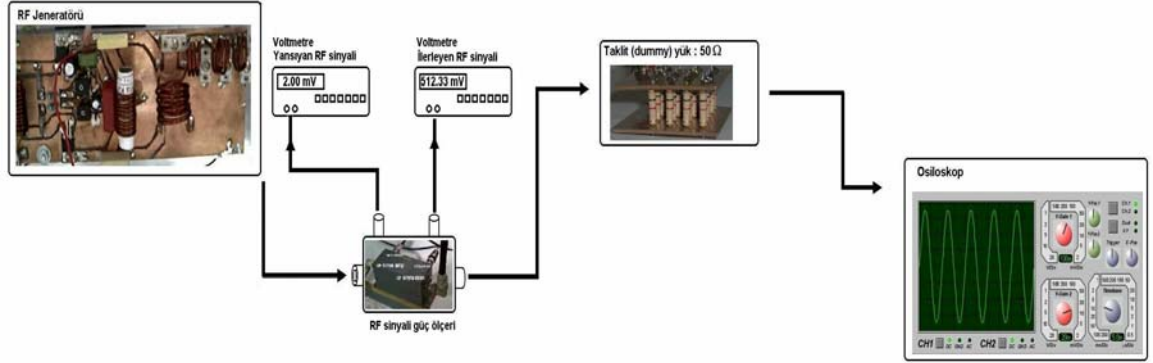
jeneratörde üretilen RF gücünün, yansıyan sinyalin genliğini en aza indirecek şekilde bir empedans uyumu sağlanmalıdır. Böyle bir durumda sisteme giren ve geri yansıyan RF gücünü ölçmek gerekir. Şekil 3.18'de tasarlanan RF güç ölçeri modeli verilmektedir. Devrede verilen indüktörler hava boşluğu ile birbirlerine çiftlenmiş transformatör gibi çalışmaktadırlar. Birinci sarımdan geçen RF sinyali ikinci sarımın uçlarında RF geriliminin indüklenmesine neden olacaktır. İkinci sarımın başlangıç ve bitiş noktasındaki potansiyelin toprağa göre değeri, o noktada geri yansıyan yada ilerleyen RF enerjisinin büyüklüğü ile orantılıdır. Bu ilişkinin matematiksel bir modele oturtulması ciddi devre analizi gerektirir. İkinci sarımın sağ ve sol uçlarıyla toprağa bağlanmış $100\ \Omega$ 'luk iki direnç, RF güç ölçerindeki empedans dengesini sağlamaktadır. İndüktörün uçlarındaki hızlı diyotlar ise, ac emk gerilimini dc yarım dalgaya dönüştürüp, dc bir voltmetre yardımıyla ölçülebilir duruma getirmektedir. Sonuçta, ölçülen V_1 potansiyel farkı yansıyan RF güç miktarı ile, V_2 potansiyel farkı ise ilerleyen RF güç miktarı ile orantılı değerler vermektedir. RF güç ölçeri tamamlanmış hali Şekil 3.18.b'de verilmektedir.



Şekil 3.18 a) RF güç ölçeri modeli b) RF güç ölçerinin tamamlanmış hali.

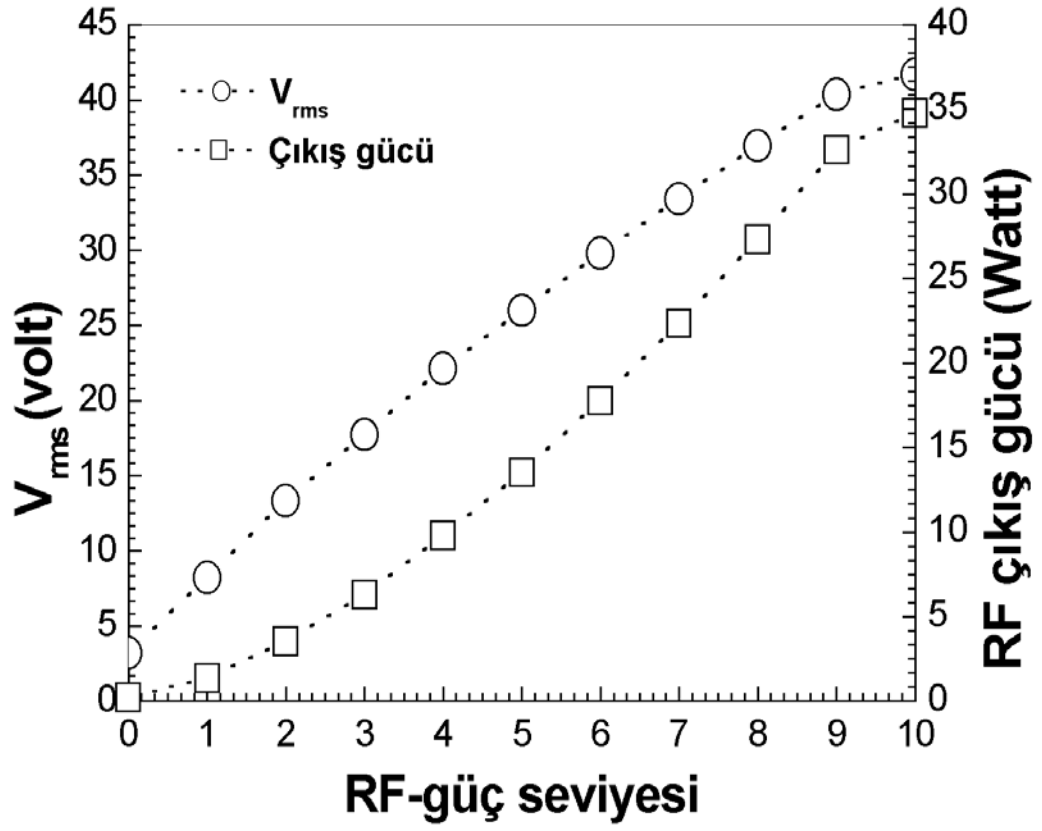
Tasarımı tamamlanan RF güç ölçeri kullanılarak Şekil 3.19'da verilen ölçüm düzeneği kurulmuştur. Kurulan bu ölçüm düzeneği ile RF jeneratörünün üzerinde bulunan güç seviyesi çıkış düğmesinin kalibrasyonu yapılmıştır. Farklı güç seviyesi çıkış değerleri için osiloskopta gözlemlenen RF sinyalinin V_{rms} değeri ölçülerek

kaydedilmiştir. Aynı anda voltmetrelerden okunan gerilim değerlerimde yansıyan ve ilerleyen RF sinyali hakkında bilgi vermektedir.

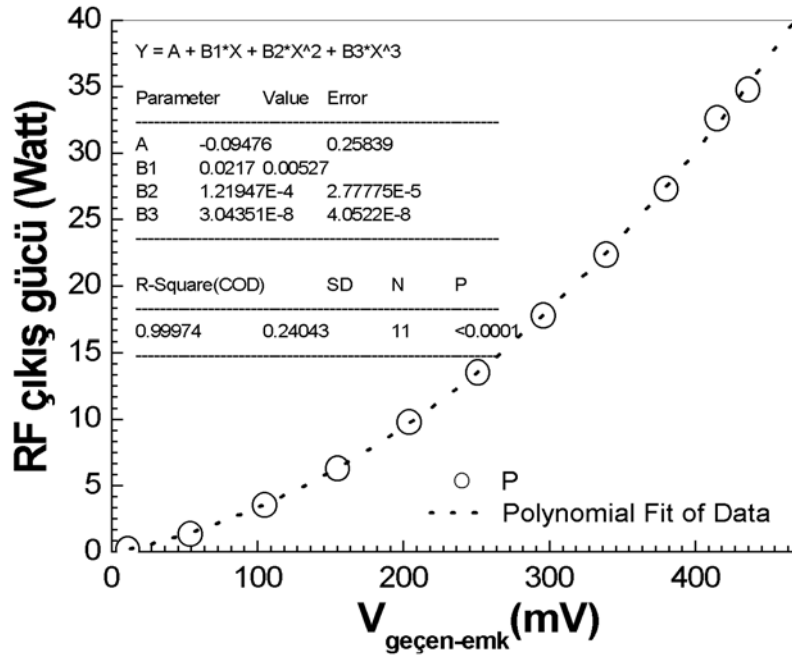


Şekil 3.19. RF güç ölçüm düzeneği.

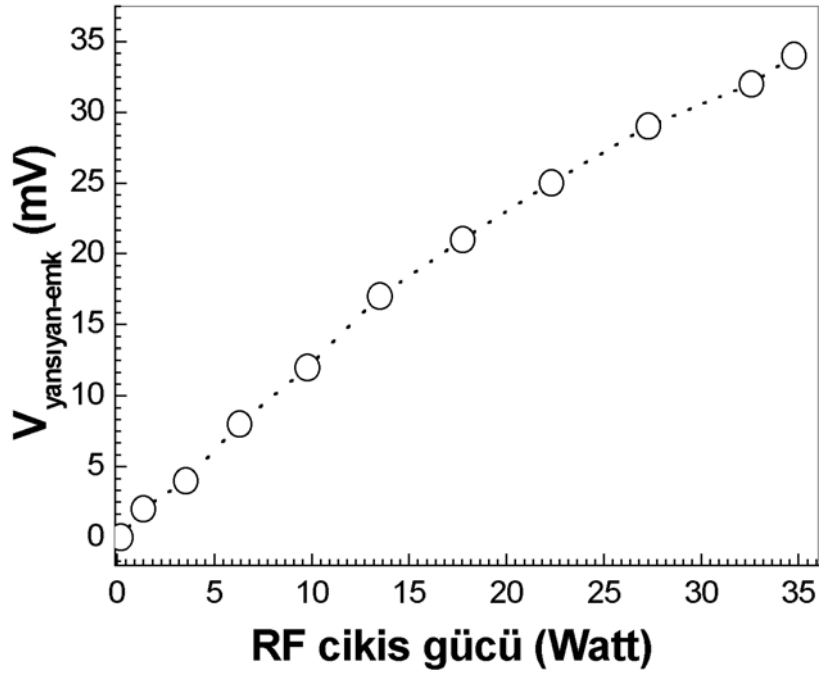
Şekil 3.20'de kalibrasyon süresince toplanan, RF güç seviye çıkışına karşın osiloskopta kaydedilen etkin gerilim değerleri ve RF güç çıkış değerleri verilmektedir. Şekil 3.20'de, RF güç seviye ayarı ile çıkış RF gücü arasında doğrusal bir ilişki olduğu gözlemlenmektedir. Bu grafikten, RF jeneratörünün RF çıkış gücünün oldukça kararlı ve doğrusal bir şekilde değiştirilebildiği gözlemlenmektedir. Şekil 3.21'de verilen grafikte ise, geçen RF sinyalinin büyüklüğü hakkında bilgi verecek olan Vmetreden okunan gerilim değerlerine karşın RF gücü değerleri verilmektedir. Bu grafikte $V_{geçen-emk}$ 'ya karşın RF gücü değeri arasında üstel bir ilişki gözlemlenmektedir. Üstel ilişkinin kararlı olması bu değişimin bir kalibrasyon fonksiyonu ile ifade edilebilmesini sağlamıştır. Fonksiyon çakıştırılması sonucu elde edilen kalibrasyon fonksiyonu ve sahip olduğu parametreler grafik içinde verilmektedir. Bu kalibrasyon fonksiyonu sayesinde RF jeneratörün plazma sistemine ne kadar güç sürdüğü ölçülebilir bir hale getirilmiştir. Şekil 3.22'de ise RF sinyalinin yansıyan kesrine ait gerilim değerlerine karşın RF güç değerleri verilmektedir. Grafikteki gerilim değerleri, geçen RF sinyaline ait gerilim değerleri ile karşılaştırıldığında oldukça küçük değerler olduğu görülmektedir. Yansıyan RF sinyalinin sürülen güç miktarı ile orantılı bir şekilde bu denli artmasının, kablo ve fiş şebekelerinden geri yansıyan RF sinyalinin bir sonucu olarak ortaya çıkmış olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 3.20. RF güç seviye çıkış sayılarına karşılık gelen ölçülmüş rms gerilim değerleri ve bu değerlere karşılık gelen RF gücü değerleri.

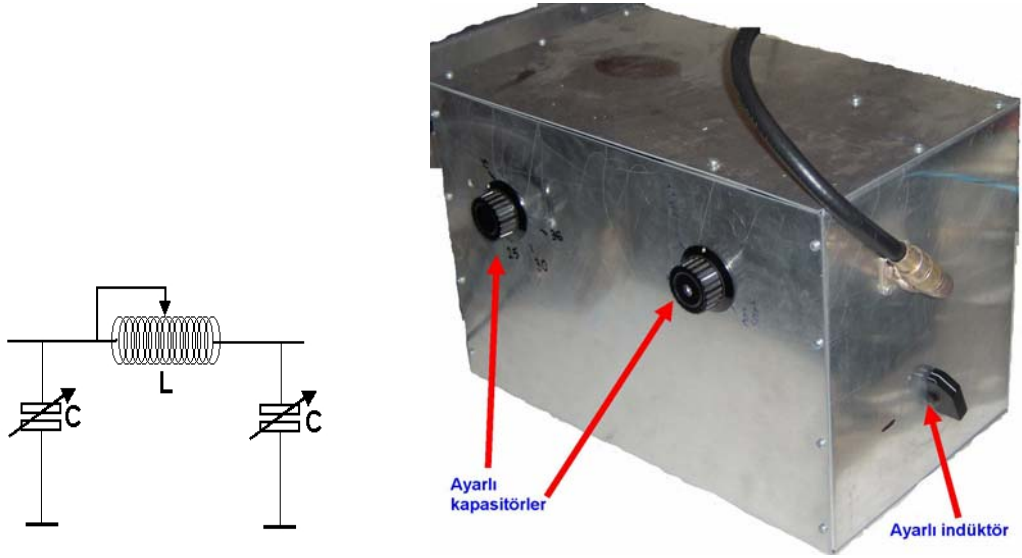


Şekil 3.21. RF güç ölçer kutusu ile kaydedilen çıkış gerilimi değerlerine karşılık gelen rms RF çıkış gücü değerleri.



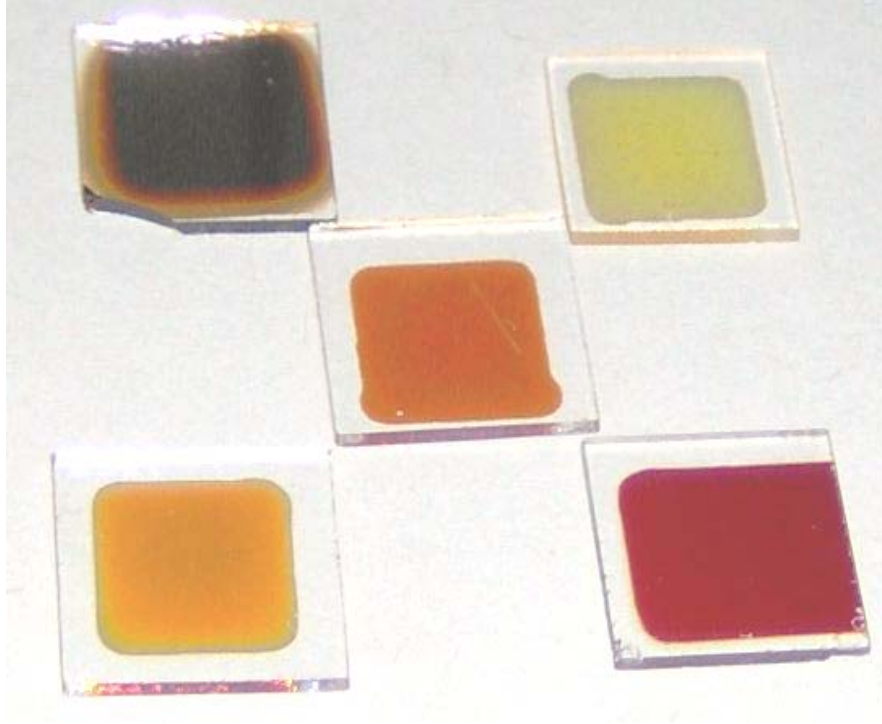
Şekil 3.22. Etkin RF çıkış gücü değerlerine karşılık gelen (güç ölçer devresi ile ölçülen) yansıyan RF sinyali gerilim değerleri.

kesitinde, 4 cm çapında helisel olarak burulmuş selenoit formunda indüktör kullanılmıştır. İndüktörün bir ucu gezgin bırakılarak sarımların üzerinde rahatça gezinebilmesine olanak tanınmış, böylelikle değişken indüktör değerleri elde edilebilmiştir. Kapasitörler de hava boşluklu, oldukça yüksek kalite katsayısına sahip seramik bağlantı izolasyonlarına sahiptir. Kullanılan indüktörün değişim aralığı 0-30 μ H, kapasitörlerin sığa değişim aralığı ise 5-500 pF'tır. Sığa ve indüktör değerleri HP4192 A empedans analizörü yardımıyla 13 MHz değerinde ölçülmüştür. Şekil 3.23'te tasarımı tamamlanan π filtreli empedans uyumu ünitesinin resmi verilmektedir.



Şekil 3.23. PEVCD sisteminde kullanılmakta olan π filtreli empedans uyumu ünitesinin tamamlanmış hali.

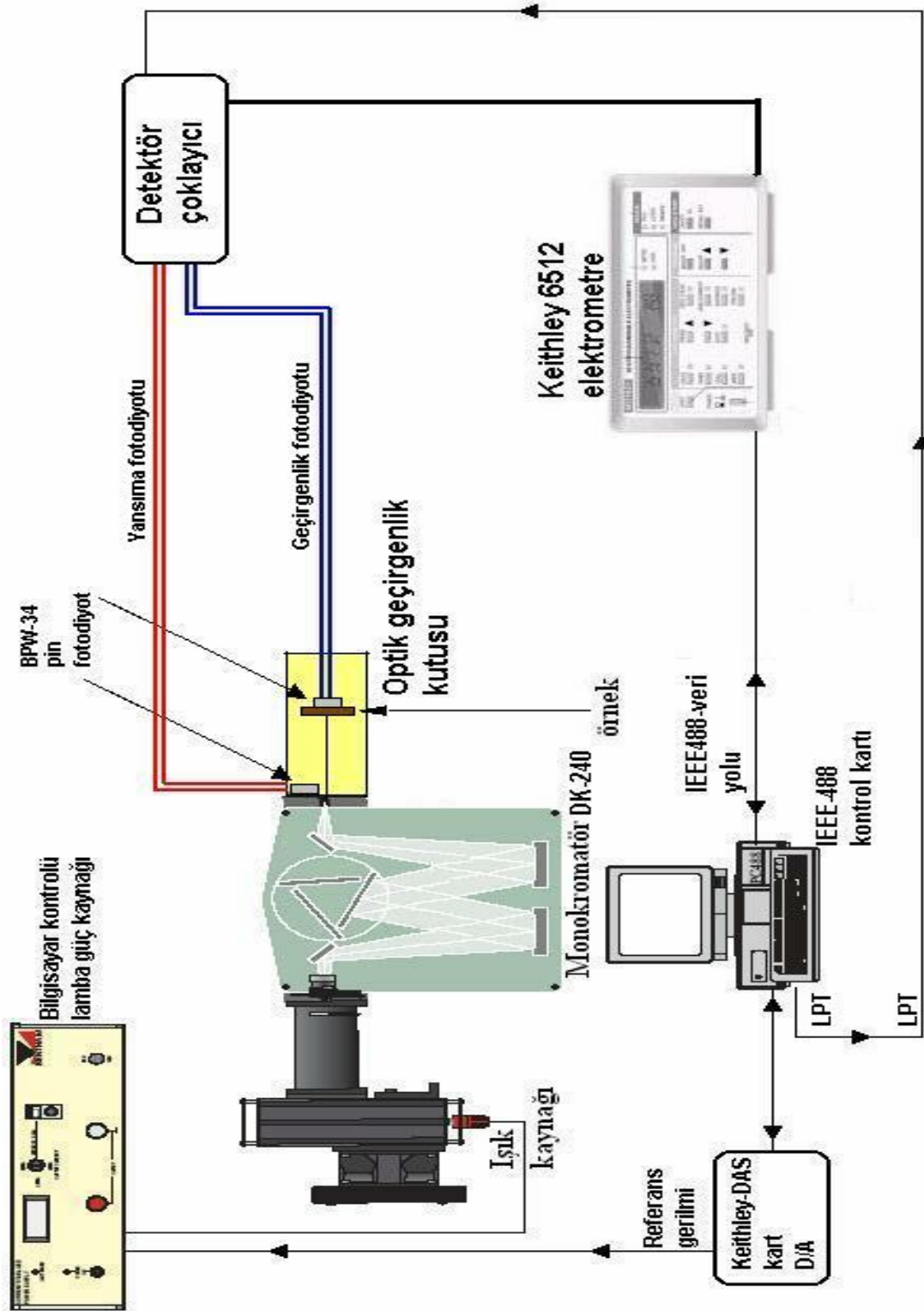
Şekil 3.24'te plazma biriktirme sisteminde farklı koşullarda hazırlanan beş a-Si:H ince film örneğin yakından çekilmiş resimleri verilmektedir. Örneklerin renklerindeki farklılıklar, sadece optik bant aralıklarındaki farklılıktan dolayı değil aynı zamanda örnek kalınlıklarının da farklı olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.24. PEVCD sisteminde hazırlanan beş a-Si:H ince filmin yakından çekilmiş resimleri.

3.2. Optik Yansıma ve Geçirgenlik Ölçüm Düzeneği

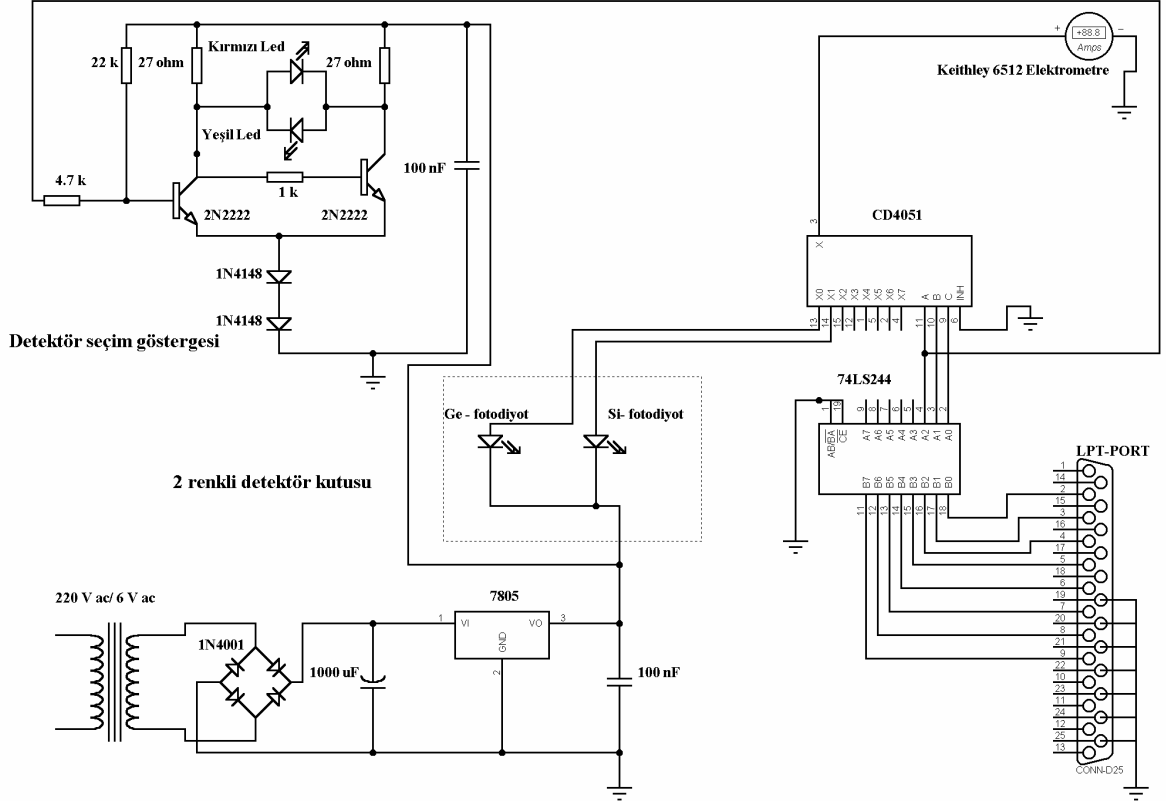
Şekil 3.25'te optik geçirgenlik deney düzeneği verilmektedir. Bilgisayar kontrollü bir dc güç kaynağı ile sürülen quartz-halogen lambadan elde edilen beyaz ışıktan, CVI Dijikrom 240 monokromatör yardımıyla istenilen dalgaboyunda ışık elde edilebilmektedir. Detektör olarak BPW34 kodlu p-i-n fotodiyot kullanılmıştır. Deney süresince lambaya sürülen akım sabit tutuldu. Önce örnek yokken detektör üzerine düşen ışığın oluşturduğu kısa devre akımı Keithley 6512 elektrometre ile ölçüldü ve dalga boyuna bağlı olarak bir dosyaya yazdırıldı. Daha sonra detektörün önüne örnek yerleştirilerek, aynı bilgisayar programında fotodiyot kısa devre akımları başka bir dosyaya kaydedildi. Söz konusu kısa devre akımlarının oranı a-Si:H filmlerin optik geçirgenlik verilerini oluşturmaktadır.



Şekil 3.25. Optik geçirgenlik ve yansım ölçümlerinde kullanılan deney düzeneğinin blok diyagramı.

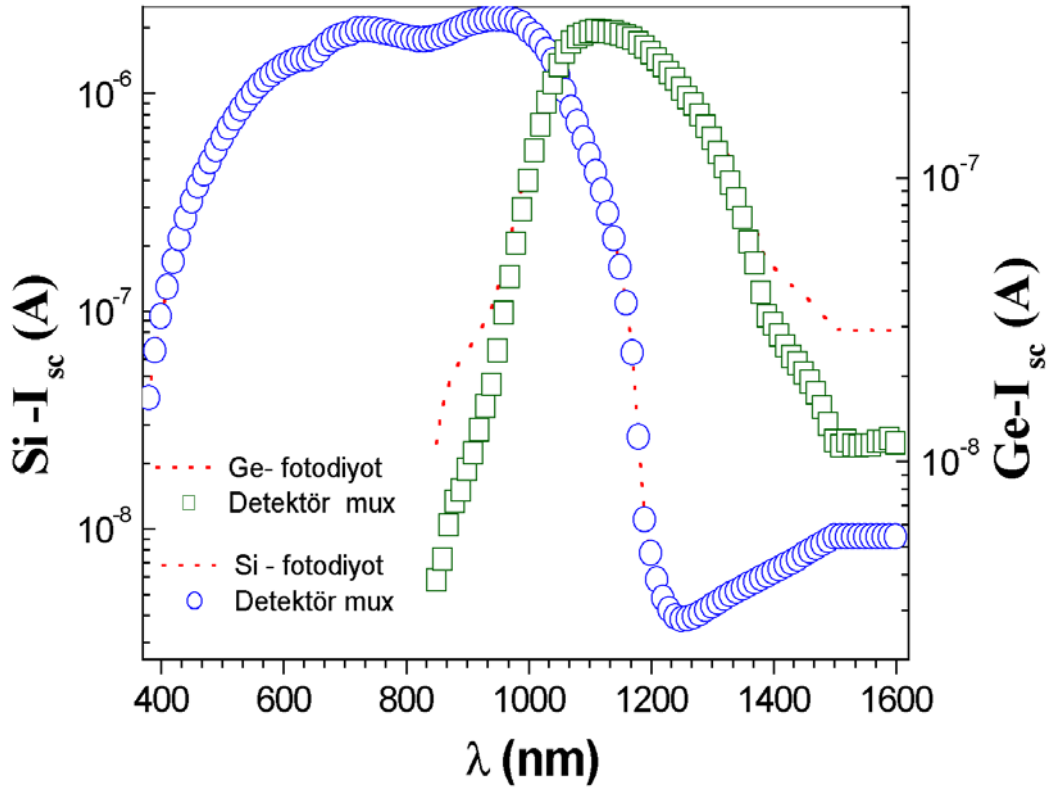
3.2.1. Bilgisayar kontrollü detektör çoklayıcı devrenin tasarımı ve uygulaması

Bazı durumlarda, a-Si:H ince filmlerin optik geçirgenlik ölçümü ile eşzamanlı olarak optik yansıma ölçümünün de yapılması gerekebilmektedir. Böyle bir durumda, her bir dalga boyunda ölçülen geçirgenlik (T) ve yansıma (R) verileri ve $(A=1-(T+R))$ eşitliği kullanılarak soğurma (A) spektrumuna geçilebilir.



Şekil 3.26. Optik geçirgenlik ve yansıma ölçümlerinde kullanılan detektör çoklayıcı devrenin açık devre şeması.

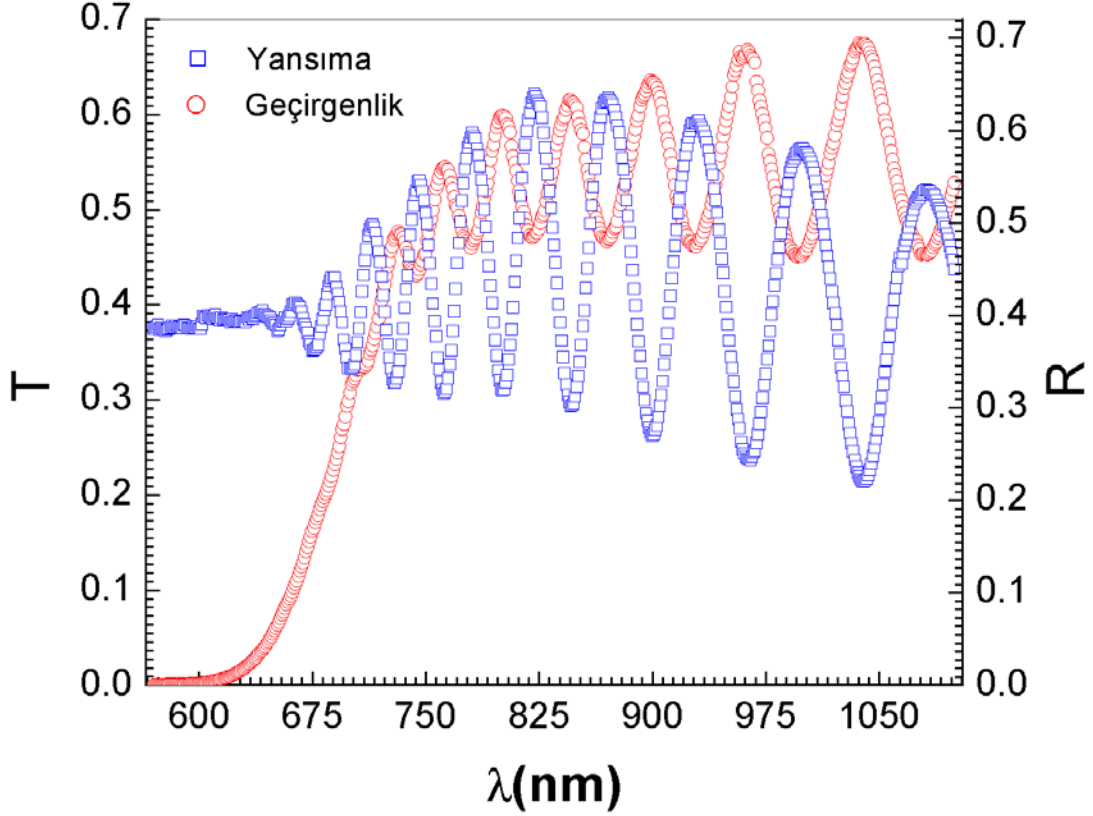
Şekil 3.26'da verilen elektronik devre yardımıyla optik geçirgenlik ve yansıma ölçümleri eşzamanlı olarak yapılabilir. Böyle bir elektronik devrenin getirdiği diğer bir yenilik ise çift renkli detektör (Si+Ge) ile kullanılabilmesidir. Silisyum alaşımından yapılmış detektörler 1100 nm'den daha büyük dalga boylu elektromanyetik ışımaya duyarlı değildirler. 1100 nm üzerindeki dalga boylarında optik geçirgenlik spektrumu değerlendirilmek istenirse Ge fotodiyot kullanabilir. Deneyin sürekliliğinin bozulmaması için detektör değiştirme işlemi uygun bir yazılım ve yukarıda verilen devre yardımıyla gerçekleştirilebilir.



Şekil 3.27. Kuvartz halojen lambanın bilgisayar kontrollü detektör çoklayıcı devre yardımıyla ölçülmüş (gratinglerin+foto diyotların spektral duyarlılıkları) spektrumu.

Şekil 3.26’da verilen elektronik devrenin çalışma prensibi kısaca şöyle özetlenebilir. Fotodiyotlara uygun çalışma noktası değerinde ters besleme uygulanması detektörün kararlılığını, tepki süresi değerini ve ürettiği akım değerini artırır. Bu bakımdan kullanılan diyotlara +5 V’luk ters beslemeye uygulanarak, detektörün ürettiği akım 8 kanallı CD4051 adı verilen Analog multiplexer entegresine sürülür. CD4051’in hangi kanalı aktifleyeceğini kontrol eden, adresleme bilgi giriş noktasıdır. CD4051’in adresleme girişleri paralel porta bağlanmış uygun tamponlarla birleştirilmiştir. Kullanılan tampon (74LS244) entegresi, paralel portun data veri yolundan akım çekmemize engel olarak paralel portu korur. CD4051 entegresinin 8 kanalı doğal olarak 3 bitlik ($2^3=8$) adresleme giriş noktası vardır. Kullanılacak fotodiyot sayısının 2 olması sadece 2 kanala ihtiyaç duyulmasına neden olmuştur. Bu yüzden yalnız 1 bitlik adres veri yolunu kullanmak yeterlidir. Adres giriş noktasının 1 yada 0 mantık düzeyinde olması, Si/Ge seçimini sağlamış olmaya yeterlidir. Hangi detektörün aktif olduğunu anlamak amacıyla bir lojik prob tasarlanmıştır. Lojik proba bağlı olan 2 farklı

renkteki LED, hangi detektörün aktif olduğunu simgelemektedir. Bu sayede hangi fotodetektörün aktif olduğunu deneysel ölçüm sürecinde takip etmek mümkün olabilmektedir. Şekil 3.27’de DK-240 monokromatrör ve detektör çoklayıcı devre yardımıyla ölçülmüş kuvartz halojen lambanın elektrolüminesans değişimi verilmektedir.

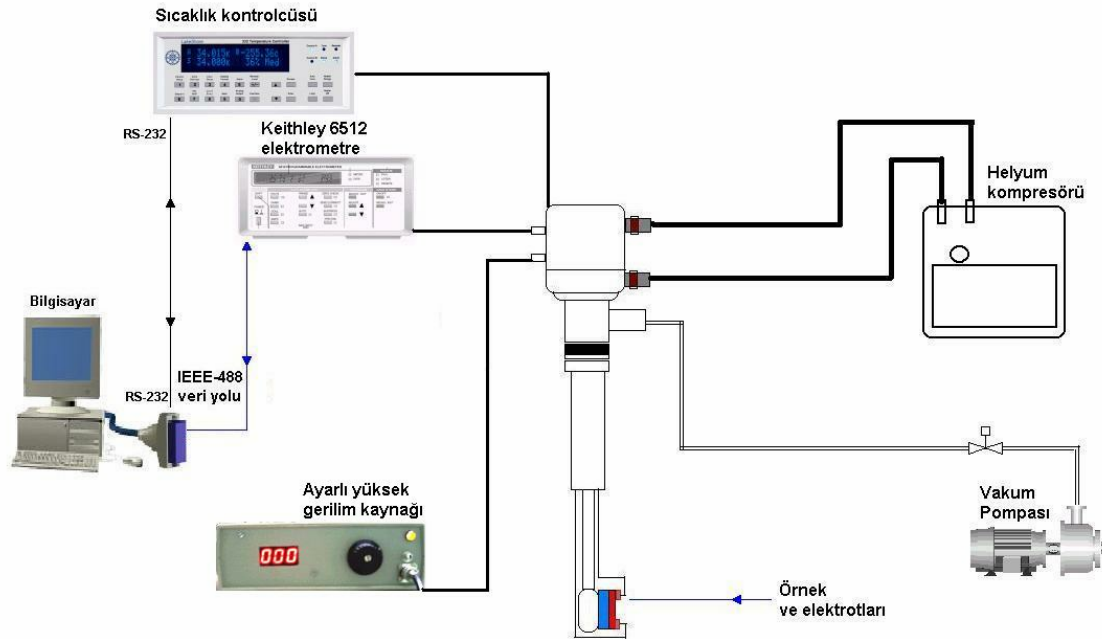


Şekil 3.28. Bilgisayar kontrollü detektör çoklayıcı devre yardımıyla ölçülmüş a-Si:H ince filmin optik yansımaya ve geçirgenlik spektrumu.

Bu grafikte sol ve sağ düşey eksenler fotodiyotlardan toplanan kısa devre akımlarıdır. Şekilde verilen grafikte 1400 nm’ye kadar olan bölgede, ölçülen gerçek spektrum ile detektör çoklayıcının kaydettiği değerlerin birbirlerine oldukça yakın olduğu gözlemlenmektedir. Tasarlanan bu düzenek yardımıyla 400 nm’den 1400 nm’ye kadar mekanik bir müdahale yapılmaksızın optik geçirgenlik ölçümü yapılabilmektedir. Tasarlanan detektör çoklayıcı yardımıyla, hazırlanan a-Si:H örneklerden birinde optik yansımaya ve geçirgenlik ölçümü testi yapılmıştır. Şekil 3.28’de detektör çoklayıcı yardımıyla ölçülmüş yansımaya ve geçirgenlik spektrumu verilmektedir.

3.3. Bilgisayar Kontrollü Karanlık İletkenlik Ölçüm Düzeneği

Şekil 3.29'da a-Si:H ince filmlerin karanlık iletkenlik ölçümünde kullanılan deneysel düzenek verilmektedir. Düzenek kapalı devre helyum soğutmalı kreostat, sıcaklık kontrolcüsü (LakeShore-331), Keithley 6512 elektrometre, IEEE-488 kontrol kartı içeren 80286 bilgisayar ve bu tez çalışmasında tasarlanan ve uygulamaya koyulan ayarlanılabilen dc yüksek gerilim kaynağından oluşmaktadır. Örneklerin üzerine, birbirine paralel yüzeysel kontaklar atılmıştır. Her kontak işleminden sonra örneklerin akım gerilim ölçümleri yapıp kantağın ohmik olup olmadığı test edilmiştir. Sıcaklık bağımlı yapılan karanlık iletkenlik ölçümlerinde örneğe sabit bir dc gerilim uygulanmış, Qbasic'te yazılan program yardımıyla örnekten geçen akım şiddeti elektrometreden, örneğin sıcaklık değerleri de sıcaklık kontrolcüsünden 1K'lık adımlarla okutulup dosyaya yazdırılmıştır.

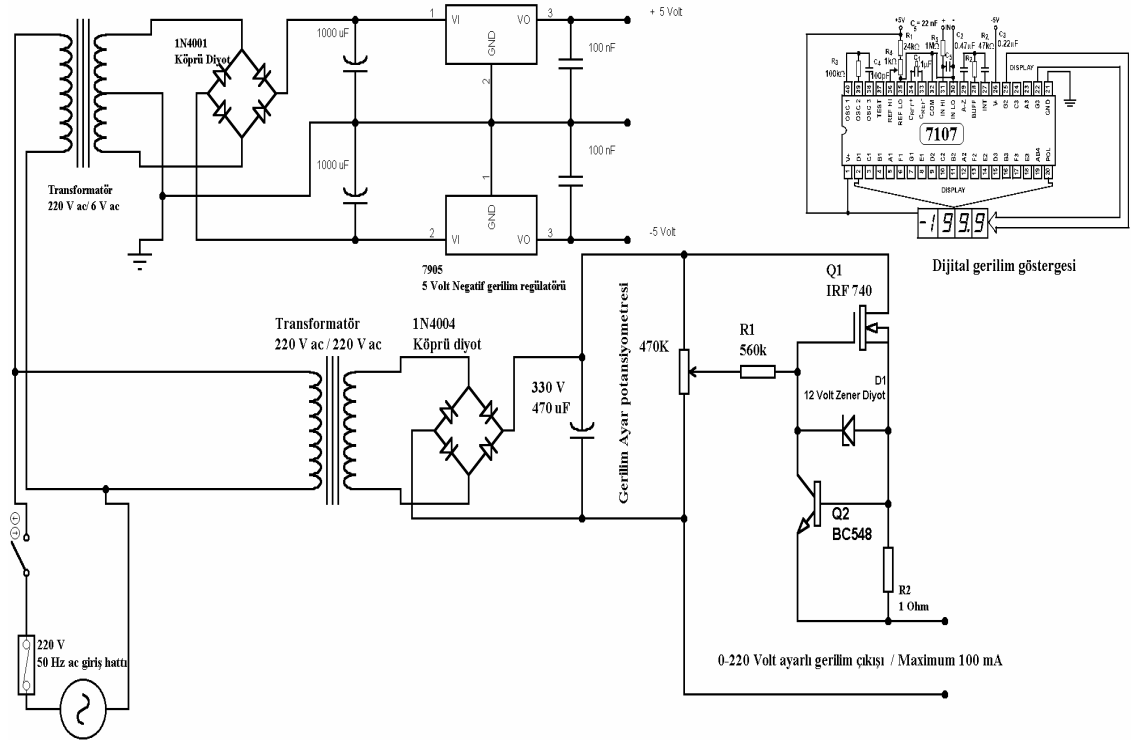


Şekil 3.29. Karanlık iletkenlik ölçüm düzeneği.

3.3.1. dc yüksek gerilim kaynağının tasarımı ve test aşamaları

Şekil 3.30'da tasarımı verilen ayarlı yüksek gerilim kaynağının transistörünün özellikle kısa devre anında aşırı yük altında çalışması sebebiyle oluşan sıcaklık

artışı transistörün delinmesine (yanması) sebep olmaktadır. Bu sebeple hem maliyet kaybının azaltılması hem de deney sürecinin yarıda kesilmesinin engellenebilmesi amacıyla çözümler aranmıştır. Bu yüzden devre tamamıyla kısa devreye karşı korumalı hale getirilmiştir. Maksimum akım çekebilme kapasitesi 100 mA olarak tasarlanan güç kaynağı, 100 mA'in üzerinde akım çekilmesi durumunda kısa devre korunmasını devreye sokabilmektedir. Devrede verilen Tr1 kodlu transformatör 30 W'lık eş sarımlardan oluşmuştur. Bu transformatörün ana görevi, normal şebeke geriliminden elde edilecek dc gerilimi güvenlik amacıyla tamamen faz ve nötr uçlarından izole etmektir. Şebekeden gelen 220 V'luk alternatif gerilim sinyali yüksek gerilime dayanaklı 1N4004 silisyum diyotlar yardımıyla yapılan köprü doğrultucu devrede dc tam dalgaya dönüştürülmektedir. Köprü doğrultucu devresi çıkışına bağlanan 330 μ F'lık kapasitör dalgacık gerilimlerini filtreleyerek ideal dc gerilimini oluşturmaya katkıda bulunur. Devredeki MOSFET transistor IRF740 kaynak (source) takipçisi olarak aç/kapa mekanizmasıyla çalışmaktadır .

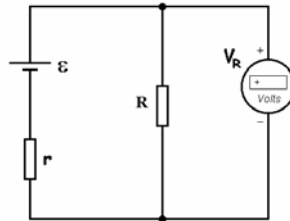


Şekil 3.30. Tasarımı yapılan ayarlı dc yüksek gerilim kaynağının açık devre şeması.

MOSFET transistörün kaynak ucu (source) 470 k Ω 'luk ayarlı direncin orta ucundan gelen değişken gerilim yardımıyla bu işlevi yerine getirir. Kapı ucunu koruyan devre elemanı ise 12 V'luk zener diyottur. Teorik olarak, bu zener diyodu kullanmanın çıkış stabilitesine çok büyük bir katkısı yoktur. Fakat amaç MOSFET transistörü korumakolduğundan bu diyot kesinlikle kullanılmalıdır. T2 transistörü ile birlikte şönt işlevi gören R2 direnci akım sınırlayıcı olarak görev yapmaktadır.

Çıkış akımının çok yükseldiğı durumlarda T2 transistörü T1 transistörünün kapısı (gate) üzerinden discharge mekanizmasının çalışmasını sağlayarak çıkış akımının daha da yükselmesine engel olur. R3 ayarlı direncinin değeri T2 transistörünün h_{fe} değerine bağılı olabilmektedir. Bu yüzden, uygun R_2 değerleri denenerek etkin bir aralıkta kontrol sağlayacak R3 değeri seçilebilir. 1 mA'in üzerinde akım çekildiğı durumlarda transistörler üzerinde yüksek sıcaklıklar oluşabilmektedir. Bu yüzden, MOSFET transistör alüminyum soğutucu üzerine monte edilerek fan yardımıyla soğutulmuştur. Gerilim kaynağının çıkış empedansı T1 MOSFET transistörünün beta değeri kullanılarak hesaplanabilir. MOSFET'in beta değerinin oldukça büyük olması çıkış empedansının küçülmesine sebep olmaktadır ve ideal bir gerilim kaynağından beklenen de budur. Tasarımı yapılan gerilim kaynağının iç direnci denklem (3.2.) ile verilen eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

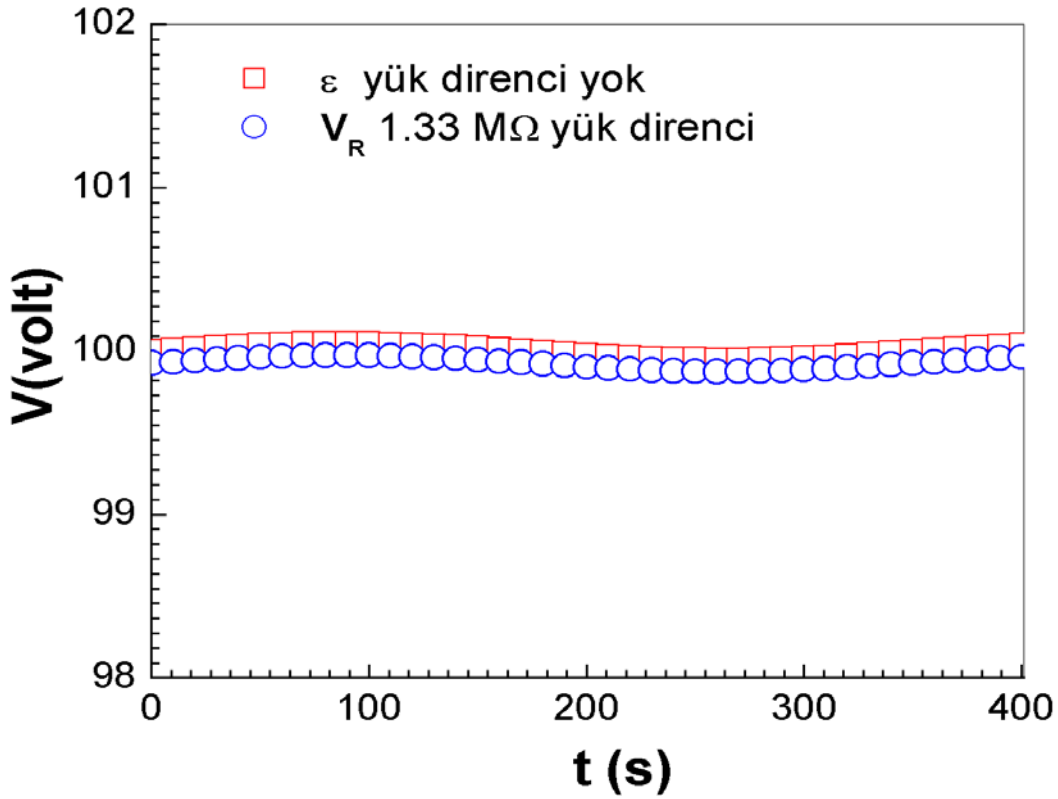
$$r = R \left(\frac{\mathcal{E}}{V_R} - 1 \right) \quad (3.2.)$$



Şekil 3.31. Sıradan bir gerilim kaynağının iç direncinin hesaplanmasında kullanılan teorik eşdeğer devre modeli.

Denklem (3.2)'de verilen $\mathcal{E}$ gerilim kaynağı açık devre iken ölçülen gerilim değeri V_R , R yük direncinin uçlarında okunan gerilim değeridir. Şekil 3.32'de tasarlanan gerilim kaynağının çıkışından Keithley 6512 elektrometre yardımıyla zamana karşı ölçülen $\mathcal{E}$, V_R , R değişimleri verilmektedir. Gerilim kaynağının çıkış gerilimi 100 V değerine ayarlanılarak toplanan veriler ve denklem (3.2.) yardımıyla, kaynağın iç direnci hesaplanmıştır. Yapılan deneysel hesaplamalar sonucunda bulunan

kaynak iç direnci yaklaşık 14 k Ω 'dur. Bu değer, üzerinde elektriksel ölçümler yapılan a-Si:H örneklerin empedanslarıyla karşılaştırıldığında ihmal edilebilecek düzeydedir. Şekil 3.33'te gerilim kaynağının tasarımının bitmiş durumundaki resmi verilmektedir.



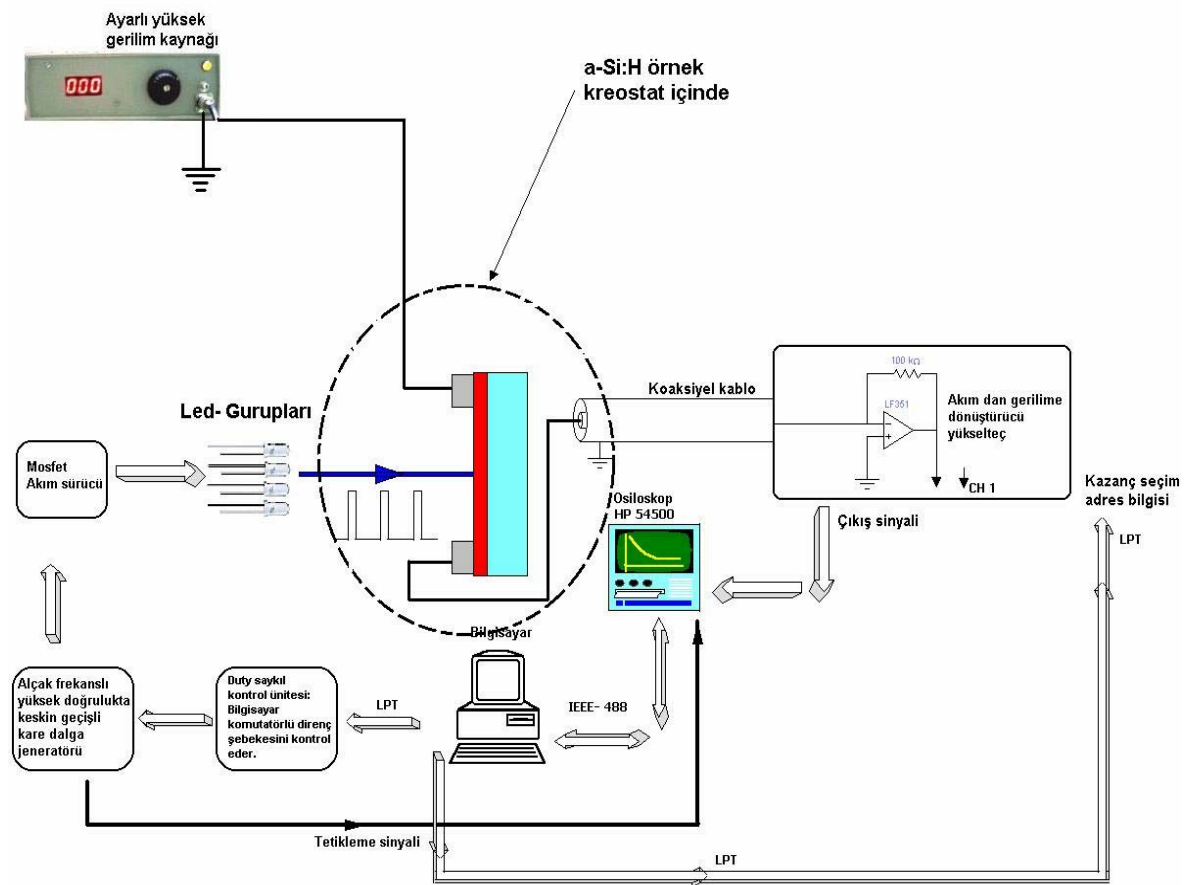
Şekil 3.32. Yüksek gerilim kaynağının oda sıcaklığında 100 V çıkış değerine ayarlanmış durumdaki zamansal değişimi.



Şekil 3.33. a-Si:H örneklerin elektriksel ve optiksel özelliklerinin ölçülmesinde kullanılan güç kaynağının görüntüsü.

3.4. Bilgisayar Kontrollü Fotoiletkenlik Tepki Süresi Ölçüm Düzeneği

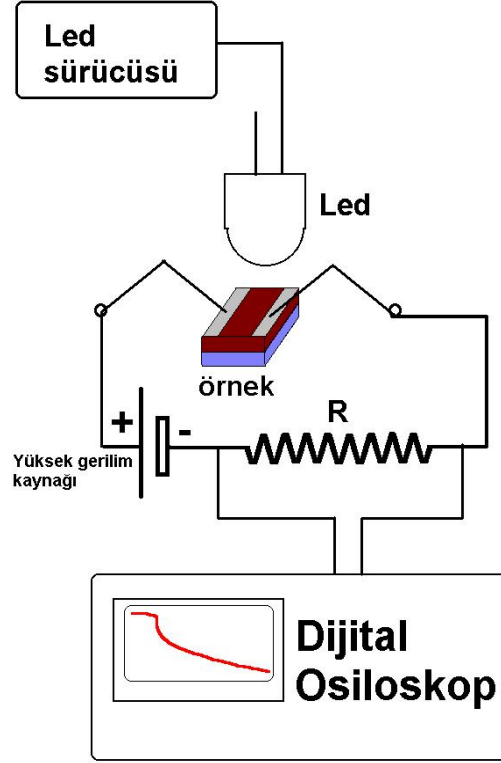
Şekil 3.34'te bu tez çalışması sürecinde tasarlanılan ve a-Si:H örneklerin sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik tepki süresi ve kararlı durum fotoiletkenlik değişimlerini ölçmekte kullanılan bilgisayar kontrollü fotoiletkenlik tepki süresi ölçüm düzeneği verilmektedir. Şekil 3.34'teki düzenek ana hatlarıyla; kapalı devre kreostat sistemi, dc gerilim kaynağı, dijital osiloskop, bilgisayar kontrollü işlemsel yükselteçli akımdan gerilime dönüştürücü, LED guruplar, bilgisayar kontrolü LED pulse jeneratöründen oluşmaktadır.



Şekil 3.34. Bilgisayar kontrollü fotoiletkenlik tepki süresi ölçüm düzeneği.

Fotoiletkenlik tepki süresi ölçüm düzeneği temel olarak, keskin bir monokromatik ışık ile çok kısa bir süre aydınlatmadan sonra ışık kaynağının hızla kapatılıp, bu süreç boyunca fotoiletkenliğin zamanın fonksiyonu olarak kaydedilmesi ilkesine dayanır. Elde edilen zamana bağlı fotoiletkenlik verisi yarıiletken malzeme içindeki yük taşıyıcıların yaşam süresi ve/veya kullanılan yarıiletken malzemenin enerji

bant yapısı içindeki bir elektronik seviyenin değişimi hakkında bilgi edinme amacıyla kullanılmaktadır. Bu konuyla ilgili gerekli teorik bilgi bölüm 2’de verilmiştir. Bu bölümde, fotoiletkenlik tepki süresi ölçüm düzeneğini deneysel olarak geliştirmede kullanılan ayrıntılar tartişılacaktır. şekil 3.35’te basit bir fotoiletkenlik tepki zamanı ölçüm düzeneği verilmektedir.



şekil 3.35. Fotoiletkenlik tepki zamanı ölçümünde basit bir düzeneğ.

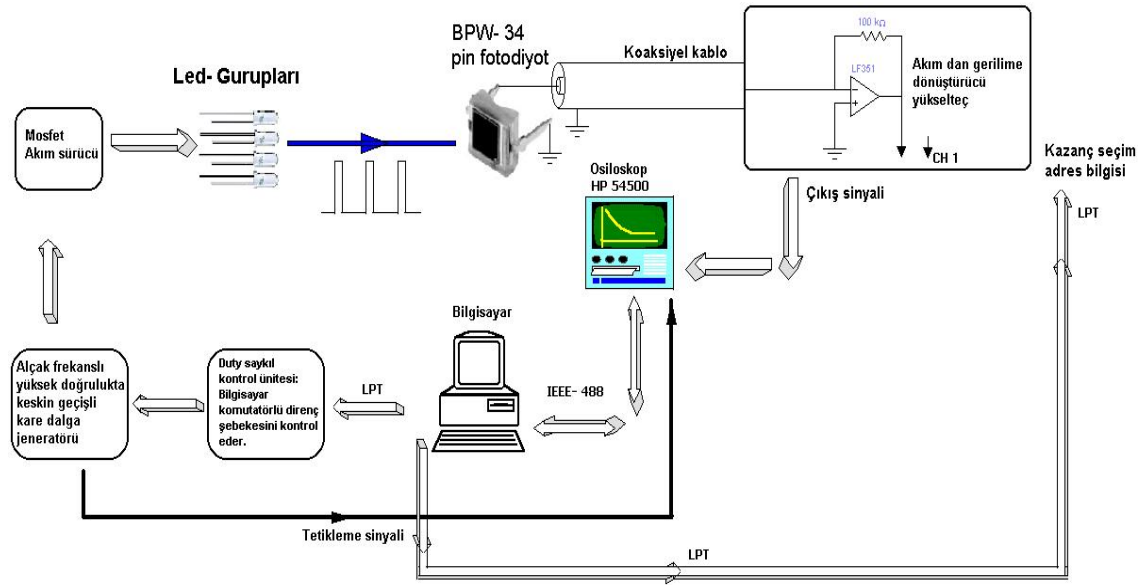
Düzeneğin elektronik olarak önem taşıyan ve deneysel ölçüm sürecinde elde edilecek sonucun hata payını önemli ölçüde etkileyecek olan iki ana bölüm vardır. Bunlardan biri Led sürücü devresi, diğeri ise fotoakım değerlerinin kaydedileceği kesimdir. Led sürücü devresi, keskin kare dalga geçiş üretim ünitesi ve hızlı akım kaynağı anahtarlama devresi olarak iki kısımda incelenmelidir. Akım okuma kesiminde en basit şekliyle bir direnç kullanmak mümkün gözükse de, küçük akım değerlerinde direncin uçlarındaki gerilim iyice küçüleceğinden osiloskop bu gerilimleri ölçemeyecektir. Bu durumda tüm yarım saykılık periyot sürecinde fotoiletkenlik verisini kaydetmek imkansız hale gelecektir. Özellikle yüksek dirençli örneklerde bu problem çok daha belirgindir. Bu bakımdan fotoakımdaki değişimi izlemek için kullanılan referans direnci yerine tepki zamanı örnekten daha hızlı

akımdan gerilime dönüştürücü işlemsel yükselteç kullanmak daha iyi bir çözüm olarak görünmektedir.

Böyle bir durumda düzeneğin tüm elemanlarını ayrıntılı bir blok diyagram üzerinde ele alarak üç farklı kesime ayırabiliriz. Bunlar;

1. Keskin geçişli (high rise and fall time) kare dalgaların üretilmesi.
2. Yüksek anahtarlama hızlarında çalışan LED akım kaynağı.
3. Fotoakım değerlerini yükseltgeyip akıma dönüştürecek I/V yükselteç.

Şekil 3.36.da bilgisayar kontrollü fotoiletkenlik tepki zamanı ölçüm düzeneği blok diyagramları ile birlikte verilmektedir.

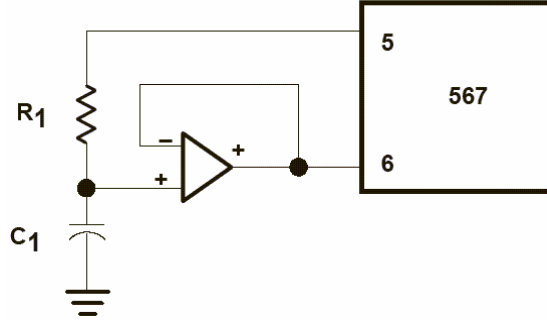


Şekil 3.36. Bilgisayar kontrollü hale getirilmiş fotoiletkenlik tepki zamanı ölçüm düzeneği.

3.4.1. Keskin geçişli (high rise and fall time) kare dalgaların üretilmesi

Sıradan bir a-Si:H ince filmin 445 K civarında tepki süresi 5 μ s civarındadır. Mikrosaniye düzeyindeki bu hızlı fotoiletkenlik değişimini gözlemlemek için kullanacağımız elektroniğin hızı bu düzeyden en az 2-3 kat daha küçük olmalıdır. Deneysel ölçüm düzeneğinde bu hızı etkileyecek iki faktör vardır. Bunlardan biri örneği uyarmak için kullanılan ışık kaynağının diğeri ise işlemsel yükselteçli

akımdan gerilime dönüştürücü ünitenin tepki süresidir. Işık kaynağının tepki süresi iki etkene bağlıdır.



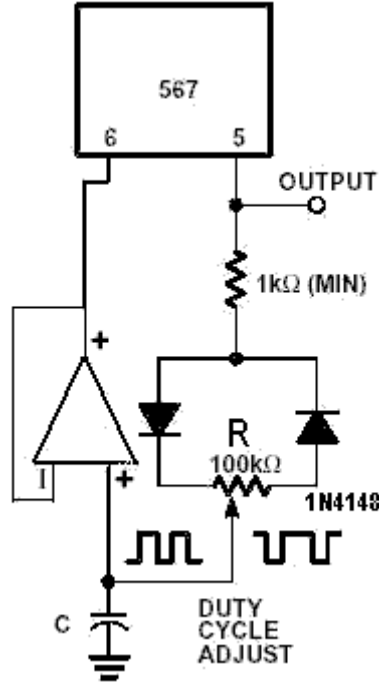
Şekil 3.37. Yüksek kararlılıkta keskin yükseliş ve iniş süresi sergileyen kare dalga osilatör devresi.

Bunlar; LED'in tepki süresi ve LED'e uygulayacağımız akım pulslarını sürececek olan akım kaynağı ve onun peşindeki kare dalga osilatörünün yükseliş ve iniş süresidir. Bu durumda işe kare dalga osilatöründen başlanmalıdır. Sıradan bir kare dalga osilatörünün ürettiği kare dalga sinyalinin 1 Hz'lik salınım frekansındaki düşüş süresi 1 μ s civarındadır. Bu sürelerden daha hızlı iniş ve yükseliş süresine sahip bir kare dalga osilatörü her zaman bu tür deneyler için daha uygundur. Bu amaçla National Semiconductor firması tarafından üretilen NEC567 entegresinin iniş ve yükseliş süreleri ölçüldü. Yapılan çalışmalar sonucunda Şekil 3.37'de verilen devre konfigürasyonunda oldukça kararlı, 30 ns'lik iniş ve 100 ns'lik yükseliş süresine sahip olan bir kare dalga osilatörü tasarlandı. Şekilde verilen devrenin salınım frekansı denklem (3.3.)'te verilmektedir.

$$f_o \approx \frac{1}{1.1 R_1 C_1} \quad (3.3.)$$

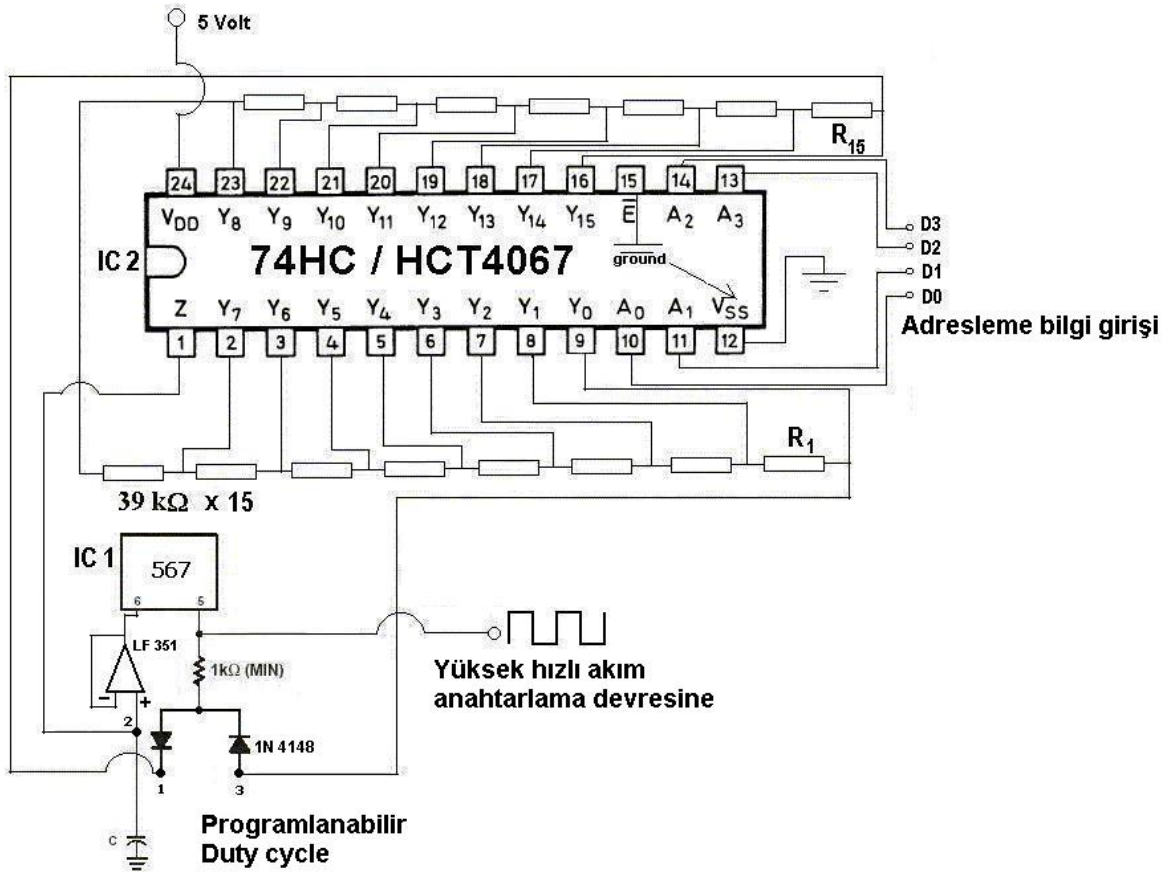
Kare dalga osilatörlerindeki en büyük problem, alçak frekanslı salınımları oluşturmak için ihtiyaç duyulan büyük sığa değerine sahip kapasitör kullanmaktır. Büyük sığa değerine sahip bir kapasitörde yaşanabilecek olası problem, zamanla salınım frekansındaki kayma yada sürüklenmedir (drift). Bu problemim çözümü, yüksek q (kalite) faktörüne sahip kararlı fakat düşük bir sığa değerine sahip kapasitör kullanmaktır. Fakat bu durumda kullanılacak direnç değeri oldukça yüksek olmalıdır. Bu sefer de, yüksek empedansa sahip bir RC devresinde kapasitörden akım çekmeden uçlarındaki potansiyel fark değerini ölçme problemi ile karşılaşılır. NEC567 entegresinin 6 nolu bacağı toprağa göre oldukça düşük empedansa sahiptir. Bu durumda çözüm bir işlemsel yükselticili gerilim takipçisi

kullanmaktır. Gerilim takipçisi C kapasitörünün uçlarından akım çekmeksizin kapasitörün toprağa göre potansiyel farkını ölçüp, bunu 6 nolu bacağa iletir. NEC567 entegresinin 5-6 nolu bacakları akım kontrollü osilatör olarak çalışmaktadır. Entegre, 6 nolu bacadan gelen gerilim bilgisine göre 5 nolu bacağa akım sürer. Bu sayede kararlı bir frekansta osilasyon sağlanmış olur. Şu ana kadar yapılan işlemler kararlı bir frekansta salınım yapan hızlı iniş ve yükseliş süresine sahip kara dalga osilatörü yapmaktır. Üretilen kare dalga sinyallerinin “on” süreleri 1 s’lik bir salınım periyodu süreci içerisinde 1 ms kaplayacak şekilde küçültülürse, ele alınan bu kare dalga sinyaline bir puls denilebilir. Çünkü “on” kalma süresi “off” süresine göre oldukça küçüktür. Kare dalga sinyalinin salınım frekansını değiştirmeksizin “on” yada “off” sürelerini değiştirme işlemine duty cycle değiştirme süreci adı verilir. a-Si:H ince filmlerde kararlı durum fotoiletkenlik değeri örnekten örneğe farklılık gösterebilmektedir. Böyle bir durumda kare dalga osilatörünün duty cycle oranı önem kazanmaktadır. Kare dalga osilatörünün duty cycle değerini değiştirmek için Şekil 3.38’de verilen devre önerilmektedir. Böyle bir devrede 100 k Ω ’luk ayarlı direncin orta ucunu gezdirmek suretiyle merkezi titreşim frekansını sabit tutup, kare dalga sinyalinin duty cycle değerini değiştirmek mümkündür. 100 k Ω ’luk ayarlı direncin madranını döndürmek gürültü kaynağı olarak davranarak devrenin kararlılığını bozabilmektedir. Bu problem karşısında önerilen, komütatör ve direnç gurupları kullanmaktır. Komütatör işlevini çok daha sesiz ve hızlı yaparak ölçümün kararlılığı ve hızını arttırır.



Şekil 3.38. Duty-cycle değıştirme özelliğine sahip kare dalga osilatörü.

Dijital komütatör işlevini yerine getirecek elektronik devre elemanı bir anlamda elektronik çoklayıcıdır (multiplexer). Philips firması tarafından üretilen HCT4067 bu amaca uygundur ve bu entegre 16-kanallı analog çoklayıcıdır. Bu entegreyi tıpkı bir komütatör olarak kullanma fikrini ortaya atmak, dijital komütatör kavramına oldukça büyük bir katkı getirmektedir. Bu sayede 74HC/HCT4067 entegresi yardımıyla 16 farklı direnç değerine sahip 16 tane direnç şebekesi rahatlıkla seçilebilir. Bir tür dijital komütatör olarak çalışabilme özelliğine sahip bu entegrenin ihtiyaç duyduğu, 4 bitlik adresleme bilgisidir. Şekil 3.39'da duty cycle oranı 74HC/HCT4067 entegresi ile kontrol edilebilme özelliğine sahip devrenin tasarımı verilmektedir. Şekildeki devrede 4 bitlik adres bilgisini sağlamanın en ucuz ve kolay yolu bilgisayarın paralel portunun kontrol veri yolunu kullanmaktır. Hemen hemen tüm bilgisayarlarda hazır olarak bulunan paralel bilgi giriş çıkışını sağlayan printer (yazıcı) portu oldukça ekonomik ve hızlı bir çözüm sunmaktadır. Bu durumda C0, C1, C2 ve C3 veri yolları bu amaca yönelik kullanılabilir. Kontrol veri yolundan akım çekmeye yada başka olası hatalara karşı korumak amacıyla 74LS244 tampon lojik kapısının kullanılmasında yarar vardır. Çizelge 3.2'de 4 bitlik veri yolundan gelecek verinin değerine göre adreslenen bacak noktaları sıralanmaktadır.



Şekil 3.39. Dijital bilgi ile duty-cycle değiştirme özelliğine sahip kare dalga osilatörü.

15 tane seri bağlı 39 k Ω 'luk direncin toplam direnci 585 k Ω 'dur. Eğer C sığasının değeri de yaklaşık olarak 1,4 μ F ise, devrenin osilasyon frekansı denklem (3.3.) kullanarak hesaplandığında 1,1 Hz olarak bulunur. Dijital komütatörün toplam 16 tane dişi vardır. Bu sayede 16 farklı duty cycle değeri ayarlamak mümkündür. Öncelikle Çizelge 3.2'de verilen adres bilgileri bilgisayardan gönderilerek komütatörün her dişi için duty cycle değerleri ölçüldü. Ölçülen her adres bilgisine karşılık gelen duty cycle dalga formları dijital osiloskop yardımıyla ölçülüp Çizelge 3.3'te sıralanmıştır.

Girişler				Kanal
A3	A2	A1	A0	açık
0	0	0	0	Y ₀ -Z
0	0	0	1	Y ₁ -Z
0	0	1	0	Y ₂ -Z
0	0	1	1	Y ₃ -Z
0	1	0	0	Y ₄ -Z
0	1	0	1	Y ₅ -Z
0	1	1	0	Y ₆ -Z
0	1	1	1	Y ₇ -Z
1	0	0	0	Y ₈ -Z
1	0	0	1	Y ₉ -Z
1	0	1	0	Y ₁₀ -Z
1	0	1	1	Y ₁₁ -Z
1	1	0	0	Y ₁₂ -Z
1	1	0	1	Y ₁₃ -Z
1	1	1	0	Y ₁₄ -Z
1	1	1	1	Y ₁₅ -Z

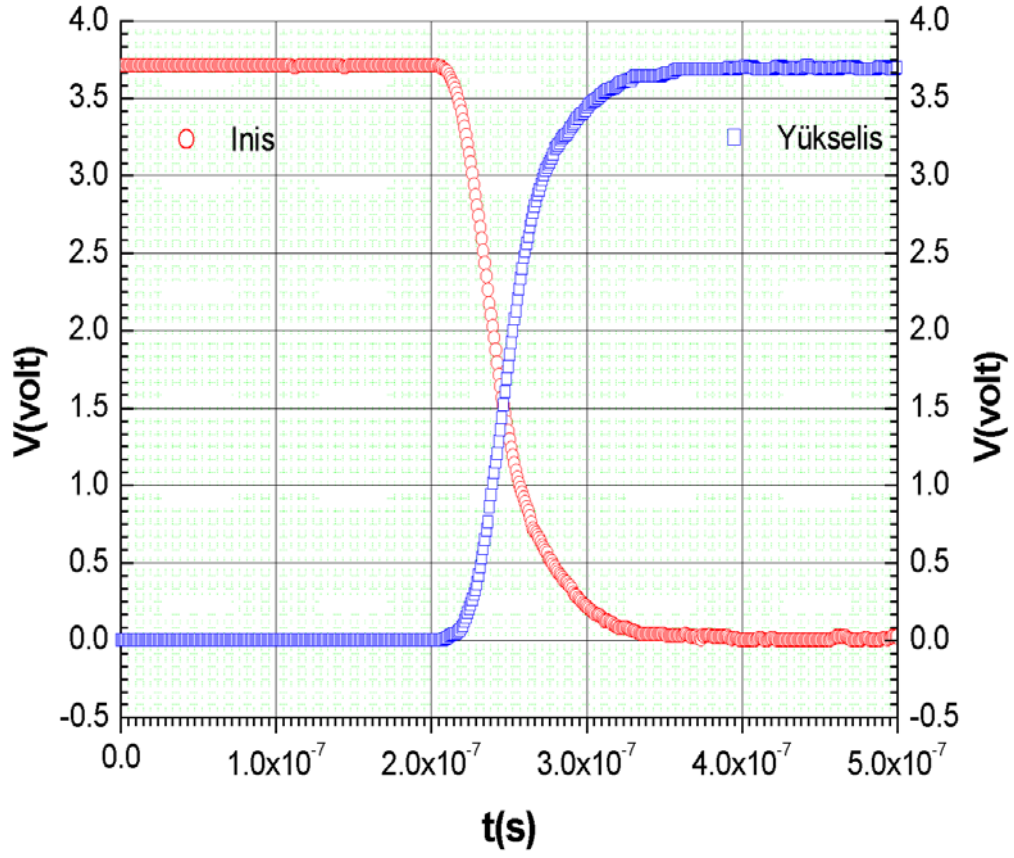
Komütatör dişi	Açık kalma (on) süresi (ms)	Kapalı kalma (off) süresi(ms)
0	3	1097
1	76	1024
2	149	951
3	218	882
4	286	814
5	356	744
6	424	676
7	492	608
8	560	540
9	627	473
10	692	408
11	760	340
12	824	276
13	892	208
14	955	145
15	1097	3

Çizelge 3.2. 4 bitlik adres bilgisine göre hangi kanalların aktifleşeceğini belirten çizelge.

Çizelge 3.3. Komütatör dişi değerlerine bağlı olarak Duty-cycle zaman sürelerinin değişimi.

Bilgisayarın paralel portu kullanılarak kontrol veri yolundan gönderilen 4 bitlik bilgi paralel bağlı olarak iki farklı entegreye yönlendirilmiştir. Bunlardan biri SN74LS47 entegresi diğeri ise 74HC/HCT4067 çoklayıcı entegresidir. SN74LS47 entegresi 8'lik LED segmenti sürerek, direnç şebekesinin hangi komütatör dişinde seçili olduğunun görülmesine olanak tanır. Şekil 3.40'da programlanabilen duty cycle kare dalga jeneratörünün 8 nolu komütatör dişinin dijital osiloskopta ölçülmüş iniş ve yükseliş sürelerinin zamana göre değişimleri verilmektedir. Şekil 3.40' ta verilen kare dalganın iniş ve yükseliş süreleri dijital osiloskop yardımıyla ölçülmüştür.

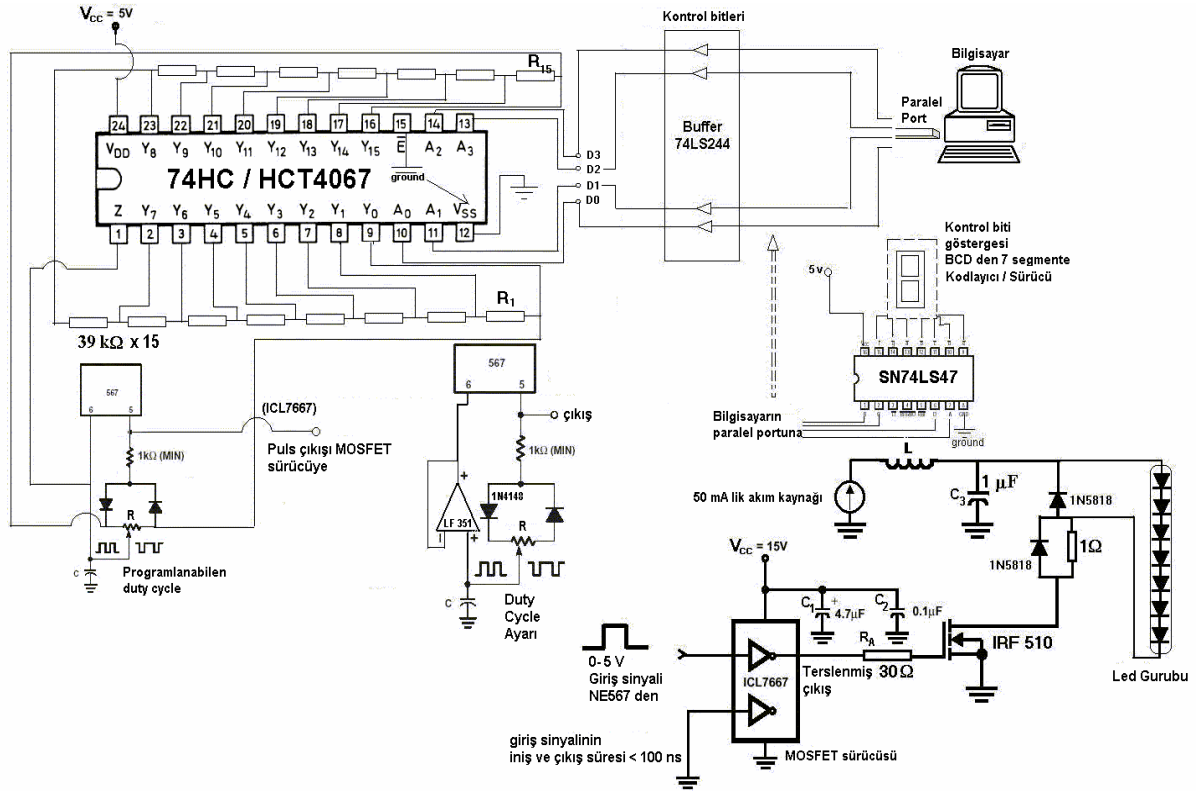
Ölçülen bu değerler $t_{\text{inis}}=64$ ns, $t_{\text{yükseliş}}=59$ ns'dir. Tasarlanan kare dalga jeneratörü oldukça hızlı iniş ve yükseliş değerlerine sahip olduğu verilen şekilde görülmektedir.



Şekil 3.40. Programlanabilen duty cycle kare dalga jeneratörünün dijital osiloskopta kaydedilen, kare dalga yükseliş ve iniş bölgeleri.

3.4.2. Hızlı anahtarlama süresine sahip LED akım kaynağının tasarımı

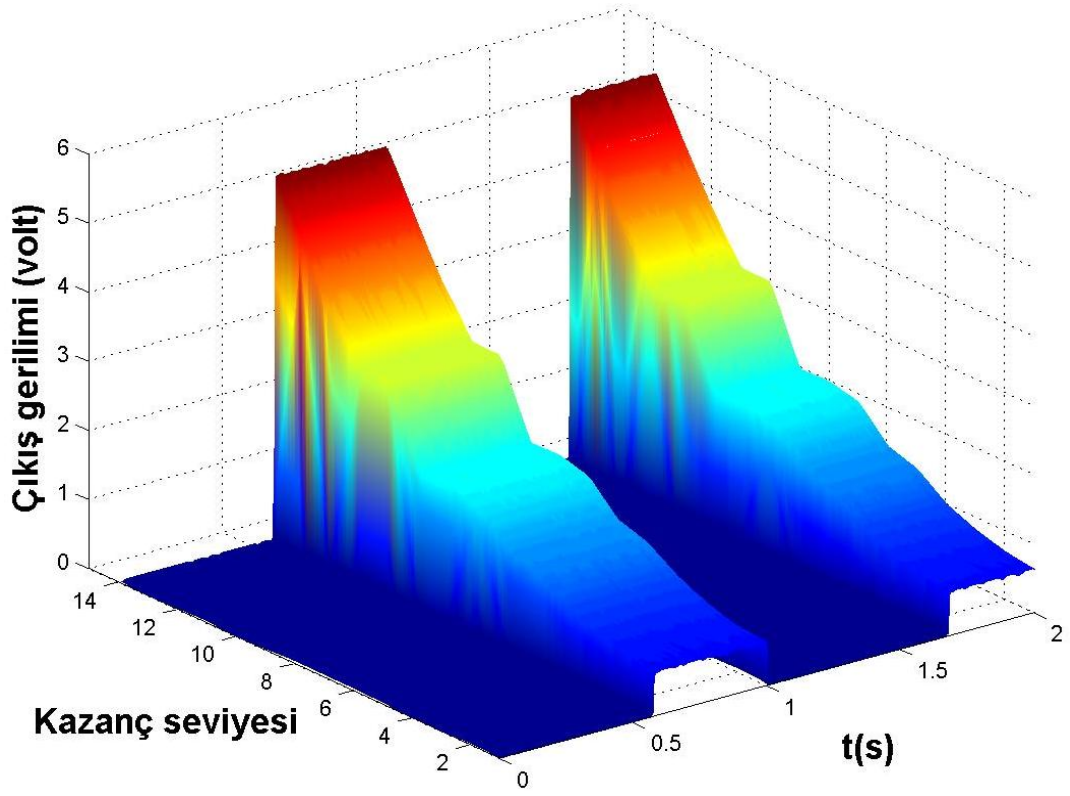
Bu devre için oldukça hızlı anahtarlama süresine ve yüksek akım sürebilme özelliğine sahip bir MOSFET transistöre ihtiyaç vardır. IRF510 bu amaca uygun bir MOSFET transistördür. IRF510'un yükseliş süresi 25 ns, düşüş süresi 12 ns ve maksimum drain akımı ise 5,6 A'dır. IRF510 MOSFET transistörü kullanılarak tasarlanan devre Şekil 3.41'de verilmektedir. MOSFET transistörün giriş uçlarına bağlanan ICL7667 entegresi MOSFET sürücü olarak çalışmaktadır. ICL7667 entegresi monolithic yüksek hızlı TTL seviyesindeki sinyali yüksek akım çıkışına dönüştüren bir entegredir. MOSFET transistörlerde yüksek frekanslı anahtarlama uygulamalarında kullanılan bu entegre amacımıza oldukça uygundur. Gate ve toprak uçları arasındaki kapasitansı çok hızlı olarak yükleyip boşaltan bu entegre, MOSFET üzerinde harcanacak güç kayıplarını en aza indirir. Çıkış empedansı yaklaşık 7Ω olduğundan sürebileceği akım miktarı oldukça yüksektir (300 mA). Çıkış empedansının bu kadar küçük olması büyük kapasitif yükleri çok hızlı bir şekilde anahtarlayabilme kabiliyeti kazandırır. Bu yüzden bu entegre, aynı zamanda yüksek güçlü CMOS çevirici olarak da düşünülebilir. 1000 pF'lık bir kapasitif yükü 40 ns'lik bir hızla sürebilir. Devredeki ani yüklenme ve boşalmalar dc güç kaynağından çekilen akımın çok kısa bir süre için yüksek değerlerde kalmasını gerektirebilir. Bu entegrenin dc besleme uçlarına paralel olarak bağlanan 4,7 μ F'lık tantalum kapasitör ve yine buna paralel bağlı 0,1 μ F'lık düşük indüktans değerine sahip kapasitör, bahsedilen problemin üstesinden gelmeye yeterlidir. Devredeki R_A direnci ve C_1 kapasitörünün üstlendiği görev, puls jeneratörünün (ani yüklenme ve boşalmalardan ötürü) dc besleme hattı üzerinde bıraktığı ringing gerilimini filtrelemesidir. Ringing gerilimine neden olan sebeplerden biri Lenz gerilimidir. R_A direncinin büyütülmesi, yükseliş ve iniş anahtarlama sürelerinin büyümesine neden olabilir. Bu nedenle R_A direncinin değeri dikkatli seçilmelidir. 1N5818 diyodu oldukça hızlı anahtarlama süresine sahip Schottky diyottur. Bu diyot devredeki indüktif etkilerden dolayı oluşacak Lenz gerilimini kısa devre yapma görevini üstlenmiştir. LED'in uçlarında oluşacak Lenz gerilimi LED'i ters yönde besleyerek LED guruplara zarar verecek düzeylere ulaşabilir. Bu nedenden 1N5818 diyodunun kullanılması kaçınılmazdır.



Şekil 3.41. Bilgisayar kontrollü duty cycle programlanabilen kare dalga jeneratörü ve LED akım sürücünün toplu devre gösterimi.

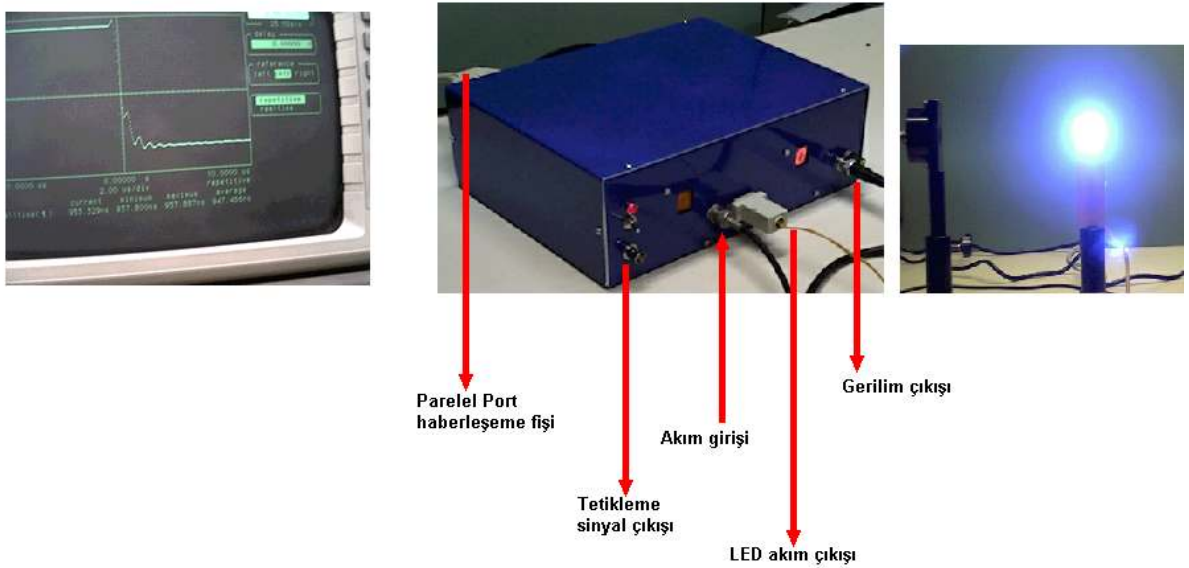
3.4.3. İşlemsel yükselteçli akımdan gerilime dönüştürücü

İşlemsel yükselteçli akımdan gerilime dönüştürücü yükselteci tasarlamadan önce a-Si:H ince filmin karanlıkta ve foton uyarımı altındaki direnç değerini kabaca bilmiş olmak gerekmektedir. Sıradan bir amorf silisyumun karanlıktaki direnci $50 \text{ G}\Omega$, ışık altındaki direnci ise yaklaşık $50 \text{ M}\Omega$ civarındadır. Örneğe uygulanan dc gerilimin 100 V olduğu durumda örnekten geçecek fotoakım 2 nA - $2 \text{ }\mu\text{A}$ arasındadır. Bu aralıkta yükseltgeme yapacak olan bir yükseltecin oldukça yüksek giriş empedansına ve yüksek slew rate değerine sahip olması gerekmektedir. Bu amaca uygun olarak JFET girişli, yüksek slew rate değerine sahip ve ucuz olan LF351 entegresi kullanıldı. Şekil 3.42'de bilgisayar kontrollü akımdan gerilime dönüştürücü (I to V) yükselteç devresi verilmektedir.



Şekil 3.43. Farklı kazanç seviyesi değerlerinde osiloskopta kaydedilen eğriler.

Şekil 3.44'de, tasarlanan LED puls jeneratörü ve bilgisayar kontrollü programlanabilen akımdan gerilime dönüştürücü yükselteç yardımı ile kurulan fotoiletkenlik tepki süresi deney düzeneğinin yakın görüntüsü verilmektedir.



Şekil 3.44. Fotoiletkenlik tepki süresi ölçüm düzeneğinin deney anında alınmış görüntüsü.

3.4.4. Tepki süresi düzeneğinin test edilmesi

Bu kesimde Şekil 3.36'da blok diyagramı ile verilen düzenek kuruldu. Düzenekte elde edilen ölçüm sonucu Şekil 3.45'te verilmektedir. Bilgisayar yardımıyla duty cycle 4 seviyesine (286 ms “on”/ 814 ms “off”) ayarlanmıştır. LED guruplarına yine bu çalışma içinde tasarlanan ayarlı akım kaynağı yardımıyla 36 mA akım sürülmüştür. Osiloskopta gözlenen dalga formunun tepki süresinin hesaplanmasında kullanılan ifade denklem (3.4.) ile verilmektedir.

$$\frac{1}{\tau_r} = - \frac{1}{I_{sc-pp}} \left. \frac{dI_{sc}}{dt} \right|_{t=0} \quad (3.4.)$$

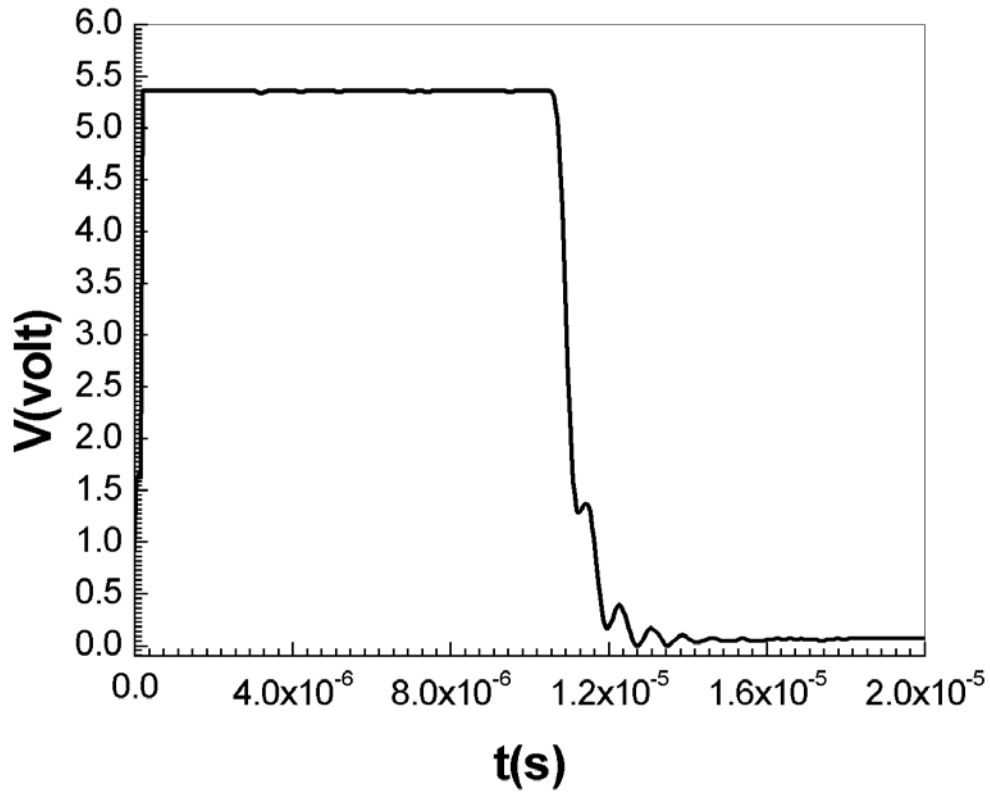
Bu formülde I_{sc} , pin fofodiyodun kısa devre (short circuits current) akım değeridir. $t=0$ anı diye belirtilen kritik nokta ise, sönümün başladığı anı ifade etmektedir. I_{sc-pp} ise kısa devre akımının sabit olarak devam ettiği maksimum değeridir. Osiloskopta ölçülen gerilim, kısa devre akımı ile doğru orantılı bir büyüklüktür. Bu yüzden denklem (3.4.)'te verilen ifadeyi çıkış gerilimi cinsinden yazmak gerekir. Eğer denklem (3.4.)'de I_{sc} yerine V/R_f yazılırsa, denklem (3.5.) elde edilir. Burada R_f , akımdan gerilime dönüştürücü yükseltecinde kullanılan geri besleme direncidir.

$$\frac{1}{\tau_r} = - \frac{1}{\frac{V_{pp}}{R_f}} \left. \frac{d}{dt} \left[\frac{V}{R_f} \right] \right|_{t=0} \quad (3.5.)$$

Verilen denklemde R_f , bir sabit olması sebebiyle türev ifadesinin dışına alınabilir. Bu durumda R_f 'ler sadeleşerek denklem (3.6.) elde edilir.

$$\frac{1}{\tau_r} = - \frac{1}{V_{pp}} \left. \frac{dV}{dt} \right|_{t=0} \quad (3.6.)$$

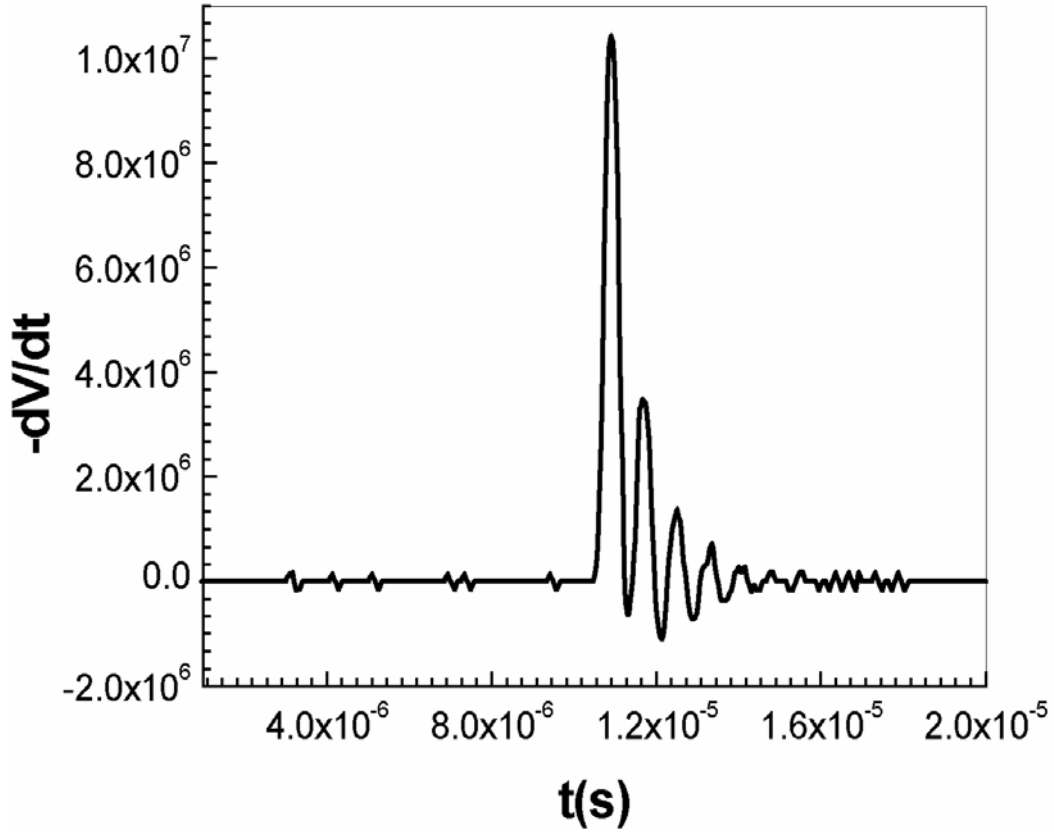
Denklem (3.6.)'da verilen tepki süresi ifadesi, sadece osiloskopun çıkışında elde edilen sinyal cinsinden ifade edilmektedir. Denklem (3.6.)'da verilen nümerik işlemin yapılması tepki süresine ulaşılmasına olanak tanır.



Şekil 3.45. BPW-34 pin foto diyodun osiloskopta gözlenen kısa devre akımı tepki süresinin değişimi.

Şekil 3.45'te osiloskopta kaydedilerek bilgisayara transferi yapılan sinyal verilmektedir. Şekil 3.46'da ise gerçek sinyalin zamana göre bir kez nümerik türevinin alınması sonucunda elde edilen sinyal gösterilmektedir. Şekil 3.46'da verilen türev eğrisinin maksimum noktası ($dV/dt \approx 10429500$) sönümün başladığı an olarak değerlendirilir. Şekil 3.45'te verilen grafikte ise, monokromatik uyarım kaynağının (mavi LED grupların) açık olduğu andaki kısa devre akımının kararlı durum değerinin, yükselteç çıkışındaki gerilim ($V_{pp} \approx 5,36$ V) karşılığı gösterilmektedir. Okunan bu iki değerden denklem (3.6.)'da verilen işleme tabii tutulması sonucu tepki süresi $\tau_r \approx 514$ ns olarak bulunur. Tepki süresi tüm sistemin algılayacağı sönüm süresini göstermektedir. Diğer bir deyişle kare dalga jeneratörü+yüksek akım anahtarlama devresi+LED grupların teki süresi+akımdan gerilime dönüştürücünün (I to V amplifier) tepki süresi+BPW 34 pin fotodiyodun tepki süresi ≈ 514 ns'yeye eşit olmaktadır. Bu deneyde tepki süresi doğrudan ölçülemeyen iki aygıt vardır. Bunlar; LED gruplar ve BPW34 pin fotodiyottur. Diğer elektronik aygıtların ölçülen tepki süreleri 60 ns civarındadır. BPW34 pin foto diyotun SIMENS ve VISHAY firmaları tarafından ölçülen düşüş (fall time) düresi

değeri 1 μm 'lik monokromatik aydınlanmada ve 10 V'luk ters beslemede 100 ns'dir. Yine bu firmaların kullanım kılavuzlarında açıkladıkları ölçümlere göre kullanılan monokromatik ışığın dalga boyu küçüldükçe ölçülen bu değer 50 ns'lere kadar inebilmektedir.

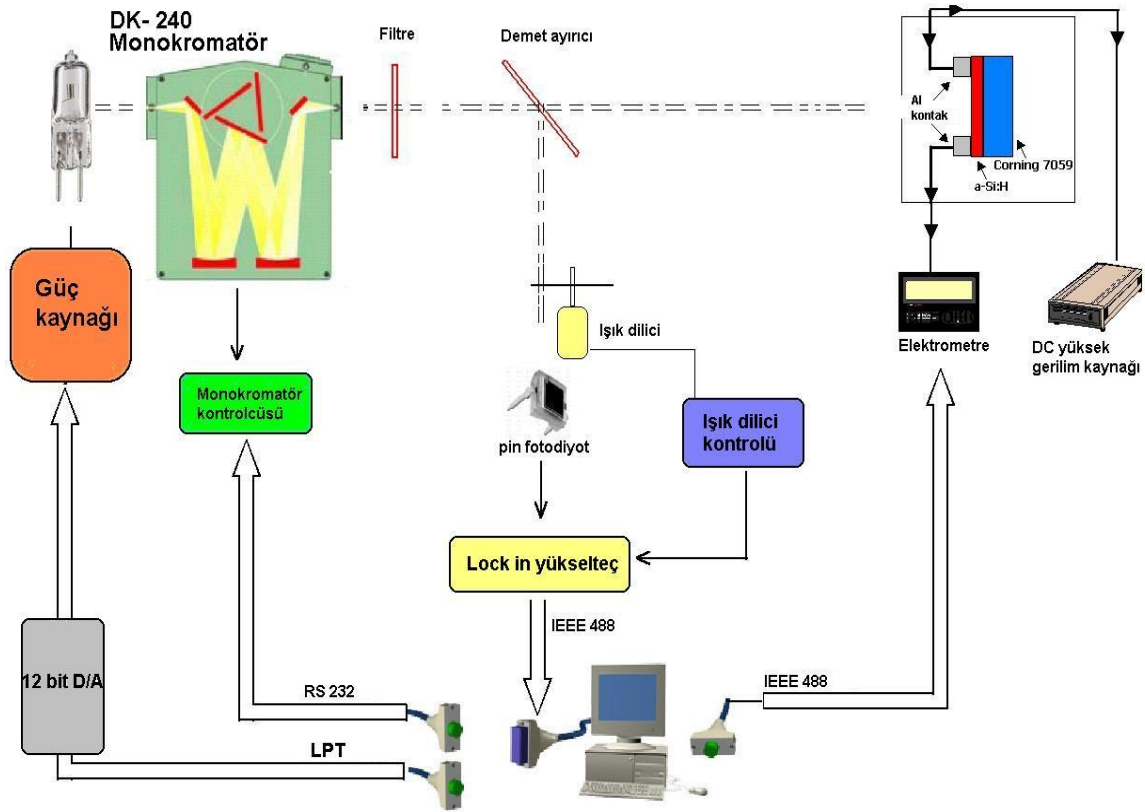


Şekil 3.46. BPW34 pin foto diyodun osiloskopta gözlemlenen kısa devre akımı tepki süresinin zamana göre bir kez türevinin alınmasıyla elde edilmiş eğri.

Şekil 3.44'te deney anında alınan bir görüntü verilmektedir. Şekildeki osiloskop ekranında, düşüş süresi (fall time) görülmektedir. Osiloskobun ölçtüğü düşüş süresi 900 ns civarındadır. Deneysel ölçümler sonucunda elde edilen 900 ns'lik düşüş süresinin kullanılan LED gurupların tepki süreleri ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Bu deneyin sonucunda elde edilen diğer bir sonuç ise, tepki ve düşüş sürelerinin rakamsal olarak tanımlanmış olmasıdır. Bu büyüklüklerin aralarındaki ilişki neredeyse iki kattır.

3.5. Sabit Fotoakım Ölçüm Düzeneği

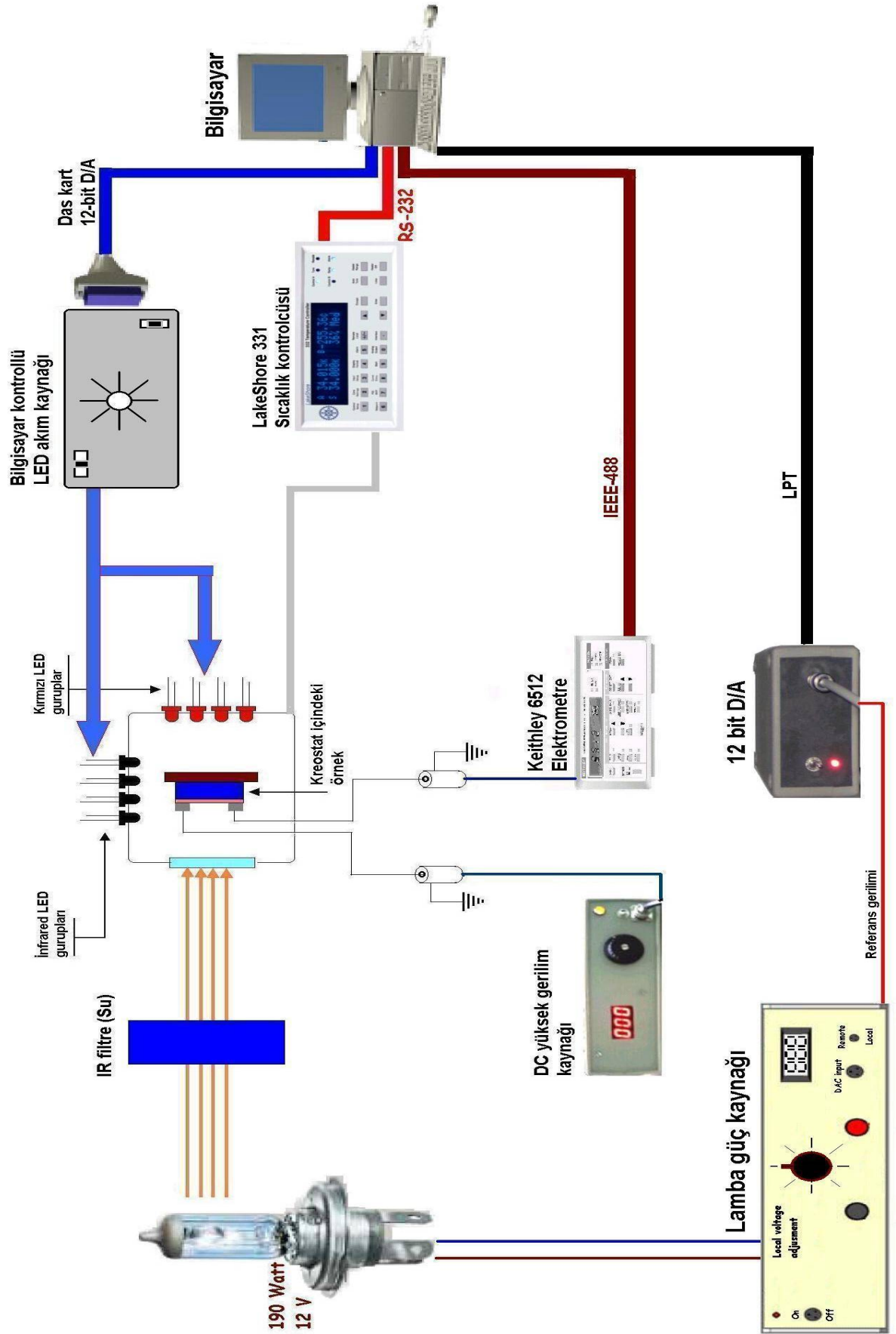
Bu tez çalışmasında örneklerin soğurma spektrumu dc-CPM düzeneği yardımıyla ölçülmüştür. Şekil 3.47’de dc-CPM düzeneği verilmiştir. Monokromatik ışık demeti, geniş spektrumlu bir kuvarz halojen lambadan çıkan ışığın bir monokromatörden geçirilmesi ile elde edilmiştir. Uzun dalga boyunu geçiren farklı filtreler kullanılarak monokromatörün gratinglerinden gelebilecek yüksek mertebeli kırınımalar engellenmiştir. Monokromatik ışık demeti, çalışılan dalga boyu aralığında (1050-650 nm) spektral bağımlılık göstermeyen, bir kuvarz demet bölücü yardımıyla ikiye ayrılmıştır. Demetlerden birisi kreostat içinde oda sıcaklığında tutulan örneğin yüzeyine, diğeri ise bir ışık diliciden geçirildikten sonra spektral dağılımı bilinen bir pin Si fotodiyot üzerine düşürülmüştür. Si fotodiyodun kısa devre akımı PAR5210 Lock-in yükselteç ile ölçülmüştür. CPM yönteminde, fotoakım sabit kalacak şekilde foton akısı değiştirilir. Bu amaçla fotoakımı ölçen elektrometrenin (Keithley-610C) çıkışında bulunan analog 0-3 V çıkış noktası kullanılmıştır. 12 bitlik A/D dönüştürücü bir kart yardımıyla elektrometrenin çıkışında okunan fotoakımla orantılı olan gerilim değerleri, uygun bir yazılım yardımıyla fotoakım değerlerine dönüştürülmüştür. Bu sayede uygun yazılım yardımıyla bilgisayar kontrollü güç kaynağının monokromatöre bağlı bulunan ampule ne kadar akım süreceği kontrol edilebilmektedir. Bu kontrol mantığı geri besleme döngüsü sağlamış olur. Bir tür geri besleme devresi gibi çalışan bilgisayar, ampulün güç kaynağını kontrol ederek fotoakımı seçilen değerde sabit tutmaktadır. Ölçüm süresince seçilen fotoakım değeri ardışık okuma süreçlerinde aynı değeri gösterdiği an, bilgisayar Si fotodetektörün çıkışındaki kısa devre akımını okuyarak seçilen dalga boyu için α ile orantılı büyüklüğü hesaplamaktadır. Dosyaya yazdırılan bu bilgiden sonra, bilgisayara RS-232 veri yolu üzerinden bağlı bulunan monokromatöre, bir sonraki dalga boyu adımına geçip aynı işlemleri tekrarlaması için gerekli komutlar gönderilir.



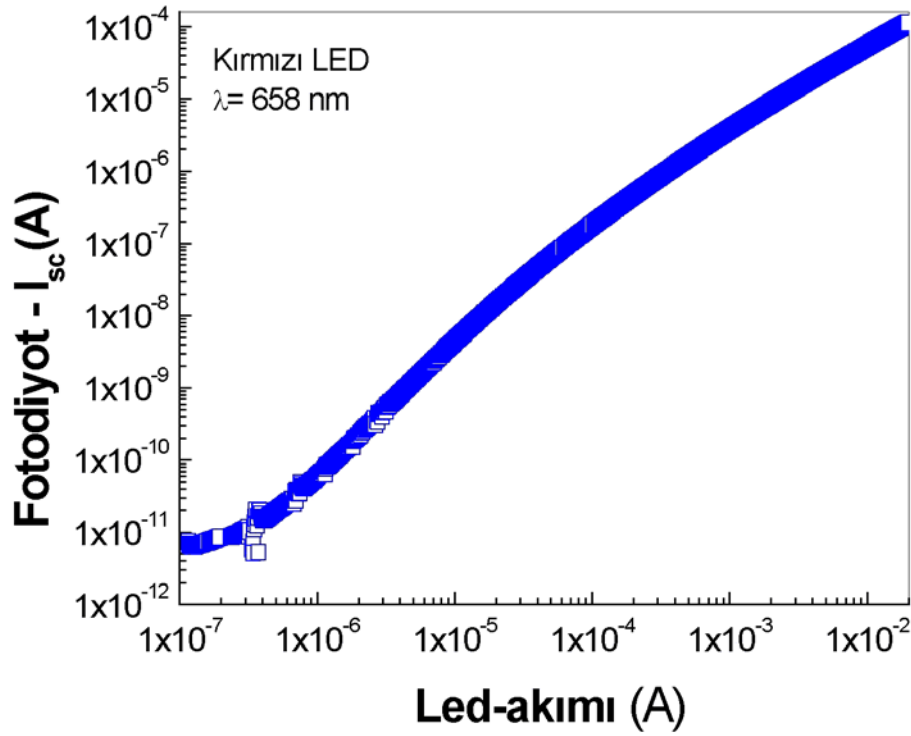
Şekil 3.47. CPM ölçü düzeneği.

3.6. Işıl Kusur Yaratma ve Tavlama Kinetiği Ölçüm Düzeneği

Yarı-kararlı kusurlar CPM deney düzeneğine ve Şekil 3.48’de gösterilen düzeneğe yapılan ek cihazlarla kurulmuştur. Şekil 3.48 ve ek cihazlar, CPM ölçü düzeneğindeki optik eksene dik bir optik ray üzerinde oturtulmuştur. Aydınlatma sürecinde kullanılan geniş spektrumlu kuvarz halojen lamba (190 W), üzerinde oluşacak ısıyı atabileceği 2 fandan oluşmuş alüminyum bir kutunun içine yerleştirilmiştir. Deneyde kullanılan lambanın oldukça yüksek güçlü olması, kararlı dc akım gereksinimine neden olmuştur. Bu amaçla, uzun süreler oldukça kararlı dc akım sürebilme yeteneğine sahip, bilgisayar kontrollü bir dc monokromatör lamba güç kaynağının tasarımı ve geliştirilmesi yapılmıştır. Şekil 3.48’de verilen LED gruplarını süren, oldukça geniş bir aralıkta kontrol yapabilme özeliğine sahip LED akım kaynağı da bu tez çalışması sürecinde tasarlanmıştır.

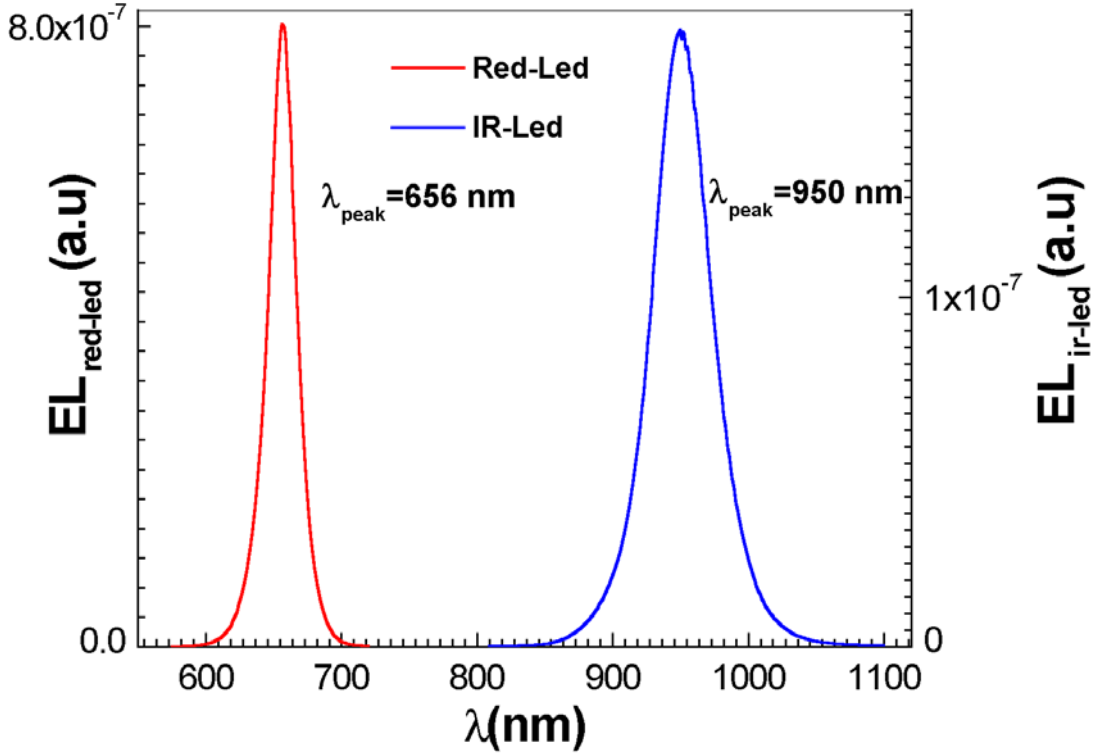


Şekil 3.48. Işıl kusur yaratma ve tavlama düzeneği.



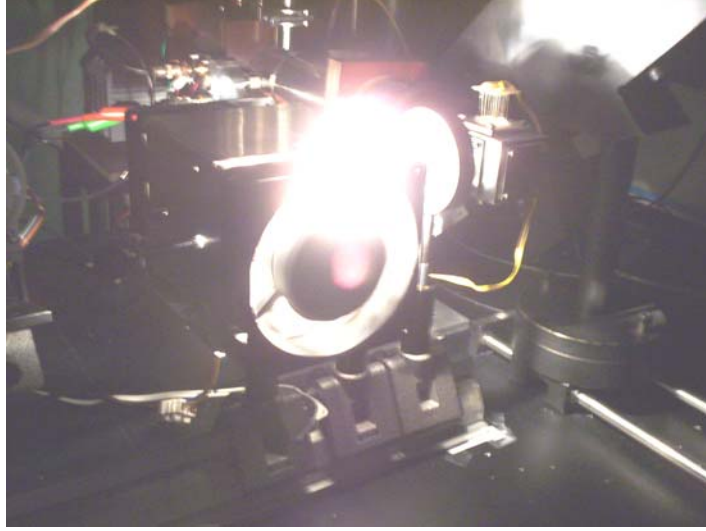
Şekil 3.49. Kırmızı LED gruplarının LED akımına karşı fotodiyot kısa devre akım değişimi.

Lambadan çıkan ışık mercekler yardımıyla örneğin üzerine homojen bir aydınlanma sağlayacak şekilde odaklanmıştır. Örnek üzerine halojen lambadan gelen ışık şiddeti daha önce KIPP and Zonen CM11 Pyranometreye göre kalibre edilmiş bir pin fotodiyot kullanılarak ölçülmüştür. Örnek üzerindeki aydınlanma şiddeti 500 mW/cm^2 'ye kadar değiştirilebilmektedir. Foton akısına bağlı fotoiletkenlik ölçümleri yapılmadan önce LED gruplara sürülen akım değerlerine karşın detektörden okunan kısa devre akım değerleri kaydedilip, gerekli kalibrasyon hesapları yapılmıştır. Şekil 3.49'da kırmızı LED gruplarının LED akımına karşın fotodiyot kısa devre akım değerleri verilmektedir. Daha sonra kullanılan grup Led'lerin (yakın kırmızı ötesi ve kırmızı renk) DK -240 monokromatör yardımıyla elektrolüminesans değişimleri ölçülmüştür. 24 mA'lık sabit akım altında çalışan LED lerin ölçülen elektrolüminesans değişimleri Şekil 3.50'de verilmektedir.



Şekil 3.50. Işıl kusur yaratma düzeneğinde kullanılan LED gruplarının elektrolüminesans değişimleri.

Şekildeki değişim incelendiğinde kırmızı renkte ışıldayan LED'in 656 nm'de, infrared LED'in 950 nm'de keskin lüminesans değişimi sergilediği gözlemlenmektedir. Spektral duyarlılık değişimi ve etkin alanı bilinen fotodiyot yardımıyla ölçülen kısa devre akım değerlerine karşılık gelen foton akısı değerleri, yazılan bir program yardımıyla 7. dereceden bir fonksiyona çakıştırılmıştır. Bu şekilde, bilinen LED akım değerlerinin örnek üzerinde hangi foton akısı değerine karşılık geldiği hesap edilmiştir. Kreostat başlığına uygun şekilde tasarlanan LED tutucular, örneğin bulunduğu noktayı homojen olarak aydınlatacak şekilde tasarlanmışlardır. Dönebilen kreostat başlığı yardımıyla, istenilen renkteki LED gruplarının yaydığı ışık demeti örneğin üzerine yönlendirilmiştir. Şekil 3.48'de verilen düzenekte optik eksen üzerindeki su kabı filtre görevi görerek, IR ışığı büyük ölçüde keser. Aydınlanma sürecinde örneğin sıcaklığının artmasını engellemek amacıyla helyum soğutmalı kapalı devre sistemi 293 K değerine ayarlanarak, örneğin oda sıcaklığında tutulması sağlanmıştır. Şekil 3.48'de verilen düzenek, örneklerin bazılarında farklı sıcaklıklarda foton akısına bağlı fotoiletkenlik ölçümlerinin yapılmasında da kullanılmıştır.



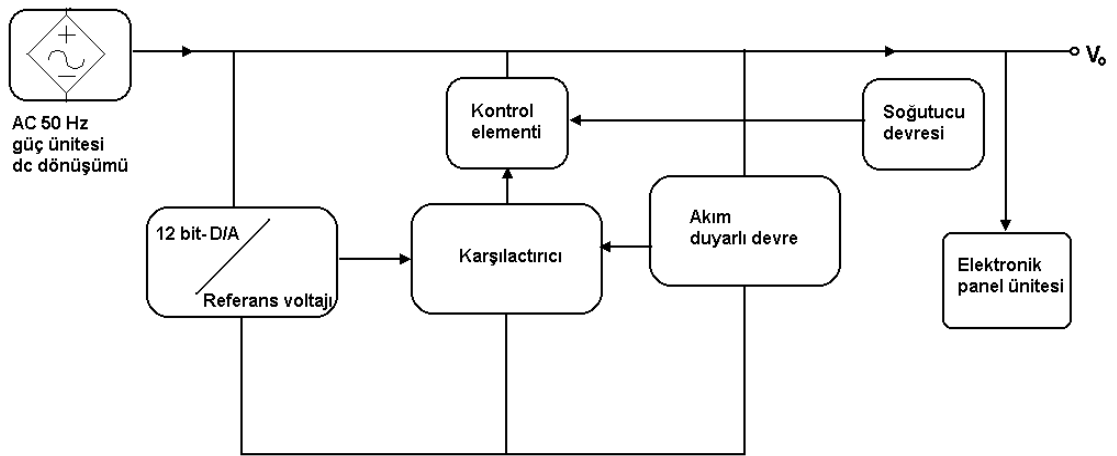
Şekil 3.51. Işıl kusur yaratma süreci sırasında kreostat bölgesinden bir fotoğraf.

Şekil 3.51’de ııl kusur yaratma deneyi sırasında kreostat ve lambanın bulunduğu bölgeden bir fotoğraf verilmektedir. Şekil 3.48’de verilen deney düzeneğinin hazırlanması aşamasında, özellikle kuvartz halojen lambanın uzun süreler boyunca kararlı ve sürekli bir spektrum yaymasını sağlamak amacıyla, yüksek kararlılıkta ve ayarlanılan sabit gerilimde yüksek akım sürebilme yeteneğine sahip bilgisayar kontrollü monokromatör lamba güç kaynağı tasarlanmıştır. Tasarlanılan güç kaynağının tasarım ve uygulama aşamaları aşağıda tartışılmaktadır.

3.6.1. Bilgisayar kontrollü monokromatör lamba güç kaynağı

Genellikle optik geçirgenlik ölçüm düzeneğinde tercih edilen foton kaynağı kuvartz halojen ampuldür. Kuvartz halojen ampulün oldukça ucuz ve uzun kullanım süresi (5000 saat) optik geçirgenlik ölçümü dışında oldukça geniş bir bilimsel alanda kullanıma sahip olmasına sebep olmaktadır. Konu, daha doğru ve kararlı bir spektroskopik ölçüm olduğunda bu ampullerin foton akısı kararlılığı oldukça büyük önem kazanmaya başlar. Ampulün yaydığı foton akısı ve spektrumu doğrudan fitil sıcaklığı ile ilgilidir. Yüksek fitil sıcaklığı geniş bir spektrum anlamına gelir. Yüksek ve kararlı fitil sıcaklığı ise, kararlı ve yüksek akım kaynağı gerektirir. Ampulü besleyen güç kaynağının dc çıkış karakteristiğinin salınım yapması, ampulün yaydığı foton akısının dc güç kaynağının çıkışındaki salınım frekansı ile modüle olmasına neden olur ve bu ilişki iki katı olarak çalışır. Eğer bir ampul 50 Hz’lik ac

gerilim ile beslenirse, çıkış foton akısı 100 Hz'lik frekans ile salınım yapar. Foton akısındaki bu salınım dc bir foton akısı içerisinde çok küçük bir genliğe sahiptir. Diğer bir deyişle bu koşulda çalışan bir ampulün çıkış foton akısı izlendiğinde görülecek sinyal, yüksek değere sahip sürekli bir spektrumun içinde çok düşük bir kesre sahip, salınan bir foton akısıdır. Ampulün yaydığı foton akısındaki dalgalanma kararlı ve tekrarlanabilir olduğu sürece uygun fourier transformu ile gerçek deneysel veri içinden elenebilir. Fakat ampulü besleyen dc güç kaynağında bir kararsızlık problemi varsa bu ampulün foton akısında flicker gürültüsü adı verilen bir bozunuma neden olabilir. Bunun sonucunda ampulün bağlı bulunduğu monokromatör yada spektrometrenin çıkış karakteristiği ciddi bir şekilde bozunuma uğrar. Ampulün ilk çalışma anından yaklaşık 300 s sonra fitil sıcaklığı belirgin bir şekilde artmaktadır. Oda sıcaklığında bulunan bir ampulün 300 s sonra fitilindeki sıcaklık artık 4000 K civarındadır. Oldukça yüksek sıcaklık değişimi sergileyen fitilin, bu aralıkta direnci, metal olmasından dolayı kayda değer bir miktarda büyümektedir. Mükemmel bir monokromatör lamba dc güç kaynağı, uçlarına bağlı ampulün direnç değerindeki bu ani değişimleri algılayıp, ampule sürdüğü toplam elektriksel gücü sabit tutmalıdır. Ampulün yaydığı foton akısı ancak bu şekilde kararlı kalabilir. Özellikle sabit foton akısında uzun süreler aydınlanma gerektiren ısı kusur yaratma deneylerinde böyle bir dc güç kaynağı ihtiyaç olarak görünmektedir. Bu nedenle, bilgisayar kontrollü dc lamba güç kaynağının tasarımı yapılmıştır. Şekil 3.52'de tasarım yapılan güç kaynağının blok diyagramı verilmektedir.

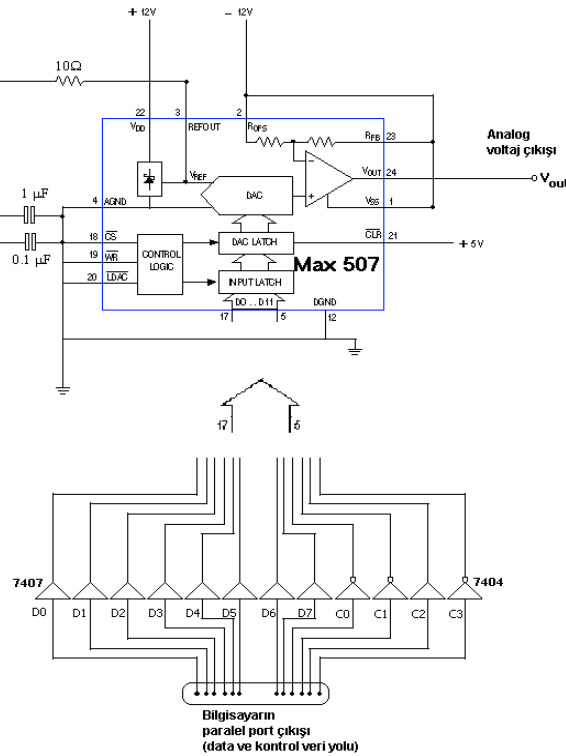


Şekil 3.52. Geliştirilen güç kaynağının blok diyagramı.

Şekilde verilen diyagram referans gerilimini sağlayacak 12 bit D/A dönüştürücü, kontrol elementi, akım duyarlı devre, soğutucu kontrolü ve LED göstergeli panelmetreden oluşmaktadır.

3.6.1.1. 12 bit D/A

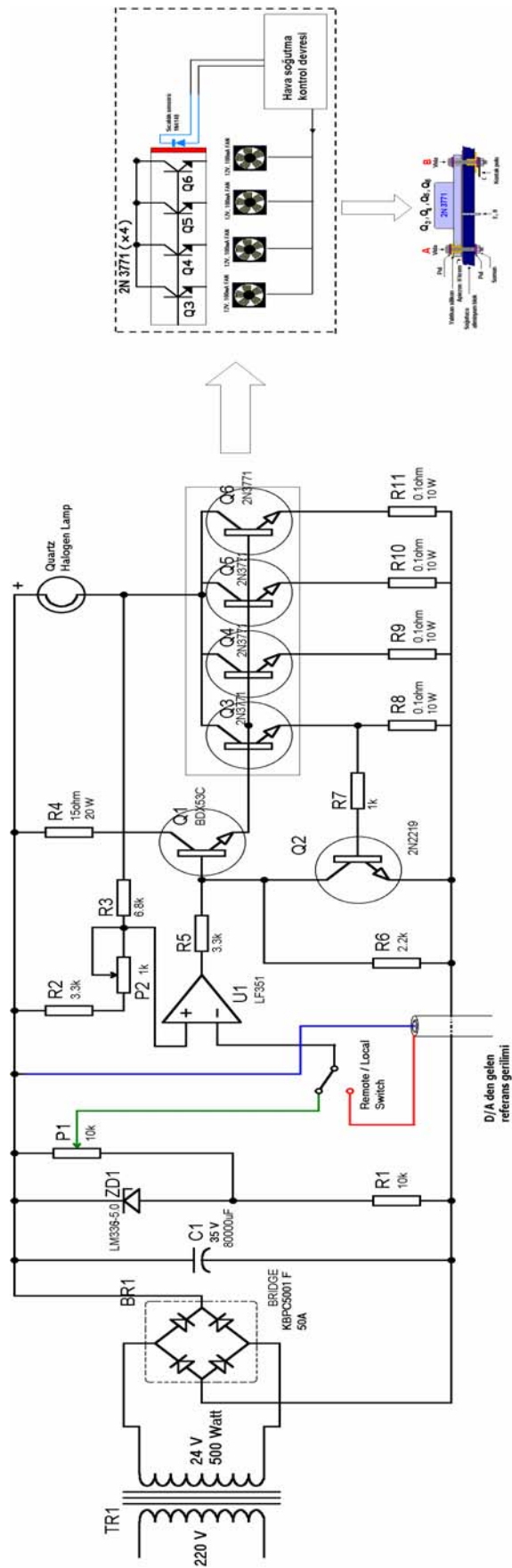
Güç kaynağının ilk ve en önemli parçası olan bu kısım, devrenin bilgisayar kontrollü voltaj referans kaynağı olarak çalışmaktadır. Devrede kullanılan MAX507 entegresi 12 bit paralel bilgi girişli monolithic D/A dönüştürücüdür. Çıkış kurulum süresi (settling time) 5 μ s'dir. ± 15 V'luk simetrik besleme altında güç tüketimi 450 mW'tır. D/A dönüştürücünün maksimum akım sürebilme kapasitesi 5 mA'dir. Devrenin 0-5 V gerilim aralığındaki çözünürlüğü yaklaşık 1,25 mV'tur. Devrenin açık şeması Şekil 3.53'de verilmektedir ve dijital girişleri 7404 ve 7407 tampon entegreleri ile korunmuştur. Devrenin kontrol bitleri paralel porttan gelen data ve kontrol veri yolu ile sağlanmıştır. 12 bit'lik dijital verinin 8 biti data veri yolundan, 4 biti ise kontrol veri yolundan gelmektedir. Qbasic altında yazılan program rutini ile D/A çıkışına istenilen gerilim (0-5 V aralığında) değerini sürmek mümkündür.



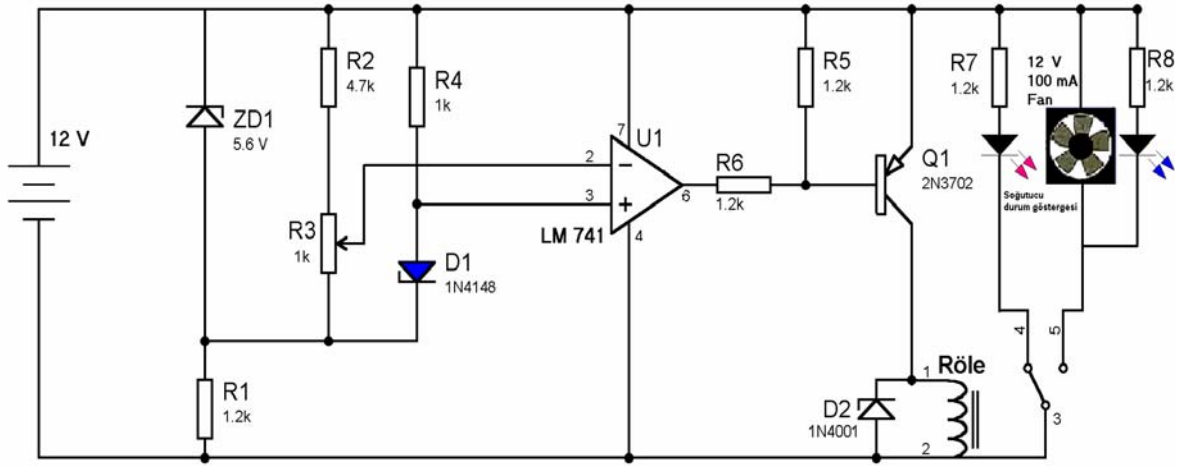
Şekil 3.53. Geliştirilen güç kaynağının 12 bitlik D/A kesiminin açık devre diyagramı.

3.6.1.2. Güç elektroniği ve test süreci

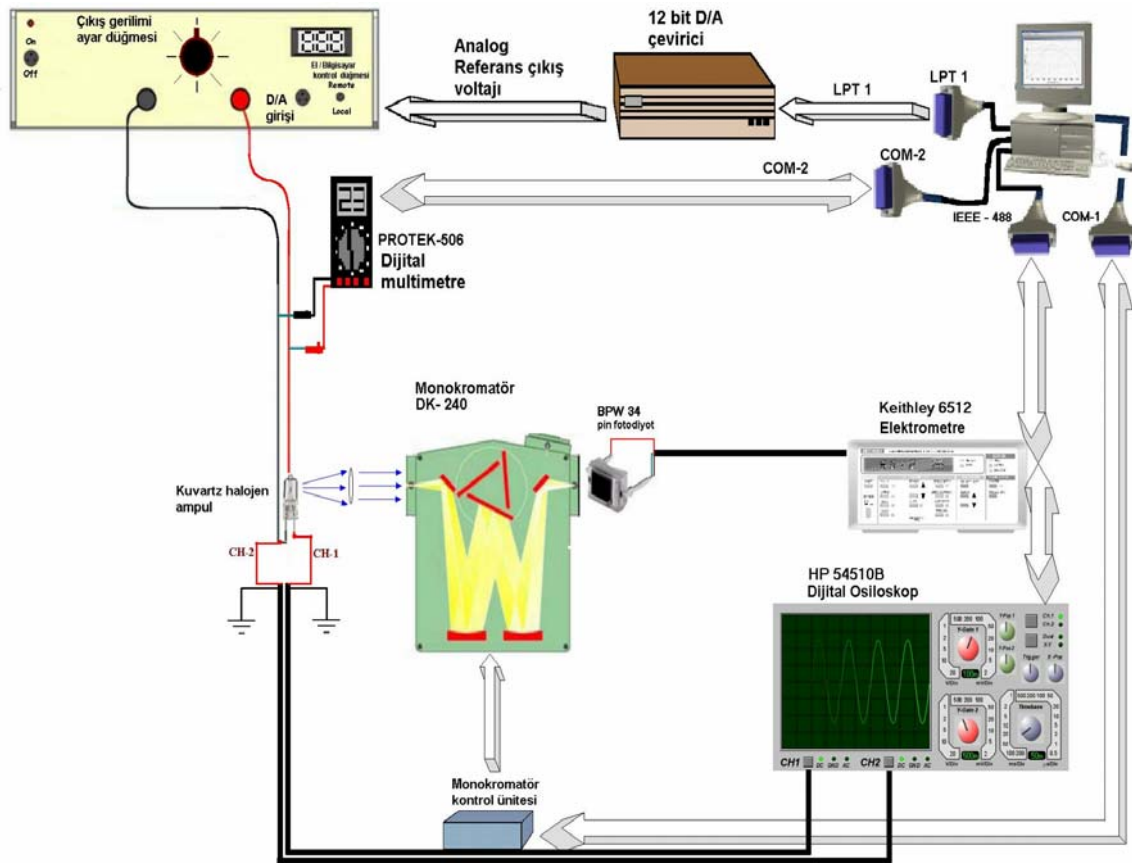
Devrenin güç elektroniği ilgili açık devre şeması Şekil 3.54'te verilmektedir. Devrenin ilk kesiminde yaklaşık 600 W'lık 220 V'u 24 V'a dönüştüren transformatör vardır. Transformatörün çıkışındaki 50 Hz'lik ac gerilim, 50 A akım sürebilme kapasitesine sahip bir köprü diyot yardımıyla dc gerilime dönüştürölür. Köprü diyot kılıfı soğutucu gövdeli ve hava soğutmalıdır (3 W'lık fan yardımıyla sürekli soğutulmaktadır). Köprü diodun çıkışında elde edilen tam dalga dc gerilim, yüksek sığa değeriine sahip bir kapasitans yardımıyla tam dalga dc'ye dönüştürölür. 36 V'luk regülesiz dc gerilim, Q_1 darlington transistörüne ve Q_3 – Q_6 transistor grubuna sürölür. Transistörler, aralarında yaklaşık 20 mm boşluk bırakılarak, 40 cm uzunluğunda alüminyum blok soğutucu üzerine monte edilmiştir. Transistörlerin alüminyum blok soğutucuya termal kontağı Apiezon-H ile sağlanmıştır. 12 bit'lik D/A, dc regüleli referans voltajını U_1 işlemsel yükselteciine uygular. Yükselteç, bu gerilimi çıkış gerilimi ile kıyaslayıp darlington transistör yardımıyla emiter takipçisi olarak bağlanan transistörlerin beyz uçlarına akım sürer. Buradaki Q_3 – Q_6 transistor gurubu kontrol elementi olarak çalışmaktadır. Devre tamamıyla kısa devre korumalıdır. Devrenin çalışma anında transistörler üzerinde açığa çıkan sıcaklık miktarı 120 °C'ye ulaşabilmektedir. Sıcaklığın bu derece yükselmesi, transistörlerin β değeriinin değışimine yol açabilir. Bu ihtimale karşın hava soğutmalı sıcaklık kontrolcüsü tasarlanmıştır. Elektronik soğutma ünitesi temel olarak, transistörlerin bağı bulunduğı alüminyum blok üzerindeki sıcaklığı ölçüp, 36 °C'nin üstüne yükselmişse devreye bağı bulunan röleyi enerjilendirip fanları devreye sokmaktadır. Sıcaklık ölçme sensörü olarak sıradan 1N4148 silisyum diyot kullanılmıştır. Şekil 3.55'te hava soğutmalı sistemin sıcaklık kontrol ünitesinin açık devre diyagramı verilmektedir. Devrenin tasarımı tamamlandıktan sonra Şekil 3.56'da verilen test düzeneğı kurulmuştur. Düzenekte fotodetektör olarak BPW34 pin fotodiyot kullanılmıştır. Fotodetektörün çıkışındaki kısa devre akımı Keithley 6512 elektrometre ile ölçölmüştür. Elektrometrenin pc ile haberleşmesi ve verileri uygun zaman aralıklarında ölçmesi Qbasic'te hazırlanan programlar yardımıyla yapılmıştır. Monokromatörün çıkış dalga boyu 3 temel rengi oluşturan dalga boylarına ayarlanarak çıkıştaki foton akısının kararlılığını ölçmek hedeflenmiştir.



Şekil 3.54. Monokromatör lamba güç kaynağının güç elektroniği kısmı.

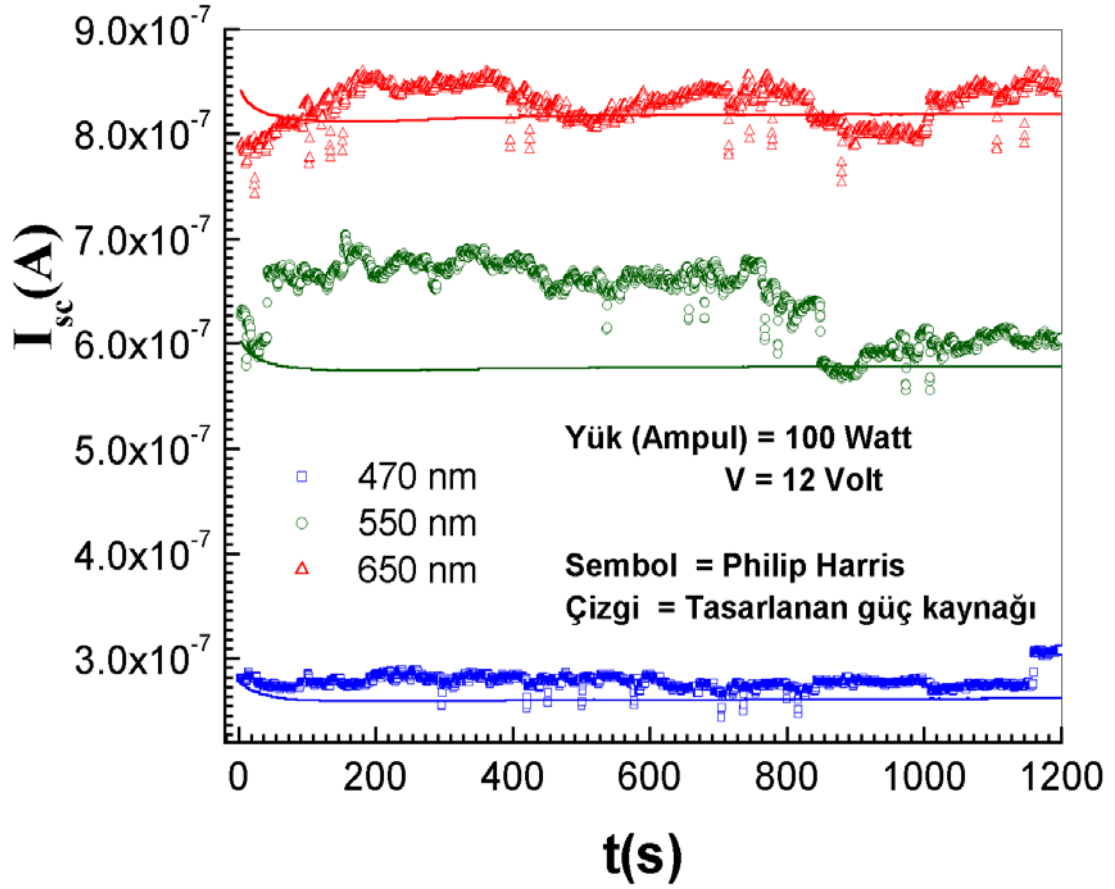


Şekil 3.55. Fanları açıp kapatan sıcaklık kontrol devresi.



Şekil 3.56. Tasarlanan monokromatör lamba güç kaynağını test etmek amacıyla kullanılan deney düzeneği.

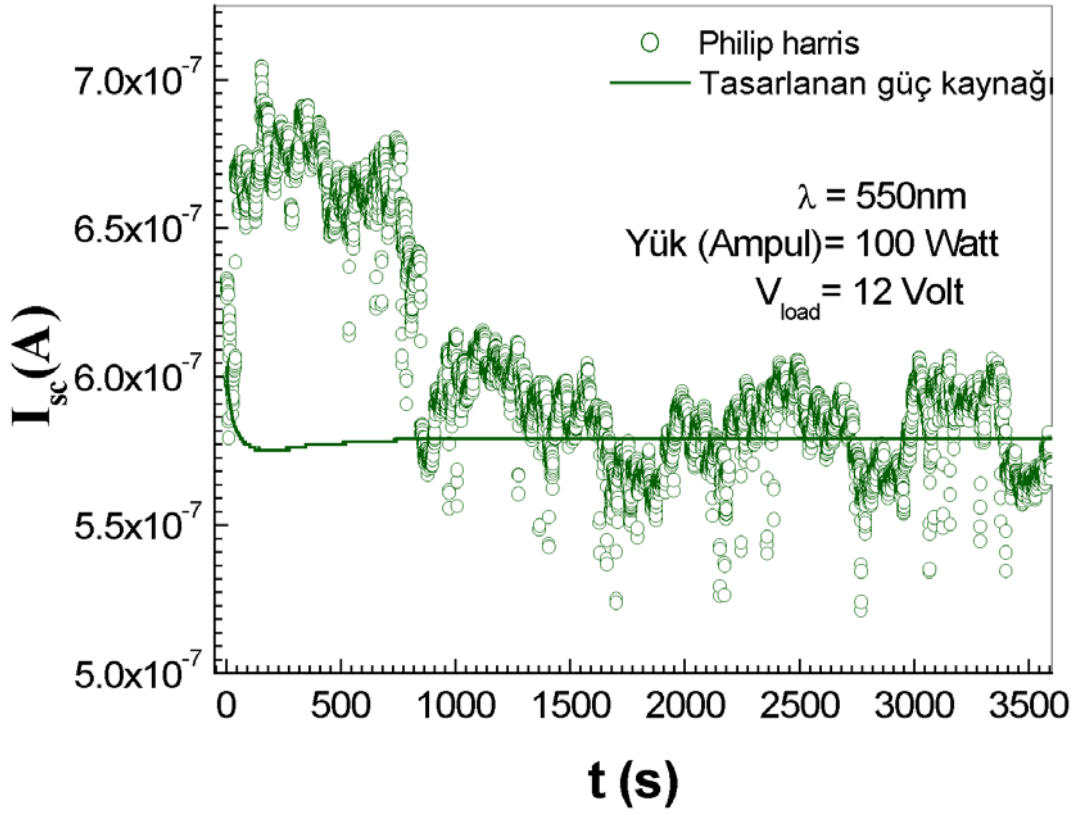
Bu amaçla ayarlanılan dalga boylarında lambaya sürülen güç sabit tutulup fotodiyodun kısa devre akımı her 300 ms’de bir ölçülüp kaydedilmiştir. Sabit bir dalga boyunda ölçülen kısa devre akımı doğrudan foton akısı ile orantılıdır. Devrenin çıkış karakteristiği çıkışına bağlanan farklı güç değerine sahip ampullerle test edilmiştir. Elde edilen değişimler sıradan bir güç kaynağının performansı ile üst üste çizilerek karşılaştırılmıştır. Şekil 3.57’de kurulan test düzeneği yardımıyla alınan veriler sunulmaktadır.



Şekil 3.57. Bilgisayar kontrollü ve sıradan bir güç kaynağı ile sürülen monokromatör lambasının fotodiyotta oluşturduğu kısa devre akımının zamana göre değişimi.

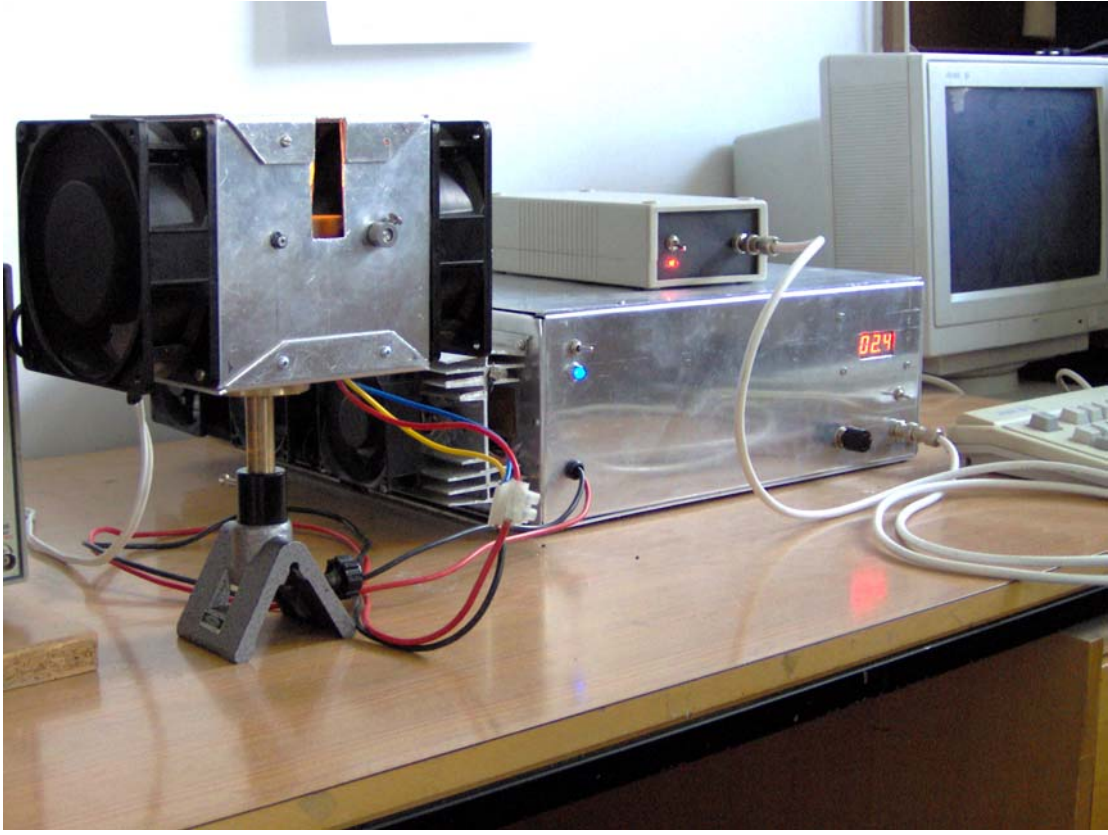
Şekil 3.57’de sıradan bir güç kaynağı (Philip Harris) ve tasarlanan güç kaynağı arasındaki fark sergilenmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, sıradan güç kaynağına bağlandığında foton akısında dalgalanma sergileyen ampul, tasarımı yapılan güç kaynağına bağlandıktan sonra oldukça kararlı bir değişim sergilemektedir. Foton akısındaki salınımlar fitil sıcaklığı ile doğrudan ilgilidir. Fitol

sıcaklığındaki değişimler ise ampulü besleyen güç kaynağının elektriksel güç çıkışındaki dalgalanmayı göstermektedir.



Şekil 3.58. Fotodiyodun kısa devre akımının zamana karşı değişimi.

Şekil 3.58'deki grafik bir önceki grafikte verilen, 550 nm için olan değişimin tek başına gösterilmiş halidir. Tasarlanan güç kaynağının çıkış karakteristiği incelendiğinde ilk 300 s'lik değişimde üstel bir azalma gözlenmektedir. Bu azalış fitil sıcaklığındaki ani yükselişten kaynaklanmaktadır. Ampulün içindeki fitil 300 s süre içerisinde ısı dengeye ulaşmaktadır. Bunun sonucunda çıkış foton akısı oldukça kararlı bir şekilde kalmaktadır. Şekil 3.59'da ise tasarımı ve uygulaması tamamlanıp çalışır hale getirilen monokromatör lamba tutucusu ve güç kaynağının yakından çekilmiş fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 3.59. Tasarımı ve uygulaması tamamlanmış bilgisayar kontrollü monokromatör lamba güç kaynağı.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Helyum ve silan gazı karışımı kullanılarak elde edilen amorf silisyum ince filmlerin, optik ve elektriksel özellikleri, Bölüm 3'te deneysel düzenekleri verilen yöntemler ile incelenmiştir. Bölüm 4'te, deneysel veriler ve bu verilerin fiziksel analizi sonucunda elde edilen grafik, çizelge ve şekiller sunulacaktır.

Bir PECVD sisteminin vakum odasında silan (SiH_4) ve helyum (He) gazı karışımları kullanılıp, bu karışımın toplam basıncı ve karışım oranı, alttaş sıcaklığı, RF gücü değiştirilerek çok sayıda a:Si-H filmler hazırlanmıştır. [He] ve [SiH_4] sırasıyla He ve SiH_4 gazlarının kısmi basınçlarını göstermek üzere, seyreltme oranı (D.R);(Dilution Rate),

$$D.R = \frac{[\text{He}]}{[\text{He}] + [\text{SiH}_4]} \quad (4.1.)$$

ile ifade edilir. Burada [He]+[SiH_4] vakum odacığındaki toplam basınç değeridir. Çizelge 4.1'de, çalışmada büyütülen tüm örneklerin film hazırlama koşulları verilmektedir. Hazırlanan tüm örneklerin optik ve elektriksel ölçümlerine ek olarak örnek içindeki hidrojen oranını bulabilmek amacıyla set-2-3-4 ve 5'in kırmızıaltı spektrumları ölçülmüştür.

Çizelge 4.1. Optik ve elektriksel ölçümlerle incelenen filmlerin hazırlama koşulları.

		D.R[%]	Toplam basınç (mT)	RF gücü(W)	Alttaş sıcaklığı(°C)
Set-1	1	50	500	4,5	300
	2	80	500	4,5	300
	3	90	500	4,5	300
	4	96	500	4,5	300
	5	98	500	4,5	300
Set-2	1	0	500	4,5	300
	2	25	500	4,5	300
	3	50	500	4,5	300
	4	70	500	4,5	300
	5	85	500	4,5	300
	6	90	500	4,5	300
	7	98	500	4,5	300

		D.R[%]	Toplam basınç (mT)	RF gücü(W)	Altaş sıcaklığı(°C)
Standart örnek seti	1	0	200	4,5	200
	2	0	200	4,5	210
	3	0	200	4,5	220
	4	0	200	4,5	230
	5	0	200	4,5	240
	6	0	200	4,5	260
	7	0	200	4,5	300

		D.R[%]	Toplam basınç (mT)	RF gücü(W)	Altaş sıcaklığı(°C)
Set-3	1	95	200	18,1	230
	2	95	300	18,1	230
	3	95	500	18,1	230
	4	95	900	18,1	230
	5	95	1200	18,1	230

		D.R[%]	Toplam basınç (mT)	RF gücü(W)	Altaş sıcaklığı(°C)
Set-4	1	95	1200	9,8	230
	2	95	1200	13,6	230
	3	95	1200	18,1	230
	4	95	1200	19,9	230
	5	95	1200	24,8	230
	6	95	1200	27,5	230
	7	95	1200	30,1	230

		D.R[%]	Toplam basınç (mT)	RF gücü(W)	Altaş sıcaklığı(°C)
Set-5	1	85	1200	19,9	230
	2	90	1200	19,9	230
	3	95	1200	19,9	230
	4	97	1200	19,9	230
	5	99	1200	19,9	230

		D.R[%]	Toplam basınç (mT)	RF gücü(W)	Altaş sıcaklığı(°C)
Set-6	1	99	1200	19,9	180
	2	99	1200	19,9	200
	3	99	1200	19,9	230
	4	99	1200	19,9	240
	5	99	1200	19,9	250
	6	99	1200	19,9	270
	7	99	1200	19,9	300

* Çizelgedeki 4,5 W'lık RF güç değerinin, detayları Bölüm 3'te anlatılan RF güç ölçer ekipmanları ile yapılan kalibrasyonlar sonunda 19,9 W değerine karşılık geldiği hesaplanmıştır.

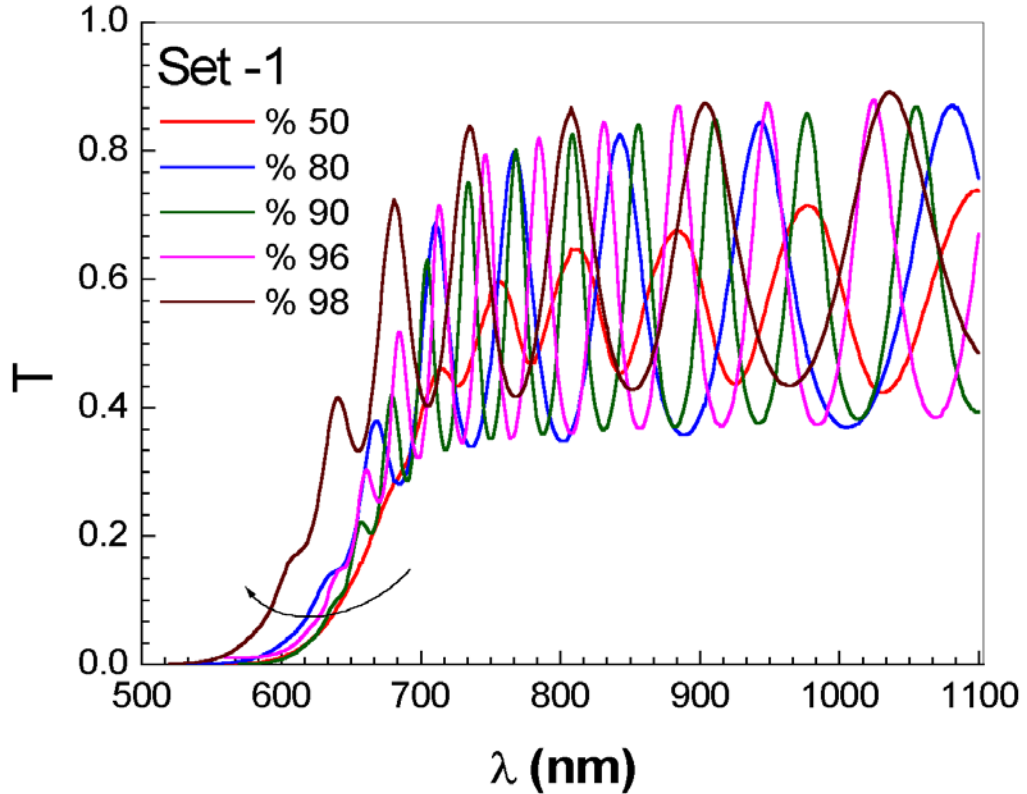
4.1. Set-1 Örnekleri

Bu kesimde, film hazırlama parametreleri Çizelge 4.1'de verilen set-1 örneklerinin elektriksel ve optik ölçüm sonuçları verilecektir.

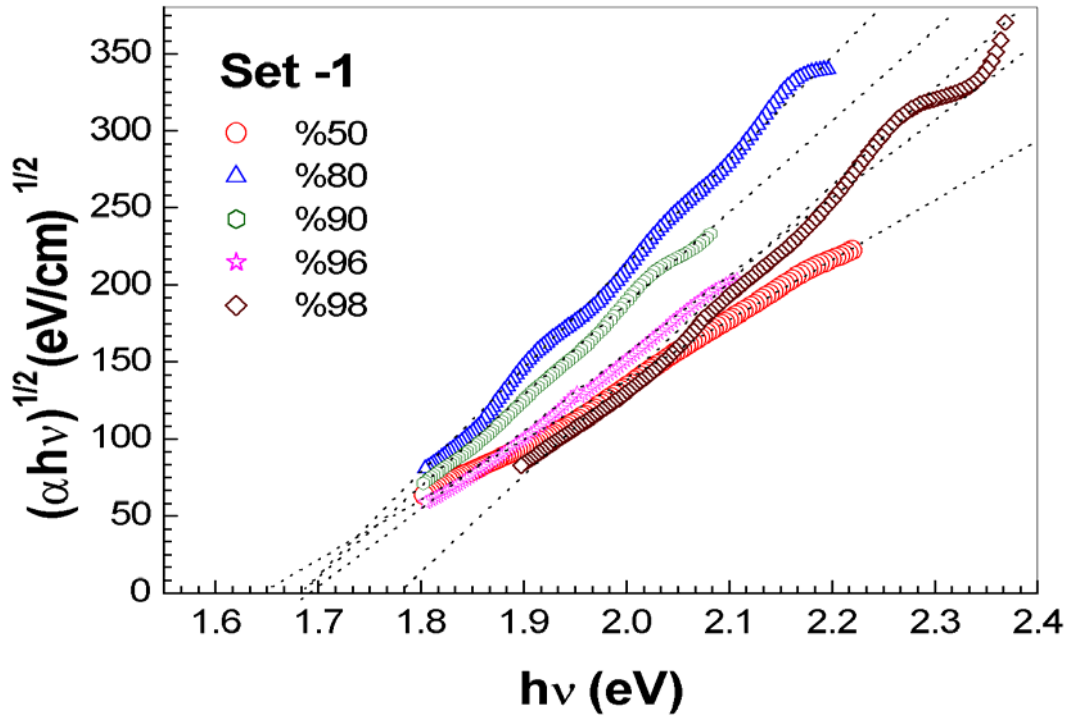
4.1.1. Optik geçirgenlik

Optik geçirgenlik ölçümü yardımıyla, film kalınlığı d , dalga boyuna bağlı kırma indisi, n ve soğurma katsayısı, α , (Swanepoel, 1983), ile Tauc (Tauc, 1972) yöntemi kullanılarak optik aralık, E_g^{Tauc} belirlenebilmektedir. Büyütülen a-Si:H filmlerin, farklı seyreltme oranları için, optik geçirgenlik spektrumları Şekil 4.1'de verilmiştir. Optik geçirgenlik ölçümü verilerinden hesaplanan soğurma spektrumu değerleri kullanılarak elde edilen Tauc çizimleri ise Şekil 4.2'de verilmiştir.

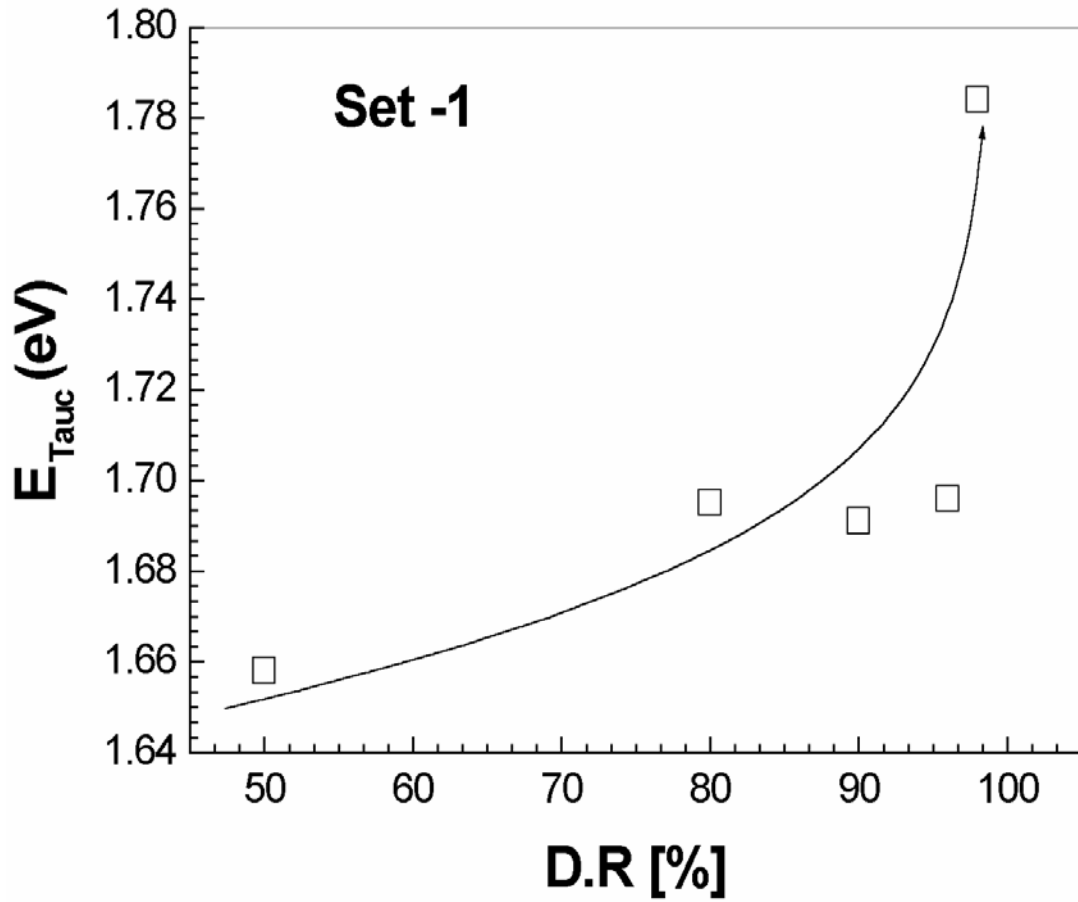
Şekil 4.2'de helyum seyreltme oranının artması ile Tauc bant aralığının büyüdüğü görülmektedir. Şekil 4.3'te seyreltme oranına bağlı olarak Tauc bant aralığının değişimi verilmektedir. Tauc optik bant aralığının helyum seyreltme oranına bağlı olarak 1,78 eV -1,66 eV arasında değiştiği gözlenmektedir.



Şekil 4.1. Set-1 örneklerinin optik geçirgenlik spektrumunun seyreltme oranına bağlı değişimi.

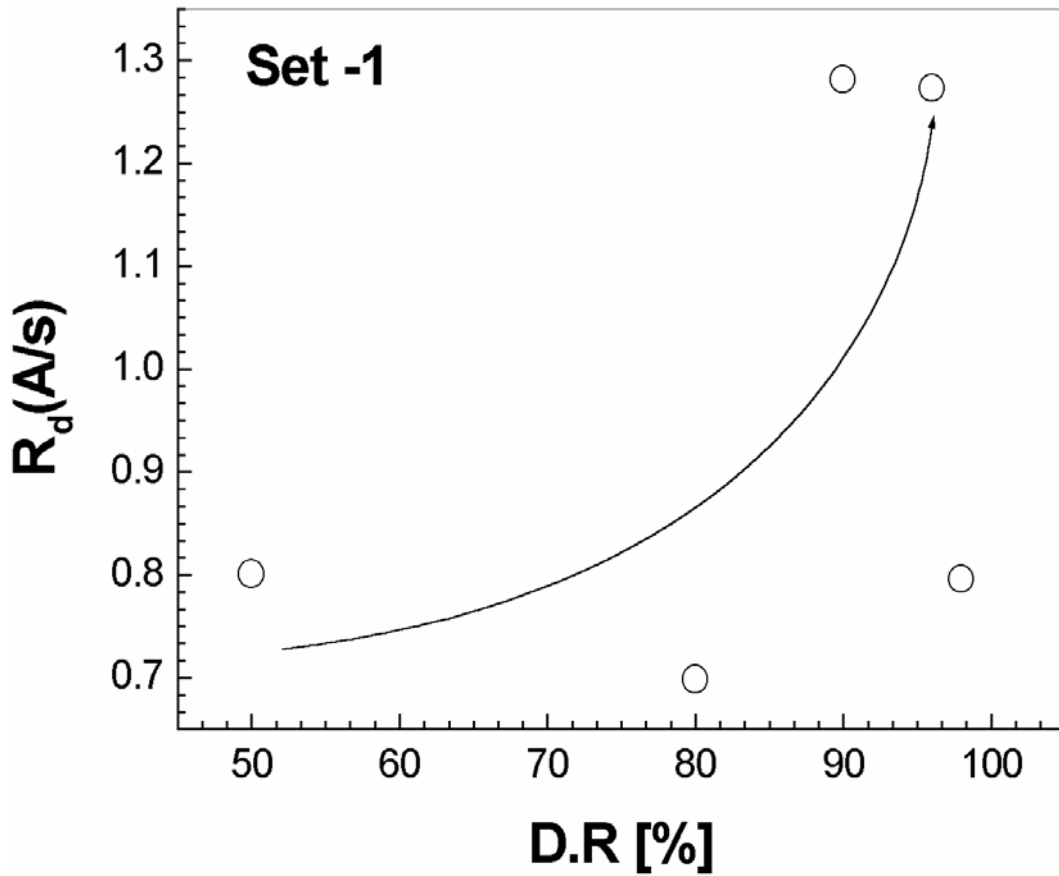


Şekil 4.2. Set-1 örneklerinin Tauc çizimleri.



Şekil 4.3. Tauc yaklaşımından elde edilen bant aralığı enerji değerlerinin seyreltme oranına bağlı değişimi.

Optik geçirgenlik spektrumlarından yararlanarak, set-1 örneklerinin kalınlık değerleri ve hazırlama süreleri kullanılarak film büyüme hızları hesaplanmıştır. Film büyüme hızının (R_d) helyum oranına bağlı değişimi Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, film büyüme hızı, artan helyum oranı ile birlikte artmaktadır. Literatürde film büyüme hızının helyum seyreltme oranına bağlı değişimini ortaya koyan bir çalışmaya rastlanamamıştır. Ancak sabit bir seyreltme oranında toplam gaz basıncının film büyütme hızına bağlı değişimini ortaya koyan çalışmalar vardır ve bu çalışmalarda, artan toplam basınç değerlerinde film büyüme hızının da arttığı ortaya konulmuştur (Middya et. al., 1999, 1996).

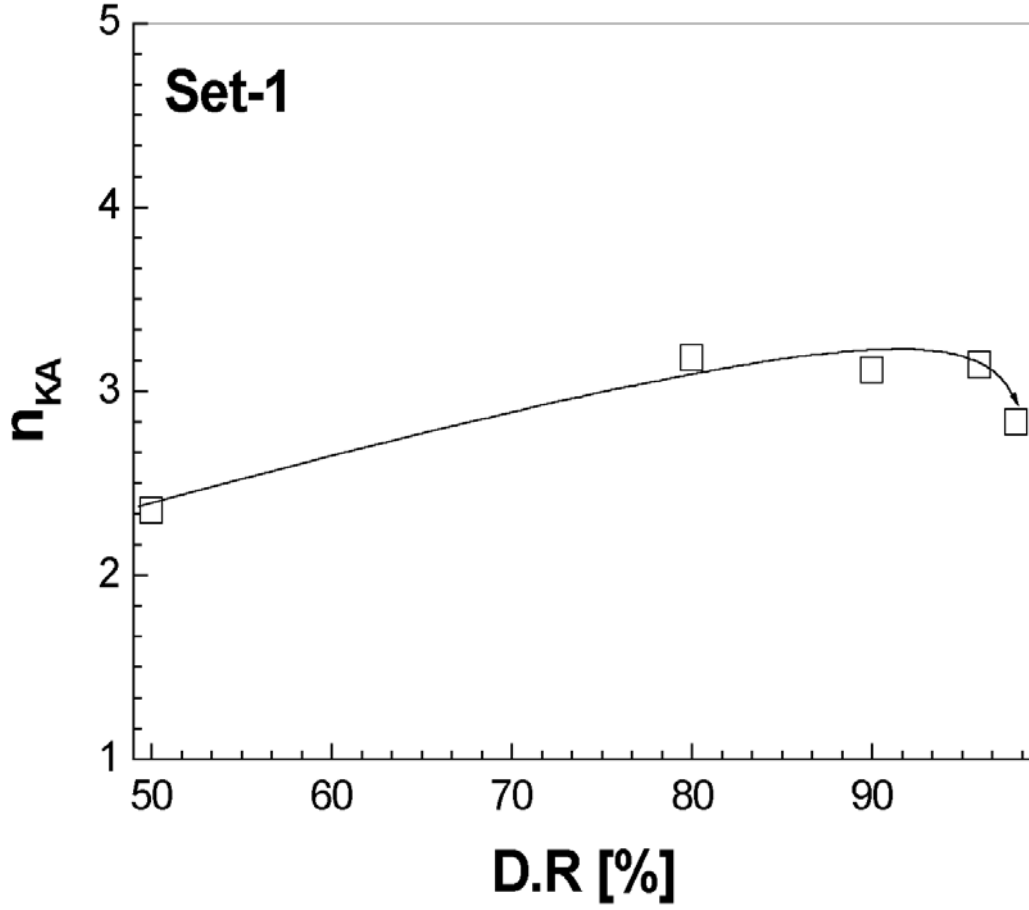


Şekil 4.4. Film büyüme hızının helyum seyreltme oranı ile değişimi.

Middya ve gurubu (1996), seyreltme oranını sabit tutup (bu değer hiçbir makalede belirtilmemiştir) toplam gaz basıncının 500 mTorr ile 2200 mTorr arasında değiştirildiği ($\text{He}+\text{SiH}_4$ akış hızı 42.5 sccm de sabit tutularak) farklı örnekler hazırlamışlardır. Elde edilen örneklerin kalınlıklarını belirleyerek büyüme hızını tayin edilmiştir. Toplam gaz basıncının 1 Torr'dan daha büyük değerlerinde büyütülen filmlerin büyüme hızının arttığını gözlenmiştir. α bölgesinden γ bölgesine

geçiş olarak adlandırdıkları bu kritik basınç bölgesi kendi filmlerini hazırladıkları plazma odacığının geometrisine göre tespit edilmiş bir değerdir. Buna benzer geçiş bölgesi başka çalışma guruplarınca da gözlemlemiştir (Cabarrocas, et. al.,2000,2002,2003 1998). Fakat araştırmacıların kullandıkları film büyütme sistemlerinin plazma odacık geometrilerinin farklı olmasından dolayı bu kritik değer daha yüksek veya düşük basınç değerlerine kayabilmektedir. Aguas ve arkadaşlarının (2003) yaptığı bir çalışmada da plazma odacığındaki elektrot şekillenimini değiştirerek, daha iyi kalitede düşük kusur yoğunluklu ve büyüme hızı yüksek filmler elde etmişlerdir. Buradan da bir kere daha anlaşıldığı gibi, a-Si:H örneklerin fiziksel özellikleri film hazırlama koşullarına oldukça duyarlıdır.

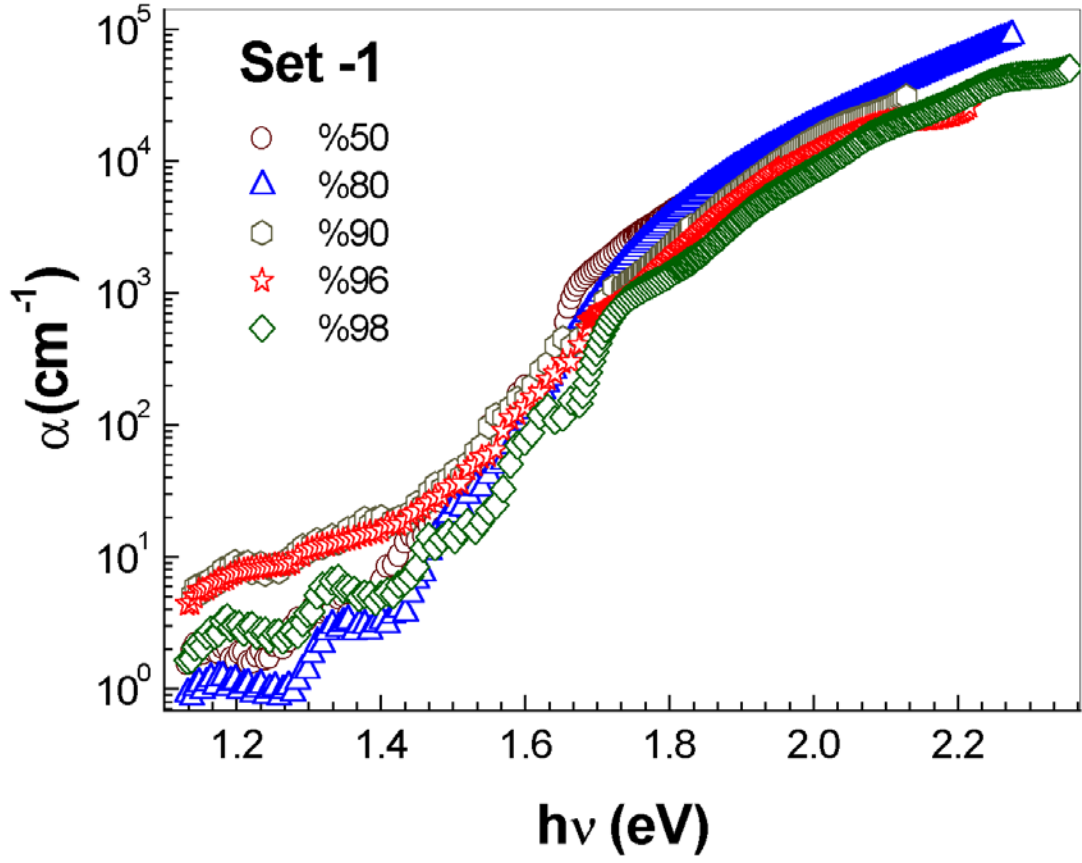
Optik geçirgenlik verileri kullanılarak Swanepoel'in önerdiği yöntemle, film kalınlığı ve dalga boyunun fonksiyonu olarak örneğin kırma indisi bulunabilir. a-Si:H ince filmlerin kırma indisleri, görünür bölge ve yakın kırmızıaltı için, dalgaboyunun azalan bir fonksiyonudur ve uzun dalga boyları için sabit bir değere yaklaşır. Bu sabit değer n_{KA} sembolü ile etiketlenmiştir. Şekil 4.5'de set-1 örneklerinin seyreltme oranına bağlı olarak n_{KA} kırma indislerinin değişimi verilmektedir. Örneklerin yakın kırmızıaltı bölge için bulunan kırma indisi değeri, artan helyum seyreltme oranı ile artmakta fakat yüksek seyreltme oranlarında küçük bir azalma sergilemektedir. Filmlerin kırma indisi değerleri 3,2 düzeyindedir. Bu değerler literatürde benzer hazırlama koşullarında hazırlan filmlerin sergilediği değerler ile aynıdır.



Şekil 4.5. Filmlerin kırma indisi değerlerinin helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.

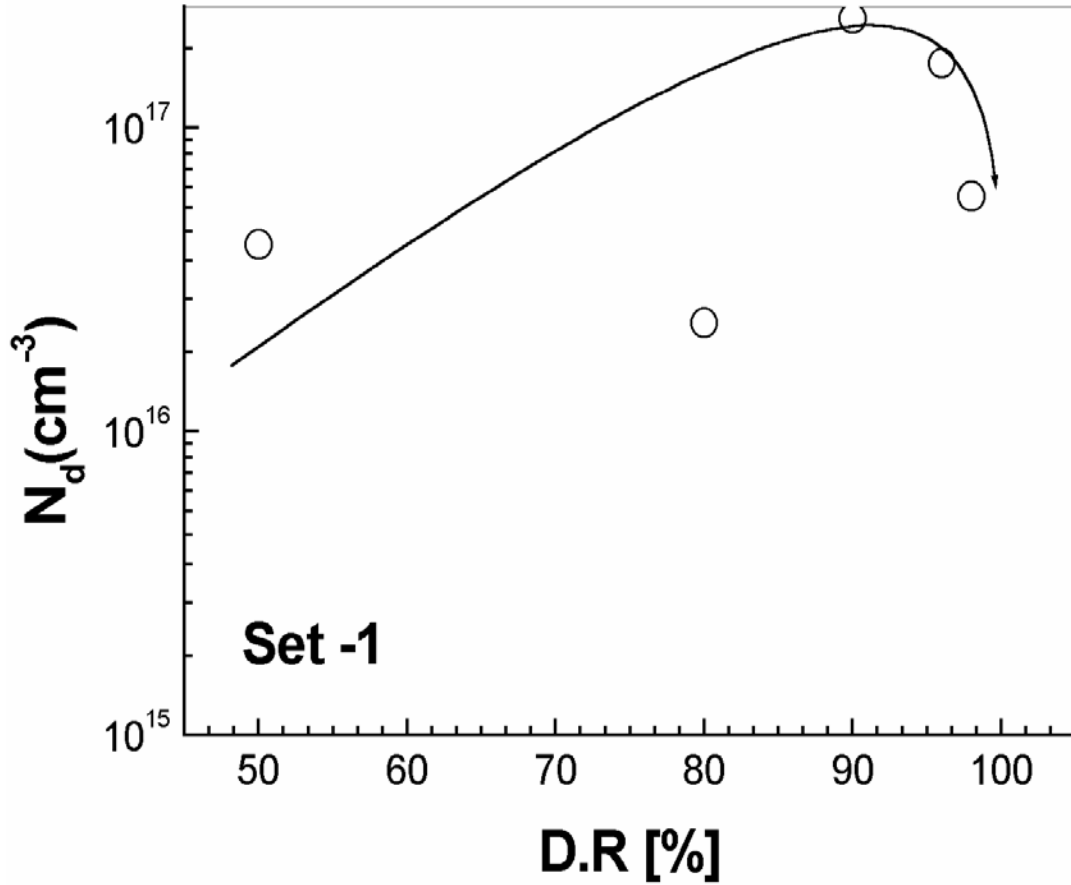
4.1.2. CPM sonuçları

Helyum ile seyreltilerek hazırlanan, set-1 örneklerinin, sabit fotoakım yöntemi kullanılarak elde edilen soğurma spektrumunun değişimi Şekil 4.6'da verilmiştir. Bu soğurma spektrumları kullanılarak amorf yapının örgü düzeninin bir parametresi olan Urbach enerjisi ve soğurma spektrumunun $\alpha(1,2 \text{ eV})$ 'deki değerinden kusur yoğunluğu hesaplanmıştır (Wyrsh, 1991).



Şekil 4.6. Farklı miktarda helyum içeren a-Si:H örneklerin soğurma spektrumları.

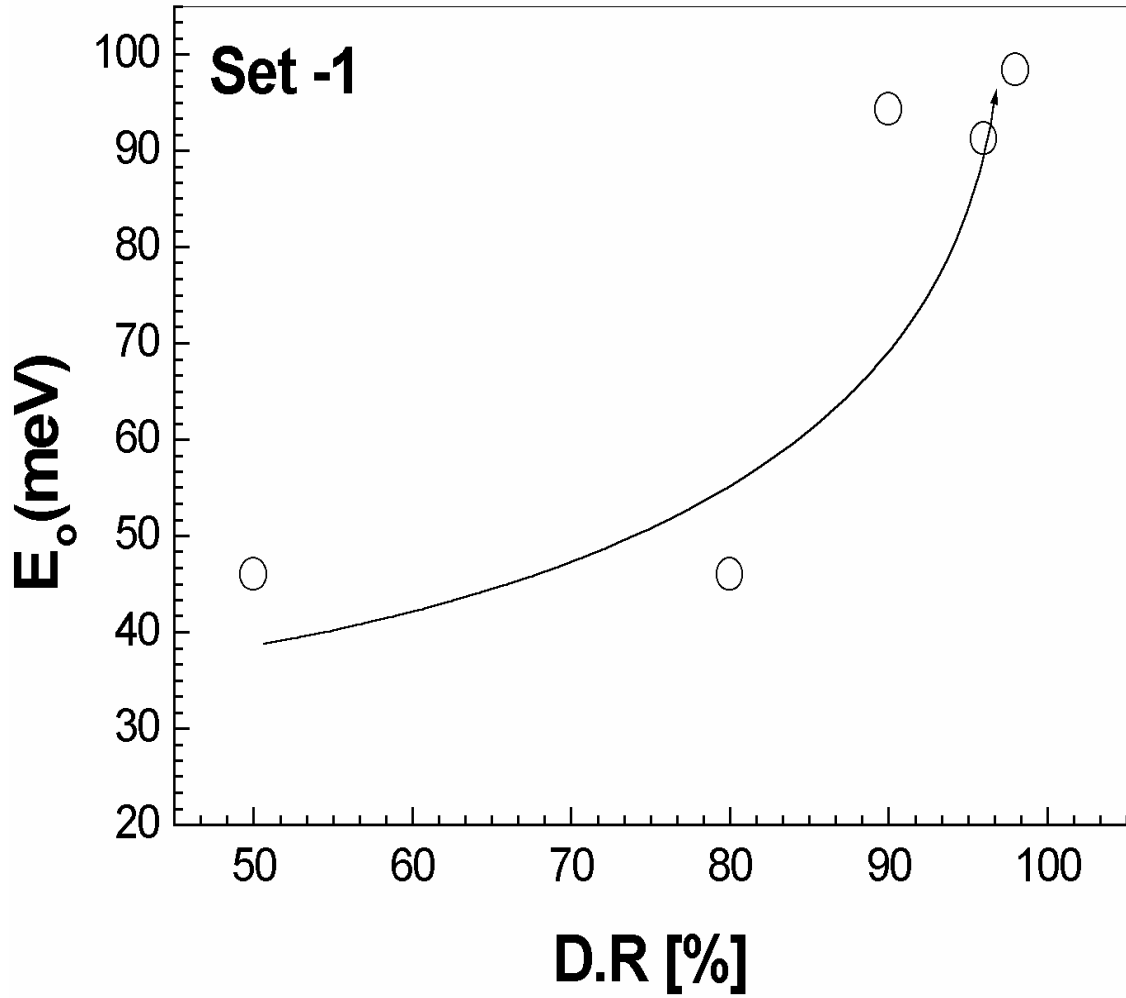
Şekil 4.7'de seyreltme oranına bağlı olarak kusur yoğunluğundaki değişimler çizilmiştir. Kusur yoğunluğu % 90 helyum seyreltme oranında hazırlanan örnekte % 50 seyreltme oranında hazırlanan göre yaklaşık olarak bir merteye artmasına rağmen, daha yüksek seyreltme oranlarına gidildiğinde kusur yoğunluğu tekrar azalmaya başlamıştır.



Şekil 4.7. Set-1 örneklerinin kusur yoğunluğunun helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.

% 50 helyum seyreltme oranında 0,8 Å/s hızla büyüyen filmin kusur yoğunluğu sadece 2×10^{16} 'dır. % 96 Helyum seyreltilmiş örneğin büyüme hızı 1,6 kat artarken, kusur yoğunluğu yaklaşık iki katına çıkmıştır. Yüksek seyreltme oranlarında daha hızlı büyüyen fakat düşük kusur yoğunluğu sergileyen örnekler teknolojik yönden oldukça ilginçlerdir. Kısa sürede az silan miktarıyla iyi kalitede ve fotoiletkenliği yüksek filmler hazırlamak fotovoltaiik aygıt yapımı açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, helyum seyreltilerek hazırlanan ince filmler, güneş pillerinde aktif malzeme olarak kullanılabılır.

Urbach enerjisinin seyreltme oranına bağlı değişimi Şekil 4.8'de verilmektedir.



Şekil 4.8. Set-1 örneklerinin Urbach kenarının helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.

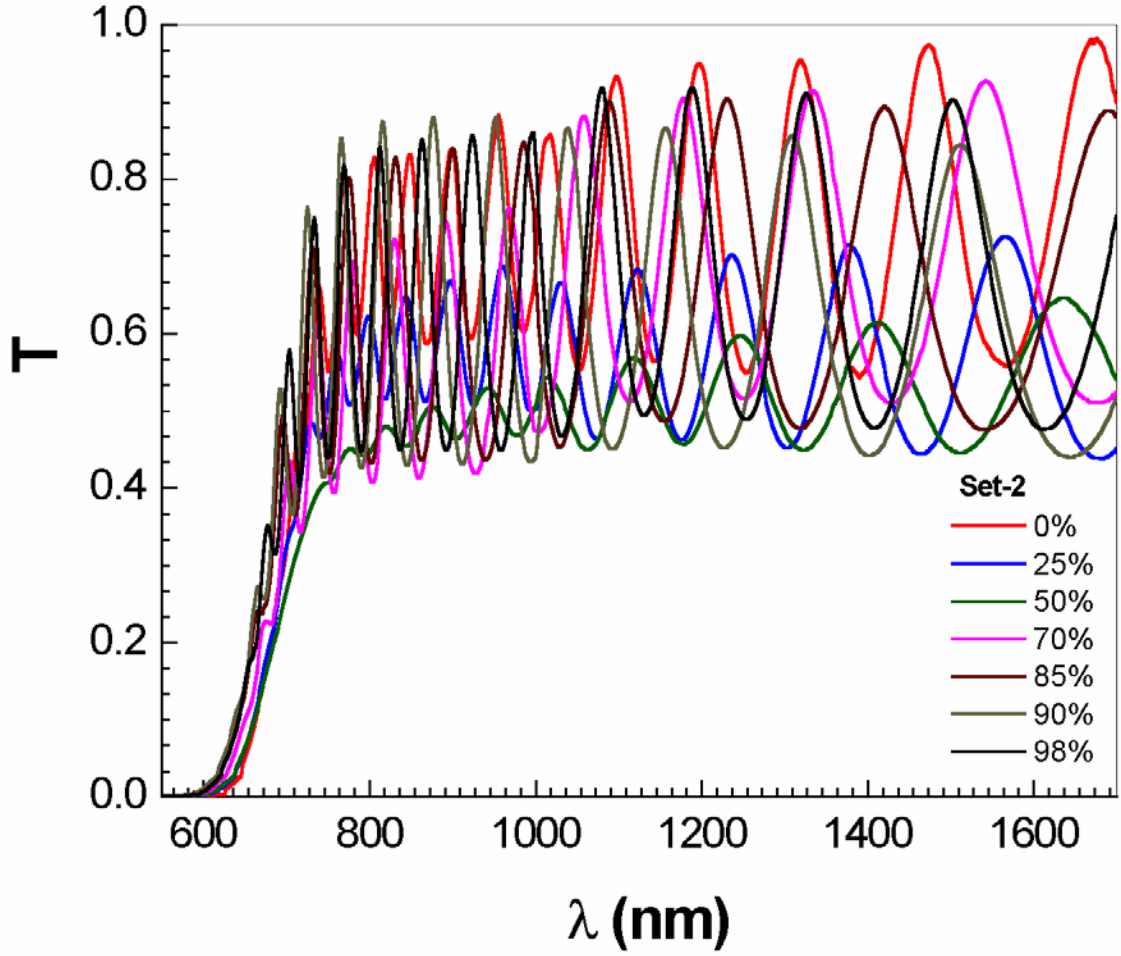
4.2. Set-2 Örnekleri

Bu kesimde, film hazırlama parametreleri Çizelge 4.1’de verilen set-2 örneklerinin optik ve elektriksel ölçüm sonuçları anlatılacaktır.

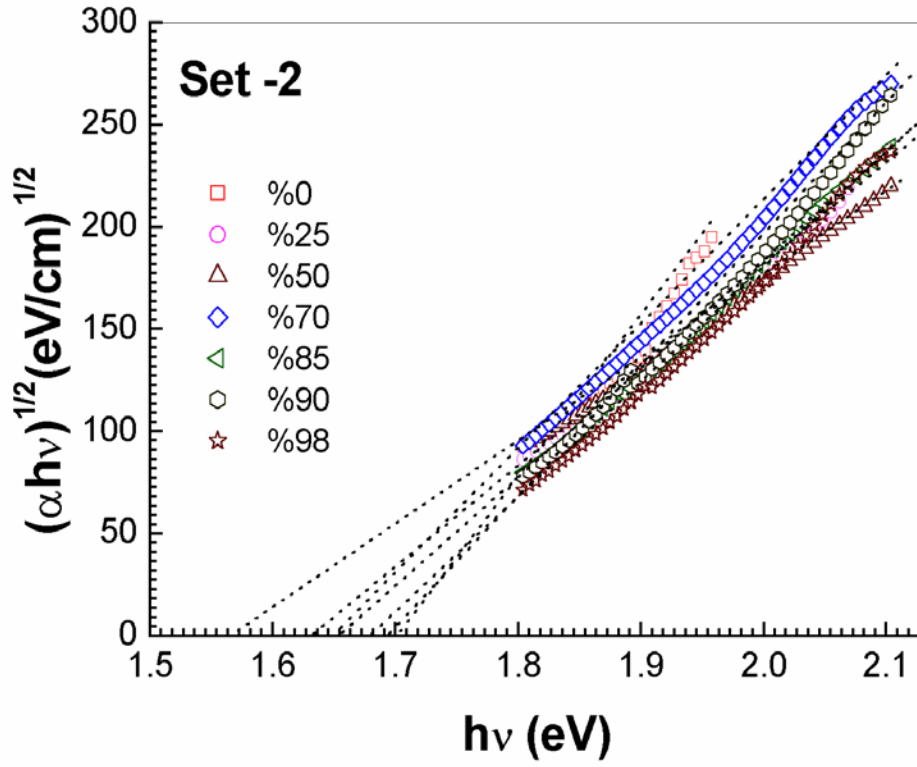
4.2.1. Optik geçirgenlik

Büyütülen a-Si:H filmlerin, farklı seyreltme oranları için optik geçirgenlik spektrumları Şekil 4.9’da ve optik geçirgenlik ölçümü verilerinden hesaplanan soğurma spektrumu kullanılarak yapılan Tauc çizimi Şekil 4.10’da verilmektedir. Farklı oranlarda helyum seyreltilerek hazırlanan örneklerin Tauc çizimleri üst üste yapılmıştır. Helyum seyreltme oranının artması ile birlikte filmlerin bant aralığı azalmakta %50 helyum seyreltme oranından sonra, artma göstermektedir. Bir

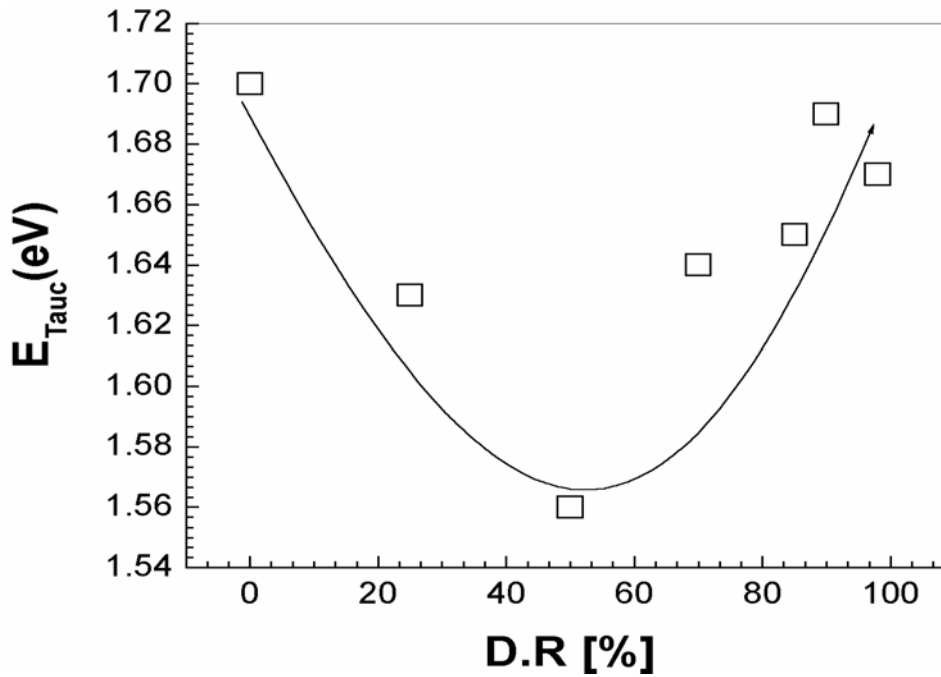
önceki örnek setinde benzer davranışın gözlenmesi % 50 helyum seyreltme oranının bu tür örneklerde kritik bir geçiş noktası olduğuna işaret etmektedir. Örnekler, helyum seyreltme miktarına bağlı olarak 1,55 -1,70 eV arasında değişen Tauc bant aralığı değerlerine sahiptirler. Şekil 4.11'de set-2 örneklerinin optik geçirgenlik verileri kullanılarak elde edilen Tauc bant aralığının seyreltme oranına bağlı değişimleri verilmektedir.



Şekil 4.9. Set-2 örneklerinin optik geçirgenlik spektrumunun seyreltme oranına bağlı değişimi.



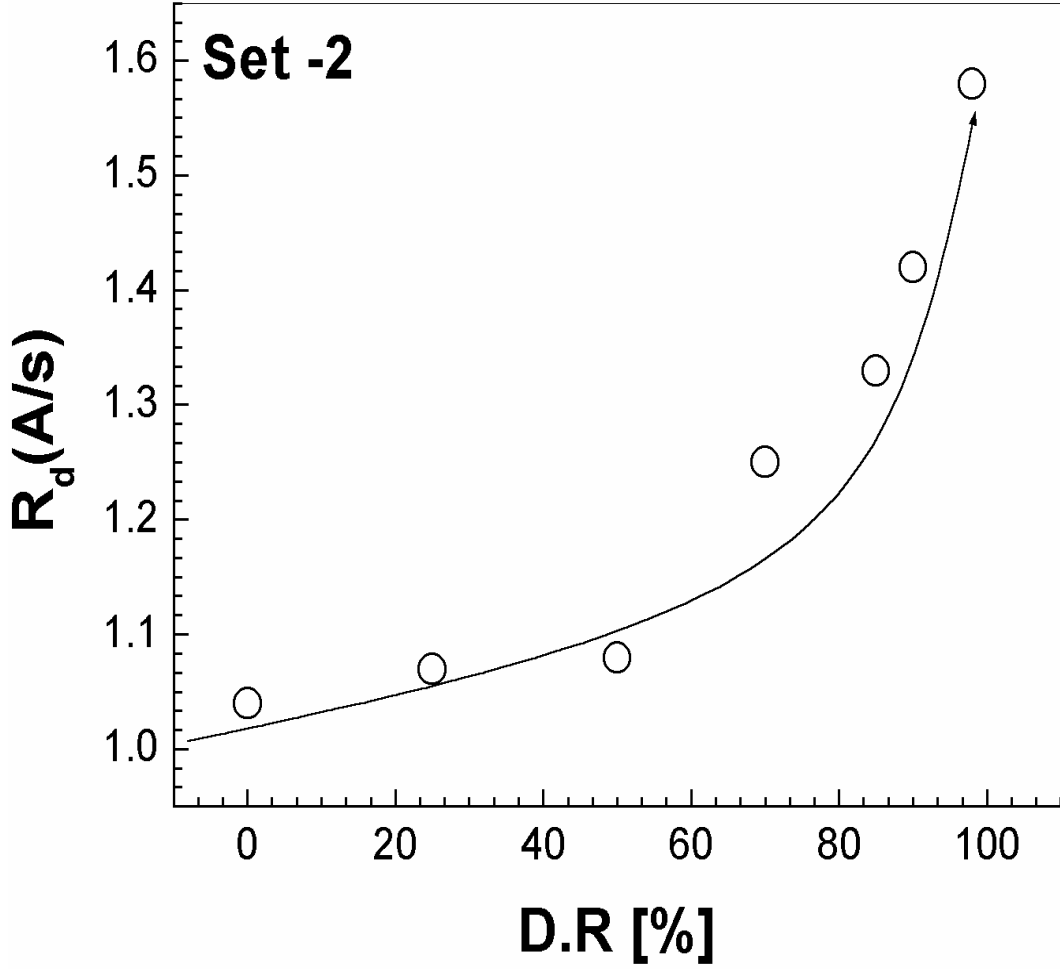
Şekil 4.10. Set-2 örneklerinin Tauc çizimleri.



Şekil 4.11. Tauc yaklaşımından elde edilen bant aralığı enerji değerlerinin seyreltme oranına bağlı değişimi.

Şekil 4.11'deki değişim incelendiğinde saf silan gazı kullanılarak hazırlanmış standart a-Si:H örneğin Tauc optik aralığının 1,70 eV civarında olduğu

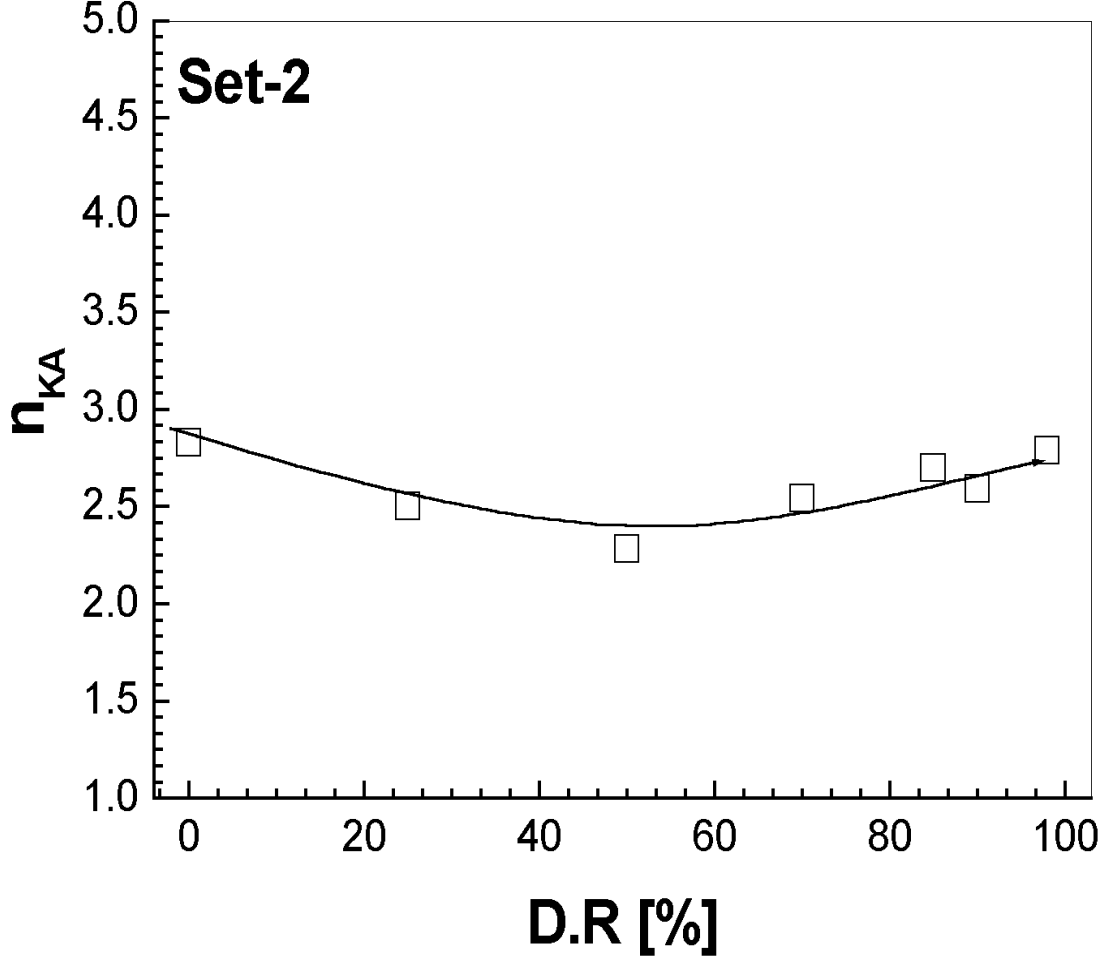
görülmektedir. Fakat plazma içindeki artan helyum miktarı ile Tauc optik aralığı değişmektedir. % 50 seyreltme oranında Tauc optik aralığı en küçük değerine sahiptir (1,55 eV). Bu noktadan sonra helyum seyreltme oranındaki artmayla birlikte Tauc optik aralığı tam ters bir davranış sergileyerek başlangıçtaki 1,70 eV düzeyine ulaşmıştır. Bu kritik geçiş noktasında film büyüme hızının değişiminin incelenmesi amacıyla Şekil 4.12 çizilmiştir.



Şekil 4.12. Set-2 örneklerinin film büyüme hızının helyum seyreltme oranı ile değişimi.

Şekil 4.12'den de görüldüğü gibi seyreltme oranının % 50 olduğu noktaya kadar büyüme hızı sadece 0,1 Å/s kadar artma gösterirken, % 50 seyreltme oranı değerinden sonra film büyüme hızı yükselmekte ve neredeyse 1,6 Å/s değerine ulaşmaktadır. Bu sebeple bu grafiği iki ayrı bölgede izlemek mümkündür. Her iki bölgede plazma reaksiyonun farklı şekilde gerçekleştiği gözlemlenmektedir. % 0 helyum (350 mTorr silan) seyreltme oranında hazırlanan örneğin film büyüme hızı 1 Å/s düzeyindeki iken % 98 helyum seyreltme oranında (7 mTorr silan) hazırlanan

örneğin büyüme hızı 1,6 Å/s dir. Bu oranda kullanılan silan miktarı bir öncekinden 50 kat az olmasında rağmen büyüme hızı bir öncekine nazaran neredeyse % 60 artmıştır.



Şekil 4.13. Set-2 örneklerinin film kırma indisi değerlerinin helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.

Şekil 4.13'de optik geçirgenlik verilerinin değerlendirilmesi sonucunda elde edilen kırmızıaltı kırma indisi değerlerinin helyum seyreltme oranına bağlı değişimi verilmektedir. %50 helyum seyreltme değerindeki ekstramum, plazma reaksiyonundaki değişim noktası olarak yine kendini göstermektedir. Kırma indisindeki değişim +0,6 düzeyindedir. Kırma indisinin helyum seyreltme oranına bağlı değişimi, Tauc bant aralığındaki değişimi izlemektedir. Kırma indisi, alttaş üzerine biriken amorf silisyum katmanlarının yerleşim düzgünlüğünün ölçütü olan bir optik parametredir. Film yüzeyinde makro yada mikron boyutundaki kümeleşmiş çatlaklar yada stres ve örgü gerilmeleri kırma indisinin değerini

azaltarak film özelliğinin kötüleşmesine neden olur. Hızlı büyüyen saf amorf silisyum ince filmlerde bu tür değişimler farklı guruplar tarafından yapılan araştırmalarda gözlenmiştir. % 98 seyreltme oranında elde edilen filmin bu denli hızlı büyümesine rağmen saf silanla hazırlanan örneğin kırma indisi ile aynı değeri sergilemesi tercih edilen bir durumdur.

4.2.2. Fourier dönüşümü kırmızıaltı (KA) spektrumları

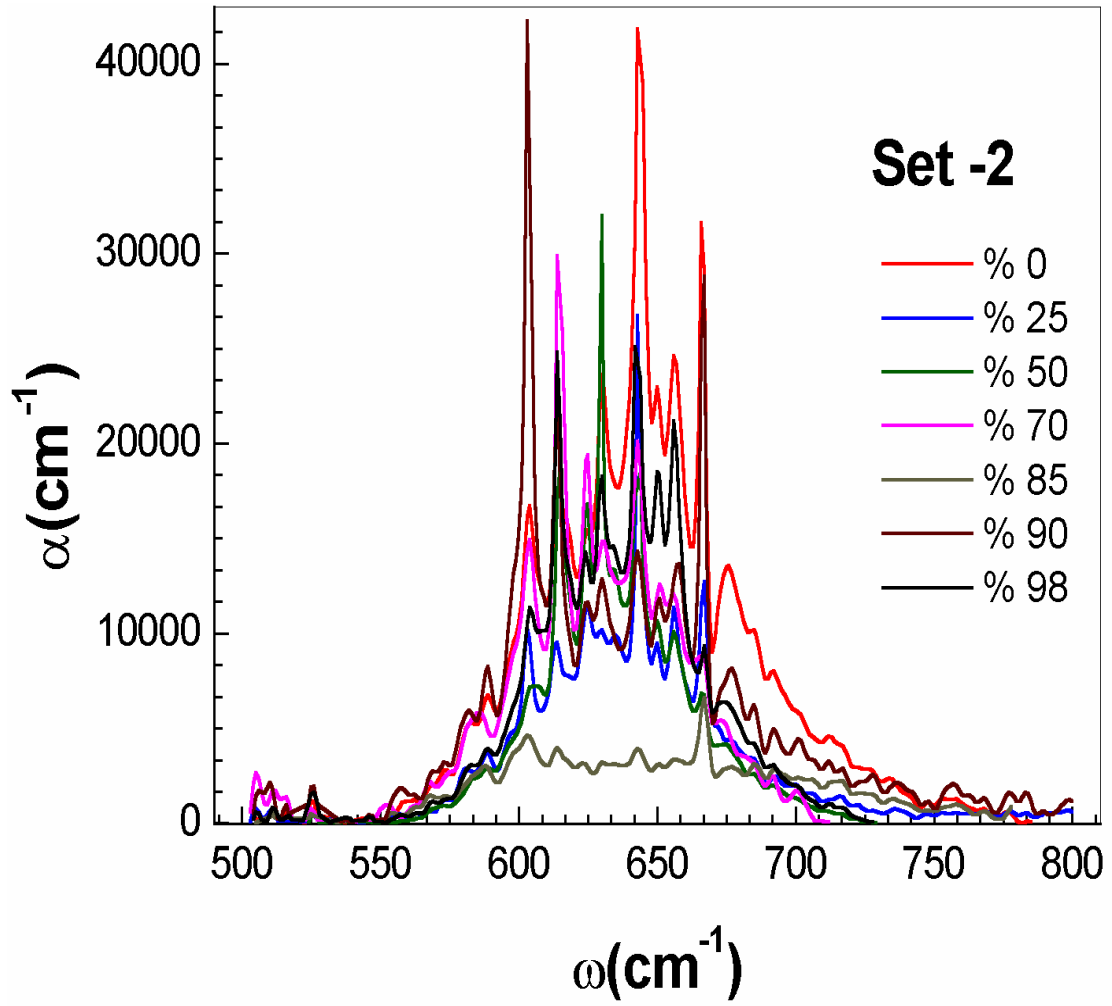
Kırmızıaltı ölçümleri için, a-Si:H ince filmler, kristal silisyum alttaşlar üzerine büyütülmüştür. Farklı seyreltme oranlarında hazırlanan bu örnekler KA optik geçirgenlik spektrumu FTIR spektrometresi kullanılarak 400 cm⁻¹ ile 3000 cm⁻¹ dalgasayısı aralığında ölçülmüştür.

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \frac{I}{I_0} \quad (4.1.)$$

Geçirgenlik spektrumu denklem (4.1.)'de verilen eşitlik yardımıyla soğurma değerlerine dönüştürülür. Burada d, filmin kalınlığı, I/I₀ örneğin geçirgenlik spektrumu verileridir. Tüm örneklerin FTIR spektrumları üst üste çizildiğinde aktif modlara ait bantlar sadece 630 cm⁻¹ ve 2000 cm⁻¹ civarındadır. Bu bantlar saf silan kullanılarak hazırlanmış, hidrojenlendirilmiş amorf silisyum ince filmler için literatürde rapor edilmiş değerler ile uyumludur. Si-H bağı, bağ bükülmesine ilişkin soğurma bandı yaklaşık 630 cm⁻¹ ve aynı bandın gerilme modu ise 2000 cm⁻¹'de gözlenmektedir. Bu bantlardaki eğrinin yüksekliğinin ve yarı genişliğinin büyümesi yapı içindeki H miktarının artmasına işaret etmektedir. Si-H modundaki bağlı hidrojen oranı söz konusu soğurma pikine ait grafiğin integrasyonu ile kolayca hesaplanabilmektedir (Morigaki, 1982).

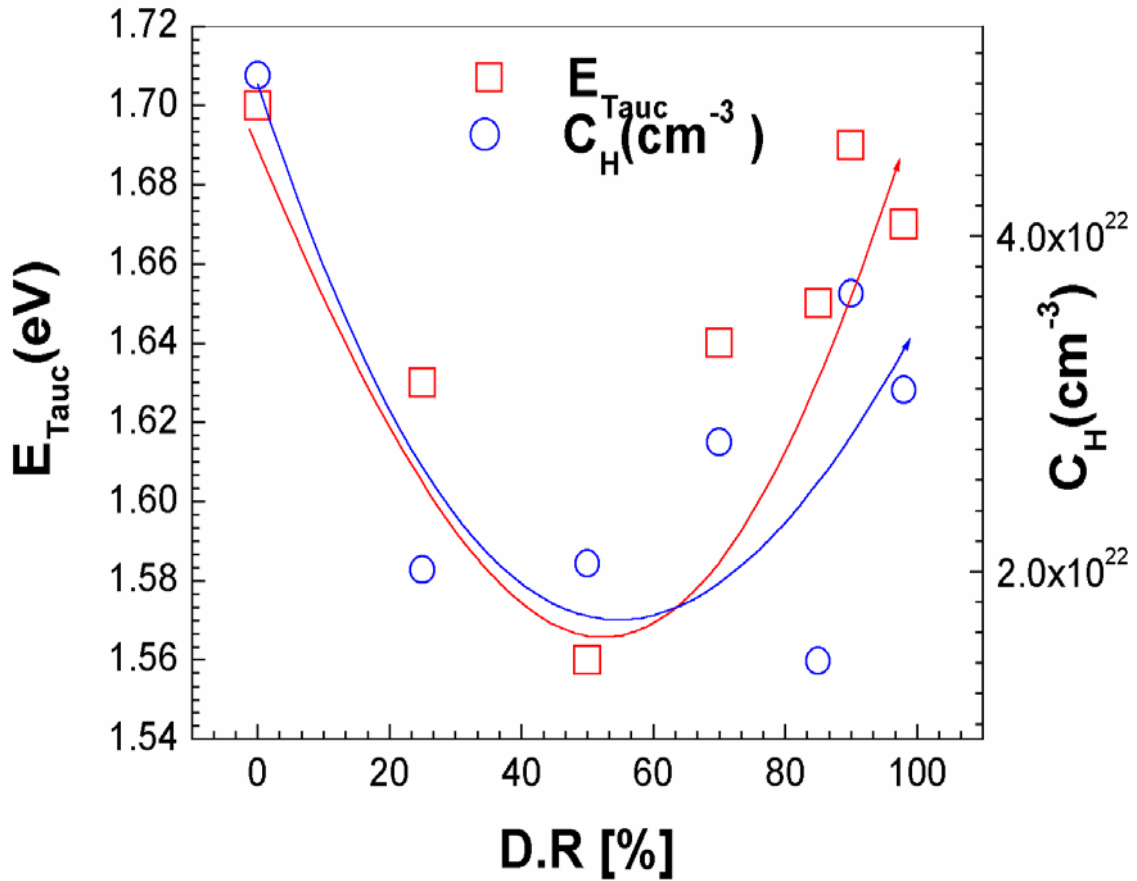
$$C_H = A \int \frac{\alpha(\omega)}{\omega} d\omega \quad (4.2.)$$

Bu integrasyona ait eşitlik denklem (4.2.)'de verilmektedir. Burada A kalibrasyon katsayısıdır ve nükleer yöntemler kullanılarak (Morigaki, 1999) bulunmuştur. A değerleri 630 cm⁻¹ ve 2000 cm⁻¹ bandı için sırası ile 1,6x10¹⁹ cm⁻³ ve 1,4x 10²⁰ cm⁻³ dir. Şekil 4.14'de set-2 örneklerine ait 500-800 cm⁻¹ dalga sayısı aralığında optik geçirgenlik verileri kullanılarak hesaplanmış FTIR soğurma eğrileri verilmektedir.



Şekil 4.14. Set-2 örneklerinin kızılötesi soğurma spektrumları.

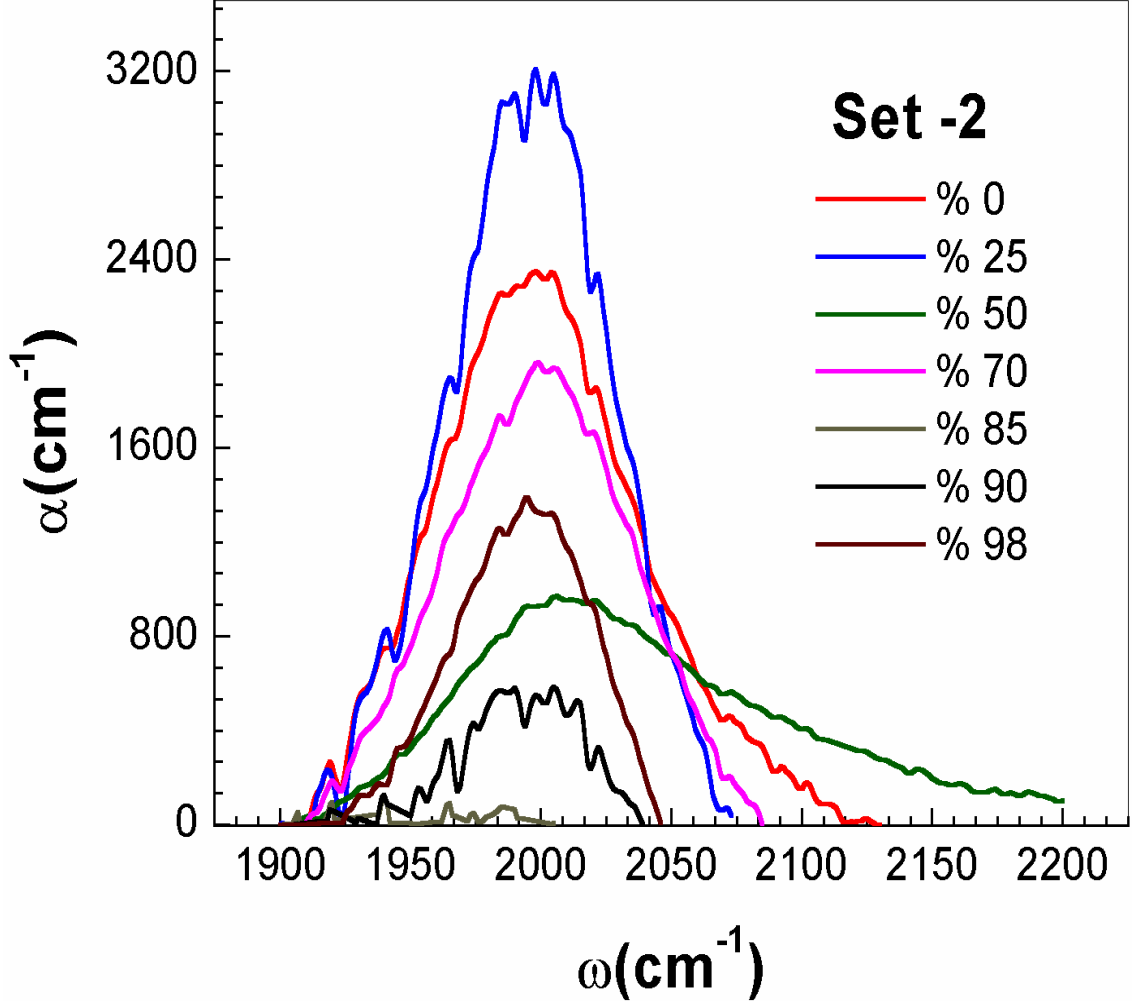
Şekil 4.14'teki değişimler incelendiğinde 630 ve 640 cm^{-1} bandı civarlarında soğurma pikleri gözlemlenmektedir. 630 cm^{-1} değerindeki soğurma pikleri SiH bağına ait karakteristik bükülme modunun amorf örgü içerisinde oldukça başat olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 4.15. Set-2 örneklerinin, 630 cm^{-1} bandındaki titreşim modu kullanılarak hesaplanan bağlı hidrojen oranları.

630 cm^{-1} 'in yakınındaki bantlarda bazen birkaç yüksek soğurma piki gözlenmesine rağmen bu soğurma tepelerine karşılık yüksek enerjili bantlardaki bükülme, gerilme yada sallanma modları bulunamamıştır (Morigaki, 1999, Shanks et. al., 1980, Stryhahilev et. al, 2000, Lucovsky et. al.,1979). Bu piklerin bir kısmına ise, literatürdeki veri tabanında tanımlı bir bant olarak rastlanamamıştır. Gözlenen soğurma pikleri çoklu gausiyen formda bir fonksiyona çakıştırılarak 630 cm^{-1} bandındaki soğurma piki üzerinde hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 4.14'deki soğurma eğrileri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen bağlı hidrojen oranının helyum seyreltme oranına bağlı değişimi Şekil 4.15'te verilmektedir. Şekil 4.15'deki değişimde sol eksen optik geçirgenlik verilerinin değerlendirilmesi ile elde edilen Tauc optik aralığını, sağ eksen ise, 630 cm^{-1} bandından hesaplanan bağlı hidrojen oranını göstermektedir. Şekil 4.15'teki değişimde Tauc optik aralığındaki değişime paralel olarak sözü geçen SiH bağ yapısına ait bağlı hidrojen oranı da değişmektedir. Literatürde hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun bant aralığındaki azalma, amorf yapı içindeki hidrojenin azalması

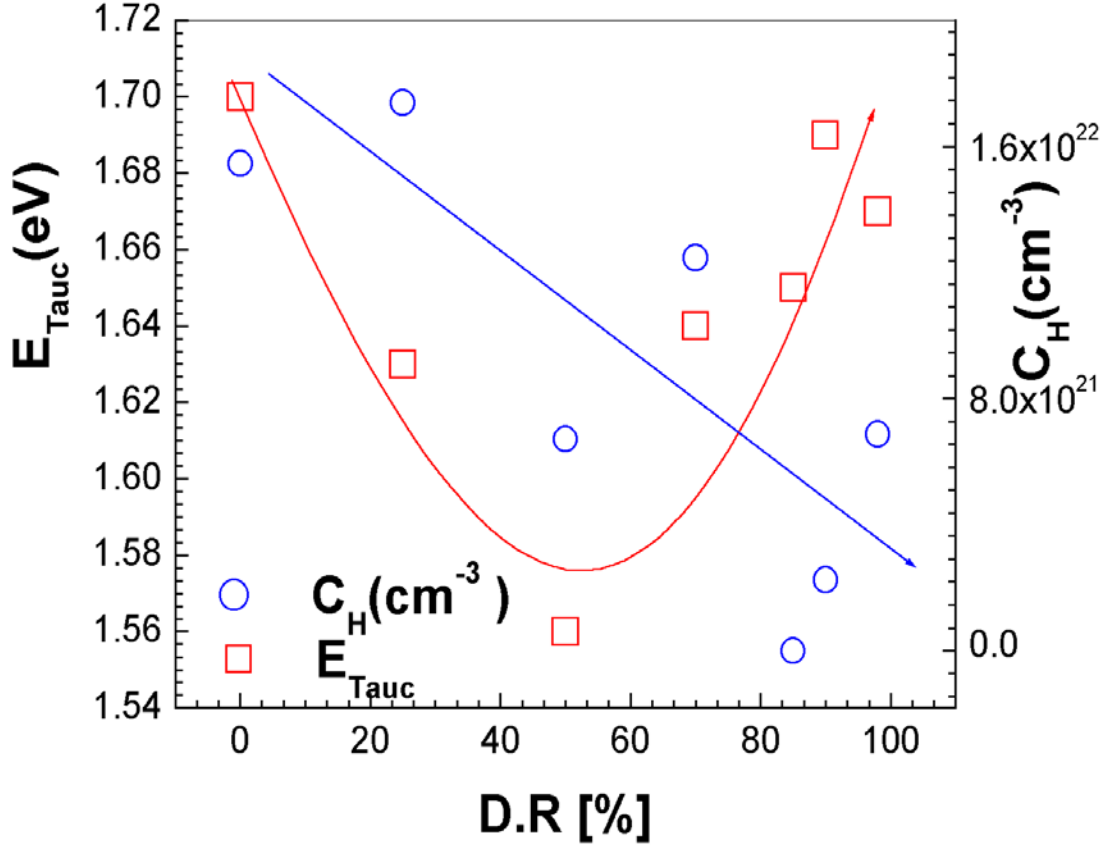
ile açıklanmaktadır (Matsuda et. al., 2003, 2004). Şekil 4.15'teki değişim literatürdeki bu gözlemle oldukça iyi bir uyum içindedir. Benzer değişimleri literatürde rapor edilen hidrojenle seyreltilerek hazırlanan a-Si:H filmlerde de görmek mümkündür (Street, 1991, Shanks et. al., 1980).



Şekil 4.16. Set-2 örneklerinin kızılötesi soğurma spektrumları.

Şekil 4.16'da Set-2 a-Si:H örneklerinin 630 cm^{-1} bandının gerilme moduna ait 2000 cm^{-1} bandı civarındaki ($1900\text{-}2200 \text{ cm}^{-1}$) soğurma pikleri verilmektedir. Tüm soğurma piklerinin yüksekliğini kontrol eden bant 2000 cm^{-1} bandıdır. Bu yüzden tüm hesaplamalar bu soğurma pikine yapılan integrasyonlarla bulunmuştur. Sadece % 50 helyum seyreltilmiş örnekte 2090 yada 2100 cm^{-1} bandına doğru bir genişleme görülmektedir. Bu titreşim bandı (SiH_2) 'nin yada $(\text{SiH}_2)_n$ 'in gerilme moduna karşılık gelmektedir (Morigaki). Bu modların varlığını doğrulamak için 875 cm^{-1} yada 890 cm^{-1} da makaslama (scissors), 845 cm^{-1} de sallama (wag) modları bulunmalıdır. Fakat bu bantlarda aktif bir soğurma pikine rastlanamaması

sebebiyle sadece % 50 helyum seyreltme oranında hazırlanan örneğin 2100 cm^{-1} değerindeki hidrojen oranı hesaplanmıştır ($C_H=2,8 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$).

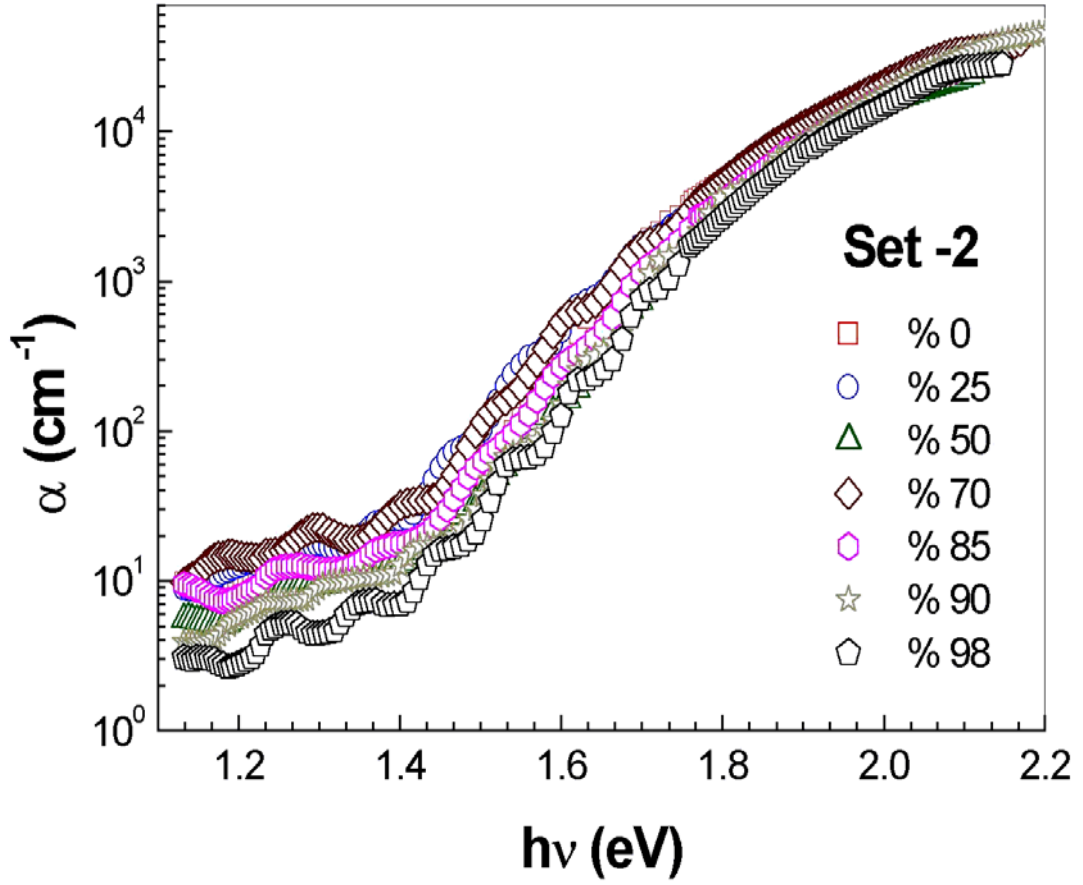


Şekil 4.17. Set-2 örneklerinin, 2000 cm^{-1} bandındaki titreşim modu kullanılarak hesaplanan bağlı hidrojen oranları.

Şekil 4.17'deki değişimde sol eksen optik geçirgenlik verilerinin değerlendirilmesi ile elde edilen Tauc optik aralığını, sağ eksen ise, 2000 cm^{-1} bandından hesaplanan bağlı hidrojen oranını göstermektedir. Bağlı hidrojen oranı (SiH gerilme modu içi), Şekil 4.16'daki soğurma eğrileri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilmiştir. Şekil 4.17'deki değişimde Tauc optik aralığındaki değişime paralel olarak bağlı hidrojen oranının da azaldığı görülmektedir. Hidrojen oranı, seyreltme oranının artmasıyla birlikte azalmaktadır. Vakum odacığına sürülen helyum miktarının artması, SiH titreşim modunun 2000 cm^{-1} 'deki gerilme modunun sönmesine neden olmaktadır.

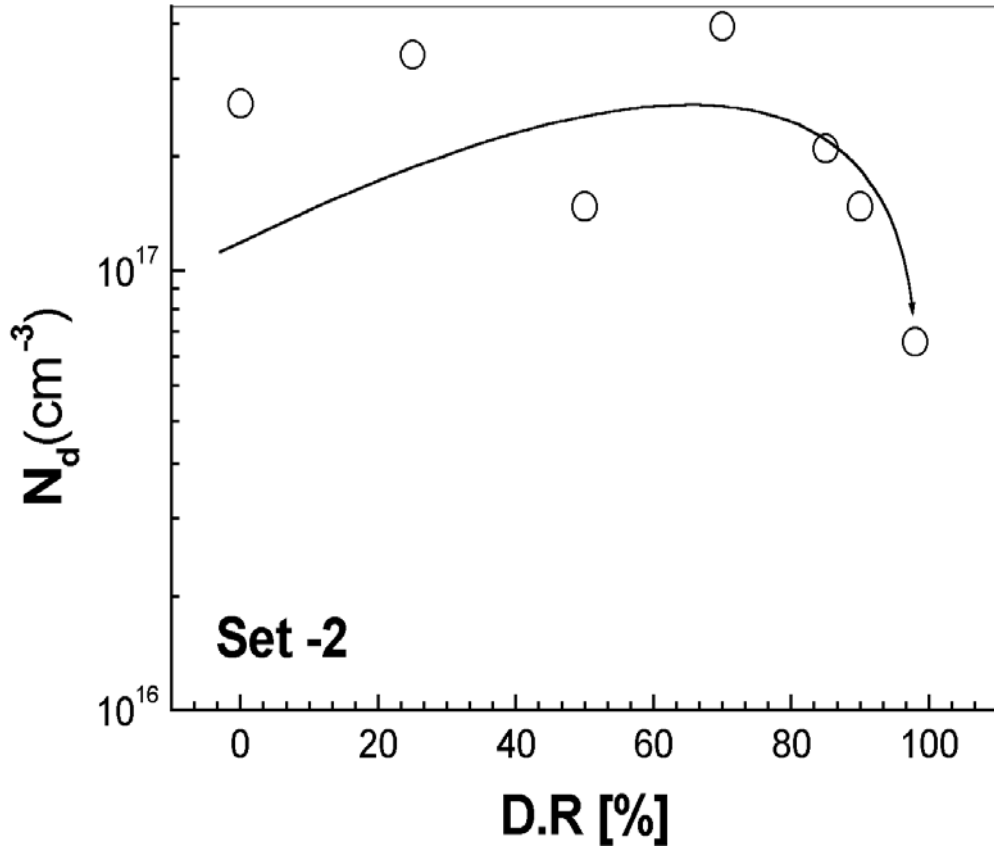
4.2.3. CPM sonuçları

Set-2 örneklerinin, sabit fotoakım yöntemi kullanılarak elde edilen enerjiye bağımlı optik soğurma değişimleri Şekil 4.18'de verilmektedir.



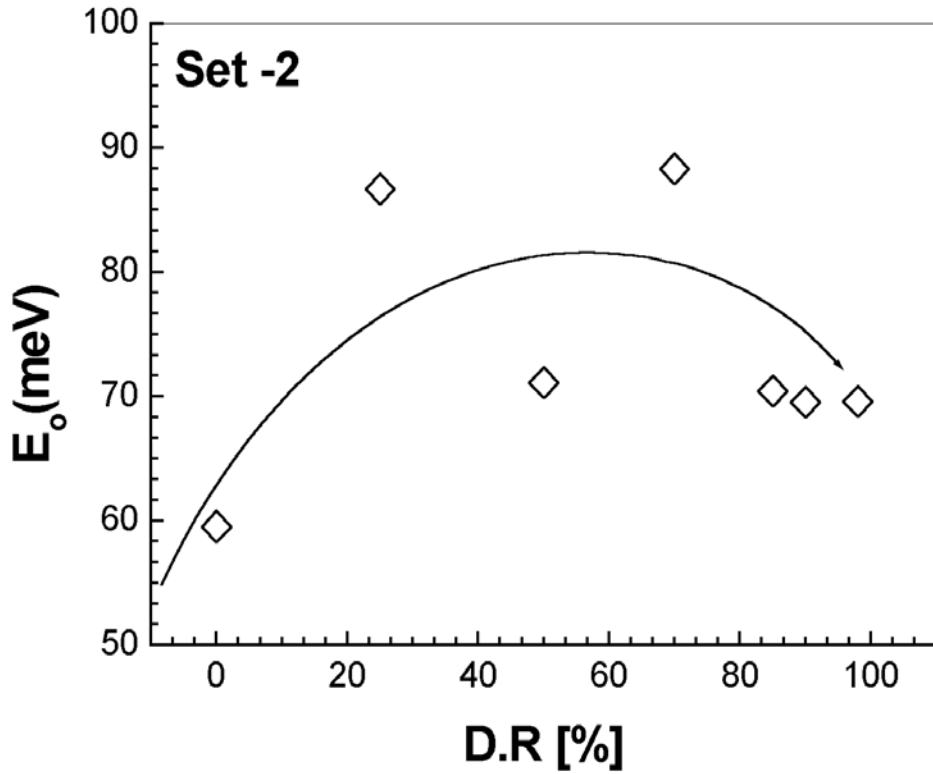
Şekil 4.18. Set-2 örneklerinin soğurma spektrumları.

Şekil 4.19'da seyreltme oranına bağlı olarak kusur yoğunluğundaki değişimler çizilmiştir. Kusur yoğunluğu, % 70 helyum seyreltme oranına kadar hafifçe artmasına karşın daha yüksek seyreltme oranlarında gidildikçe tekrar azalmaya başlamıştır. Kusur yoğunluğunun düşmeye başladığı kritik geçiş noktası vakum odacığındaki helyum seyreltme oranının bir fonksiyonudur. Benzer davranış set-1 örneklerinde de gözlenmiştir (bakınız Şekil 4.7.).



Şekil 4.19. Kusur yoğunluğunun helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.

Şekil 4.19'daki değişim incelendiğinde % 0 seyreltme oranında hazırlanan örneğin kusur yoğunluğu $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ düzeyinde olduğu görülmektedir. % 98 helyum seyreltme oranında hazırlanan örnek hızlı büyümesine karşın kusur düzeyi standart a-Si:H örnekten bir mertebe daha düşüktür. Plazma sistemi içine sürülen helyum miktarının artması elde edilecek filmin kalitesi set-2 örneklerinde kısmen arttırılabilmektedir. Benzer gözlemleri set-1 örneklerinin karakterizasyon sonuçlarında da görmek mümkündür. Urbach enerjisinin seyreltme oranına bağlı değişimi Şekil 4.20'de verilmektedir. Seyreltme oranının artmasıyla Urbach enerjisinin artması Urbach kenarının eğimindeki azalmayı göstermektedir. Urbach enerjisinin büyümesi amorf örgü içindeki düzensizliğin arttığını gösterir. Seyreltme oranı arttıkça amorf örgü içindeki düzensizlik artarken kusur yoğunluğu diğer bir deyişle kopuk bağ yoğunluğunda keskin bir değişim gözlenmemektedir.



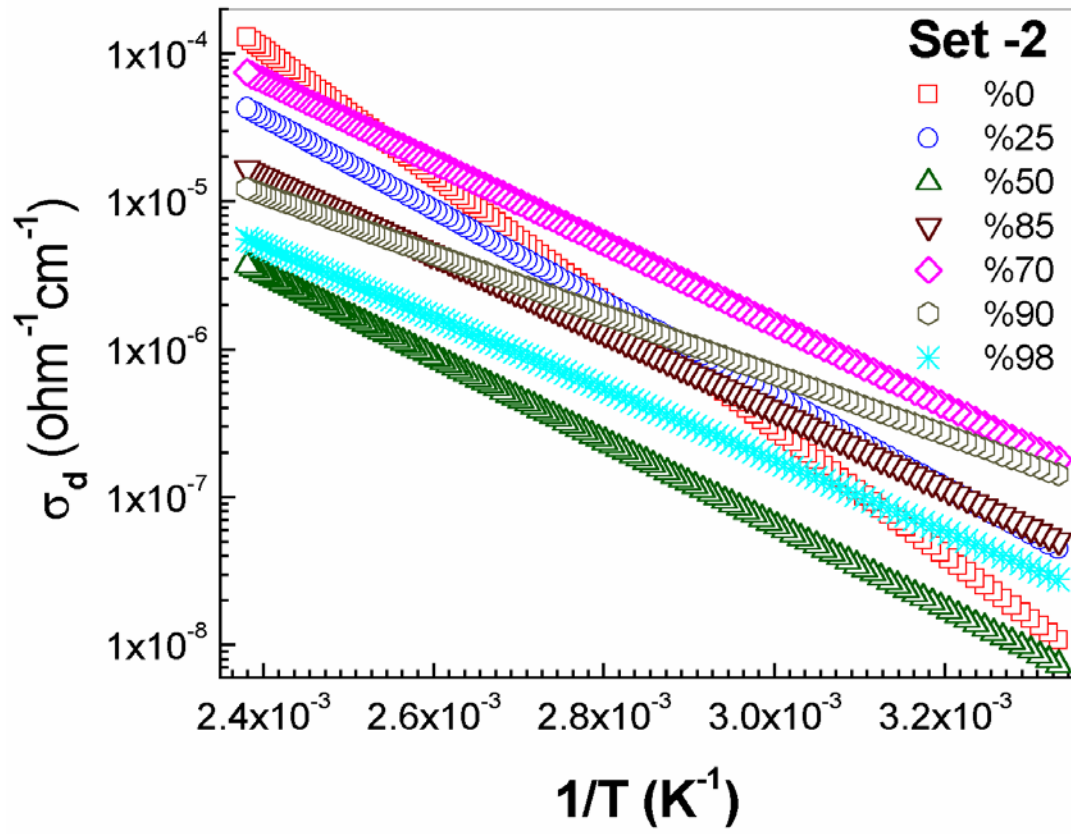
Şekil 4.20. Urbach kenarının, helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.

4.2.4. Karanlık iletkenlik ölçümleri

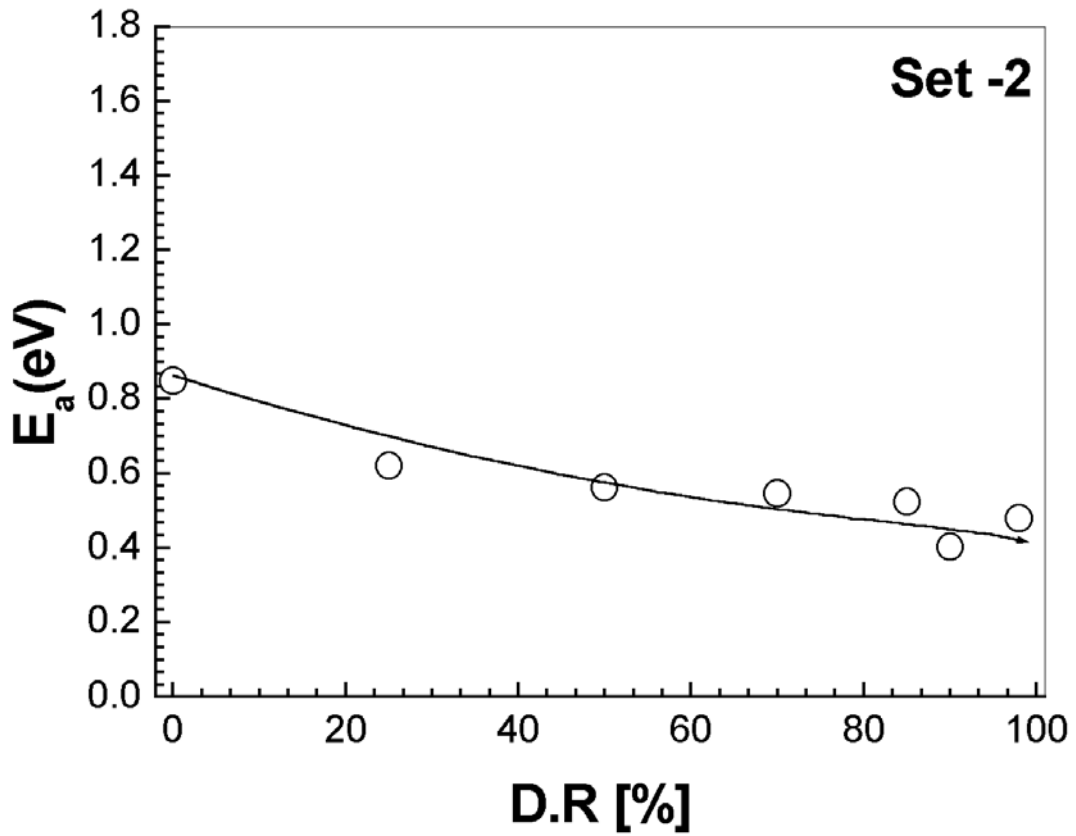
Karanlık iletkenlik ölçümleri kapalı devre helyum soğutma sisteminde örneğe sabit bir gerilim uygulanarak ve örnekten geçen akım sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Örneğe uygulanan dc gerilimin değeri, örneğin ohmik davrandığı bölge içinden seçilmiştir. Örneğin bulunduğu sıcaklıkta örnekten geçen akım değerleri qbasicte yazılan bir program yardımıyla veri dosyasına yazdırılmıştır. Her örnek için incelenen sıcaklık aralığı oda sıcaklığı ile 440 K arasındadır. Şekil 4.21’de set-2’de hazırlanan örneklerin karanlık iletkenlikleri verilmektedir.

$$\sigma(T) = \sigma_0 e^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (4.3.)$$

Şekil 4.12’deki değişim incelendiğinde yarı logaritmik eksenlerdeki değişimin doğrusal bir davranış sergilediği gözlemlenmektedir. Her örnek için Arrhenius gösterimindeki bu grafik yardımıyla denklem (4.3.) kullanılarak örneklerin karanlık iletkenlik aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır.



Şekil 4.21. Set-2 örneklerinin karanlık iletkenlik ölçüm sonuçları.



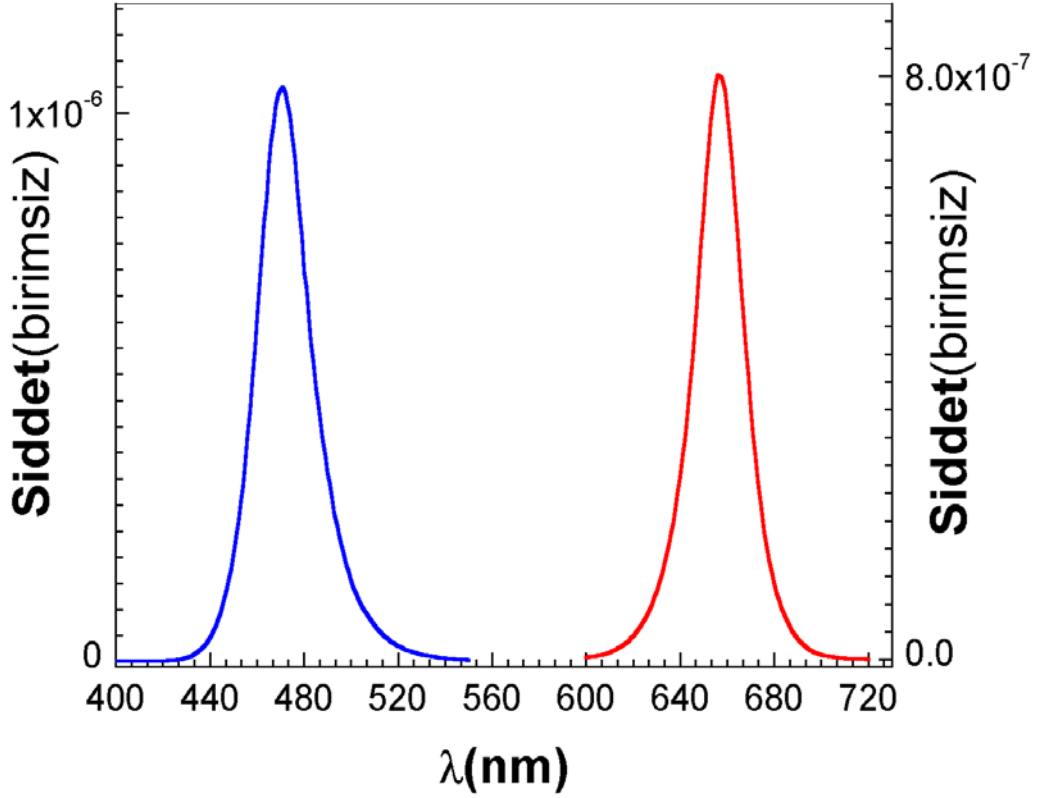
Şekil 4.22. Aktivasyon enerjisinin, helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.

Burada E_a , Fermi enerjisi ile iletim bandı arasındaki enerjice mesafeyi söylemektedir. Elde edilen eğrilerin denklem (4.3.)'te verilen fonksiyonla karşılaştırılmasıyla her örneğin aktivasyon enerji değeri hesaplanmıştır.

Şekil 4.22'de helyum seyreltme oranına bağlı olarak hesaplanan karanlık aktivasyon enerjisi değerleri verilmektedir. Şekildeki değişimde karanlık aktivasyon enerjisi artan helyum oranıyla beraber hızla azalmaktadır. Fermi enerjisiyle iletkenlik bandı arasındaki enerji farkının, katkılanmamış bir örnek için bu denli azalması beklenmedik bir değişimdir. Benzer değişimler literatürde Middya ve gurubu (1996) tarafından da gözlenmiştir.

4.2.5. Fotoiletkenlik tepki (response) süresinin ölçülmesi ve elektronların sürüklenme mobilitesinin hesaplanması

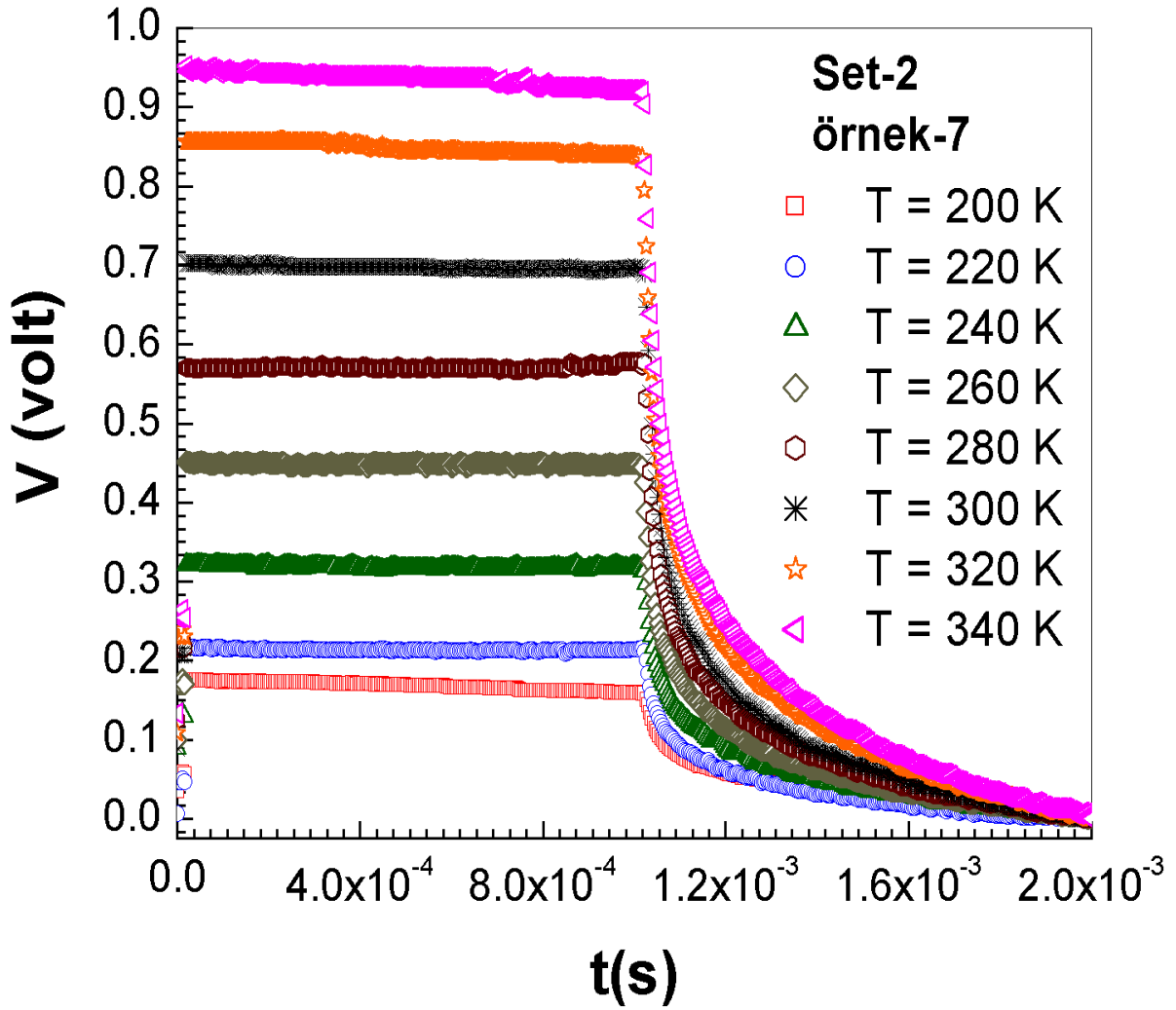
Fotoiletkenlik tepki süresinin ölçülmesi daha önce Bölüm3'te deneysel ayrıntıları anlatılan düzende ve set-2'den seçilmiş iki örnek üzerinde gerçekleştirildi. Bu örnekler Tauc optik aralığı en yüksek (% 98) ve en düşük (% 50) olan iki örnektir. Optik uyarma için renkleri, örneği banttan banda uyarıma yetecek foton enerjisine sahip monokromatik ışık kaynağı, LED'ler, seçilmiştir. Bu yüzden ölçümlerde kullanılan LED'lerin öncelikle elektroluminesans spektrumları ölçülmüştür. Deneyde kullanılan mavi ve kırmızı LED grupların elektroluminesans pikleri Şekil 4.23'te sunulmaktadır. Şekilde verilen elektroluminesans pikleri kullanılarak bu LED'lerden yayılan ışıkların foton enerjileri hesaplanmıştır.



Şekil 4.23. Fotoiletkenlik sönüm süresi ölçümlerinde kullanılan mavi ve kırmızı LED'lerin elektroluminesans spektrumları.

4.2.5.1. Set-2 örnek-7 fotoiletkenlik tepki süresi ölçüm sonuçları

Set-2 örnek-7 (%98 helyum seyreltilmiş) üzerinde yapılan fotoiletkenlik tepki süresi ölçümleri 472 nm pik dalga boyuna sahip mavi LED'lerle ölçülmüştür. LED'e sürülen akım 24 mA'de sabit tutulmuştur ve bu akım altında LED'in örnek üzerine yaydığı foton akısı $F = 7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 'dir. Ölçümler 128 K ile 420 K arasında 2 K'lık adımlarla gerçekleştirilmiştir. Tüm ölçümlerin üst üste çizilmesinin, değişimin net olarak görülmesinde sorun yaratacağı düşüncesiyle, Şekil 4.24'de sadece 8 sıcaklık değerindeki veriler üst üste çizilerek verilmiştir.



Şekil 4.24. Dijital osiloskop yardımıyla ölçülen fotoiletkenlik tepki süresi verilerinin birkaç sıcaklık değeri için gösterimi.

Şekil 4.24'teki değişimler II farklı bölgeye ayrılarak incelenmiştir. Bu bölgelerden birincisi fotoiletkenliğin değişmez kaldığı bölge, diğeri ise uzatılmış üstel fonksiyon formunda azalan kısımdır. Fotoiletkenliğin değişmez kaldığı I. bölgedeki veriler kararlı durum fotoiletkenliğini (steady state photoconductivity) göstermektedir.

$$\frac{1}{\tau_r} = - \left. \frac{1}{V_{ss}} \frac{dV}{dt} \right|_{t=0} \quad (4.4.)$$

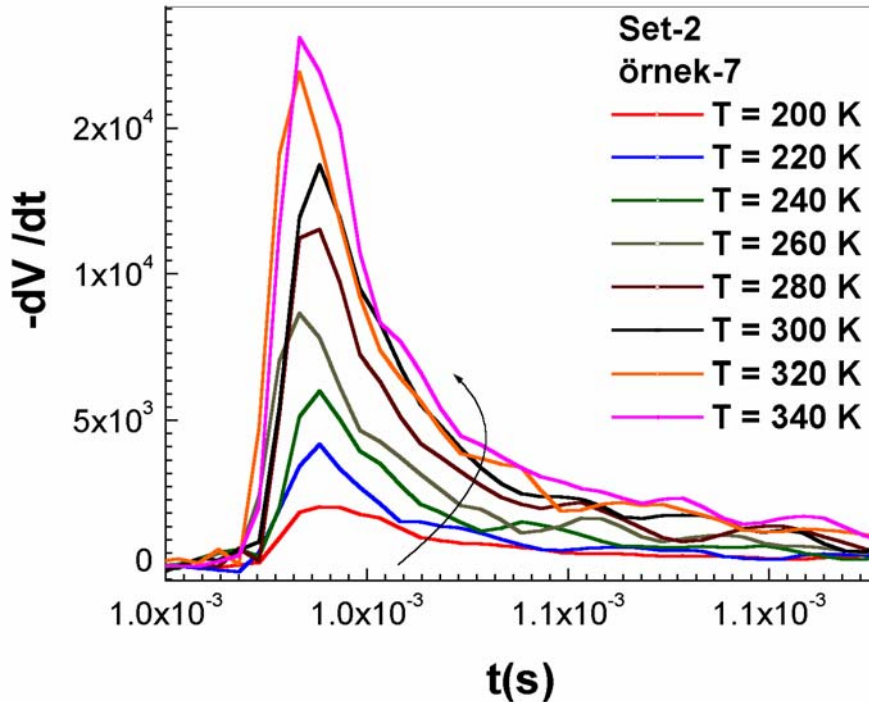
Bu bölgedeki veriler kullanılarak sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik verilerini elde etmek mümkündür. II. bölgedeki verilerin nümerik türevleri ise, denklem (4.4.)'ün solundaki ifadeye ulaşmamızı sağlayacaktır. Şekil 4.24'teki verilerin nümerik türev değerleri alınarak Şekil 4.25'teki değişimler elde edilmiştir. Fotoiletkenliğin değişmez kaldığı I. bölgedeki veriler kullanılarak da, Şekil 4.26'da verilen, sıcaklığın fotoiletkenliğe bağlı değişimi elde edilmiştir.

$$\sigma_{ss} = V_{ss} \frac{\kappa}{R_f \cdot V_{dc-bias}} \quad (4.5.)$$

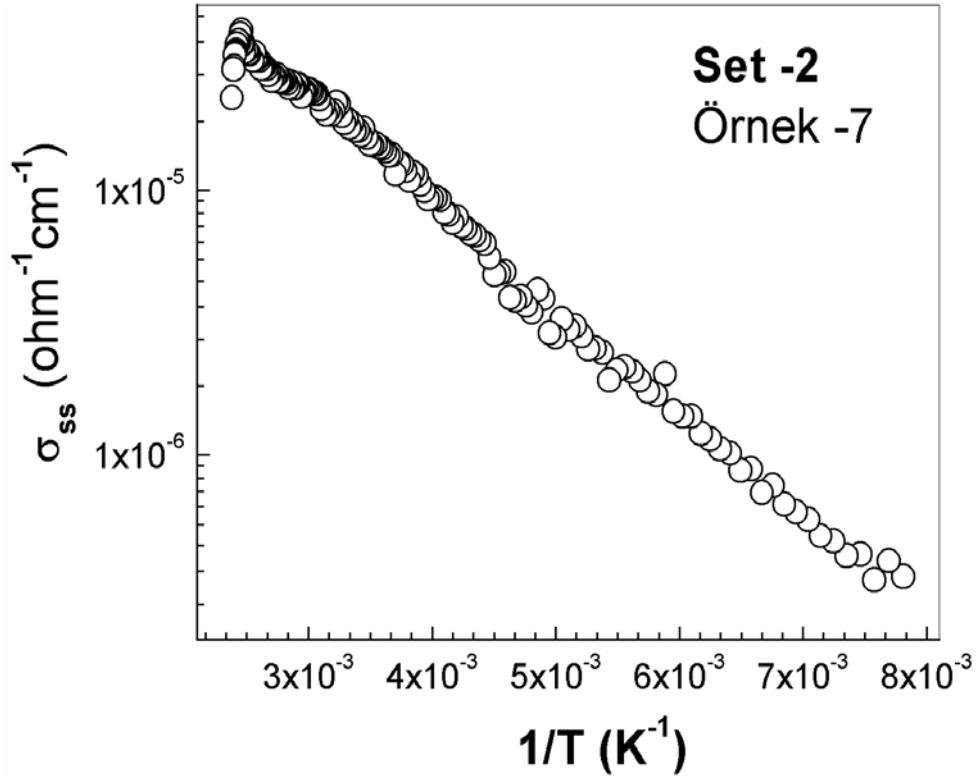
Burada V_{ss} kararlı durum fotoiletkenliğe karşılık gelen gerilim çıkışıdır. V_{ss} değerinden kararlı durum fotoiletkenlik değerine denklem (4.5.)'de verilen ifade yardımıyla geçiş yapılabilir.

Burada κ kullanılan örneğin kalınlığına ve elektrot geometrisine bağlı bir çarpan, R_f akımdan gerilime dönüştürücü yükselteç devresinde kullanılan geri besleme direncinin değeri, $V_{dc-bias}$ ise örneğe uygulanan dc potansiyel farkıdır.

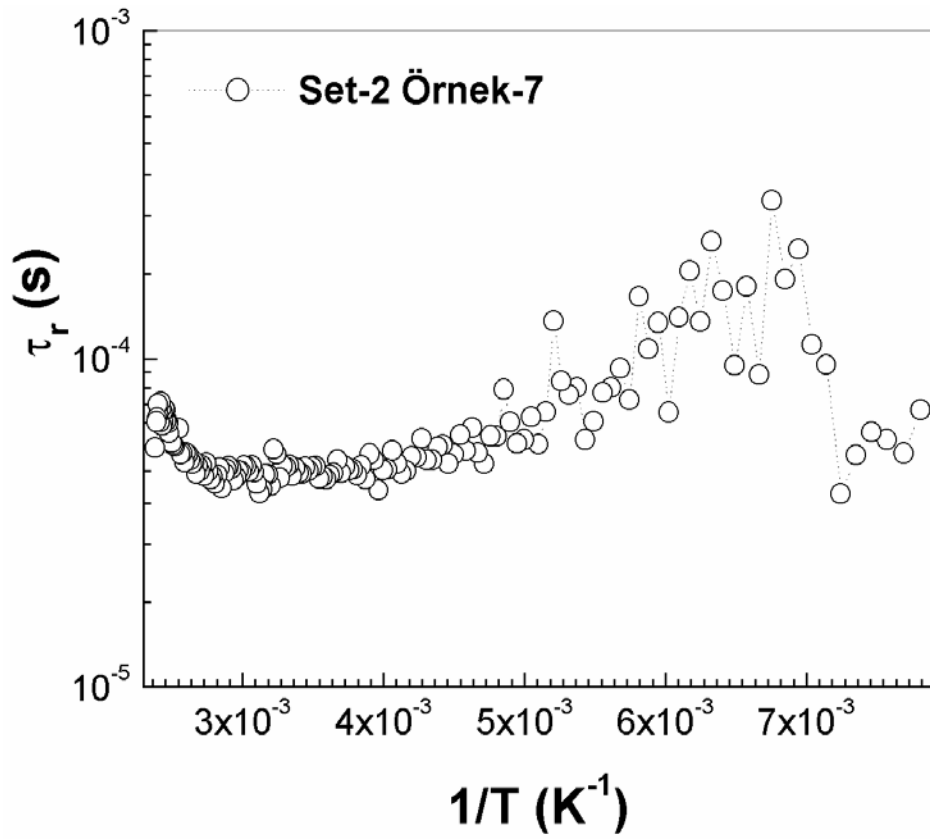
Denklem (4.4.)'teki ifadeyi kullanarak her sıcaklık değerine karşılık gelen sönüm süreleri hesaplanıp çizildiğinde, Şekil 4.27'deki grafik elde edilir. Şekil 4.27'deki değişim 128 K ile 420 K arasındaki sıcaklıklarda tepki süresinin değişimini sergilemektedir. Sıcaklık düştükçe tepki süresinin büyümesi sıradan bir a-Si:H film için beklen bir davranıştır. Ölçülen sıcaklık aralığında tepki süresi 40 μ s düzeylerinden 400 μ s düzeylerine çıkmıştır. Bu değişim bir mertebelik artış sergileyen aktivasyon türü bir davranıştır. Sürüklenme (drift) mobilitesini denklem (4.6.)'da verilen ifade yardımıyla hesaplayacak olursak, Şekil 4.27'deki ve Şekil 4.26'daki verileri kullanmamız gerekecektir.



Şekil 4.25. Fotoiletkenlik sönüm zamanı verilerinin zamana göre nümerik olarak alınmış birinci dereceden türev değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri.



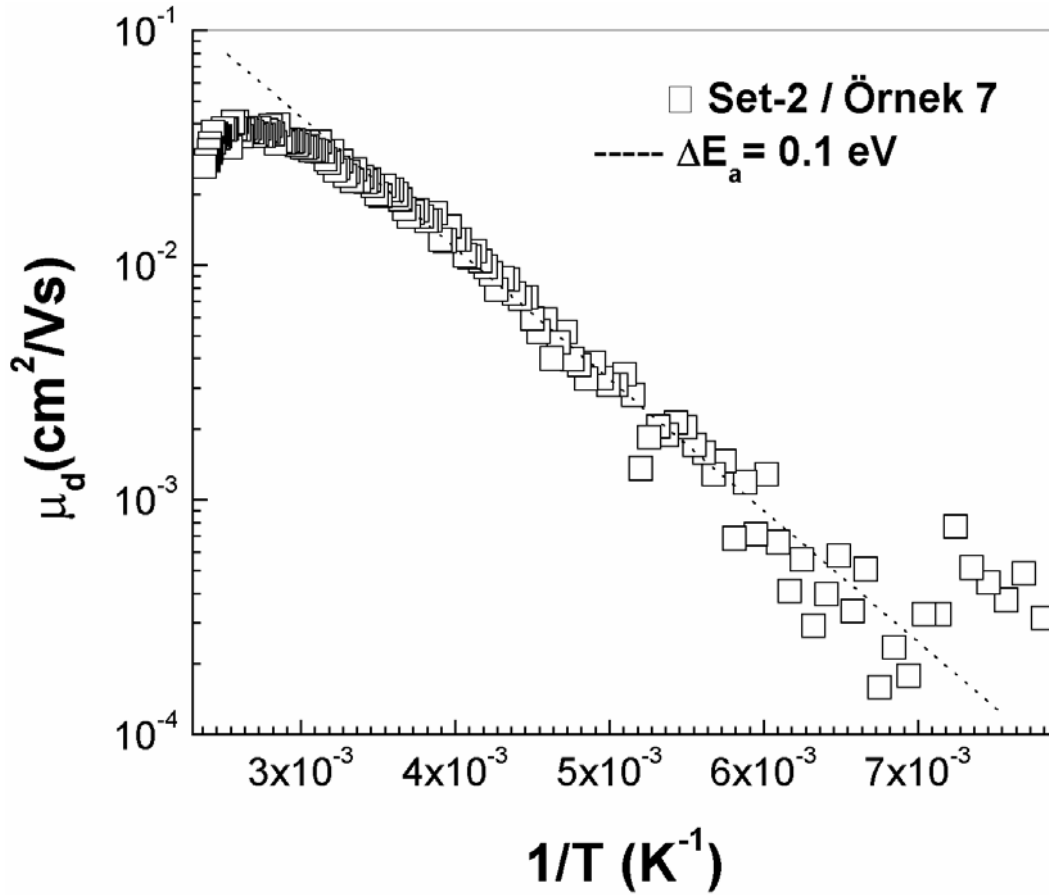
Şekil 4.26. Kararlı durum fotoiletkenliğin $1/T$ ile değişimi.



Şekil 4.27. Fotoiletkenlik tepki süresinin $1/T$ ile olan değişimi.

$$\mu_d(T) = \frac{\sigma_{ss}(T) / eG}{\tau_r(T)} \quad (4.6.)$$

Burada e elektronun yükü, G örneğe sürülen foton akısına ve foton enerjisine karşılık gelen elektron deşik üretim hızı katsayısı, σ_{ss} sıcaklığa bağlı kararlı durum fotoiletkenlik değerleri, τ_r sıcaklığa bağlı fotoiletkenlik tepki süresi değerleridir.



Şekil 4.28. Set-2 örnek-7'nin elektronların sürüklenme mobilitésinin $1/T$ ile değişimi.

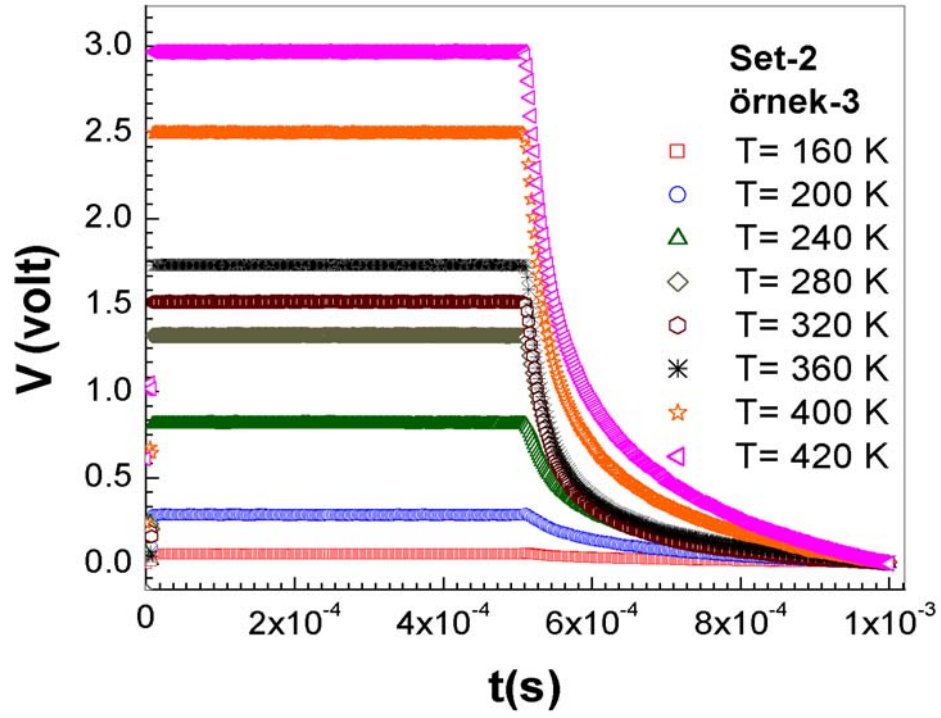
Şekil 4.28'de fotoiletkenlik sönüm zamanı ölçümlerinden yararlanılarak elde edilen, set-2 örnek-7'nin sürüklenme mobilitésinin $1/T$ ile olan değişimi verilmektedir. Şekil 4.28'deki değişim incelendiğinde, 128 K ile 420 K sıcaklığı arasında mobilite yaklaşık üç mertebe artmaktadır. Düşük sıcaklıklara gidildiğinde sürüklenme mobilitési değerlerinin saçıldığı gözlemlenmektedir. Bunun nedeni düşük sıcaklıklarda fotoiletkenliğin iyice azalması ve bunun sonucunda fotoakımın sinyal/gürültü oranıyla aynı sinyal seviyesine (genliğine) yaklaşmasıdır. Sıcaklık yükseldikçe mobilitenin büyümesi hidrojenlendirilmiş amorf silisyum örneklerde literatürde de gözlenen bir davranıştır (Andriaennes et. al., 1995, Hoheisel et. al.,

1988). Sıcaklık arttıkça sürüklenme mobilitesi sıcaklıkla aktivasyon türü bir davranış göstermektedir. Yüksek sıcaklıklarda, bu yöntemle elde edilen elektron mobilitesi artık doyuma ulaşmakta, sıcaklık biraz daha arttırılırsa sürüklenme mobilitenin küçülmeye başladığı görülmektedir. Deneysel verilerin üstel bir fonksiyona çakıştırılmasıyla elde edilen aktivasyon enerjisi değeri ($\Delta E_a = 0,1$ eV) grafik içinde verilmektedir. Şekil 4.28'den oda sıcaklığı civarında hesaplanacak aktivasyon enerjisi, ΔE_a , bant uzantısı tuzak enerji düzeylerinin, E_c enerjisine göre ortalama konumunu verir. Bir başka deyişle, ΔE_a , iletkenlik bandı uzantısının genişliğinin bir ölçüsüdür (Öktü et. al., 1993).

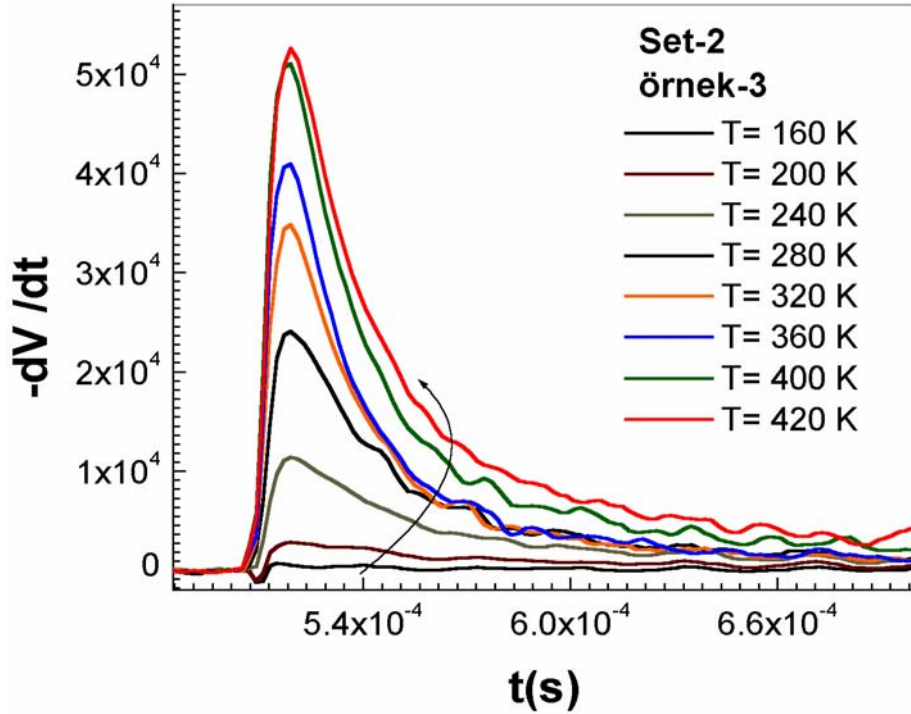
4.2.5.2. Set-2 örnek-3 fotoiletkenlik tepki süresi ölçüm sonuçları

Set-2 örnek-3 (% 50 helyum seyreltilmiş) üzerinde yapılan fotoiletkenlik tepki süresi ölçümleri 658 nm pik dalga boyuna sahip kırmızı LED'lerle gerçekleştirilmiştir. LED'e sürülen akım 24 mA'de sabit tutulduğunda bu akım altında LED'in yaydığı foton akısının $F = 8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ dir ve 160 K ile 420 K arasında 10 K'lık adımlarla fotoiletkenlik tepki süresi ölçülmüştür. Şekil 4.29'da farklı sıcaklık değerlerinde kaydedilen fotoiletkenlik tepki süresi verileri sunulmaktadır.

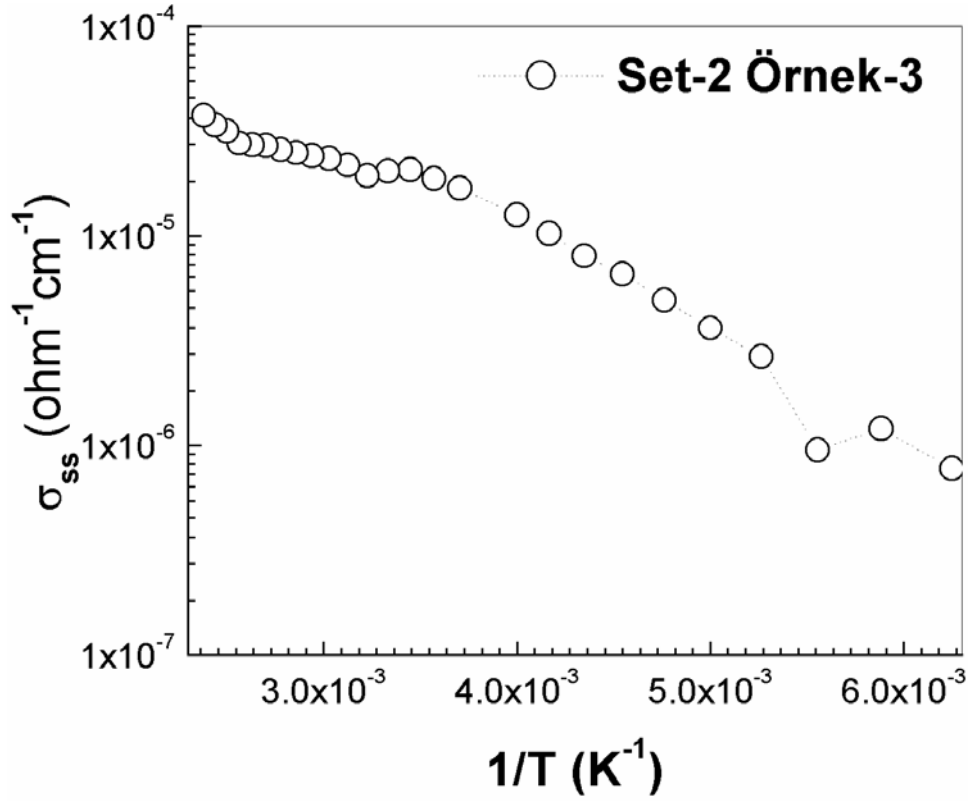
Şekil 4.29'da elde edilen fotoiletkenlik tepki süresi verileri kullanılarak, Şekil 4.30 ve 4.31'deki grafikler elde edildi. Şekil 4.29'daki grafikte kararlı durum fotoiletkenliğinin sıcaklık arttıkça büyüdüğü gözlemlenmektedir. Şekil 4.31'deki grafik incelendiğinde, beklenildiği gibi artan sıcaklıkla fotoiletkenliğin de üstel bir biçimde büyüdüğü, düşük sıcaklıklarda 10^{-7} düzeyinde olan fotoiletkenliğin 420 K sıcaklığa ulaşıldığında yaklaşık iki mertebe yükselerek 10^{-5} 'lere ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4.29. Dijital osiloskop yardımıyla ölçülen fotoiletkenlik tepki süresi verilerinin birkaç sıcaklık değeri için gösterimi.

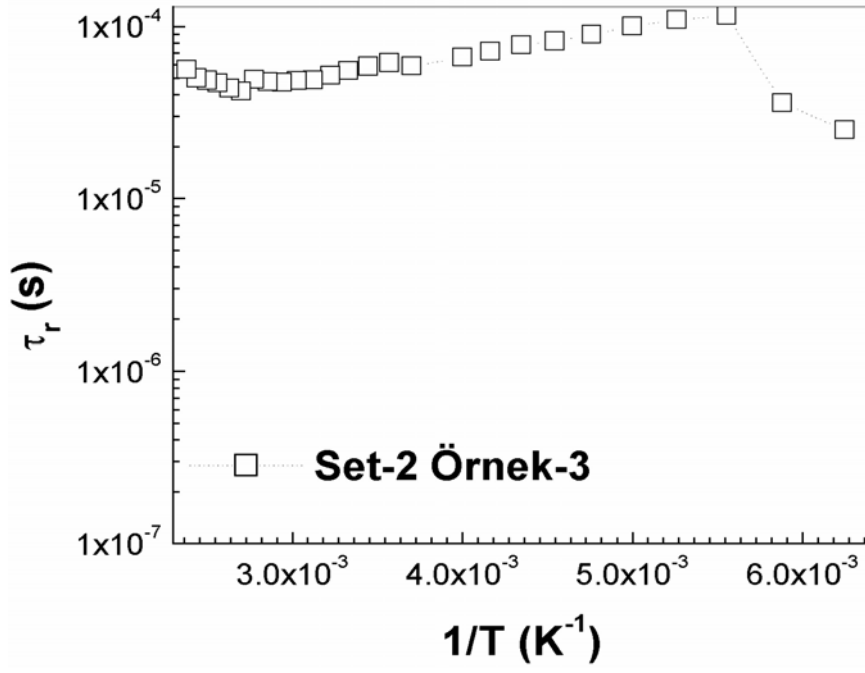


Şekil 4.30. Fotoiletkenlik sönüm zamanı verilerinin zamana göre nümerik olarak alınmış birinci dereceden türev değerlerinin zamana bağlı değişimleri.

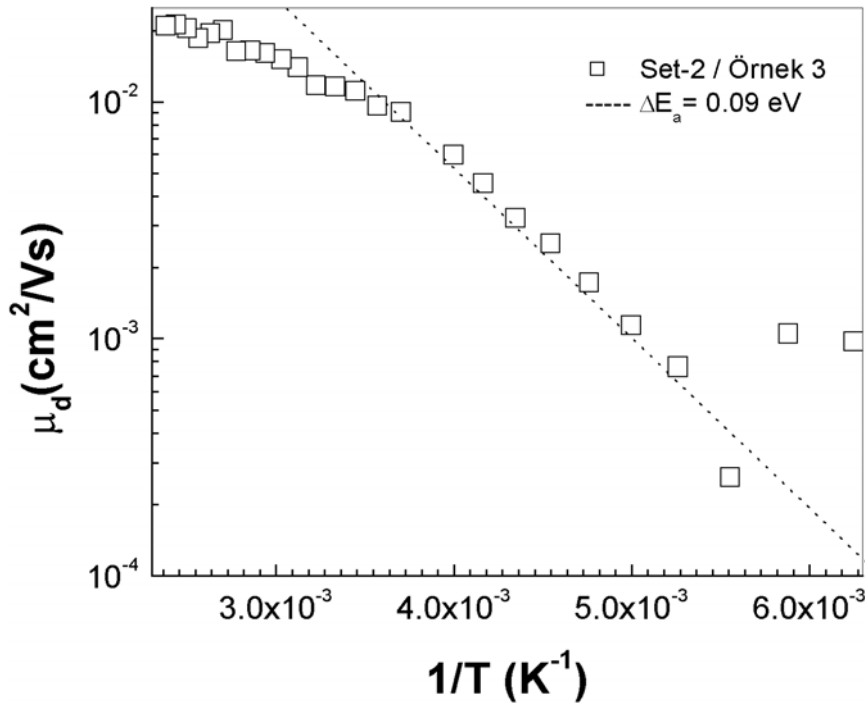


Şekil 4.31. Kararlı durum fotoiletkenliğinin 1/T ile değişimi.

Oda sıcaklığındaki fotoiletkenlik değeri incelendiğinde, bu değerin 2×10^{-5} civarında olduğunu gözlenmektedir. Bu değer, saf silan gazı kullanılarak hazırlanmış a-Si:H örneklerin literatürde yayınlanan fotoiletkenlik değerinden bir mertebe daha yüksektir. Şekil 4.30 ve 4.31'deki veriler kullanılarak fotoiletkenlik sönüm süresi değerleri her sıcaklık değeri için hesaplanarak Şekil 4.32'de gösterilmiştir. Fotoiletkenlik tepki süresi, sıcaklık arttıkça küçülmekte ve bir minimum değere ulaşmaktadır. Bu aralıkta fotoiletkenlik tepki süresi bir mertebe değişim göstererek 40 μ s'lerden 100 μ s'yelere çıkmıştır. Yarı logaritmik gösterimde fotoiletkenlik tepki süresinin sıcaklıkla değişmediği düşünülse de gerçekte bir mertebelik bir değişim söz konusudur.



Şekil 4.32. Fotoiletkenlik tepki süresinin $1/T$ ile olan değişimi.



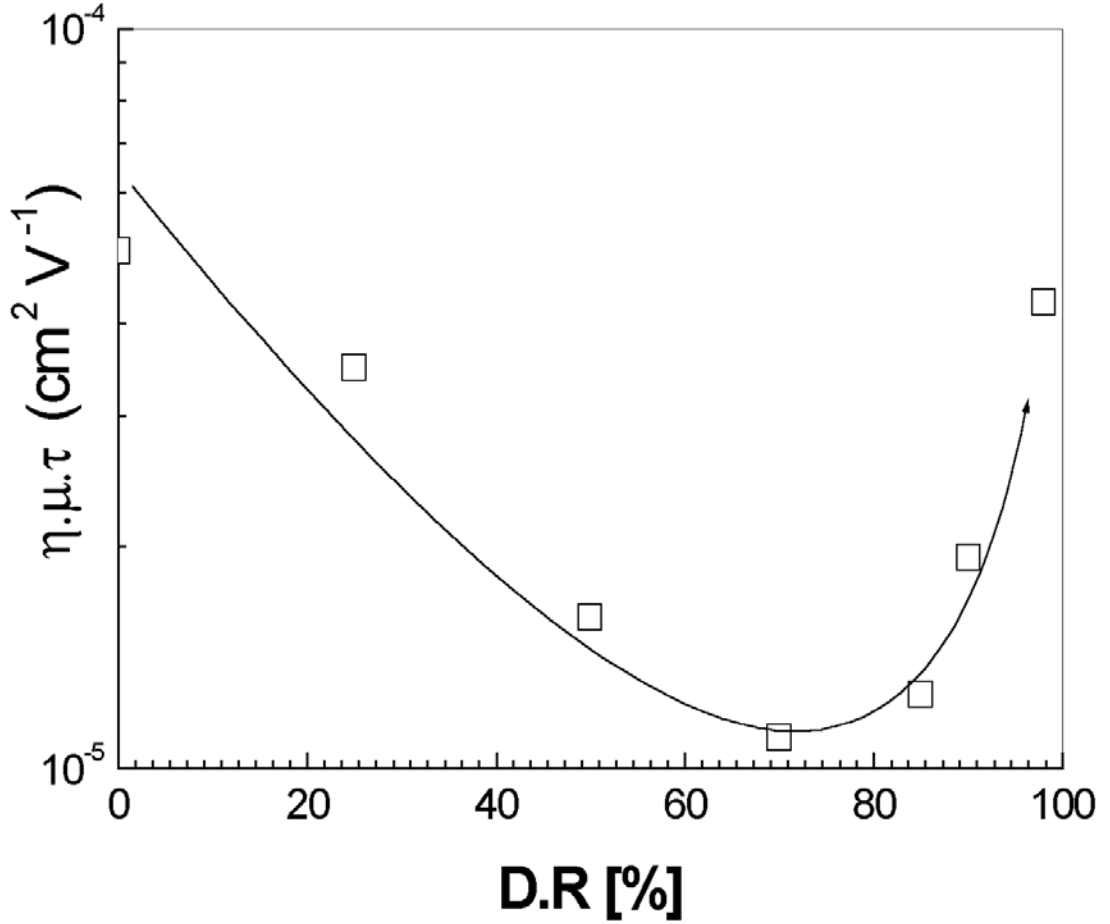
Şekil 4.33. Elektronlarının sürüklenme mobilitésinin $1/T$ ile değişimi.

Şekil 4.33'te fotoiletkenlik tepki süresi ölçümü yardımıyla bulunan sürüklenme mobilitésinin, $1/T$ ile değişimi verilmektedir. Mobilite değerleri artan sıcaklık ile büyümekte olup, örnek-7'de gözlenen davranışa benzer bir davranış sergilemektedir. 420 K civarında mobilite iki mertebe büyüyerek 10^{-2} düzeyine

ulaşmıştır. Sıcaklıkla aktivasyon türü davranış sergileyen bu değişim eksponansiyel bir fonksiyona fit edilerek aktivasyon enerjisi değeri hesaplanmıştır.

4.2.6. Oda sıcaklığında (293 K) sabit foton akısında fotoiletkenlik ölçümleri

Set-2'deki tüm örnekler 656 nm'lik dalga boyuna sahip kırmızı LED gurupları ile aydınlatılarak, $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ foton akısında fotoiletkenlikleri ölçüldü.



Şekil 4.34. Set-2 örneklerinin oda sıcaklığındaki $\eta\mu\tau$ değerlerinin helyum seyreltme oranına bağlı değişimleri.

Tüm örneklerle 100 V dc sabit gerilim uygulanarak elektrometreden geçen fotoakım değerleri kaydedilmiştir. Örnek ve kontak geometrileri hesaba katılarak her örnek için fotoiletkenlik değerleri bulunarak, fotoiletkenlik verilerinin karşılık geldiği $\eta\mu\tau$ değerlerine ulaşılmıştır. $\eta\mu\tau$ 'nın helyum seyreltme oranına bağlı değişimi Şekil 4.34'te verilmektedir. $\eta\mu\tau$ çarpanı fotoiletkenliğin direkt ölçütü olan bir büyüklüktür. $\eta\mu\tau$ değerlerinin tüm örneklerde 5×10^{-5} ve 1×10^{-5} düzeyinde olduğu görülmektedir.

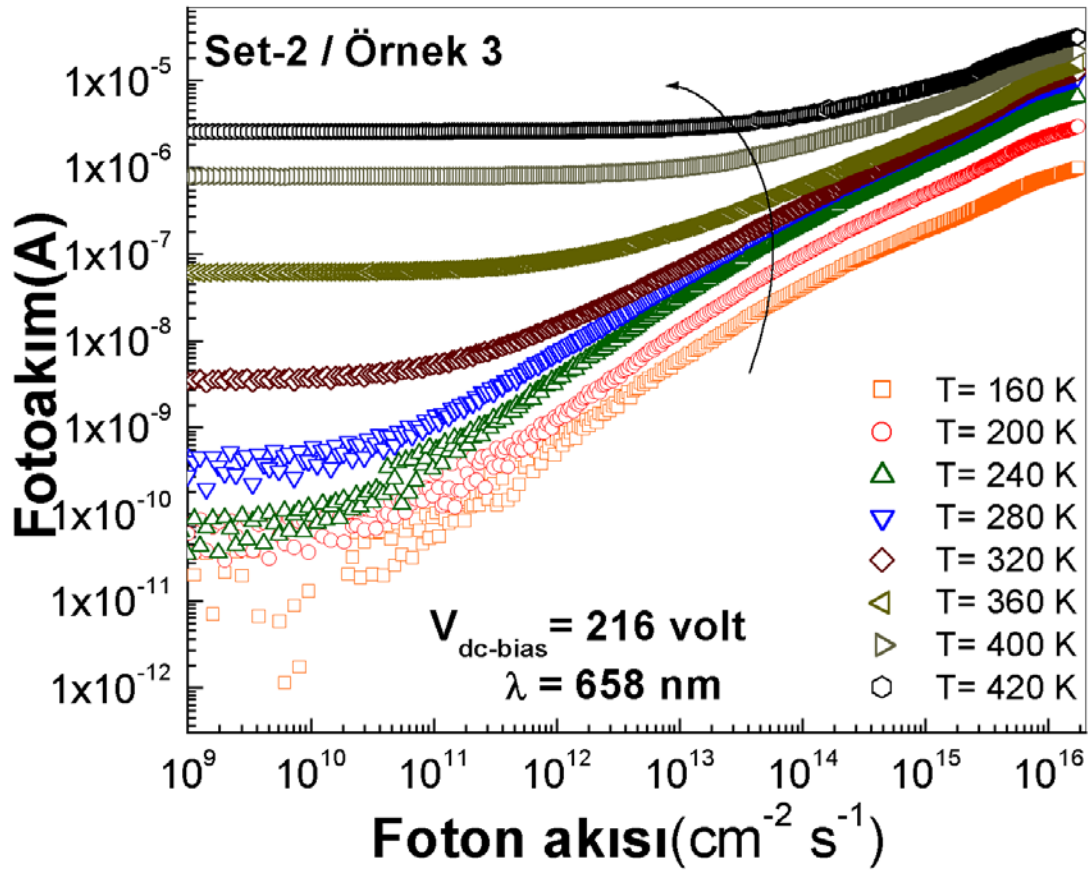
Sıradan bir a-Si:H filmde olması gerekenden oldukça yüksek olan bu değerler, helyumla seyreltilerek hazırlanmış örneklerin literatürde rapor edilmiş standart a-Si:H ince filmlerden oldukça farklı olduğunu göstermektedir. Özellikle saf silan gazı kullanılarak hazırlanmış örnekte $\eta_{\mu\tau}$ değeri 5×10^{-5} düzeyindeyken yüksek seyreltme oranlarına gidilmeye başlanıldığında bu değer küçülmekte ve % 70 seyreltme oranında bir minimumdan geçerek tekrar artmaya başlamaktadır. Sonuçta tüm değişimler 10^{-5} mertebesi içinde kalmaktadır.

4.2.7. Sıcaklığın fonksiyonu olarak foton akısına bağlı fotoiletkenlik ölçümleri

Bu bölümde sadece en düşük Tauc bant aralığına (% 50 helyum seyreltilerek hazırlanan) sahip olan örnekte sıcaklığın fonksiyonu olarak foton akısına bağlı fotoiletkenlik sonuçları sunulacaktır. Ölçümler kapalı devre soğutma sisteminde, 160 K ile 420 K arasında 10 K'lık adımlarla ve 658 nm'lik pik dalga boyuna sahip kırmızı LED guruplarıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde LED gurupların foton akısı Bölüm 3'te açıklanan bilgisayar kontrollü LED akım kontrol ünitesi yardımıyla ayarlanarak tüm veriler bilgisayar ortamında toplanmıştır. Fotoiletkenliğin foton akısına bağımlılığı denklem (4.7.) ile verilmektedir.

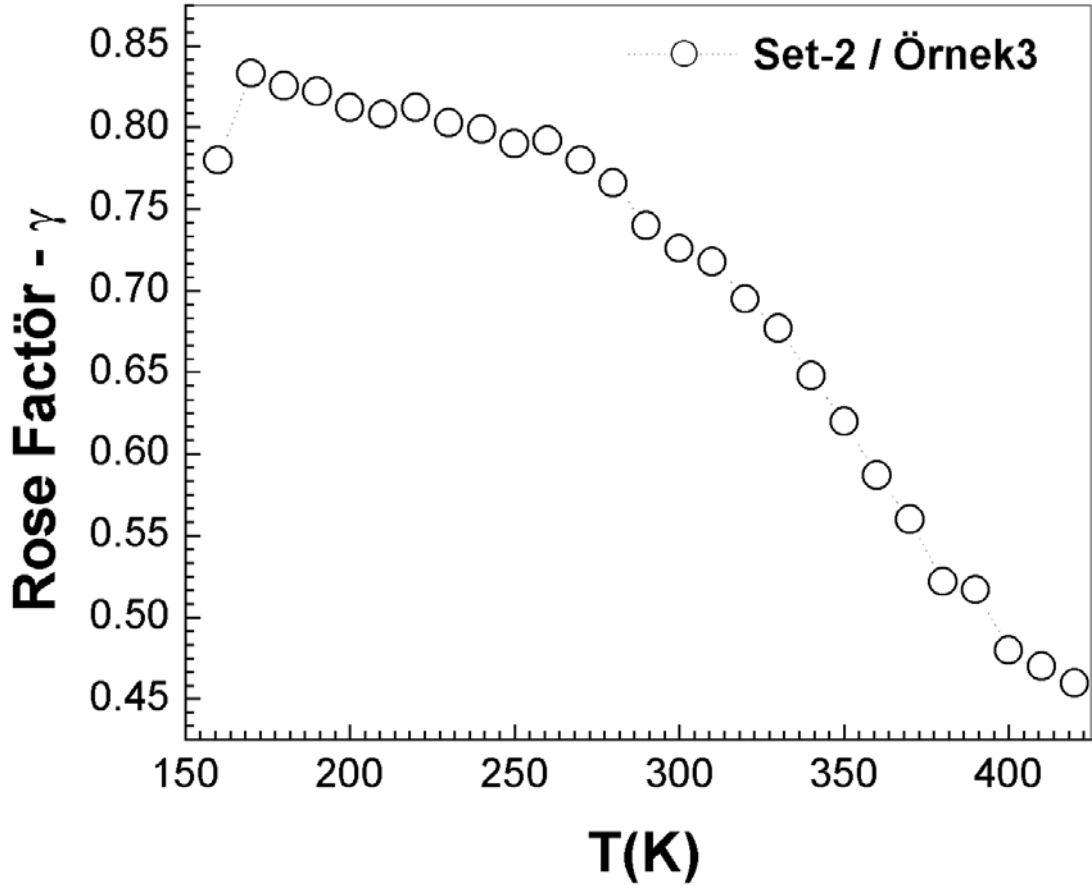
$$\sigma \approx G^{\gamma} \quad (4.7.)$$

Burada G elektron-deşik yaratma hızı, γ ise Rose faktördür. Eğer fotoiletkenlik Rose'nin önerdiği gibi foton akısına γ üstel fonksiyonu ile bağlı ise denklem (4.7.)'nin her iki tarafının logaritması alındığında karşımıza çıkacak olan değişim doğrusal olmalıdır ve bu doğrusal değişimin eğimi γ 'yı vermelidir. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum örnekler için oda sıcaklığı civarında bu değer 0,9 -0,5 arasında değişebilmektedir. Şekil 4.35'te set-2 örnek-3 için sıcaklık ve foton akısına bağlı fotoiletkenlik değişimleri verilmektedir. Şekildeki değişimlerde tüm sıcaklık adımlarındaki verilerin çizilmesi yerine sadece 8 farklı sıcaklık değerindeki değişimler gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi, belirli bir foton akısı değerine kadar fotoiletkenlik neredeyse sabit kalmış, fakat kritik bir foton akısı değerinden sonra fotoiletkenlik çok belirgin bir biçimde değişmektedir.



Şekil 4.35. Farklı sıcaklık değerlerinde kaydedilen foton akısına bağlı fotoiletkenlik değerleri.

Düşük foton akısı değerlerinde sabit kalan fotoakım değerleri, karanlık iletkenlikte kaydedilen değerler ile oldukça iyi uyum içerisindedir. Dolayısıyla fotoakım değerinin artmaya başladığı noktalar, fotoiletkenliğin kurulmaya başladığı kritik geçişleri göstermektedir. Beklenildiği gibi yüksek sıcaklıklara gidildiğinde fotoiletkenliğin değeri büyümekte ve düşük sıcaklıklarda ise küçülmektedir. 160 K'deki ölçüm incelendiğinde foton akısının yaklaşık $7 (10^9 - 10^{16})$ mertebelik değişiminde fotoakım $5 (10^{-12} - 10^{-7})$ mertebelik bir değişim göstermektedir.



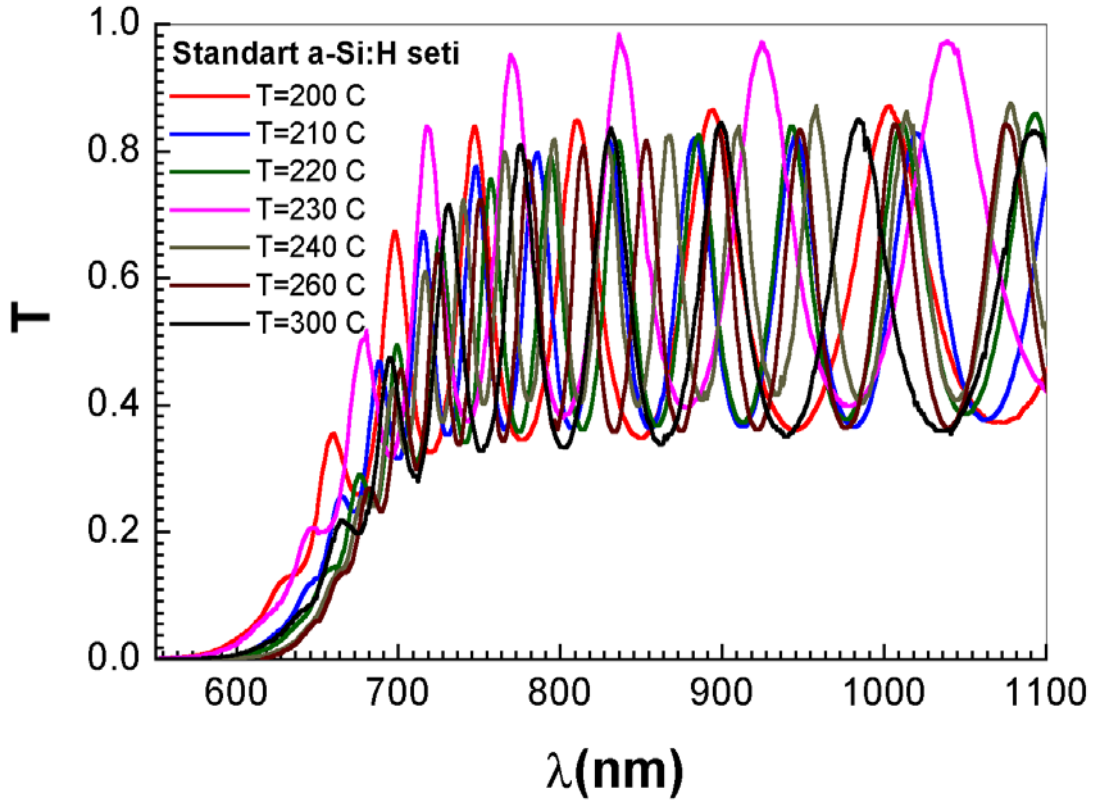
Şekil 4.36. Foton akısına bağımlı fotoakım değerleri kullanılarak hesaplanan Rose faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

Fotoiletkenliğin, foton akısının minum ve maximum olduğu düzeyleri arasında 5 mertebe değişmesi, örneğin iyi bir fotoiletken olduğunu göstermektedir. Fotoiletkenliğin kurulduktan sonraki bölgede, fotoiletkenliğin foton akısına bağlı değişiminin değişimin olması denklem (4.7.)'nin bu bölgelerde geçerliliğini göstermektedir. Her bir sıcaklık değerinde gözlenen doğrusal bölgelerin eğiminden faydalanarak hesaplanan Rose faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.36'da görülmektedir. Fotonik duyarlılığın bir ölçütü olan Rose faktör değerlerinin sıcaklık arttıkça 0,85'lerden 0,45'e düştüğü gözlenmektedir.

4.3. Standart Örnek Setinde Alttaş Sıcaklık Optimizasyonu

Ard arda gerçekleştirilen film hazırlama işlemleri sonucu vakum odacığının iç yüzeyi amorf silisyumla kaplanmaktadır. Hazırlanan örnek içinden alınmak üzere vakum odacığının her açılışı, bu odacığın iç yüzeyinde kaplı amorf silisyumun atmosfer ortamındaki oksijene maruz kalarak oksijenle bağ yapmasına yani oksitlenmesine sebep olmaktadır. Zaman içinde vakum odacığının iç duvarlarındaki amorf silisyum-oksijen biçiminde sıralanmış katmanlar giderek kalınlaşmaktadır. Mekanik ve kimyasal yolla temizlenmesi gereken bu istem dışı kaplama, zamanla vakum odacığı içerisinde büyüyen filmin kalitesini bozabilmektedir. Özellikle a-Si:H filmin büyüme süreci içerisinde, plazma reaksiyonu içine katılan safsızlıklar alttaş üzerinde büyüyen filmin optik ve yapısal özelliklerini etkileyebilmektedirler. Bu yüzden set-3 örnek setini hazırlamadan önce ciddi oranda kalınlaşan kaplama mekanik ve kimyasal yöntemlerle temizlendi. Temizleme süreci sonunda thermoçiftin konumun değişmesinden dolayı alttaş sıcaklık optimizasyonu yapılması gerekti. Vakum odacığının temizlenmesi, saf silan gazı kullanılarak hazırlanan a-Si:H örneğin kalitesi hakkında bilgi edinmek ve helyum gazının a-Si:H filmlerin optik ve elektriksel özelliklerine etkisi hakkında bilgi edinmek açısından güvenilir bir çalışma yapılmasına olanak vermiştir. Hazırlanan örneklerin düşük kusur yoğunluklu ve düşük Urbach enerji değerlerine sahip olması, fotovoltaik malzeme adayı olabilmesi yönünden tercih edilen bir özelliktir. Bu bakımdan plazma sisteminde hazırlanacak örneklerin vakum odacığı temizliği sonrasında uygun alttaş optimizasyonunun da sağlanmış olması gerekir. Bu yüzden sadece saf silan gazı kullanılarak farklı alttaş sıcaklığında sabit toplam basınç değerinde 7 örnek hazırlanmıştır. Hazırlanan yedi örnek optik geçirgenlik, CPM, karanlık iletkenlik ölçümleri yapılarak karakterize edilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda en düşük kusur yoğunluklu örneklerin 230 °C alttaş sıcaklığında hazırlanan örnekler olduğu görülmüştür. Bunun üzerine en yüksek kusur düzeyi sergileyen örnek (300 °C'de hazırlanmış örnek) seçilerek bu örnek üzerinde yukarıda sayılan deneysel ölçümlere ek olarak foton akısına bağımlı fotoiletkenlik ve fotoiletkenlik tepki süresi ölçümleri yapılmıştır.

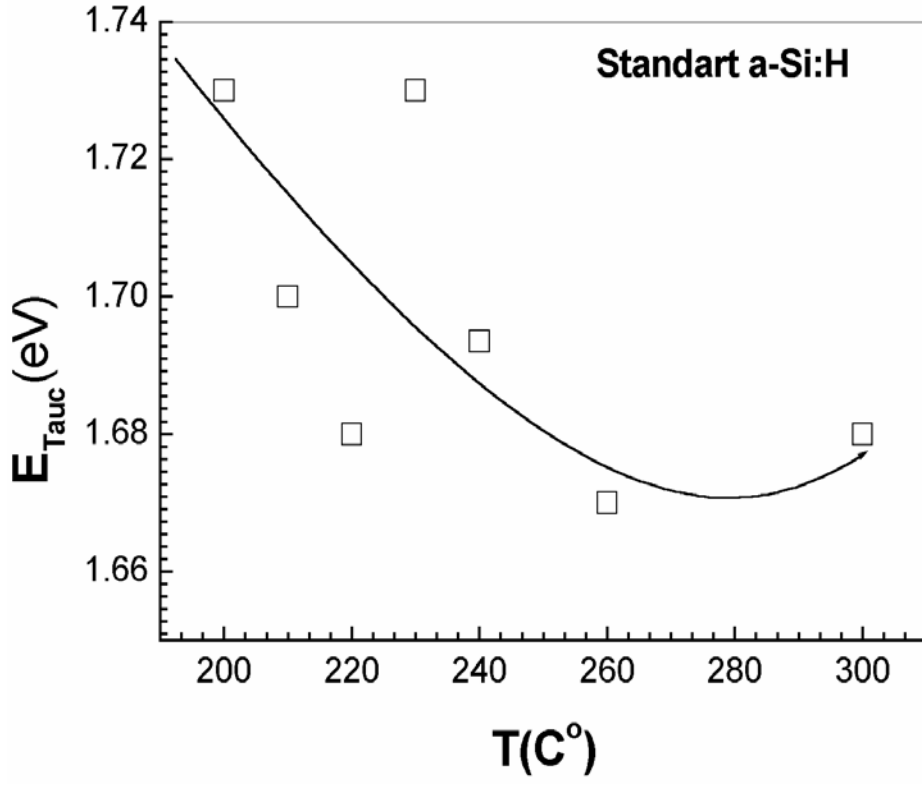
4.3.1. Optik geçirgenlik



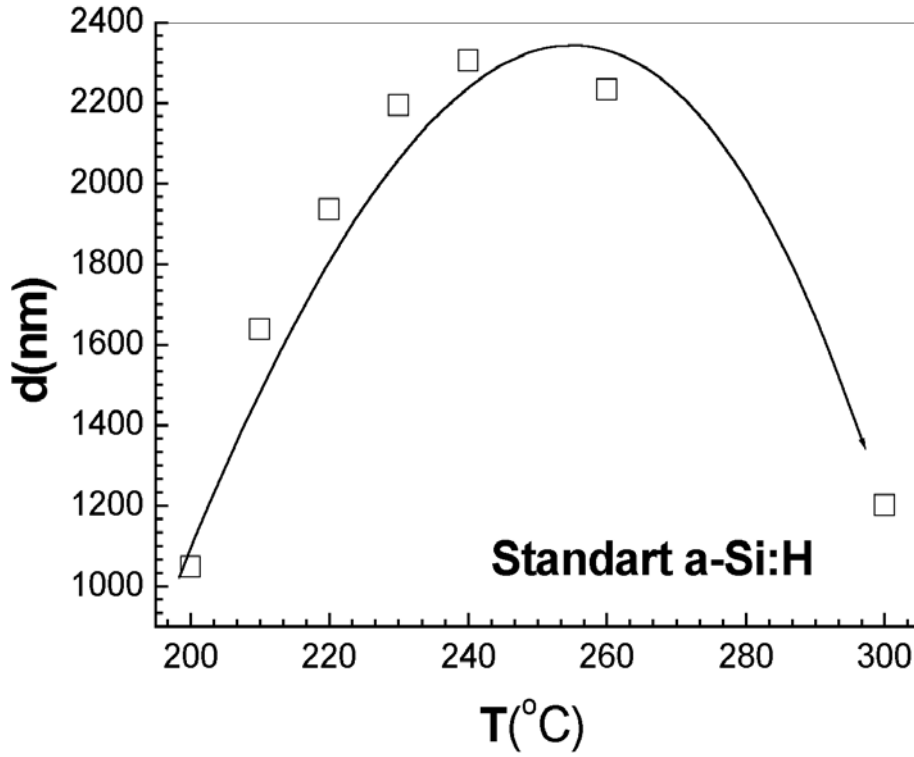
Şekil 4.37. Standart set a-Si:H örneklerinin optik geçirgenlik spektrumu.

Şekil 4.37'de yedi farklı alttaş sıcaklığında büyütülen örneğin optik geçirgenlik spektrumu sunulmaktadır. Alttaş sıcaklığının değişiminin hazırlanan örneklerin soğurma kenarını ve film kalınlığını değiştirdiği görülmektedir. Optik geçirgenlik ölçümü verilerinden hesaplanan soğurma spektrumu kullanılarak yapılan Tauc çizimi Şekil 4.38'de verilmektedir. Farklı alttaş sıcaklığında hazırlanan örneklerin Tauc çizimleri üst üste yapılmıştır.

Alttaş sıcaklığının artması ile birlikte hazırlanan örneklerin bant aralıkları küçülmektedir. Seçilen alttaş sıcaklığına bağlı olarak Tauc bant aralığı 1,74 eV ile 1,67 eV arasında değişim sergilemektedir (Şekil 4.38.).

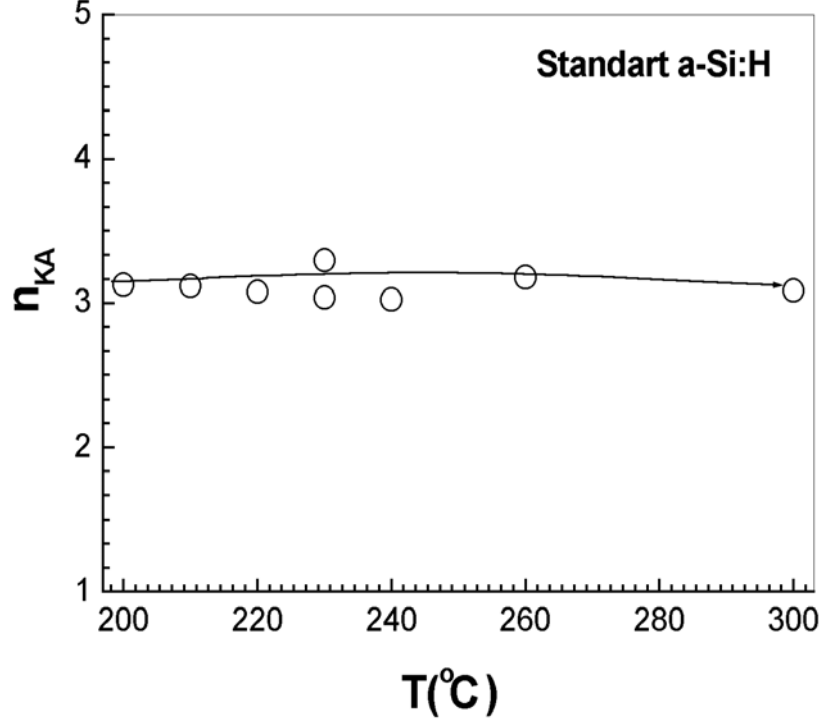


Şekil 4.38. Standart set a-Si:H örneklerinin Tauc bant aralığının alttaş sıcaklığına bağlı değişimi.



Şekil 4.39. Film kalınlıklarının alttaş sıcaklığına bağlı değişimi.

Şekil 4.39'da optik geçirgenlik spektrumundan faydalanılarak bulunan film kalınlık değerleri verilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi artan alttaş sıcaklığıyla birlikte film kalınlık değerleri artmakta ve yaklaşık 230 °C'de kalınlık 2 µm değerine ulaştıktan sonra tekrar küçülmeye başlamaktadır.



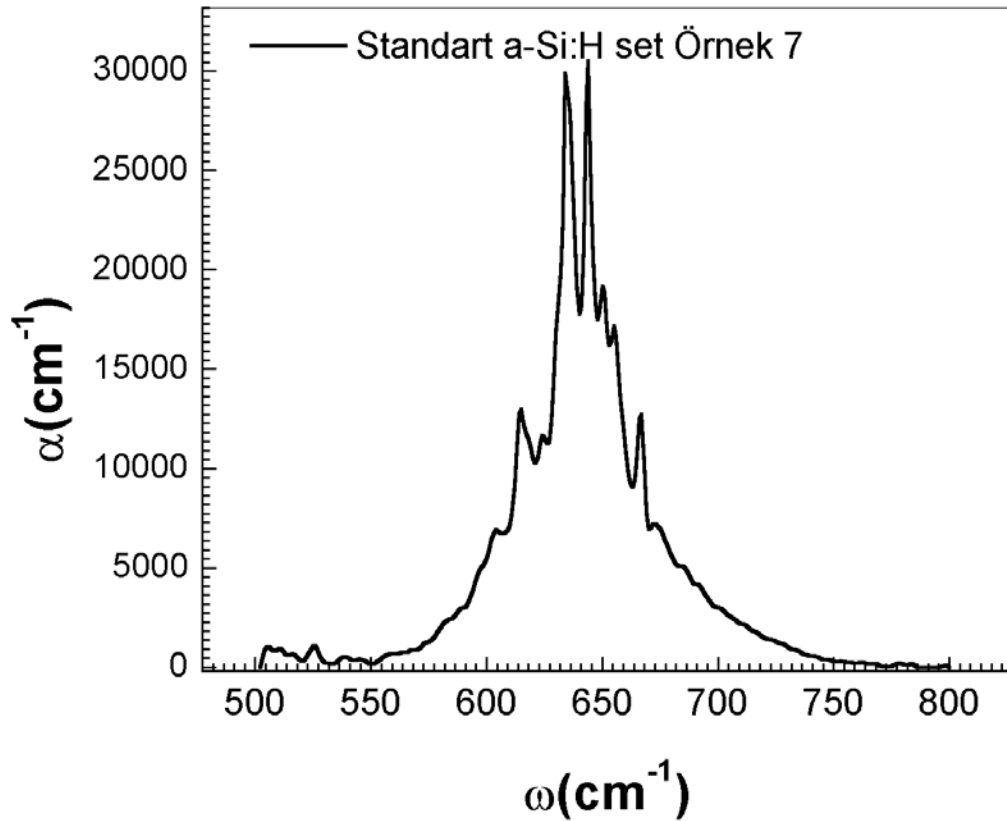
Şekil 4.40. Optik geçirgenlik spektrumdan faydalanılarak bulunan kırmızıaltı film kırma indisi değerlerinin alttaş sıcaklığına bağlı değişimi.

Şekil 4.40'da optik geçirgenlik spektrumdan faydalanılarak bulunan kırmızıaltı kırma indisi değerleri verilmektedir. Alttaş sıcaklığına bağlı olarak çizilen kırma indisi değerlerinin fazla değişmediği genellikle filmlerin kırma indisi değerlerinin 3 civarında kaldığı gözlemlenmektedir.

Tüm filmlerin büyüme sürecinde toplam gaz basıncı ve RF gücünün sabit tutulmasına rağmen Şekil 4.39'dan da görüldüğü gibi alttaş sıcaklığı değiştikçe film kalınlığı iki katına çıkmaktadır. Büyüme sürelerinin aynı olmasına rağmen film kalınlığında meydana gelen bu değişim beklenmedik bir sonuçtur. Film kalınlığını önemli derecede etkileyebilecek iki etki söz konusu olabilir; bunlardan birisi vakum odacığına sürülen gazın toplam basınç değeri ise RF gücüdür. Bu değişim iki soruyu beraberinde getirmiştir. RF güç metre, güç ölçme işlemini gerçekten doğru bir şekilde yapıyor mu?, vakum ölçer, vakum odacığına sürülen toplam gaz basıncını, doğru ölçüyor mu?

Filmin oluşum süresince RF gücü (eski RF güç ölçeri yardımıyla) sabit tutulmaya çalışılmıştır. Kalınlıktaki ani değişimin, plazmaya sürülen gücün değişimi ile doğrudan ilgili olduğu düşünülmektedir. Kalınlıktaki bu değişim, film oluşturma sürecinde RF gücünün sabit kalmamasının bir göstergesidir. Deneysel olarak gözlenen bu değişim, RF güç metrenin yanlış ölçüm yaptığının anlaşılmasıyla doğrulanmıştır. Yüksek güçlerde çalışmaya zorlanmış olan RF jeneratöründe, yansıyan RF sinyal genliğinin artmasıyla birlikte, transistörler üzerinde harcanan gücün artması, dolayısıyla bunun, ısı enerji olarak transistörler üzerinde harcandığı gözlenmiştir. Transistörlerde artan ısı, üretilen RF sinyalinin genlik tepe değerinin salınmasına neden olmaktadır. Deneysel olarak karşılaşılan bu problem, detayları bölüm3'te sunulan, yeni bir RF power metre, empedans uyuşturucu ve RF jeneratöre yeni bir soğutucu yapılarak çözüme kavuşturulmuştur.

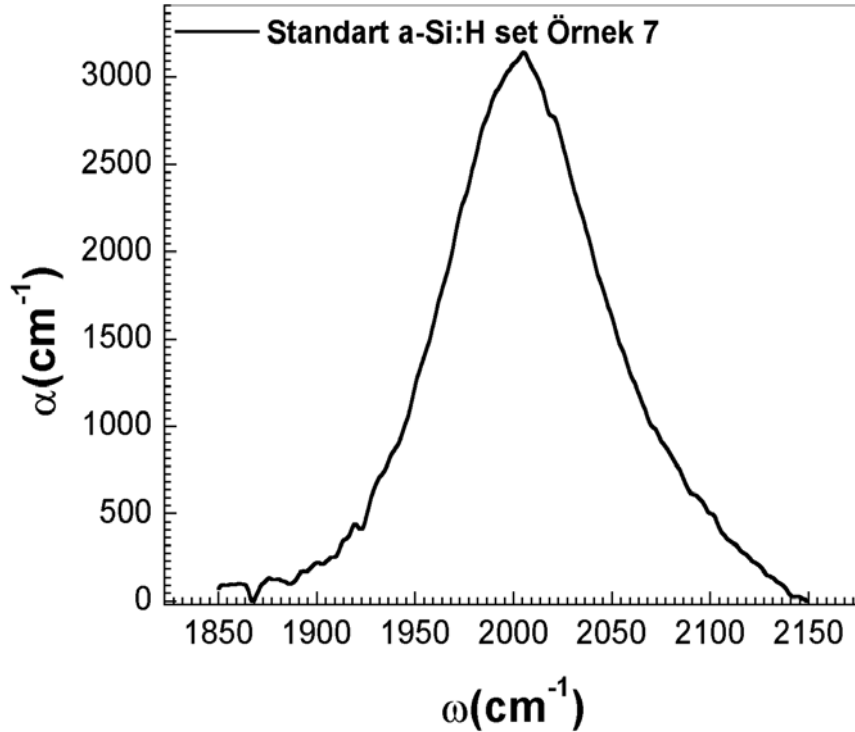
4.3.2. Fourier dönüşümü kırmızıaltı (KA) spektrumları



Şekil 4.41. Standart set a-Si:H örneklerinden 300 °C alttaş sıcaklığında hazırlanan örneğin kırmızıaltı soğurma spektrumu.

Saf silan gazı kullanılarak hazırlanan bu örnek setinde sadece 300 °C alttaş sıcaklığında hazırlanan örneğin FTIR spektrumu incelenmiştir. Bu setin hazırlanmasındaki ana amaç alttaş sıcaklık optimizasyonun yapmış olmasıdır. En düşük kusur yoğunluklu örneğin CPM ölçümleri sonucunda 230 °C civarında alttaş sıcaklığında hazırlanabileceği gözlemlenmiştir. Benzer gözlemleri hidrojenlendirilmiş a-Si:H örnekler için ESR ölçümleriyle doğrulayan araştırmalarda vardır (Matsuda et. al., 2002).

7 nolu örneğin FTIR spektrumuna bakıldığında aktif titreşim modlarına ait bantlar sadece 630- 640 cm^{-1} ve 2000 cm^{-1} civarındadır. Şekil 4.41'de standart a-Si:H setinin 7 numaralı örneğinin 500-800 cm^{-1} dalga sayısı aralığında optik geçirgenlik verileri kullanılarak hesaplanmış FTIR soğurma eğrileri verilmektedir. Şekil 4.41'deki değişim incelendiğinde 630 ve 640 cm^{-1} dalga sayısında soğurma değerleri pik vermektedir. Bu pik noktalarına ait yarı çizgi genişliklerinin oldukça dar olması bu dalga sayılarına karşılık gelen titreşim modlarının yapı içinde oldukça basat olduğunu söylemektedir.



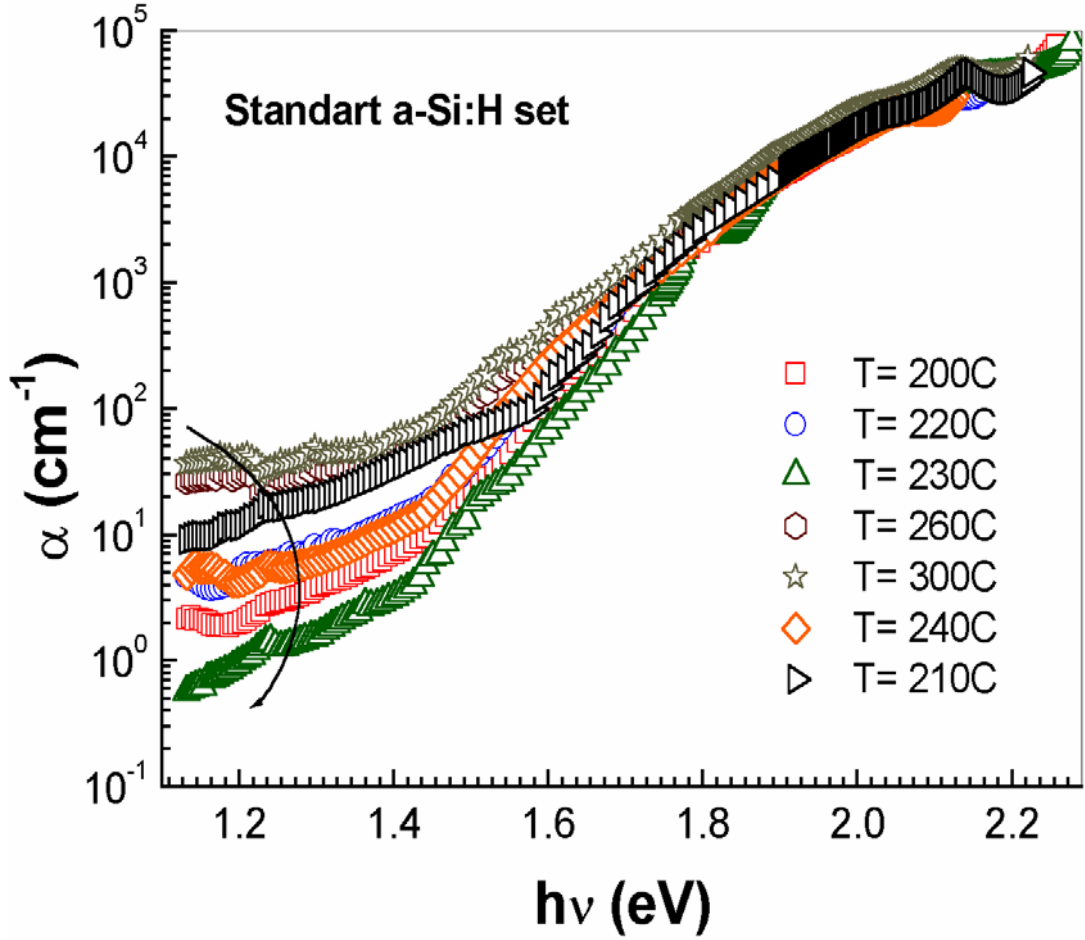
Şekil 4.42. Standart set a-Si:H örneklerinden 300 °C alttaş sıcaklığında hazırlanan örneğin kırmızıaltı soğurma spektrumu.

Bu bantlar saf silan kullanılarak hazırlanan, hidrojenlendirilmiş amorf silisyum ince filmler için literatürde rapor edilmiş değerler ile uyumludur. Si-H bağı, bağ bükülmesine ilişkin soğurma bandı yaklaşık 630 cm^{-1} ve aynı bandın gerilme modu ise 2000 cm^{-1} 'de gözlenmektedir. Bu bantlardaki eğrinin yüksekliğinin ve yarı genişliğinin büyümesi yapı içindeki H miktarının arttığına işaret etmektedir. Si-H modundaki bağlı hidrojen oranı, sözkonusu soğurma pikine ait grafiğin integrasyonu ile kolayca hesaplanabilmektedir. 630 cm^{-1} ve 2000 cm^{-1} dışındaki bantlarda da soğurma pikleri gözlenmektedir (640 cm^{-1}), fakat bu titreşim modlarının bazılarının karşılık geldiği yüksek enerjili bantlardaki bükülme, gerilme yada sallanma modları bulunamamıştır. Bu nedenle hesaplamalar sadece Si-H titreşim modlarında ait soğurma piklerine üzerinde yapılmıştır. Gözlenen soğurma pikleri çoklu gausiyen formda fonksiyona fit edilerek 630 cm^{-1} ve 2000 cm^{-1} bandındaki (SiH gerilme ve bükülme modları) soğurma piki üzerinde hesaplamalar yapılmıştır. Şekil 4.42'de 630 cm^{-1} bandının, gerilme moduna karşılık gelen 2000 cm^{-1} bandı civarındaki soğurma piki verilmektedir. Şekil 4.42 incelendiğinde soğurma değerinin 2000 cm^{-1} 'de pik verdiğini görülmektedir. Gausiyen soğurma pikinin simetrik olması diğer titreşim modlarının aktif olmadığını yada çok zayıf bir düzeyde olduğunu göstermektedir. Bu yüzden bağlı hidrojen oranı sadece 2000 cm^{-1} noktasından hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucu 630 cm^{-1} titreşim bandına karşılık gelen $C_H = 2.97 \times 10^{21}\text{ cm}^{-3}$, 2000 cm^{-1} titreşim bandına karşılık gelen $C_H = 2.25 \times 10^{22}\text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur. Bağlı hidrojen oranını belirten bu rakamlar örneğin yüksek oranda hidrojen içerdiğini göstermektedir.

4.3.3. CPM sonuçları

Sadece silan gazı kullanılarak hazırlanmış, hidrojenlendirilmiş amorf silisyum örneklerin, sabit fotoakım yöntemi kullanılarak elde edilen soğurma spektrumları Şekil 4.43'te verilmektedir. Şekil 4.43'teki değişim incelendiğinde, $1,2\text{ eV}$ ' luk foton enerjisine karşılık gelen soğurma değerinin alttaş sıcaklığı ile birlikte belirgin şekilde değiştiği gözlemlenmektedir. Bunun yanında Urbach parametresi değerlerinin de $1,2\text{ eV}$ 'daki soğurma değerinin değişimine paralel olarak değiştiği söylenebilir. $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ alttaş sıcaklığında hazırlanan örneğin, $1,2\text{ eV}$ 'luk foton enerjisine karşılık gelen soğurma değerinin oldukça küçük olması bu örneğin kusur yoğunluğunun tüm örnekler içinde en düşük kusur seviyesine sahip olduğunu

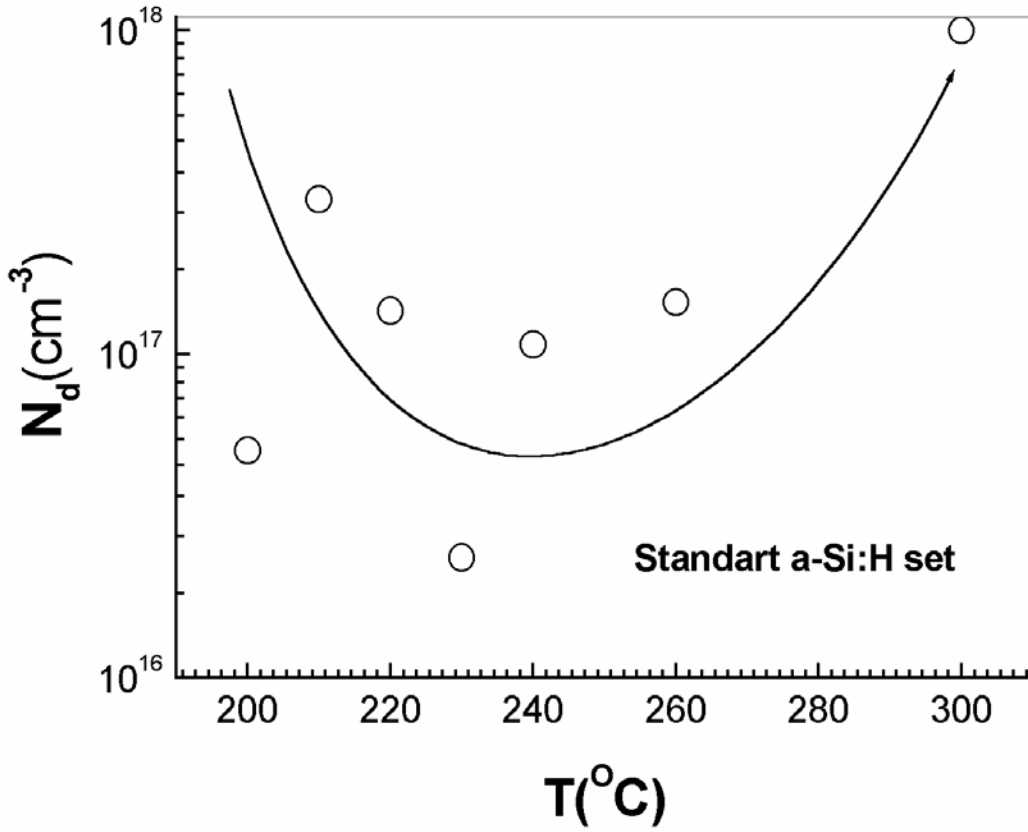
göstermektedir ve yine bu örneğin Urbach kenarının da oldukça dik olduğu göze çarpmaktadır. Yüksek enerji bölgesinde soğurma değeri tüm örneklerde 10^5 cm^{-1} düzeyinde doyuma ulaşmaktadır. Yüksek enerji bölgesinde (2,2-2,3 eV) örneklerin soğurma değerlerinin literatürde rapor edilen standart a-Si:H örneklerle aynı düzeyde olduğu gözlemlenmektedir.



Şekil 4.43. Standart set a-Si:H örneklerinin CPM spektrumları.

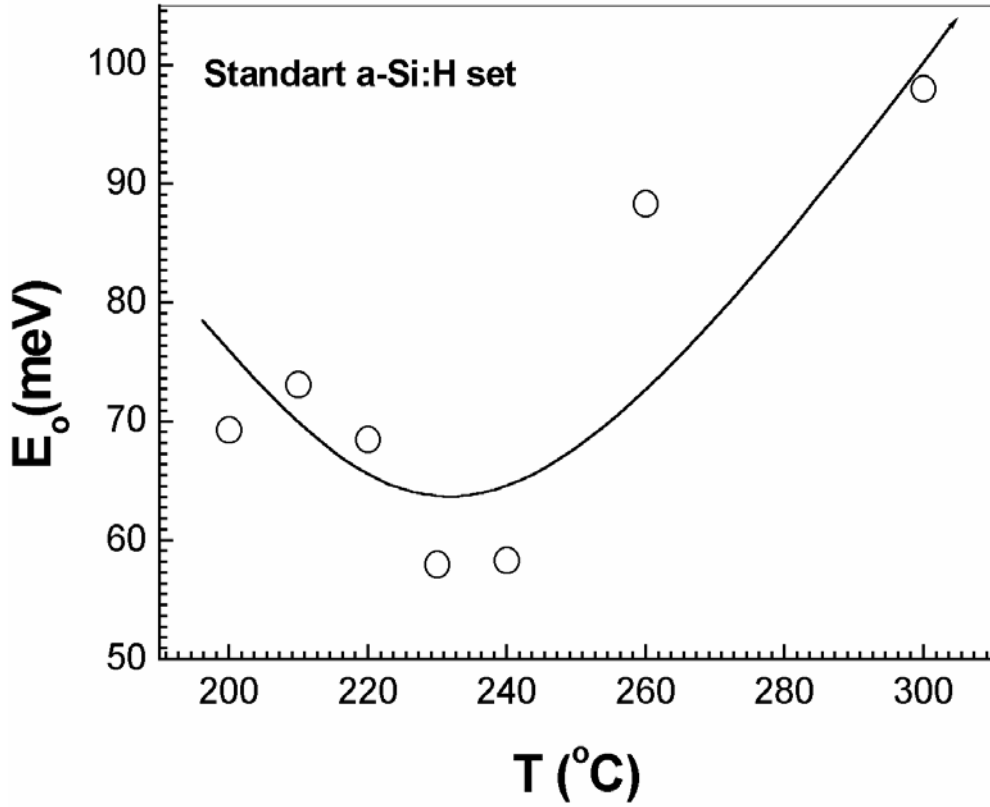
Şekil 4.44'te tüm örneklerin kusur yoğunluğu değerlerinin alttaş sıcaklığına bağlı değişimleri verilmektedir. Alttaş sıcaklığının artmasıyla kusur yoğunluğu azalmakta, 10^{17} düzeyinden 10^{16} seviyelerine düşmektedir. Yüksek alttaş sıcaklıklarına gidildiğinde kusur yoğunluğu tekrar yükselerek 10^{18} düzeyine ulaşmaktadır. Alttaş sıcaklığına bağlı olarak hazırlanan hidrojenlendirilmiş amorf silisyum filmlerde benzer değişimi farklı araştırma grupları da gözlemlemiştir (Matsuda et. al., 2003, Street, 1999). Matsuda, ESR ölçümü yardımıyla kopuk bağ yoğunluğunu alttaş sıcaklığına bağlı olarak incelediğinde kritik bir sıcaklık

değerinde kusur yoğunluğunun bir minimum değerden geçtiğini ve tekrar yükseldiğini gözlemlemiştir. Bu gözleme göre düşük kusur yoğunluklu filmler 250 °C civarında hazırlanan örneklerdir. Kusur yoğunluğundaki bu değişimlerin yapı içine alınan yada yapıdan atılan bağlı hidrojen oranıyla ilgili olduğu savunulmaktadır. Hazırlanan örneklerin Tauc optik aralığının 230-250 °C arasında büyük değerler sergilemesi ($>1,69$ eV) yapı içindeki bağlı hidrojen oranının yüksek olduğunu (10^{21} cm^{-3}) göstermektedir. FTIR ölçümlerinden elde edilen bağlı hidrojen oranı ($C_H=2,97 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$), literatürde yüksek hidrojen oranı içeren hidrojenlendirilmiş a-Si:H filmlerle tutarlı sonuçlar sergilemesi bu sonucu doğrulamaktadır.



Şekil 4.44. Standart set a-Si:H örneklerinin alttaş sıcaklığına bağlı olarak sergiledikleri kusur yoğunluğu değerleri.

Şekil 4.45'te CPM ölçümü yardımıyla hesaplanan Urbach enerjilerinin alttaş sıcaklığına bağlı değişimleri verilmektedir.

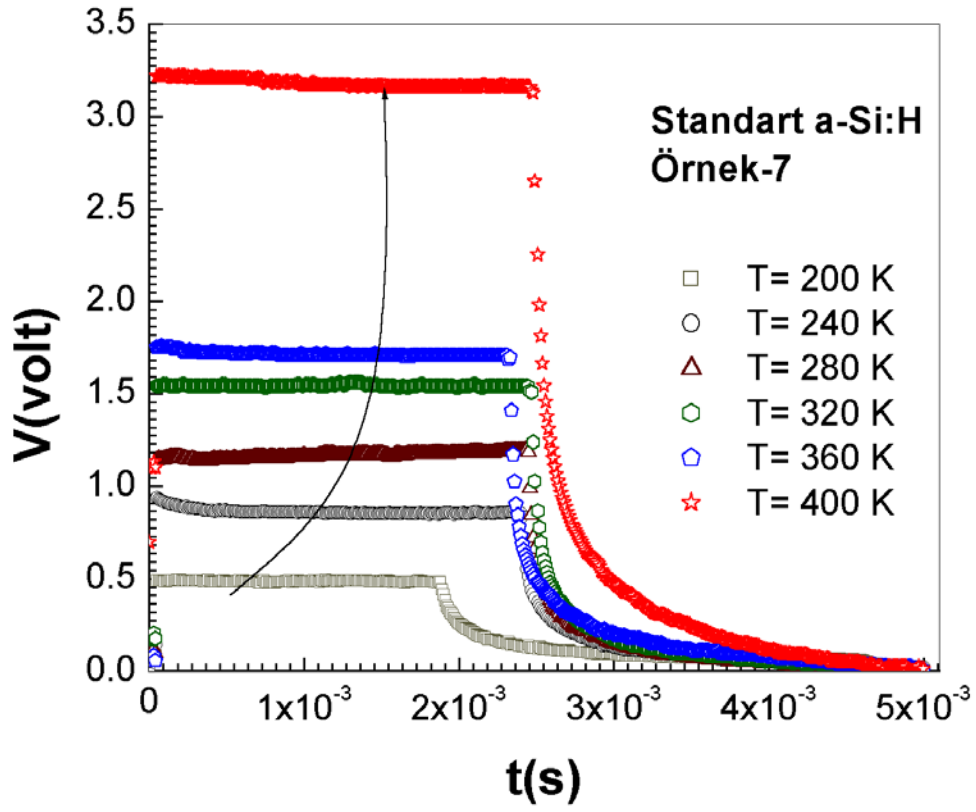


Şekil 4.45. Standart set a-Si:H örneklerinin alttaş sıcaklığına bağlı olarak sergiledikleri Urbach enerji değerleri.

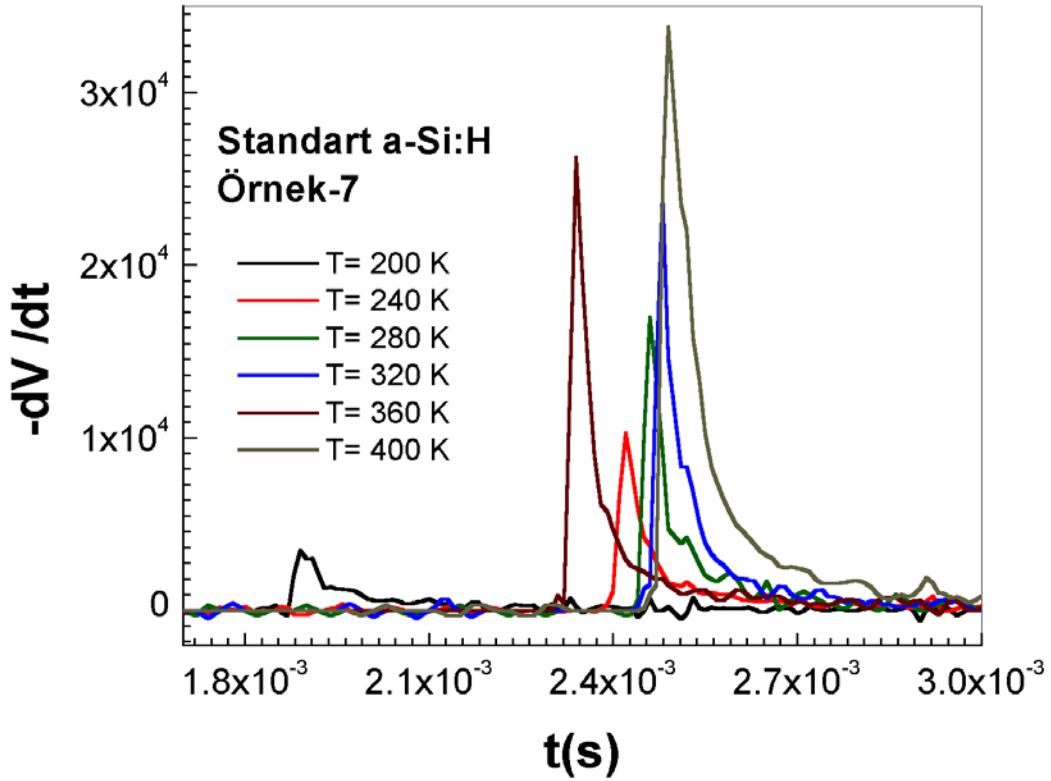
Şekil 4.45'teki değişim incelendiğinde tıpkı kusur yoğunluğundaki değişime benzer şekilde Urbach enerjisi de bir minimumdan geçmekte ve tekrar yükselmektedir. Kusur yoğunluğunun küçülmesi, amorf örgü içindeki düzensizliğin de azaldığının bir göstergesidir. 230 °C alttaş sıcaklığında hazırlanan örneğin Urbach enerjisi (56 meV) ve kusur yoğunluğu ($2.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) değerleri, literatürde tanımlanan iyi kalitede bir a-Si:H ince filmin sergilediği Urbach enerjisi ve kusur yoğunluğu değerlerine oldukça yakındır (Cabarrocas et. al., 2000, 2002, 20003).

4.3.4. Fotoiletkenlik tepki süresinin ölçülmesi ve elektronların sürüklenme mobilitésinin hesaplanması

Saf silan gazı kullanılarak hazırlanan örnek setinde sadece 300 °C alttaş sıcaklığında hazırlanan örneğin fotoiletkenlik tepki zamanı ölçülmüştür. Fotoiletkenlik tepki zamanı ölçümleri 658 nm pik dalga boyuna sahip kırmızı LED gurubu kullanılarak ölçülmüştür. LED'e sürülen akım 24 mA'de sabit tutulmuş olup ve bu akım altında LED'in yaydığı foton akısının $F = 8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 'dir.



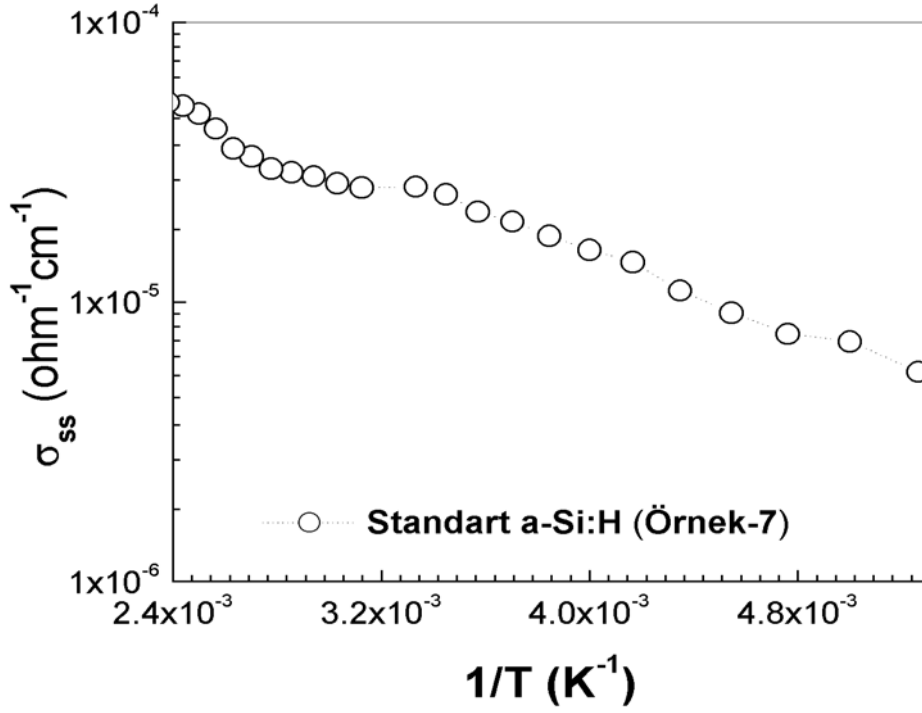
Şekil 4.46. Örnek-7'nin ($T=300\text{ }^{\circ}\text{C}$ alttaşı sıcaklığında hazırlanan) 6 farklı sıcaklık değeri için çizilmiş fotoiletkenlik tepki süresi değişimleri.



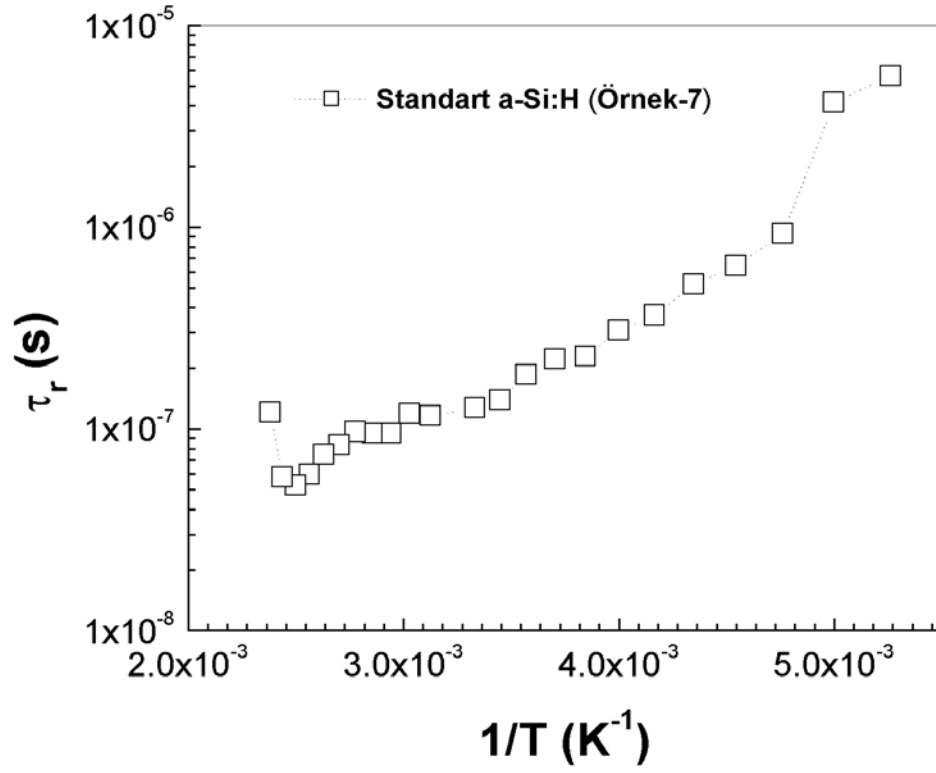
Şekil 4.47. Fotoiletkenlik tepki süresi verilerinin zamana göre nümerik olarak alınan birinci dereceden türev değerlerinin, zamana bağlı değişimleri.

Ölçümler 190 K-420 K aralığında 10K'lık adımlarla gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.46'da örnek-7'nin dijital osiloskop yardımıyla kaydedilmiş sıcaklık bağımlı fotoiletkenlik tepki süresi ölçüm sonuçları verilmektedir.

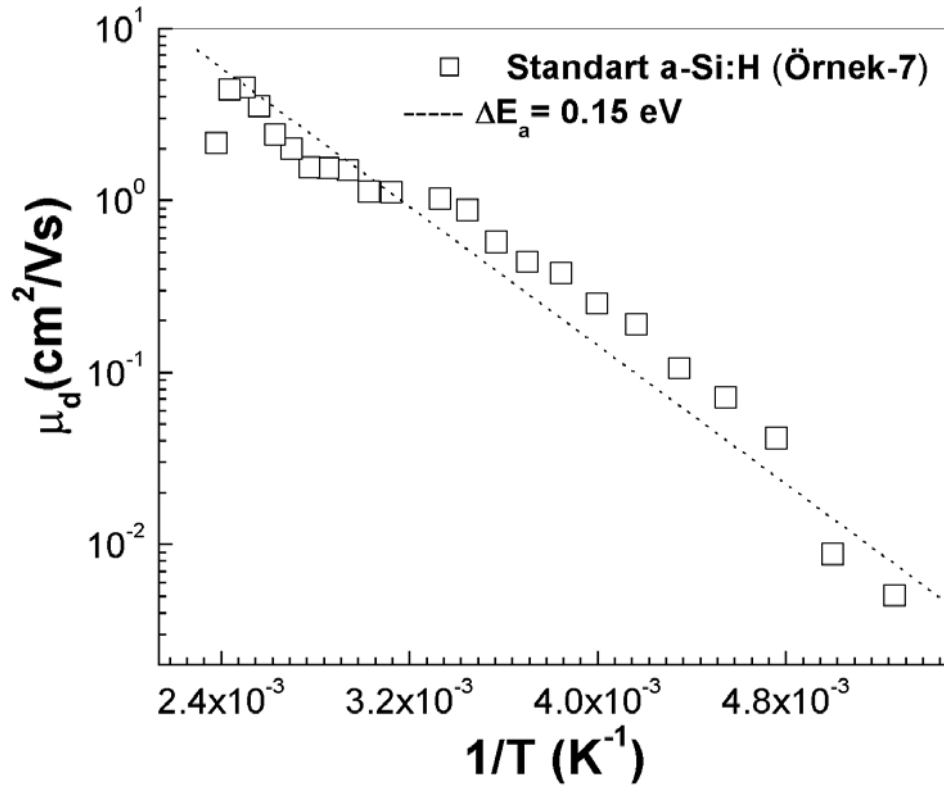
Şekil 4.46'da, kararlı fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklık arttıkça büyüdüğü gözlemlenmektedir. Şekil 4.46'daki verilerden faydalanılarak kararlı durum fotoiletkenliklerinin sıcaklığa bağlı değişimleri hesaplanıp, Şekil 4.48'deki değişim elde edilmiştir. Şekil 4.48'deki değişim incelendiğinde 190 K-420 K arasında fotoiletkenliğin, 10^{-6} ile 10^{-5} değerleri arasında değerler alarak sadece bir mertebelik değişim gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4.48. Kararlı durum fotoiletkenliğinin $1/T$ ile değişimi.



Şekil 4.49. Fotoiletkenlik tepki süresinin $1/T$ ile olan değişimi.



Şekil 4.50. Örnek-7'nin sürüklenme mobilitésinin $1/T$ ile değişimi.

Şekil 4.49'da fotoiletkenlik tepki süresi verileri kullanılarak hesaplanan tepki sürelerinin sıcaklığa bağlı olarak 100 ns-10 μ s arasında değiştiği görülmektedir. Artan sıcaklıkla tepki süresi küçülerek 100 ns değerinde doyuma ulaşmış ve tekrar artmaya başlamaktadır. Şekil 4.50'de örnek-7'nin fotoiletkenlik tepki süresi ölçümüyle hesaplanan sürüklenme mobilitelerinin sıcaklığa bağlı değişimi verilmektedir. Sürüklenme mobilitesi ilgilenilen sıcaklık aralığında 3 merteye değişim sergilemektedir. Oda sıcaklığındaki sürüklenme mobilitesi 1 cm^2/Vs değerine eşittir. Bu değer benzer deneysel yöntemlerle standart a-Si:H örneklerde ölçülen değerlerle uyum içerisinde.

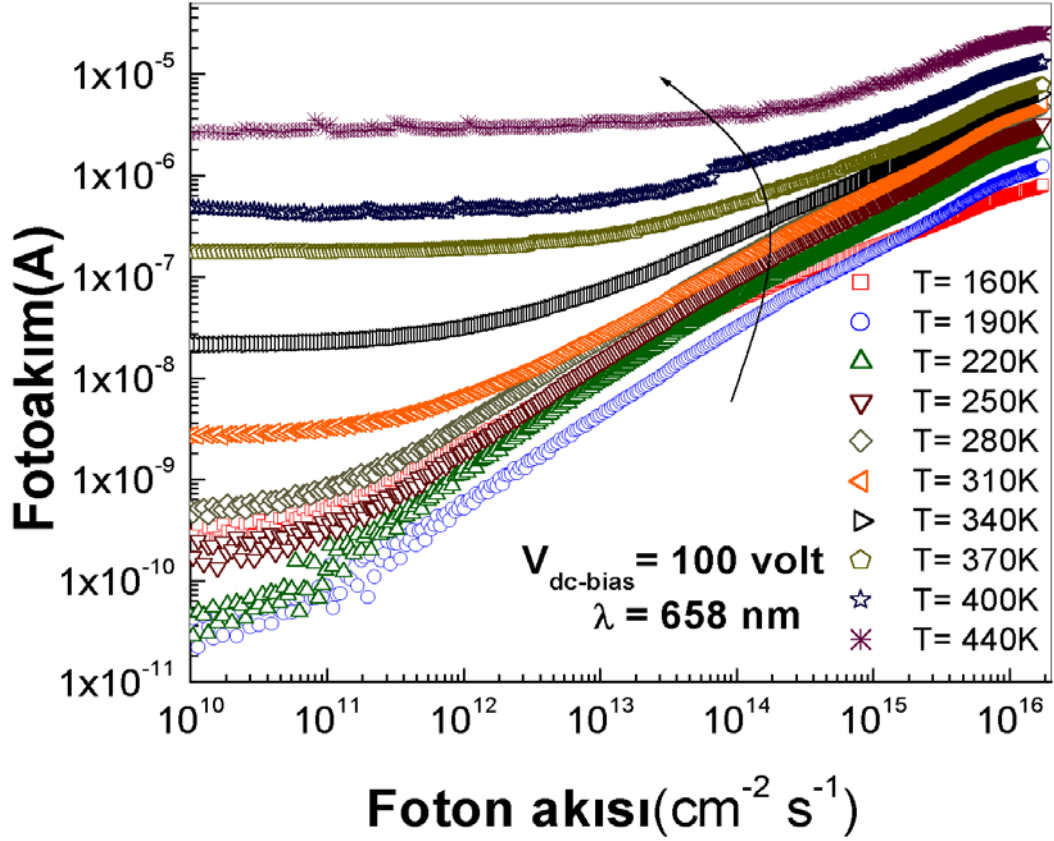
Şekil 4.50'deki değişim incelendiğinde sürüklenme mobilitesi değerlerinin sıcaklıkla aktivasyon türü davranış sergilediği gözlemlenmektedir. Bu değişimin eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi 0,15 eV 'tur.

4.3.5. Sıcaklığın fonksiyonu olarak foton akısına bağlı fotoiletkenlik ölçümleri

Bu bölümde, düşük kusur yoğunluğu sergileyen örneklerden birinin ($T=300^\circ\text{C}$ alttaş sıcaklığında büyütülen) sıcaklığın fonksiyonu olarak foton akısına bağlı fotoiletkenlik ölçüm sonuçları sunulacaktır. Ölçümler kapalı devre soğutma sisteminde 160 K ile 430 K arasındaki sıcaklıkta 10 K'lık adımlarla ve 658 nm'lik pik dalga boyuna sahip kırmızı LED guruplarıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde LED gurupların foton akısı Bölüm 3'de açıklanan bilgisayar kontrollü LED akım kontrol ünitesi yardımıyla yapılmış ve tüm veriler bilgisayar ortamında toplanmıştır.

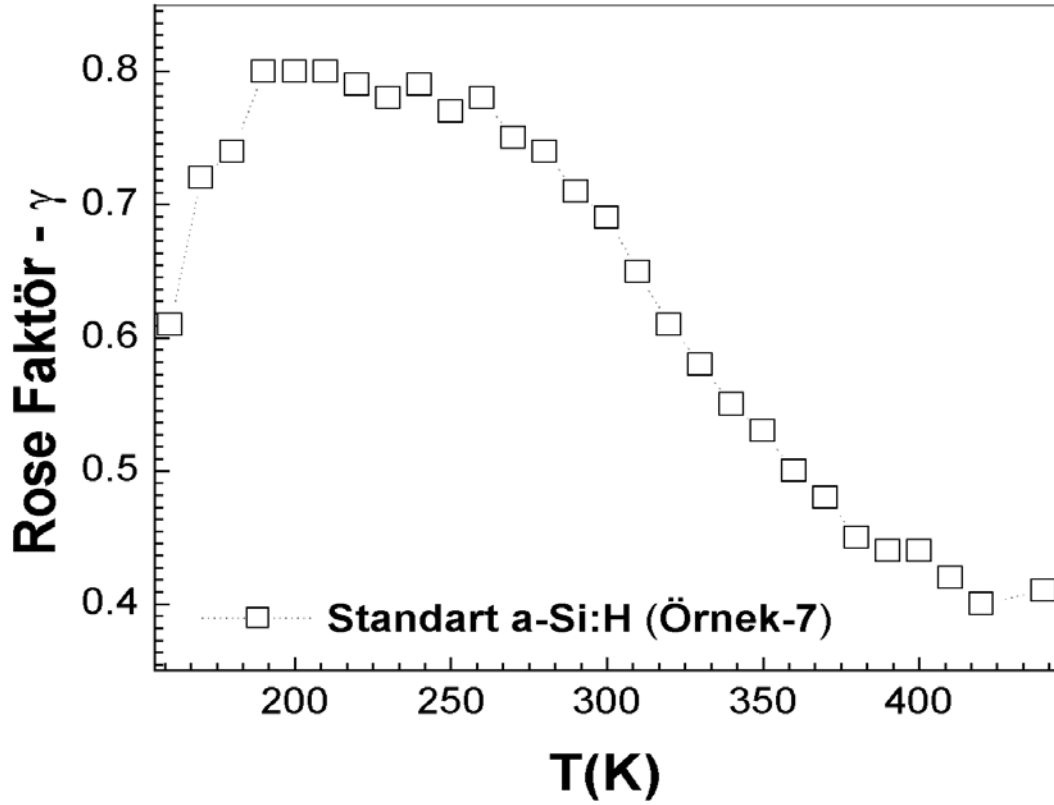
Şekil 4.51'de örnek-7 için foton akısına karşı fotoiletkenlik değişimleri verilmektedir. Şekilde 10 farklı sıcaklık değerindeki değişimler gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi belirli bir foton akısı değerine kadar foto akım neredeyse sabit kalır, kritik bir foton akısı değerinden sonra belirgin bir biçimde değişmektedir. Düşük foton akılarındaki foto akım değerleri, karanlık iletkenlikte kaydedilen değerler ile oldukça iyi uyum içerisindedir. Fotoakımda artmanın gözlemlendiği eşik noktaları fotoiletkenliğin kurulmaya başladığı noktaları göstermektedir. Beklenildiği gibi yüksek sıcaklıklara gidildiğinde fotoiletkenliğin değeri büyümekte düşük sıcaklıklarda ise küçülmektedir. 160 K'deki ölçüm

incelendiğinde foton akısının yaklaşık $5 (10^{11} - 10^{16})$ merteye değiştiği bölgede fotoakım yaklaşık $3 (10^{-10} - 10^{-7})$ merteye değişmiştir.



Şekil 4.51. Farklı sıcaklık değerlerinde kaydedilmiş foton akısına bağımlı iletkenlik değerleri.

Fotoiletkenliğin, foton akısının minum ve maksimum olduğu düzeyler arasında 5 merteye değişmesi, örneğin yüksek fotoiletken olduğunu göstermektedir. Fotoiletkenliğin kurulmaya başladığı bölgelerdeki değişimin doğrusal olması denklem (4.7.)'nin bu bölgelerde geçerliliğini göstermektedir. Şekil 4.52'de her sıcaklık adımına karşılık gelen Rose faktörü değerleri görülmektedir. Fotonik duyarlılığın bir ölçütü olan Rose faktör değerleri 160K -200 K arasında 0,6'dan 0,8'e yükselip ve sıcaklık arttıkça tekrar 0,4'e düşmektedir.



Şekil 4.52. Foton akısına bağlı fotoakım değerleri kullanarak hesaplanan Rose Faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

4.4. Set-3 Örnekleri

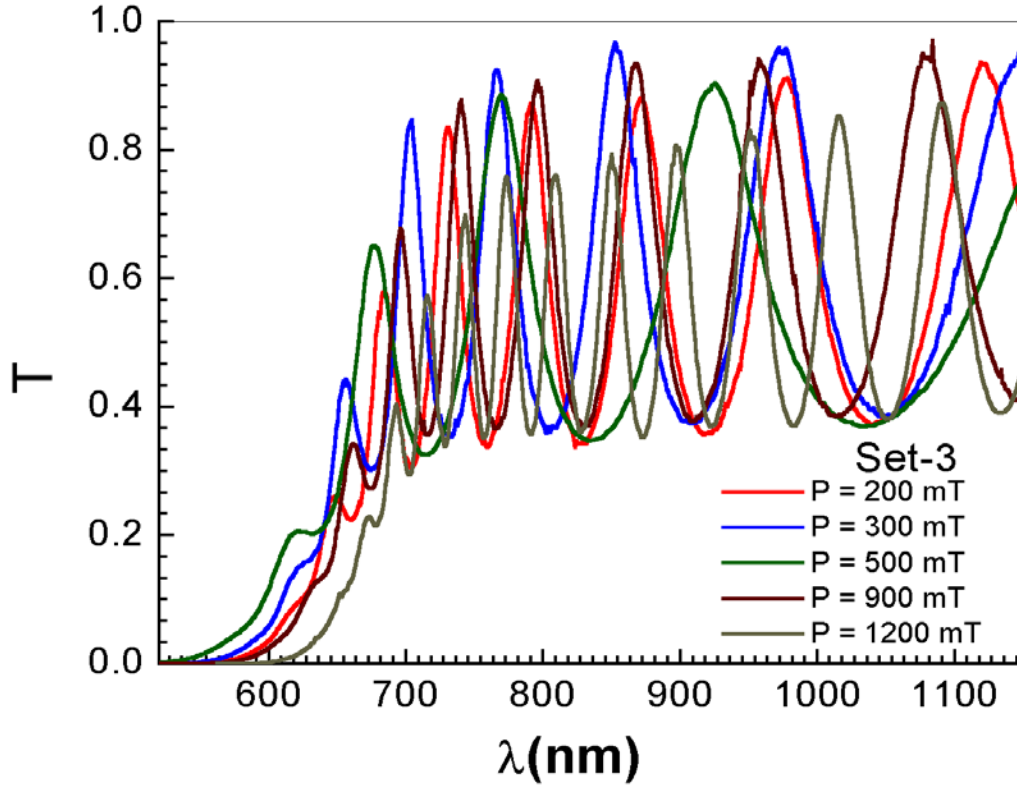
Bu kesimde, film hazırlama parametreleri Çizelge 4.1’de verilen set-3 örneklerinin optik ve elektriksel ölçüm sonuçları anlatılacaktır.

4.4.1. Optik geçirgenlik

Set-2 örnekleri hazırlanmadan önce, bir TÜBİTAK projesi kapsamında satın alınan baratron vakum ölçer sensörü ve kontrolcüsü plazma sistemine uygun dönüştürücülerle eklendi. Vakum odacığına sürülen gazın türünden bağımsız olarak gaz basıncını ölçen bu aygıt, özellikle düşük gaz basınçlarında, sisteme daha önceden bağlı bulunan basınç ölçerin gösterdiği değerlerden bir miktar farklı değerler göstermekteydi. Bunun üzerine farklı helyum ve silan basınçlarında bir dizi ölçümler alınarak önceki toplam basınç değerlerine karşılık gelen yeni basınç değerlerinin belirlenmesi amacıyla kalibrasyon yapıldı. Sonuçta daha önce ölçülen

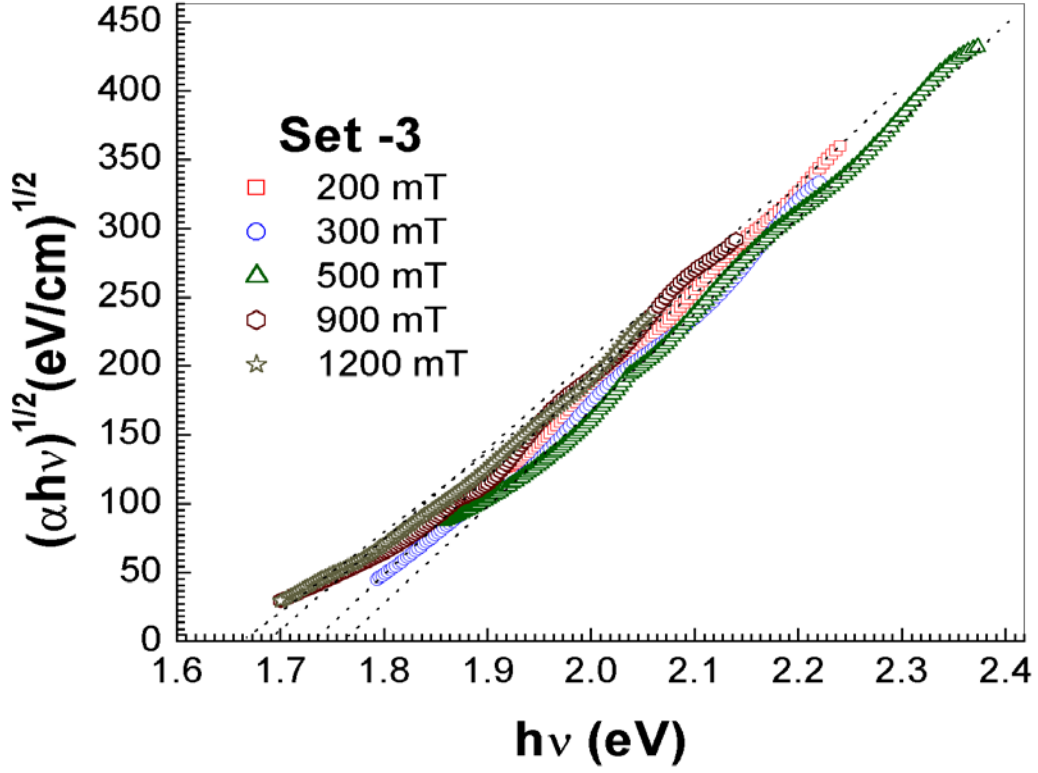
500 mTorr değerindeki toplam basınç yeni vakum lerde yaklaşık 350 mTorr'a karşılık geliyordu. Çizelge 4.1'de verilen set-1 ve 2'deki tüm değerler baratron vakum lere göre kalibre edilerek girilmiştir. Diğer setlerdeki toplam basınç değerleri baratron vakum lerle ölçülmüştür

Set-1 ve 2'de plazma biriktirme sisteminde toplam gaz basıncı 500 mTorr'da tutularak silan gazının helyum ile seyreltilmesi ile hazırlanmış örneklerin karakterizasyon sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlarda istenilen optoelektronik özelliklerdeki filmlerin silan plazmasının % 90 veya daha büyük oranlarda helyum ile seyreltildiği durumlarda elde edildiği görülmektedir. Bu gözlem literatürde verilen çalışmalarla da uyumludur (Middya et.al., 1996). Set-3'te, α - γ geçişinin gözlenmesi amacıyla 230 C alttaş sıcaklığında, % 95 helyum seyreltilmiş silan gazı kullanılarak, farklı toplam basınçlarda a-Si:H filmler hazırlanmıştır. şekil 4.53'te % 95 seyreltme oranında, sabit alttaş sıcaklığında ($T=230$ C), sabit RF frekansında ve gücünde, farklı toplam basınç değerlerinde hazırlanan filmlerin optik geçirgenlik ölçüm sonuçları verilmektedir. Optik geçirgenlik ölçümü verilerinden hesaplanan soğurma spektrumu kullanılarak yapılan Tauc izimi şekil 4.54'de verilmiştir. Farklı toplam basınç değerlerinde % 95 helyum seyreltilerek hazırlanan örneklerin Tauc izimleri st üste yapılmıştır. şekil 4.55'te set-3 örneklerinin optik geçirgenlik verileri kullanılarak elde edilen Tauc bant aralığının toplam gaz basıncına bağlı değişimleri verilmektedir.



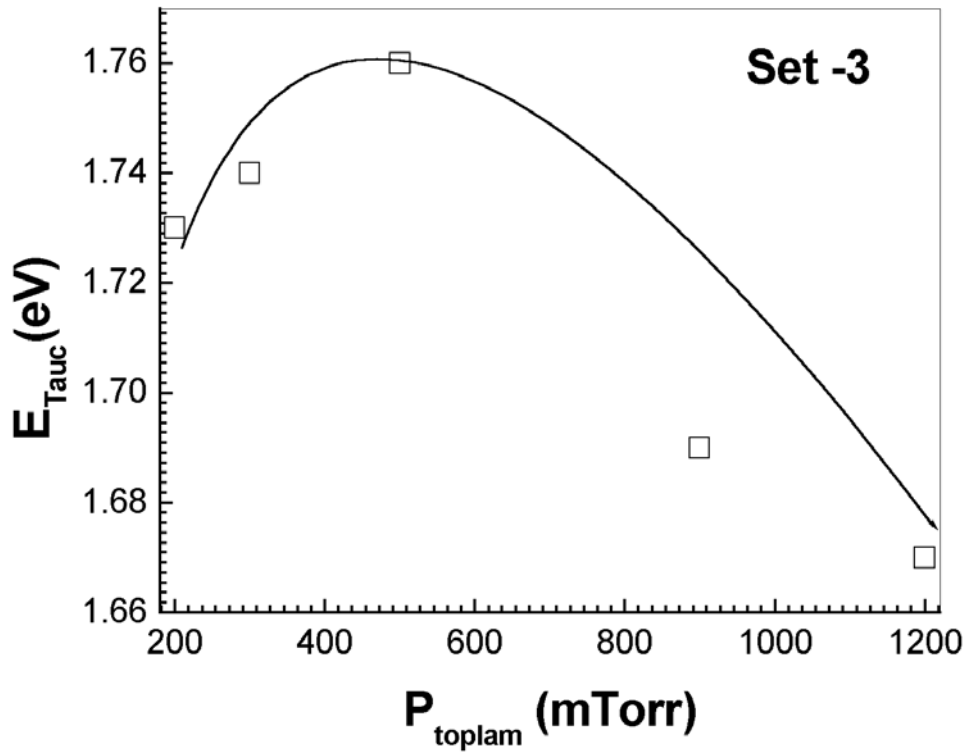
Şekil 4.53. Set-3 örneklerinin optik geçirgenlik spektrumunun toplam gaz basıncına bağlı değişimi.

Şekil 4.55'teki değişim incelendiğinde 200 mTorr gaz basıncında hazırlanan örneğin Tauc bant aralığı 1,73 eV civarında olup toplam gaz basıncının artmasıyla Tauc bant aralığının artmaya başladığı görülmektedir. 500 mTorr toplam basınç değerinde Tauc optik aralığı en büyük değerine sahip olup (1,76 eV) bu noktadan sonra toplam basınç değerinin artmasıyla birlikte Tauc optik aralığı küçülerek 1,67 eV değerine ulaşmıştır. Bu kritik geçiş noktasında film büyüme hızının değişiminin incelenmesi amacıyla Şekil 4.56 çizilmiştir.

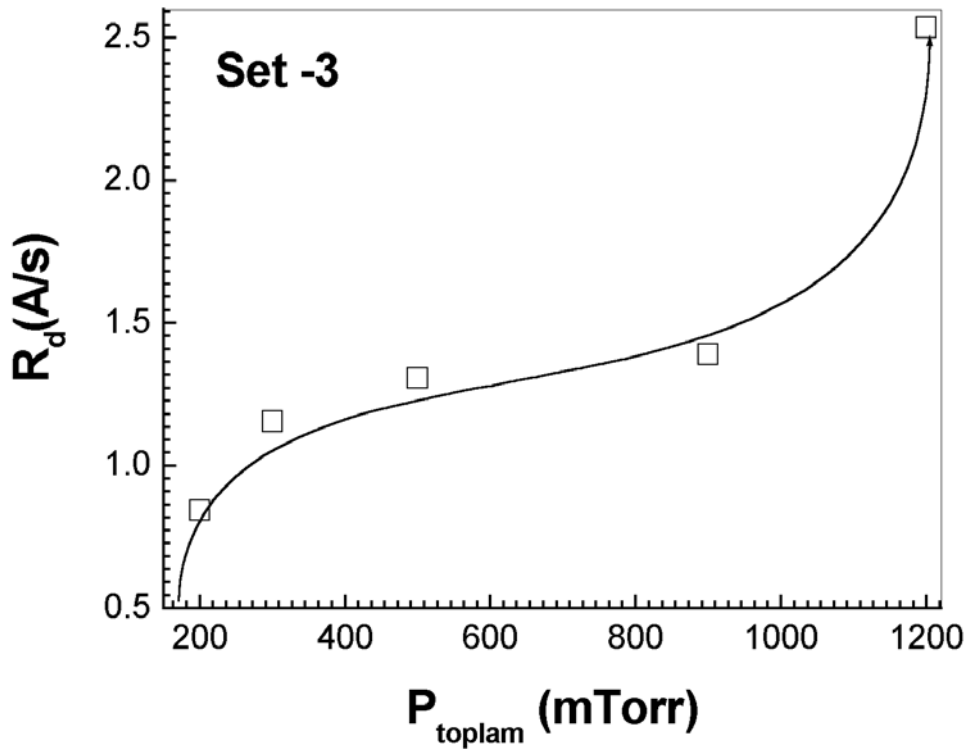


Şekil 4.54. Set-3 örneklerinin Tauc çizimleri.

Şekil 4.56'daki grafikte toplam basınç değerinin 900 mTorr olduğu noktaya kadar büyüme hızı artarak 1,3 Å/s düzeyine ulaşmıştır. 900 mTorr toplam gaz basıncı değerinden sonra film büyüme hızı yükselmekte ve neredeyse 2,5 Å/s değerine ulaşmaktadır. Şekil 4.6'daki grafik iki ayrı bölgede incelendiğinde her iki bölgede plazma reaksiyonunun farklı şekilde gerçekleştiği düşünülmektedir. Plazma reaksiyonunun hızlanması filmin daha hızlı büyümesine neden olmaktadır. 500 mTorr ve 1200 mTorr'da hazırlanan örneklerin Tauc bant aralık değerleri (1,67-1,76 eV) tüm set içinde gözlenen sınır değerlerini oluşturmaktadır. Set- 3 örnek-5 (1200 mTorr) 2,5 Å/s büyüme hızına sahiptir. Bu değer literatürde şimdiye kadar Middya ve gurubunun helyum seyrelme ile elde ettiği rakamlarla oldukça iyi uyum içerisindedir.



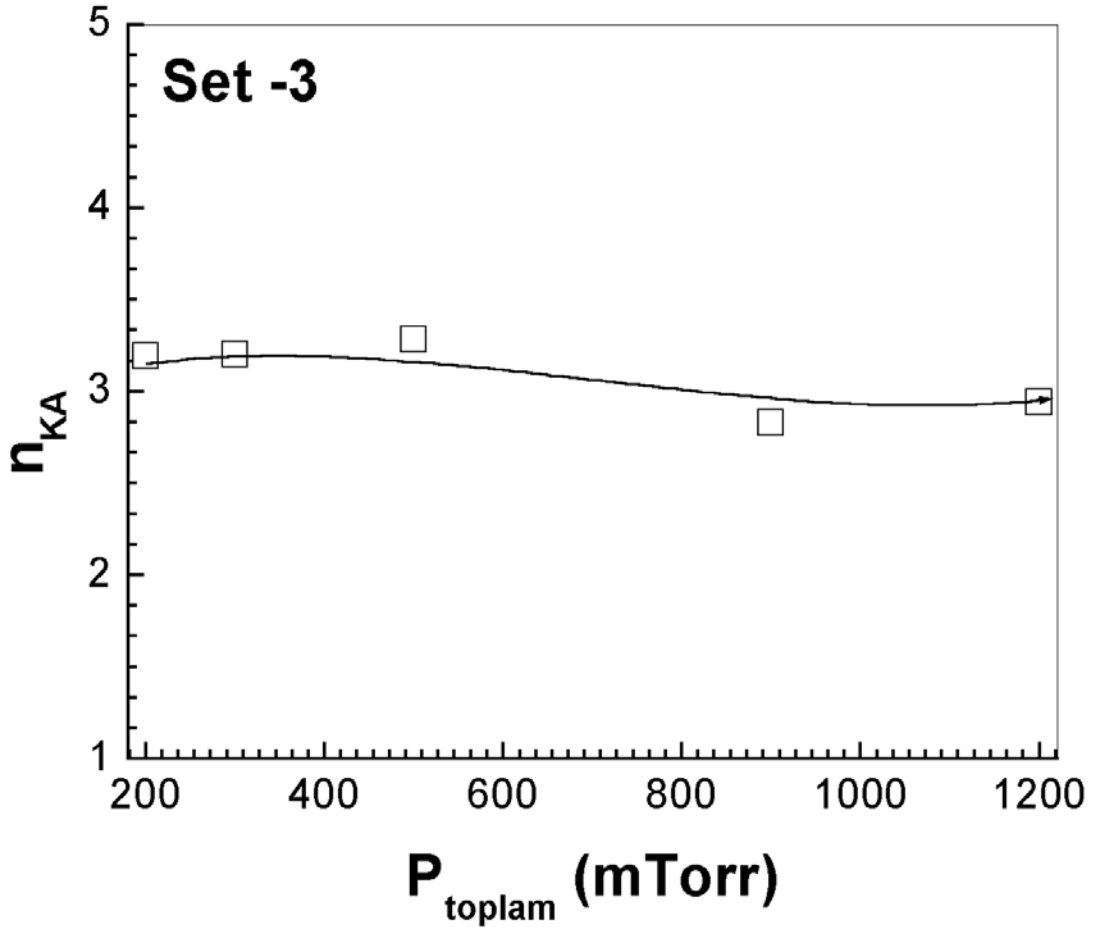
Şekil 4.55. Set-3 örneklerinin Tauc optik aralıklarını toplam gaz basıncına bağlı değişimi.



Şekil 4.56. Set-3 örneklerinin büyüme hızının toplam gaz basıncına bağlı değişimi.

Şekil 4.57'de optik geçirgenlik verilerinin değerlendirilmesi sonucu elde edilen kırmızıaltı kırma indisinin toplam basınç değerlerine bağlı değişimi verilmektedir.

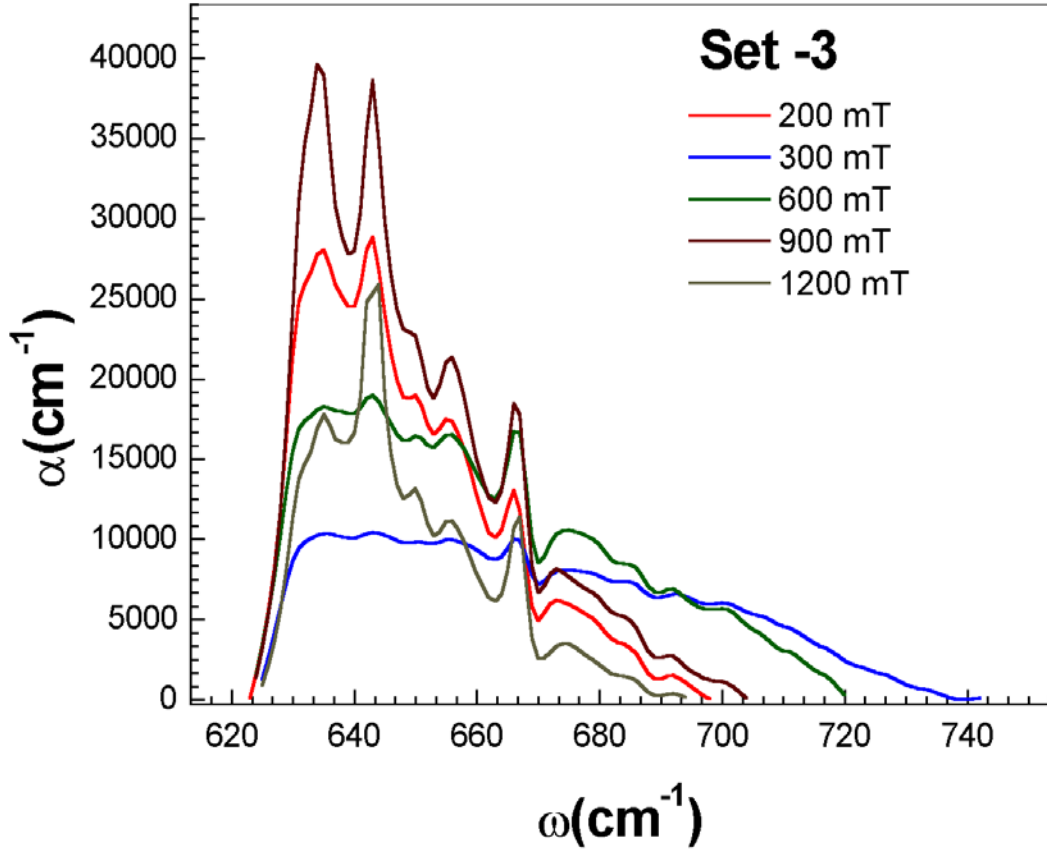
Kırma indisindeki değişim $\pm 0,4$ düzeyindedir. Bu aralıktaki bir değişim, filmin optik kalitesinin fazla değişmediğini göstermektedir. Kırma indisi, film yüzey düzgünlüğünün ölçütü olan bir optik parametredir. Film yüzeyindeki mikron boyutundaki çatlaklar, stresler yada örgü gerilmeleri kırma indisinin küçölerek filmin optik özelliğinin kötüleşmesine neden olabilmektedir (Street, 1991). 1200 mTorr toplam gaz basıncında ve % 95 seyreltme oranında elde edilen filmin büyüme hızının yüksek olmasına rağmen literatürde rapor edilmiş standart a-Si:H örneklerin kırma indisi ile aynı değeri sergilemektedir.



Şekil 4.57. Set-3 örneklerinin kırma indisi değeriğlerinin değişimi.

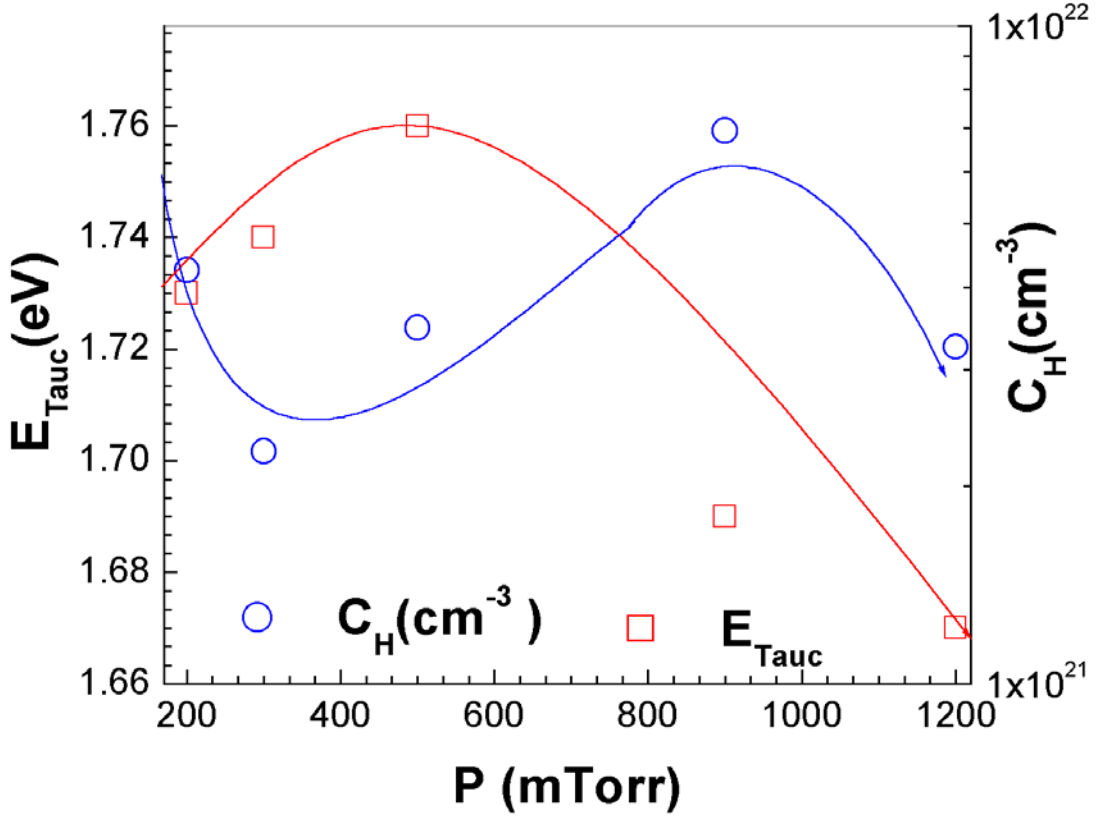
4.4.2. Fourier dönüşümü kırmızıaltı (KA) spektrumu ölçümleri

Şekil 4.58'de set-3 örneklerine ait $600-800 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı aralığında optik geçirgenlik verileri kullanılarak hesaplanan FTIR soğurma eğrileri verilmektedir.



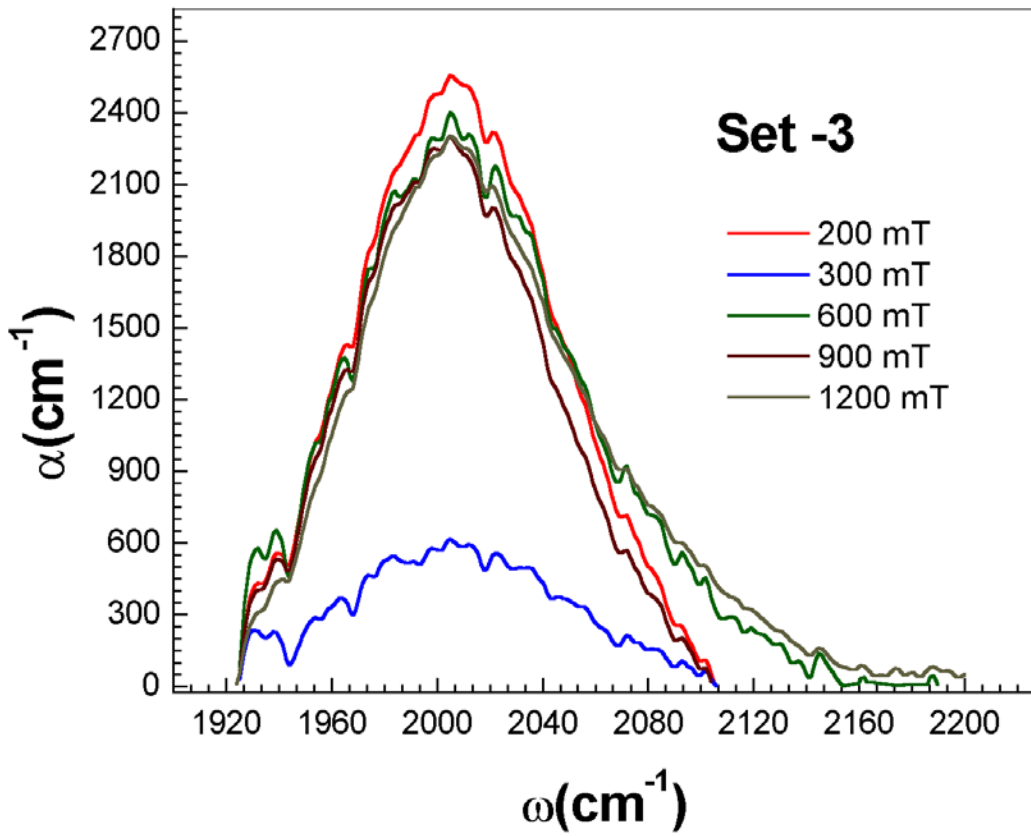
Şekil 4.58. Set-3 örneklerinin kırmızıaltı soğurma spektrumları.

Şekil 4.58'deki değişimlerin, 630 ve 640 cm^{-1} bandı civarlarında kayda değer oranda soğurma piki gösterdikleri gözlemlenmektedir. Bu da set-3 örneklerinde bağlı hidrojen bulunduğunu göstermektedir. 300 ve 600 mTorr toplam basıncında hazırlanan örneklerde, 630 cm^{-1} bandından 740 cm^{-1} bandına doğru uzanan bölgede soğurma piklerinin iç içe girmesi sonucunda yayvan ve düşük şiddette soğurma pikleri gözlenmektedir. 640 cm^{-1} bandından 740 cm^{-1} bandına doğru uzanan bölgedeki soğurma piklerinin tanımlı olduğu bir titreşim modu bulunamamıştır. Filmin oluşum sürecinde yapı içine katılan safsızlıkların, buna neden olabileceği düşünülmektedir. Bu sebeple 300 ve 600 mTorr'da hazırlanan örneklerde, yayvan soğurma eğrileri içine çoklu gausiyen fonksiyonların çakıştırılması ile elde edilen 630 cm^{-1} bandındaki titreşim modu kullanılarak bağlı hidrojen oranı hesabı yapılmıştır.



Şekil 4.59. Set-3 örneklerinin, 630 cm^{-1} bandındaki titreşim modu kullanılarak hesaplanan bağlı hidrojen oranları.

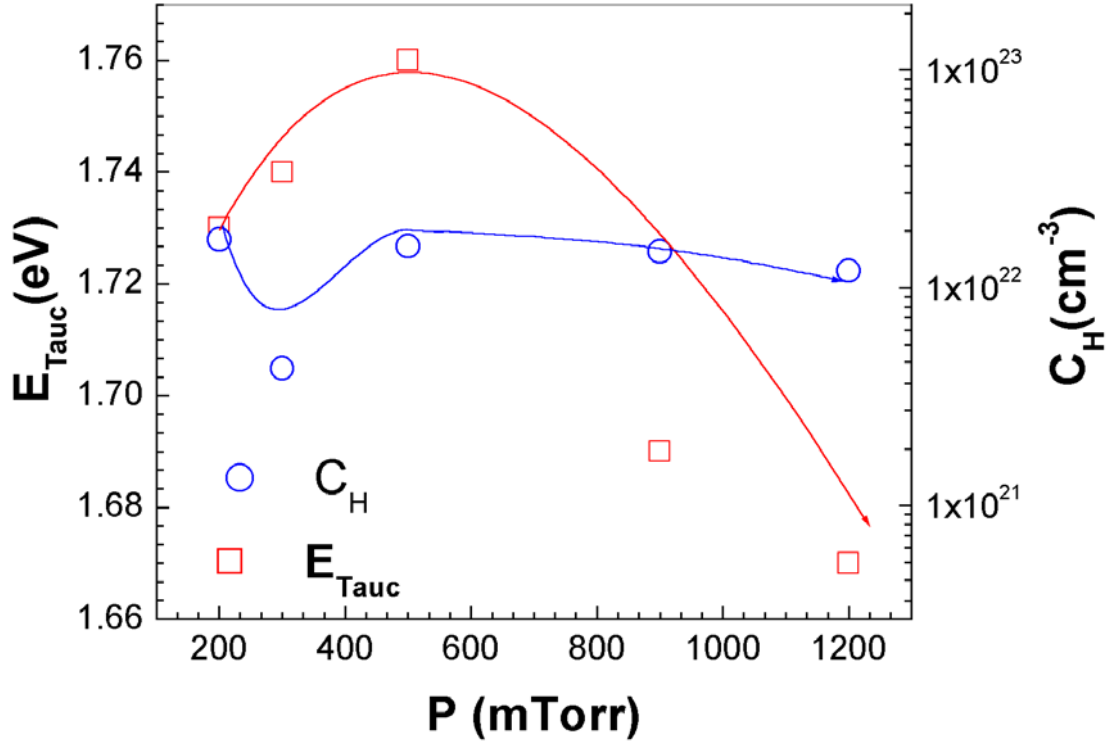
Şekil 4.58'deki soğurma eğrileri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen bağlı hidrojen oranının toplam gaz basıncına bağlı değişimi Şekil 4.59'da verilmektedir. Şekil 4.59'daki değişimde sol eksen optik geçirgenlik verilerinin değerlendirilmesi ile elde edilen Tauc optik aralığını, sağ eksen ise, 630 cm^{-1} bandından hesaplanan bağlı hidrojen oranını göstermektedir. Şekil 4.59'daki değişim incelendiğinde 300 mTorr ile 900 mTorr aralığındaki bölgede yapı içindeki bağlı hidrojen oranının arttığı gözlemlenmektedir. 300 mTorr ile 500 mTorr arasında toplam basınç değerlerinde hazırlanan örneklerin Tauc optik bant aralıkları da toplam basıncın artmasıyla artmaktadır. Yapı içindeki hidrojenin artmasıyla Tauc bant aralığının artması olağan bir sonuç olmasına rağmen bu iki değişim her zaman birbirine paralellik göstermeyebilir. Hidrojenin amorf yapı içindeki hareketi veya hangi atomla bağ yapabileceğini tahmin etmek oldukça karmaşık bir araştırma konusudur. Yapıdaki fazla hidrojen, hidrojene doymamış kopuk bağlarla bağ kurarak kusur yoğunluğun küçülmesine neden olabilmektedir. 900 mTorr ile 1200 mTorr arasında üretilen örneklerin Tauc bant aralığındaki azalmaya paralel olarak hidrojen oranının da azaldığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.60. Set-3 örneklerinin kırmızıaltı soğurma spektrumları.

Şekil 4.60'da $1900\text{--}2200\text{ cm}^{-1}$ bandı aralığındaki soğurma pikleri verilmektedir. Tüm soğurma piklerinin yüksekliğini kontrol eden bant 2000 cm^{-1} bandıdır. Bu yüzden tüm hesaplamalar bu soğurma pikine yapılan integrasyonlarla bulunmuştur. Sadece 600 ve 1200 mTorr toplam gaz basıncında hazırlanan örneklerin spektrumu 2090 yada 2100 cm^{-1} bandına doğru bir genişleme sergilemektedir. Bu titreşim bandı (SiH_2) 'nin yada $(\text{SiH}_2)_n$ 'in gerilme moduna karşılık gelmektedir (Morigaki, 1999). Bu modların varlığının tam olarak doğrulanması için 875 cm^{-1} yada 890 cm^{-1} 'de makaslama (scissors), 845 cm^{-1} 'de sallama (wag) modları bulunmalıdır. Fakat bu bantlarda, aktif bir soğurma pikine rastlanamamıştır. Bu nedenle sadece 600 ve 1200 mTorr toplam gaz basıncında hazırlanmış örneklerde iki farklı pik (2000 ve 2100 cm^{-1}) değerinde hidrojen oranı değerleri hesaplanmıştır. 2000 cm^{-1} titreşim bandı Si-H bağı gerilme moduna karşılık gelmektedir. Şekil 4.58 ve Şekil 4.60'deki değişimlerde Si-H titreşim modunun yapı içerisinde oldukça aktif olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 4.59 ve 60'daki değişimler incelendiğinde bazı örneklerin Si-H titreşim modunun gerilme ve bükülme bantlarına karşılık gelen soğurma piklerinin genişlediği

gözlemlenmektedir. 2000 cm^{-1} bandının değişimine baktığımızda Si-H gerilme titreşim modunun amorf örgü içinde oldukça başat olduğu görülmektedir.



Şekil 4.61. Set-3 örneklerinin, 2000 cm^{-1} bandındaki titreşim modu kullanılarak hesaplanan bağlı hidrojen oranları.

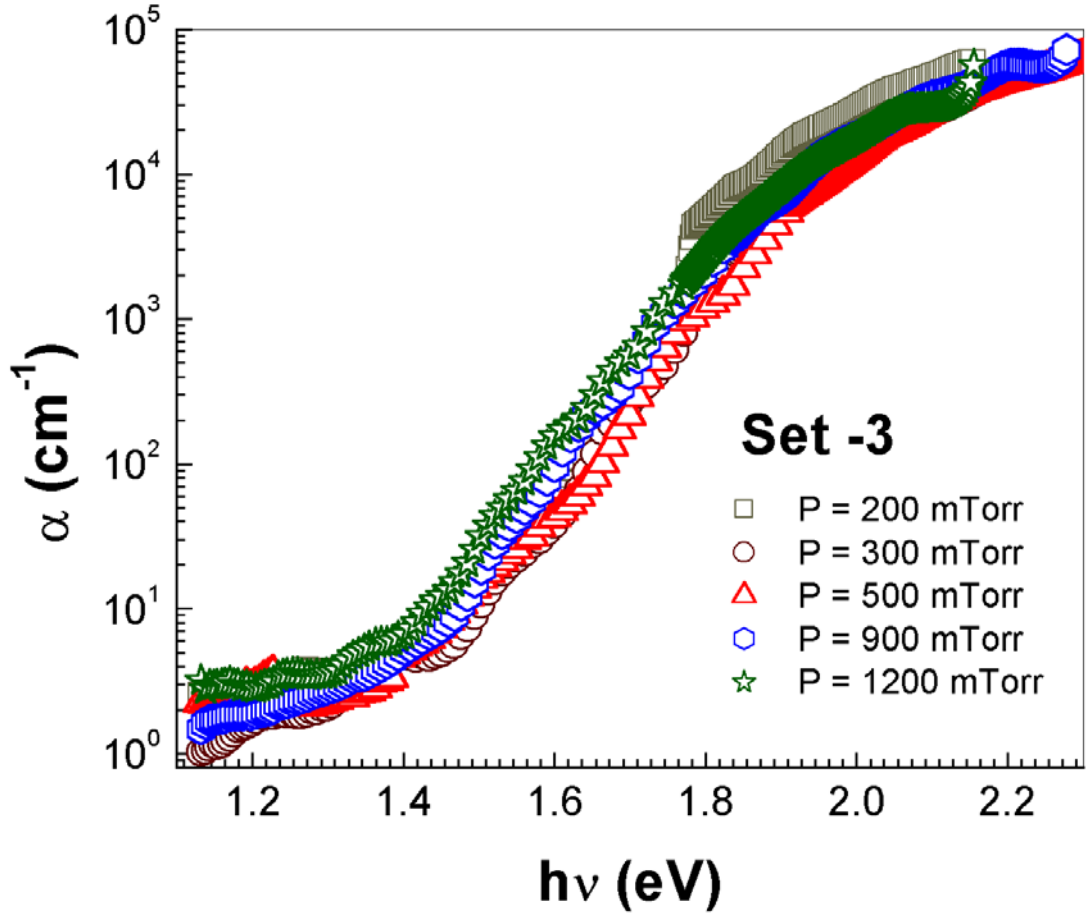
Set-3'ün 3 ve 5 nolu örneklerinin (500 mTorr ve 1200 mTorr basınç değerlerinde hazırlananlar) 2100 cm^{-1} titreşim modundan hesaplanan hidrojen oranı sırasıyla $1,84 \times 10^{21}$ ve $4,86 \times 10^{21}\text{ cm}^{-3}$ 'tir. 2100 cm^{-1} titreşim bandı (SiH_2)'nin yada (SiH_2)_n'in gerilme modunun amorf yapı içinde ılımlı miktarda olabileceğine işaret etmektedir. Yapı içinde bu titreşim modlarının ılımlı miktarda olması, Tauc optik aralığının değişimine katkıda bulunabilmektedir. Tauc optik aralığı en düşük ve en yüksek olan iki örnekte (örnek-3 ve 5) bu modların aktif olması bu yargının en güçlü kanıtıdır. Şekil 4.61'de toplam gaz basıncına bağlı olarak 2000 cm^{-1} bandından hesaplanan bağlı hidrojen oranlarının değerleri verilmektedir. Şekil 4.61'deki değişim incelendiğinde, 500 mTorr'dan daha büyük basınç değerlerinde, Tauc bant aralığındaki değişimi takip eden hidrojen oranlarındaki azalmalar göze çarpmaktadır. 2000 cm^{-1} 'deki Si-H gerilme modundaki silisyumla bağ yapmış hidrojen oranı miktarının artmasının Tauc bant aralığının artmasında etkin rol oynadığı düşünülmektedir. Burada sözü geçen hidrojen oranı 10^{22} cm^{-3} 'ler düzeyindedir. Bu miktarlar 630 cm^{-1} deki bükülme modundan hesaplanan

değerden neredeyse bir mertebe daha büyüktür. Bu rakamsal değerlerden çıkarılacak sonuç ; amorf yapı içinde başat miktarda Si-H gerilme titreşim modlarının amorf yapının optiksel ve yapısal özelliklerini kontrol etmekte etkin rol oynayabileceğinin göstergesidir.

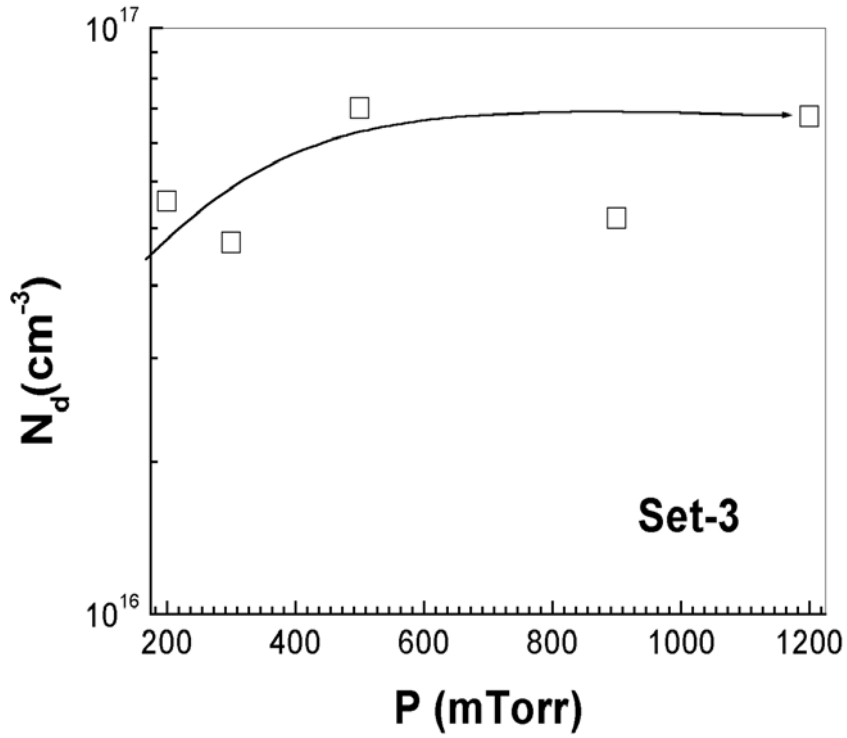
4.4.3. CPM sonuçları

Şekil 4.62’de farklı toplam basınç değerlerinde hazırlanan beş örneğin CPM spektrumları verilmektedir. Hesaplanan kusur yoğunluklarının toplam gaz basıncına bağlı değişimi Şekil 4.63’de verilmektedir. Kusur yoğunluğu en düşük ($5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) olan örnek, 200 mTorr toplam basınç değerinde hazırlanan olan örnektir. Yüksek toplam basınç değerlerine gidildiğinde kusur yoğunluğu artarak yaklaşık $7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ düzeyinde doyuma ulaşmıştır. Kusur yoğunluğundaki doyumun gözlenmeye başladığı toplam basınç değeri yaklaşık 500 mTorr’dur. Bu noktada örneklerin büyüme hızı 2 kat değişim göstermektedir. Örneklerin büyüme hızının 2 kat artış göstermesine rağmen kusur yoğunluğunun değişmez kalması teknolojik açıdan tercih edilen bir özelliktir.

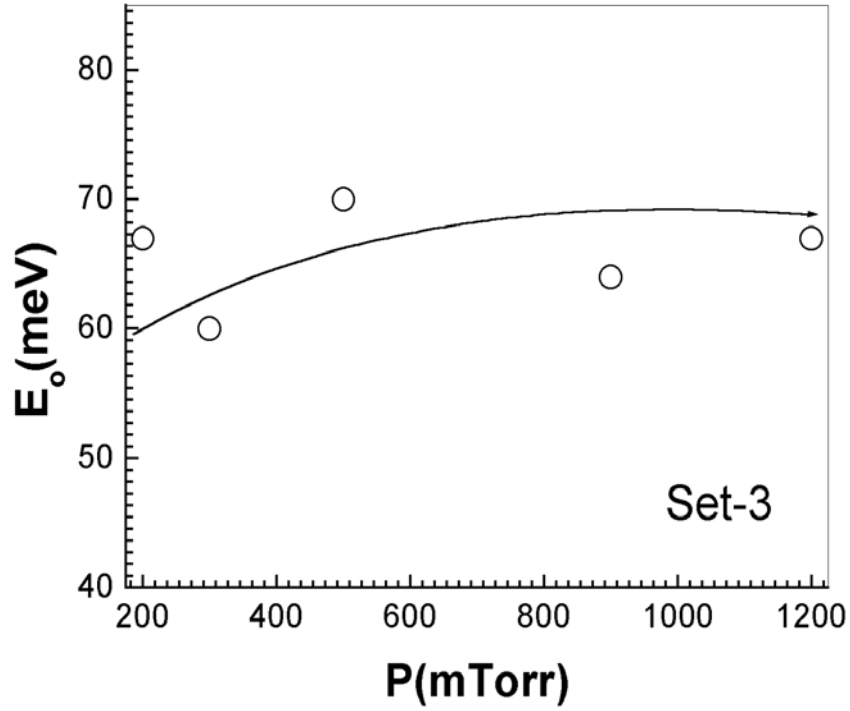
Yüksek enerji bölgesinde soğurma değerleri incelendiğinde 2,2 eV civarında tüm örneklerin soğurma değerlerinin $8 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ civarında doyuma ulaştığı görülmektedir. Bu sonuçlar helyum gazının silanla seyreltilmesi sonucunda elde edilen bu örneklerin, standart a-Si:H örneklere iyi bir alternatif olacağını göstermektedir. Yüksek film büyütme hızlarında, düşük kusur yoğunluklu filmler elde edebilmek için optimum toplam basınç değerinin 1200 mTorr civarında olabileceği konusunda bulgular netleşmeye başlamıştır.



Şekil 4.62. Set-3 örneklerinin CPM spektrumları.



Şekil 4.63. Set-3 örneklerinin kusur yoğunluğu değerlerinin helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.

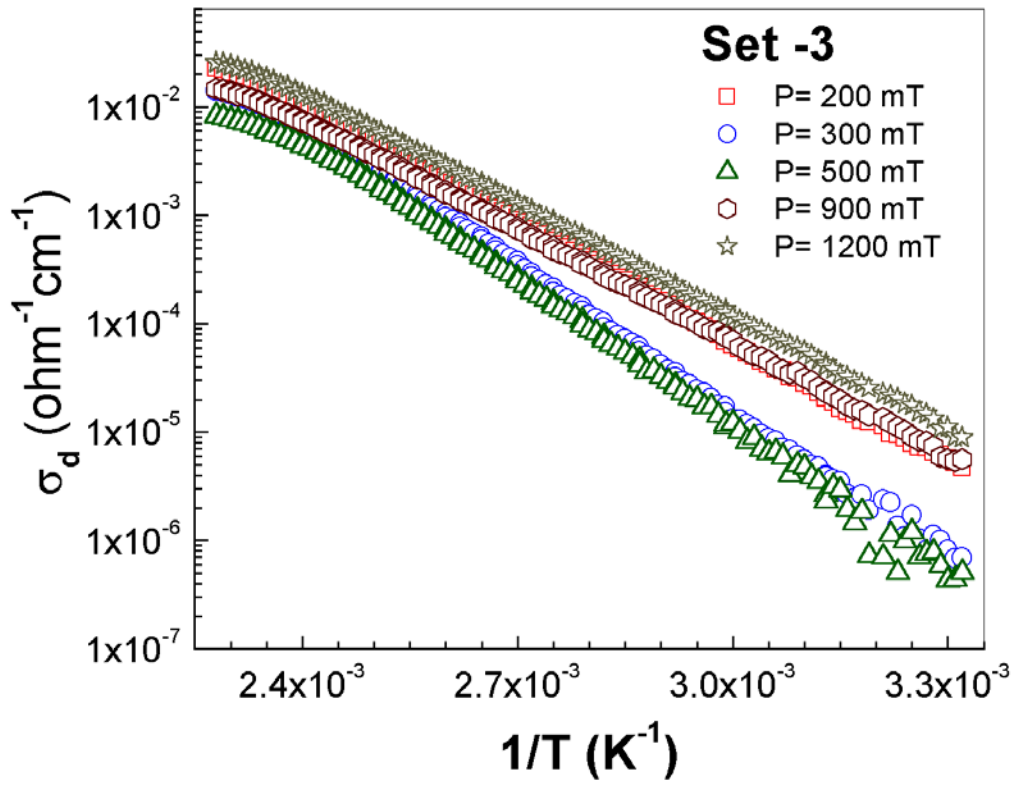


Şekil 4.64. Set-3 örneklerinin Urbach enerjisi değerlerinin helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.

Şekil 4.64’de toplam basınç değerlerine bağlı olarak hesaplanan Urbach enerji değerleri verilmektedir. Şekildeki değişimde, kusur yoğunluğundaki davranışa benzer bir değişim görmekteyiz. Örneklerin kusur yoğunluklarının artması, amorf yapı içindeki düzensizliğin de artmasını beraberinde getirmektedir. Bunun anlamı amorf yapı içindeki kusur yoğunluğu büyük oranda amorf yapının yapısal düzensizliği orjinli bir mekanizmanın çalışmasına sebep olmaktadır. Örneklerin Urbach enerjisi 60-70 meV arasında değişim sergilemektedir. En düşük ve yüksek kusur düzeylerine sahip olan örneklerde Urbach enerji değerindeki değişim sadece 10 meV’tur. Belki de 1200 mTorr toplam basınçta, % 95 seyreltme oranında fakat farklı RF güç değerlerinde hazırlanan örneklerde daha düşük kusur seviyeli bir film hazırlama koşulu tayin etmek mümkün olabilir. Bunun için set-4 örnek setini hazırlanırken, seyreltme oranını % 95, toplam basınç 1200 mTorr’da ve alttaş sıcaklığı 230° C civarında sabitlenerek farklı RF güç değerlerinde bir seri örnek hazırlanması yoluyla, RF gücü açısından bir optimum plazma koşulu elde edilmesi yoluna gidilmiştir.

4.4.4. Karanlık iletkenlik ölçümleri

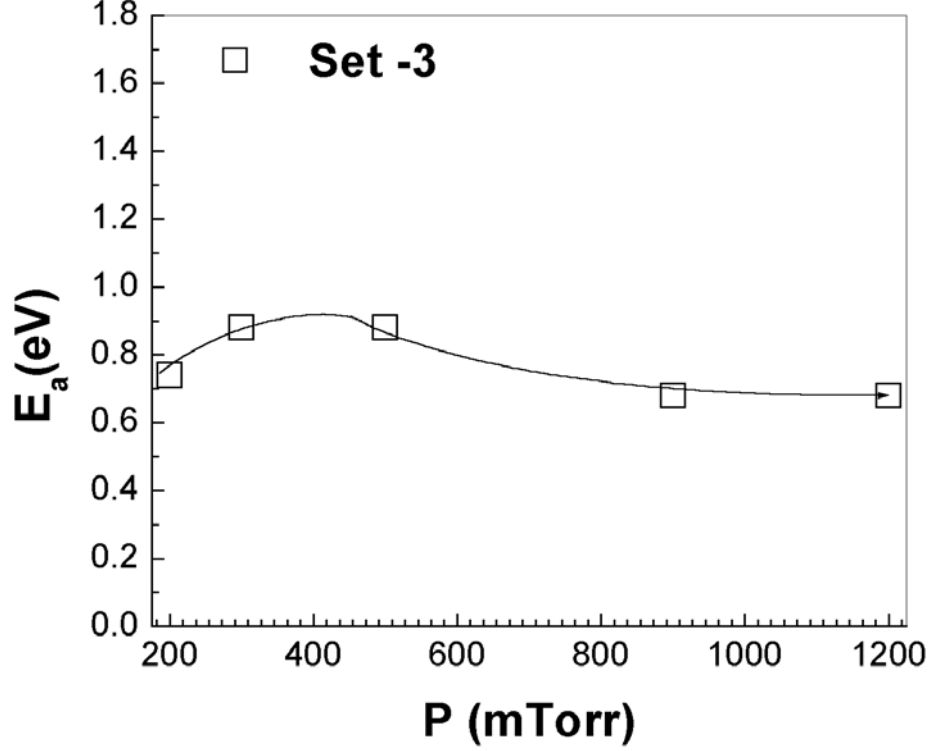
Karanlık iletkenlik ölçümleri kapalı devre helyum soğutmalı sistemde gerçekleştirildi. Örneğe uygulanan dc gerilim değeri örneğin ohmik davrandığı bölge içinden seçilmiştir. Örneğin bulunduğu sıcaklıkta örnekten geçen akım qbasicte yazılan bir program yardımıyla veri dosyasına yazdırılmıştır. Her örnek için incelenen sıcaklık aralığı oda sıcaklığı ile 440 K arasında olup 1 K'lık adımlar ile ölçüm alınmıştır. Şekil 4.65'te set-3 örneklerinin karanlık iletkenlik sonuçları verilmektedir. Şekil 4.65'teki değişim incelendiğinde yarı logaritmik eksenlerdeki değişimin oldukça doğrusal bir davranış sergilediği gözlemlenmektedir. Her örnek için Arrhenius gösterimindeki bu grafik yardımıyla denklem (4.3.) kullanılarak örneklerin karanlık iletkenlik aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır.



Şekil 4.65. Set-3 örneklerinin karanlık iletkenliklerinin değişimleri.

Şekil 4.66'da toplam gaz basıncına bağlı olarak hesaplanan karanlık aktivasyon enerjisi değerleri verilmektedir. Şekildeki değişimde karanlık aktivasyon enerjisi artan toplam basınçla beraber 0,15 eV artmakta ve 500 mTorr değerine kadar sabit kalmaktadır. 500 mTorr'un üstündeki basınç değerlerine gidildiğinde ise aktivasyon enerjisi 0,2 eV azalarak sabit kalmaktadır. Aktivasyon enerjisi

katkılanmamış bir yarı iletkende yaklaşık olarak bant ortası civarını göstermektedir. Set-3'te elde edilen örneklerin aktivasyon enerjisi değerlerinin Tauc optik bant aralığındaki değişime paralel olması hazırlanan örneklerin katkısız a-Si:H örnekler olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.66. Karanlık aktivasyon enerjisi değerlerinin, toplam gaz basıncına bağlı değişimi.

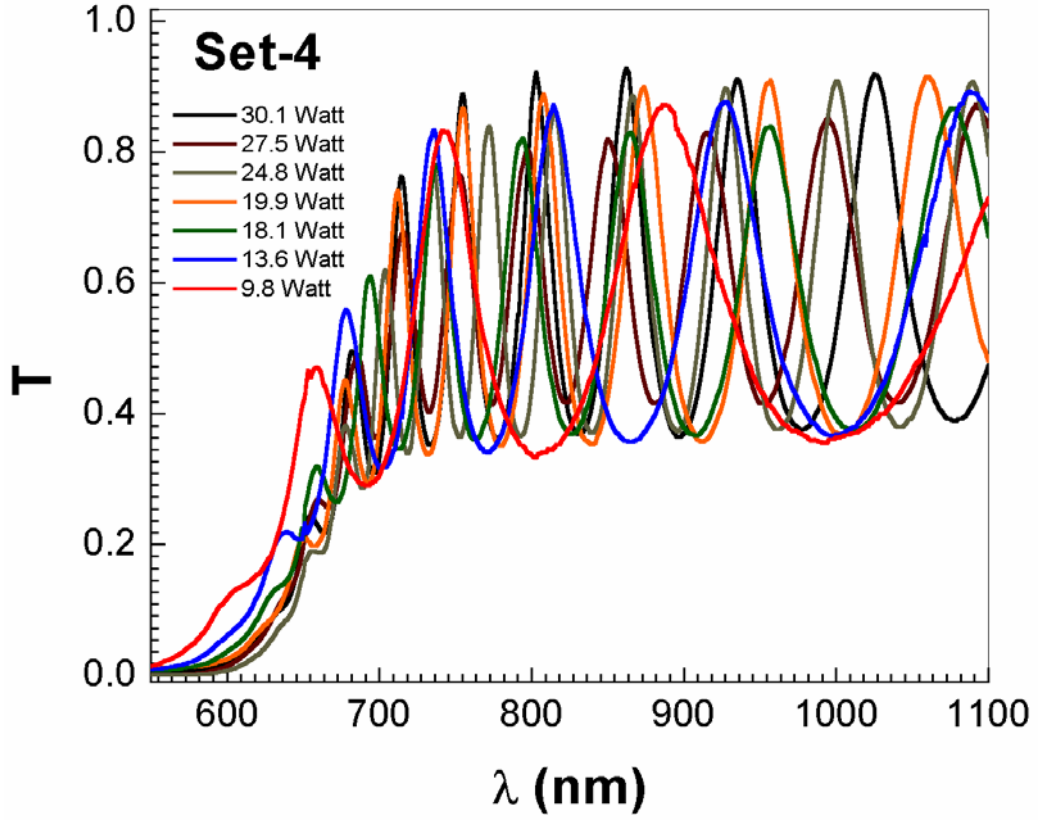
4.5. Set-4 Örnekleri

Bu kesimde, film hazırlama parametreleri Çizelge 4.1'de verilen set-4 örneklerinin optik ve elektriksel ölçüm sonuçları anlatılacaktır.

4.5.1. Optik geçirgenlik

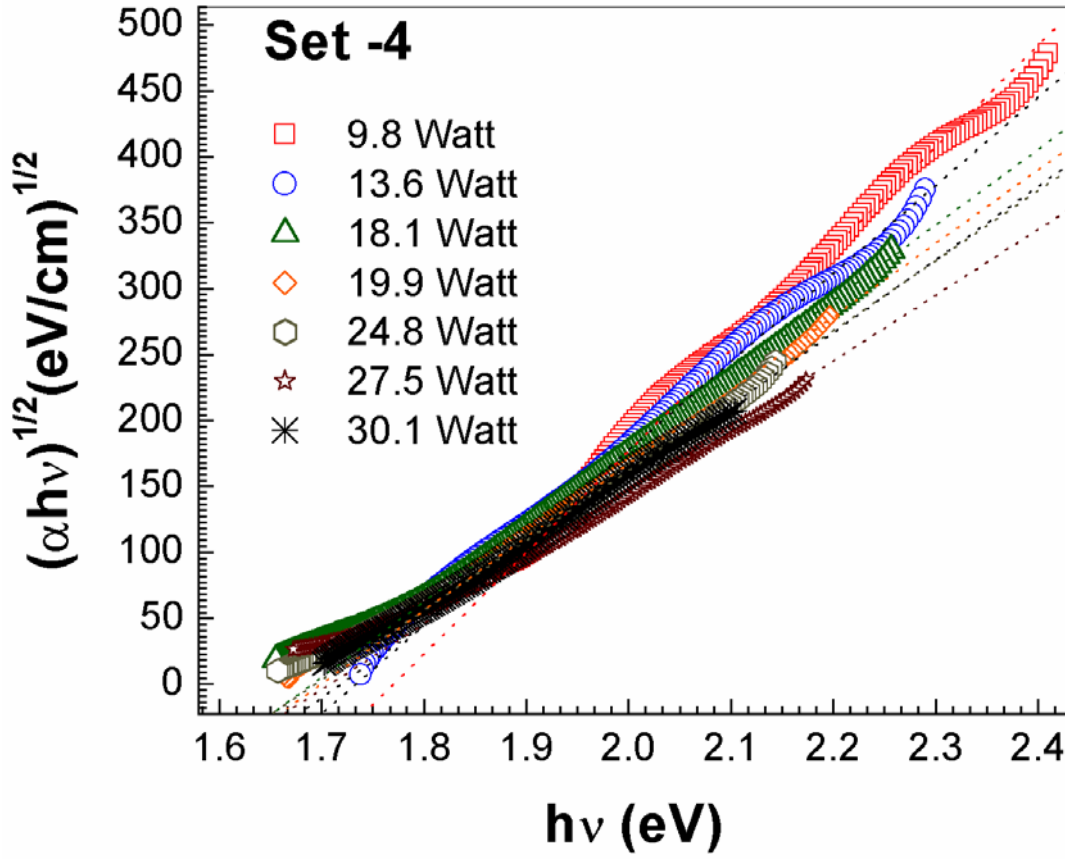
Bir önceki sette (set-3) hazırlanan örneklerin karakterizasyonu sonucunda, düşük kusur yoğunluğunda ve yüksek büyüme hızı ve fotoiletkenlik özelliklerine sahip örneklerin hazırlanabilmesi için gerekli olan koşulların; 1200 mTorr toplam gaz basıncı, %95 civarı helyum seyreltme oranı, 230 °C alttaş sıcaklığı ve 18,1 W Rf gücü olduğu belirlenmiştir. Belirlenen optimum film büyütme koşullarında daha da küçük kusur seviyesine sahip örneklerin hazırlanması, RF gücünün

değiştirilmesiyle mümkün olabilir. Bu nedenle, diğer koşullar sabit tutulmak koşuluyla RF gücü değiştirilerek set-4 örnekleri hazırlandı.



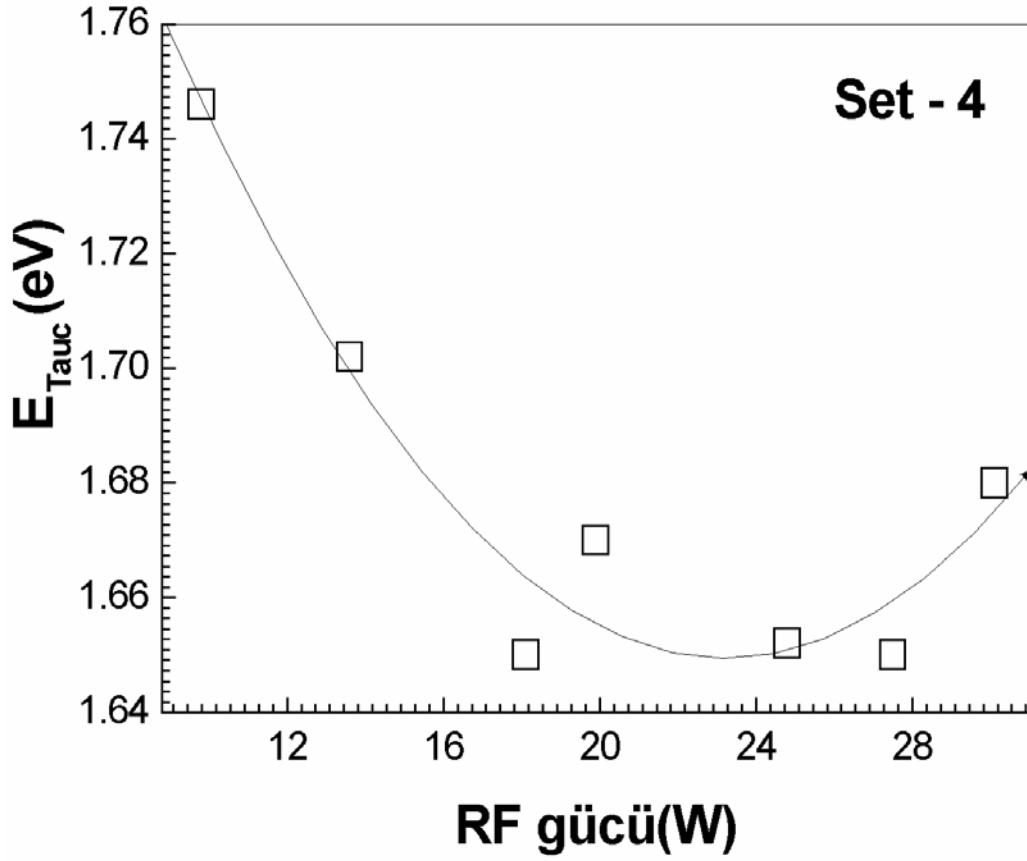
Şekil 4.67. Set-5 örneklerinin RF gücüne bağlı olarak optik geçirgenliklerinin değişimi.

Farklı RF güç değerlerinde hazırlanan a-Si:H filmlerin, optik geçirgenlik spektrumları Şekil 4.67'de, optik geçirgenlik ölçümü verilerinden hesaplanan soğurma spektrumu kullanılarak yapılan Tauc çizimi de Şekil 4.68'de verilmiştir. Farklı RF güç değerlerinde hazırlanan örneklerin Tauc çizimleri üst üste yapılmıştır. RF güç miktarının artması ile birlikte filmlerin Tauc bant aralığı azalmakta ve 24,8 W değerinden sonra artmaya başlamaktadır. 24,8 W RF gücü kritik bir nokta olarak görünmektedir. Şekil 4.69'da set-4 örneklerinin optik geçirgenlik verileri kullanılarak elde edilen Tauc bant aralığının RF gücüne bağlı değişimleri verilmektedir. Plazmaya sürülen RF gücüne bağlı olarak örnekler 1,65 - 1,75 eV arasında değişen Tauc bant aralığı değerleri sergilemektedirler.



Şekil 4.68. Set-4 örneklerinin Tauc çizimleri.

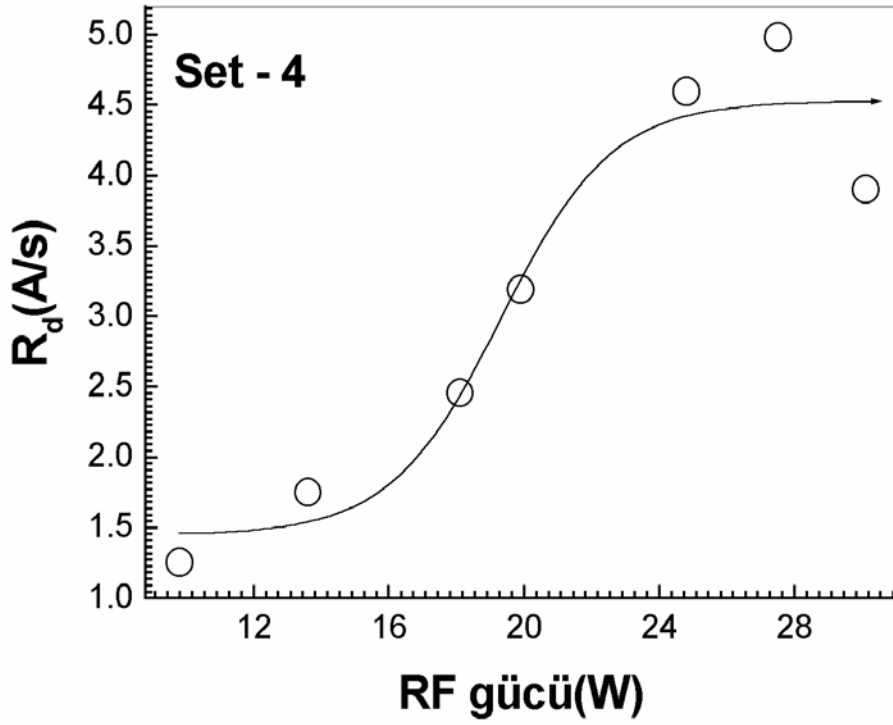
Şekil 4.69'daki değişim incelendiğinde Tauc bant aralığının RF güç değerlerine bağlı olarak değişim gösterdiği gözlemlenmektedir. Plazma sistemine sürülen RF gücü a-Si:H oluşum sürecindeki plazma reaksiyonunun hızını değiştiren önemli faktörlerin başında gelir. Diğer bir deyişle silan ve helyum gazının uyarılarak plazma fazına geçirilmesi ve bu faz geçişi sonrası oluşan iyon ve radikal türlerinin kinetik enerjilerindeki değişim, RF gücünün fonksiyonudur. Bu bakımdan amorf yapının oluşum sürecinde örneğin yapısal ve optik özelliklerinin şekillenmesinde sisteme sürülen RF gücü değerinin çok önemli bir fonksiyonu vardır. Literatürde yapılan çalışmalarda genellikle, sisteme sürülen RF güç miktarı, amorf yapıya katılan hidrojen oranını kontrol eden güçlü bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Plazmaya sürülen RF gücünün artırılması, yüzeyde gerçekleşen plazma reaksiyonunun ısı enerjisinin büyümesine neden olarak, reaksiyondan dışarıya hidrojen atılmasına neden olmaktadır (Matsuda et. al,2002). Dışarı atılan hidrojen amorf yapı içindeki hidrojen miktarını azalttığından, Tauc bant aralığında bir azalış gözlemlenebilir.



Şekil 4.69. Set-4 örneklerinin Tauc optik bant aralıklarının RF gücüne bağlı değişimi.

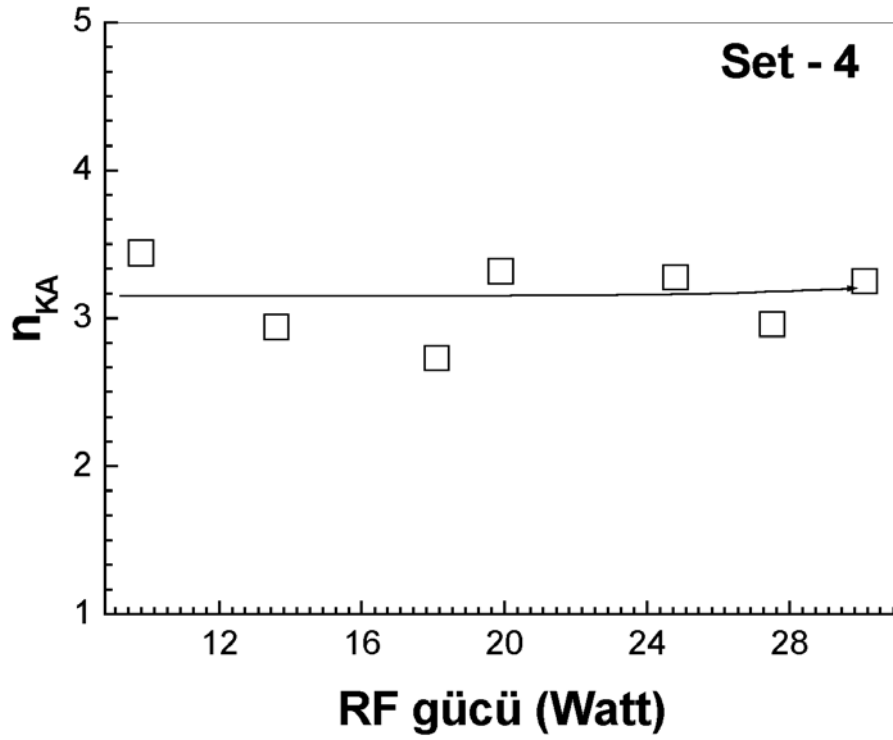
Şekil 4.69'da Tauc optik bant aralığının 27,5 W RF gücünde yapılan örnekte minimum düzeye indiği görülmektedir. Tüm değişim incelendiğinde RF gücünün 9,8-30,1 W aralığındaki Tauc optik bant aralığının 1 eV düzeyinde değişim sergilediği gözlenmiştir.

Şekil 4.70'de optik geçirgenlik ölçüsü yardımıyla hesaplanan film kalınlıklarından faydalanarak çizilen, film büyüme hızının RF gücüne bağlı değişimi verilmektedir.



Şekil 4.70. Film büyütme hızının sisteme sürülen RF gücüne bağlı değişimi.

Şekil 4.70'deki değişim incelendiğinde artan RF gücüyle birlikte film büyüme hızının hızla arttığı gözlemlenmektedir. 9,8 W RF gücünde hazırlanan örneğin büyüme hızı 1,25 Å/s civarında iken, güç 24,8 W civarına çıktığında film büyütme hızı 5 Å/s'ye yükselmektedir. 24,8 W RF gücünden yüksek değerlerde elde edilen filmlerin büyüme hızlarının fazla değişmemesi, kritik bir RF gücü değerinden sonra vakum odacığının sahip olduğu elektrot geometrisinden dolayı, plazmaya sürülen RF enerjisinin artık sistem üzerindeki ek ekipmanlar (empedans uyuşturucu ünite, RF güç ölçer ünitesi, kablolar v.b. gibi) üzerinde harcanmaya başlamasından kaynaklanmaktadır. RF enerjisinin bir bölgeden başka bir bölgeye transferi o bölgelerdeki empedans uyumunun ölçütü oranında gerçekleşir. Özellikle 16-25 W RF gücü bölgesindeki film büyütme hızının oldukça ani değişmesi, hızlı büyüyen fakat düşük kusur yoğunluğu sergileyen örneklerin bu bölgede hazırlanabileceği konusunda ip uçları vermektedir.

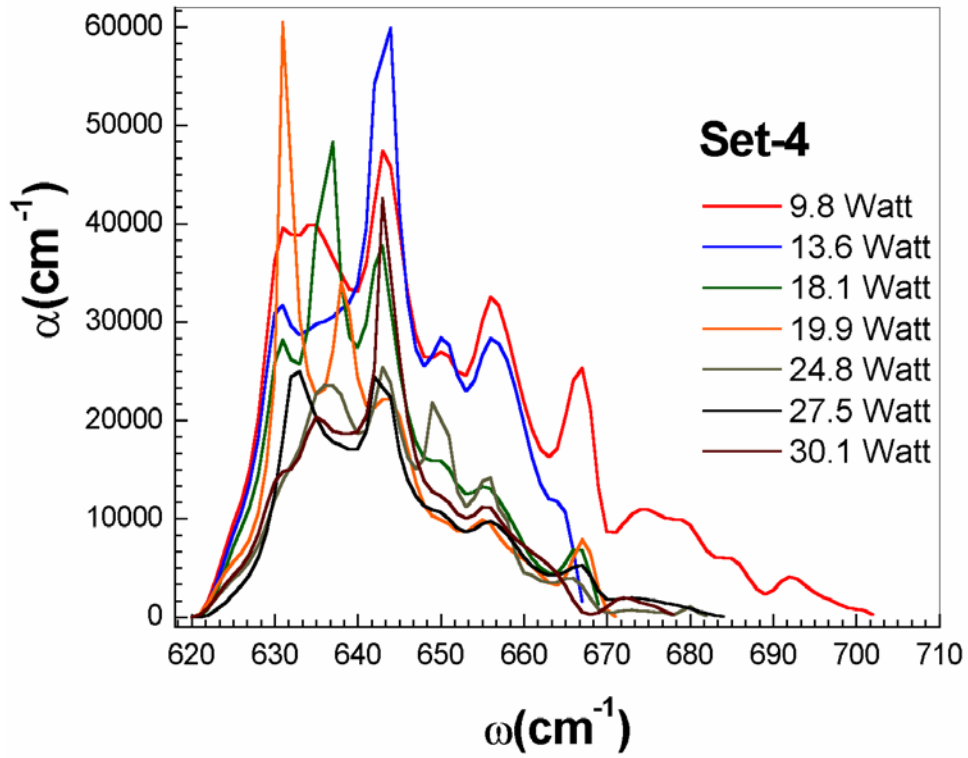


Şekil 4.71. Set-4 örneklerinin kırmızıaltı kırma indisi değerlerinin değişimi.

Şekil 4.71'de optik geçirgenlik verileri kullanılarak hesaplanan kırmızı altı film kırma indisi değerlerinin RF güç değerlerine bağlı değişimi sunulmaktadır. Kırma indisi değerleri RF güç değerine bağlı olarak 3,2 civarındadır. Hesaplanan kırma indisi değerleri, literatürde düşük kusur yoğunluklu standart hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun sergilediği değerle oldukça iyi uyum içerisindedir (Cabarrocas et.al.,1998).

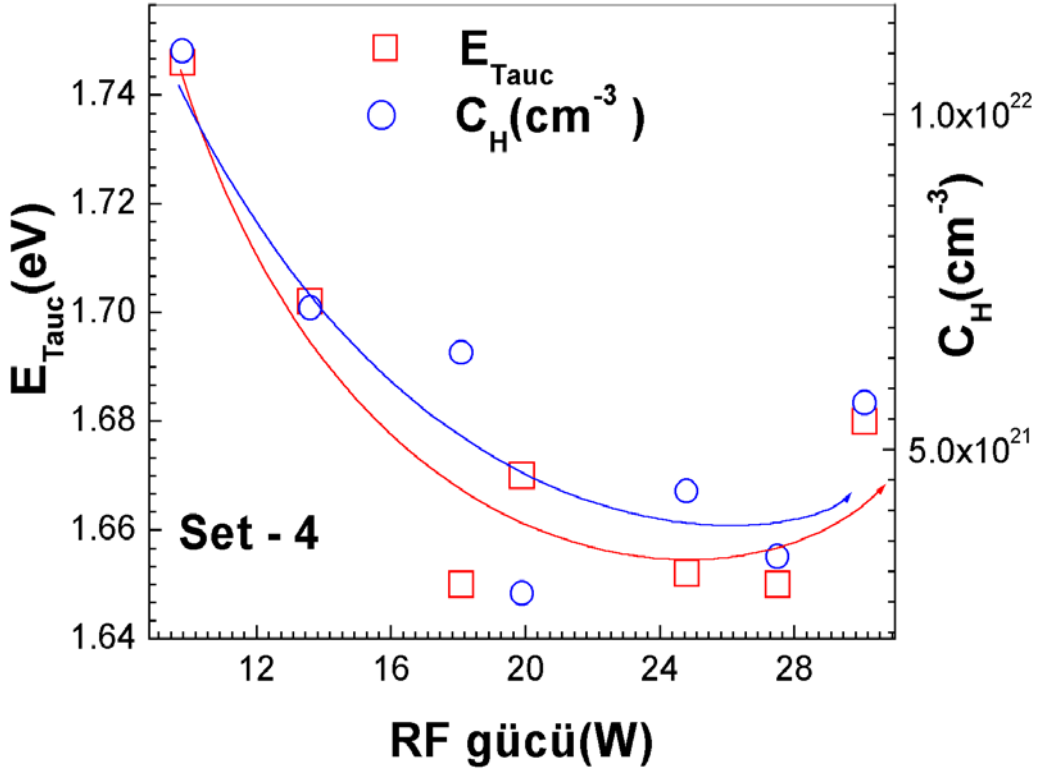
4.5.2. Fourier dönüşümü kırmızıaltı (KA) spektrumları

Şekil 4.72'de set-4 örneklerine ait 600-800 cm^{-1} dalga sayısı aralığında optik geçirgenlik verileri kullanılarak hesaplanan FTIR soğurma eğrileri verilmektedir.



Şekil 4.72. Set-4 örneklerinin kırmızıaltı soğurma spektrumları (620-700 cm^{-1}).

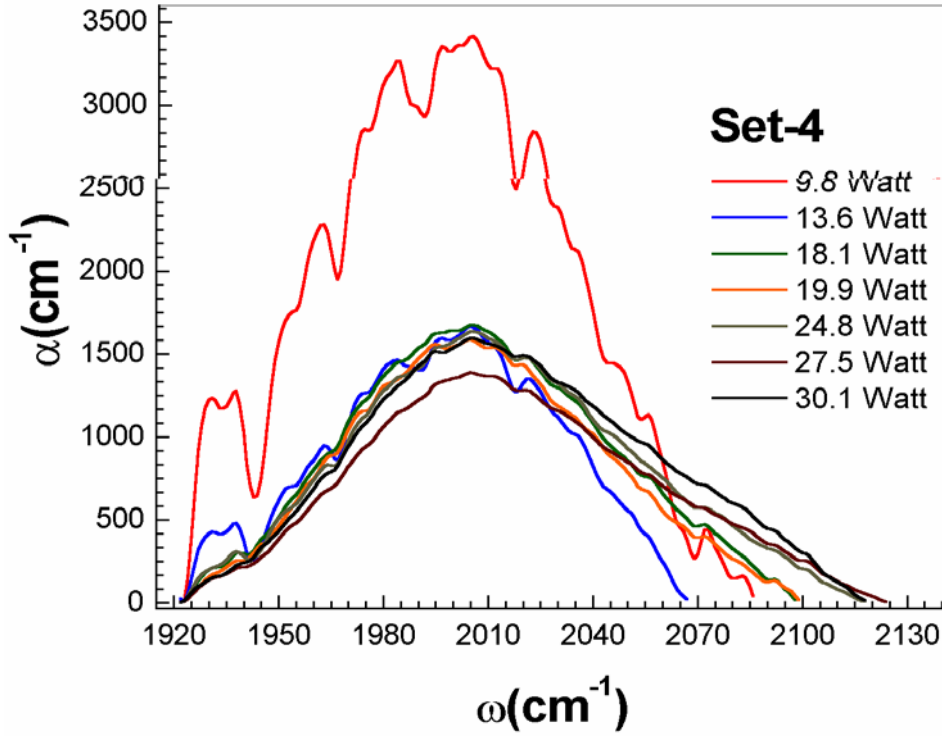
Şekil 4.72'deki değişimler incelendiğinde 630 ve 640 cm^{-1} bandı civarlarında soğurma pikleri gözlemlenmektedir. Bu da set-4 örneklerinin bağlı hidrojen bulundurduğunu göstermektedir. 630 cm^{-1} bandından 700 cm^{-1} bandına doğru uzanan bölgelerde soğurma piklerinin iç içe girmesi sonucunda yayvan ve düşük şiddetli soğurma pikleri gözlenmektedir. 640 cm^{-1} bandından 700 cm^{-1} bandına doğru uzanan bölgedeki soğurma piklerinin tanımlı olduğu bir titreşim modu bulunamamıştır. Filmlerin oluşum sürecinde yapıya katılan safsızlıkların buna neden olabileceği düşünülmektedir. Bu yüzden yayvan soğurma eğrileri içine çoklu gasusiyen fonksiyonların çakıştırılması ile elde edilen 630 cm^{-1} badnındaki titreşim modu kullanılarak bağlı hidrojen oranı hesabı yapılmıştır.



Şekil 4.73. Set-4 örneklerinin bağlı hidrojen oranları (630 cm^{-1}).

Şekil 4.72'deki soğurma eğrileri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen bağlı hidrojen oranının RF gücüyle değişimi Şekil 4.73'te verilmektedir. Şekil 4.73'teki değişimde sol eksen optik geçirgenlik verilerinin değerlendirilmesi ile elde edilen Tauc optik aralığını, sağ eksen ise, 630 cm^{-1} bandından hesaplanan bağlı hidrojen oranını göstermektedir.

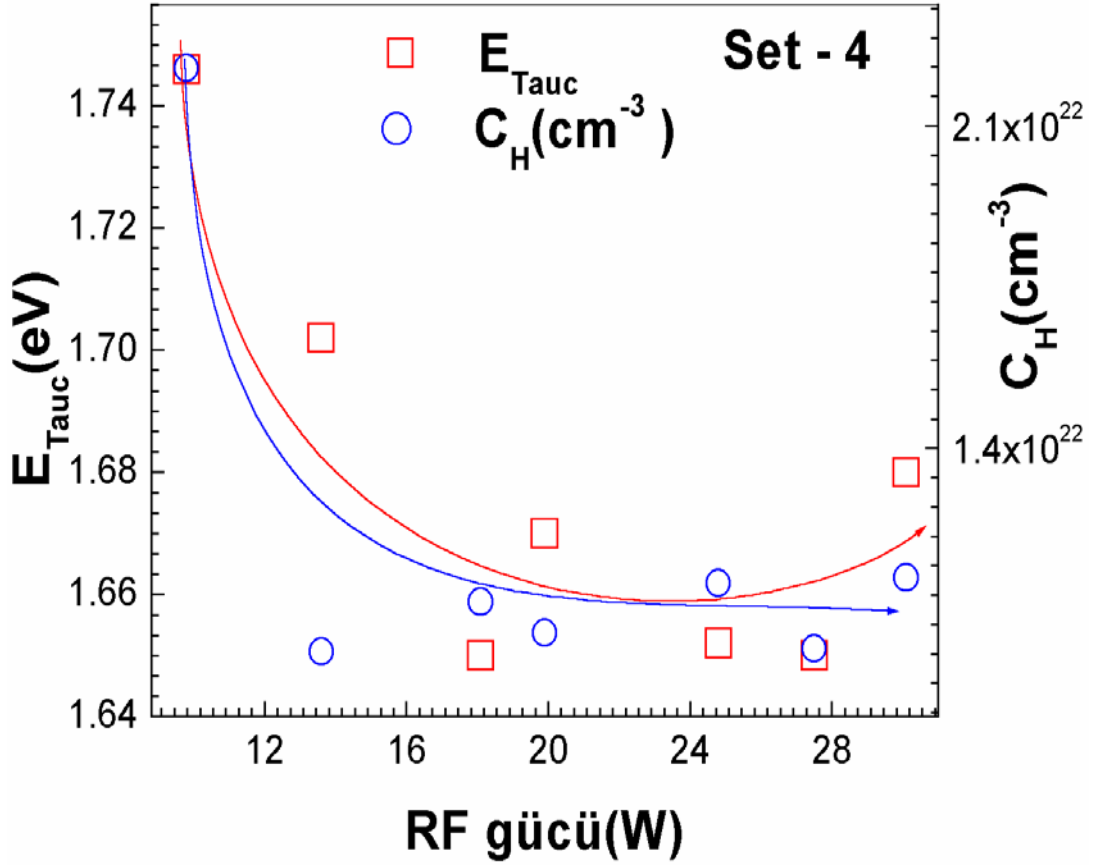
Şekil 4.73'teki değişim incelendiğinde yaklaşık 20 W RF gücü seviyesine kadar Tauc bant aralığındaki azalışa paralel olarak bağlı hidrojen oranının da düşmekte olduğunu görmekteyiz. 25 W civarındaki RF güç değerlerinden daha yüksek değerlere gidildiğinde yine RF güç seviyesindeki değişime paralel olarak Tauc bant aralığının artmakta olduğu gözlemlenmektedir. Farklı RF güçlerinde üretilen örneklerin Tauc optik bant aralığının değişimine paralel olarak silisyuma bağlı hidrojen oranının da aynı değişimi sergilemesi, Tauc bant aralığı değerinin yapıdaki hidrojen atomlarının sayısı ile kontrol edildiğini göstermektedir.



Şekil 4.74. Set-4 örneklerinin kırmızıaltı soğurma spektrumları (1920-2130 cm^{-1}).

Şekil 4.74'te 1900-2100 cm^{-1} dalga sayısı aralığında elde edilen kırmızıaltı soğurma spektrumları verilmektedir. Şekildeki değişimler incelendiğinde, tüm soğurma eğrilerinin pik noktalarının 2000 cm^{-1} titreşim bandına karşılık geldiği gözlemlenmektedir. 9,8 W RF gücünden daha büyük güçlerde hazırlanan tüm örneklerde 2000 cm^{-1} titreşim bandının yarı çizgi genişliğinin büyüyerek şiddetlerinin azaldığını görmekteyiz. Bu da Si-H gerilme titreşim modundaki azalmaya işaret etmektedir. Si-H gerilme titreşim modunun azalmasının nedeni 2100 cm^{-1} 'deki SiH_2 gerilme modunun aktif hale geçmesi olabilir. Bu titreşim modunun amorf yapı içinde aktif olduğunu söylemek için aynı titreşim bandının bükülme ve sallanma modlarında aktif soğurma piki göstermesi gerekir. Fakat spektrumda bükülme yada sallanma modlarına rastlanamamıştır. Bu nedenle, 2000 cm^{-1} merkezli gausiyen soğurma piklerine yapılan çakıştırmalar yardımıyla hidrojen oranı hesabına gidilmiştir. Şekil 4.74'de verilen değişimlerden hesaplanan hidrojen oranlarının RF güç miktarına bağlı değişimi Şekil 4.75'te verilmektedir. Şekil 4.75'teki bağlı hidrojen oranının değişimine baktığımızda en yüksek hidrojen oranının 9,8 W'ta hazırlanan örnekte olduğu görülmektedir. Şekil 4.73'teki değişimle oldukça iyi bir uyum gösteren hidrojen oranı, Tauc bant aralığını başat olarak, yapı içindeki hidrojen atomlarının kontrol ettiğini tekrar açıkça ortaya koymaktadır

(Street, 1999). Hatta Tauc bant aralığının yapıdaki hidrojen atomu sayısına fonksiyonel olarak bağımlılığından bile bahsetmek mümkündür.

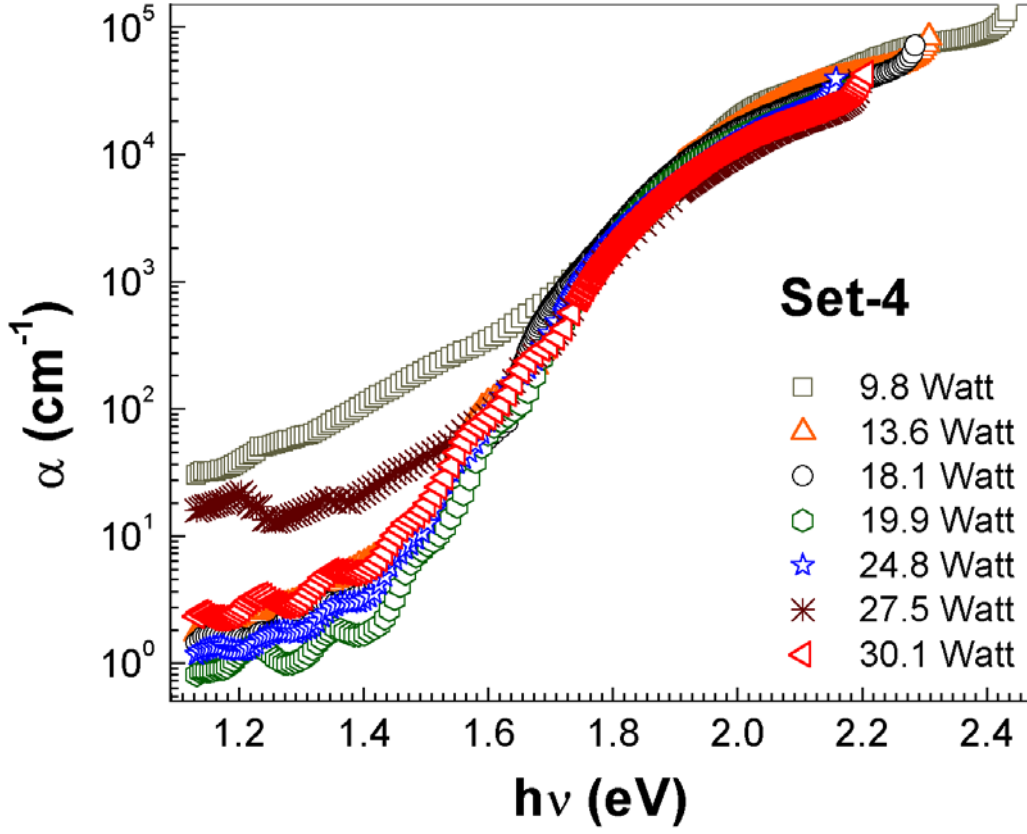


Şekil 4.75. Set-4 örneklerinin bağlı hidrojen oranları (2000 cm^{-1}).

9,8 W gücünde hazırlanan örnekte Si-H bükülme modundan hesaplanan hidrojen oranı miktarı $1 \times 10^{22}\text{ cm}^{-3}$ düzeyinde iken, gerilme modundan bulunan rakam ise $2 \times 10^{22}\text{ cm}^{-3}$ düzeyindedir. Bu rakamlar arasında 2 kattan fazla fark vardır. Bu nedenden dolayı amorf yapı içinde başat olarak Si-H gerilme modlarının aktif olduğunu söyleyebiliriz.

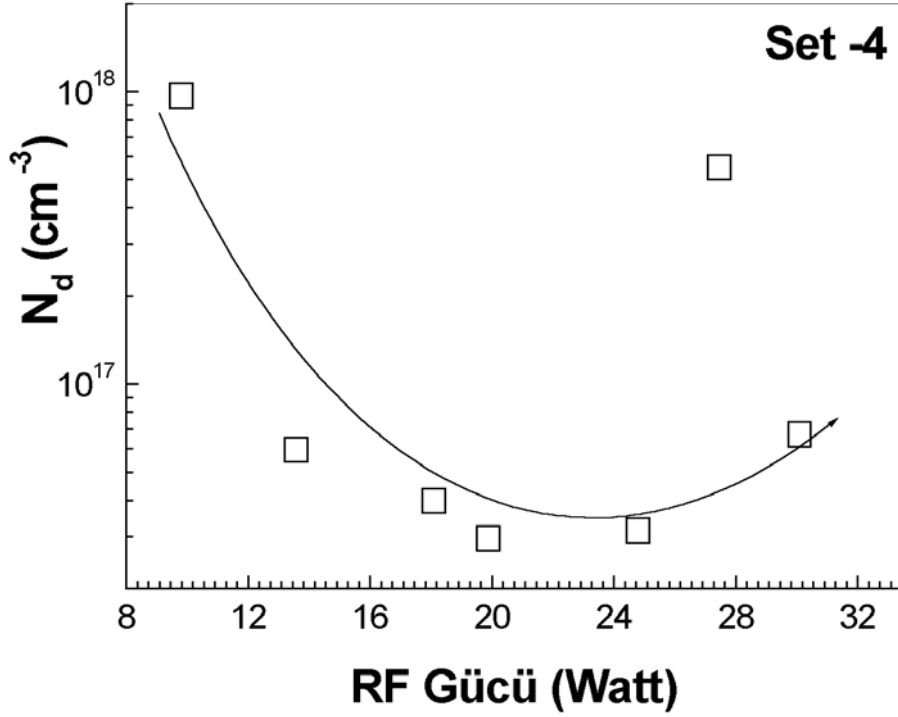
4.5.3. CPM sonuçları

Şekil 4.76'da farklı RF güç değerlerinde hazırlanan örneklerin CPM spektrumları verilmektedir. Hesaplanan kusur yoğunluklarının RF gücüne bağlı değişimi Şekil 4.77'de verilmektedir. Kusur yoğunluğu en düşük olan örnek ($2 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$), 20 W civarında RF gücünde hazırlanan örnektir.



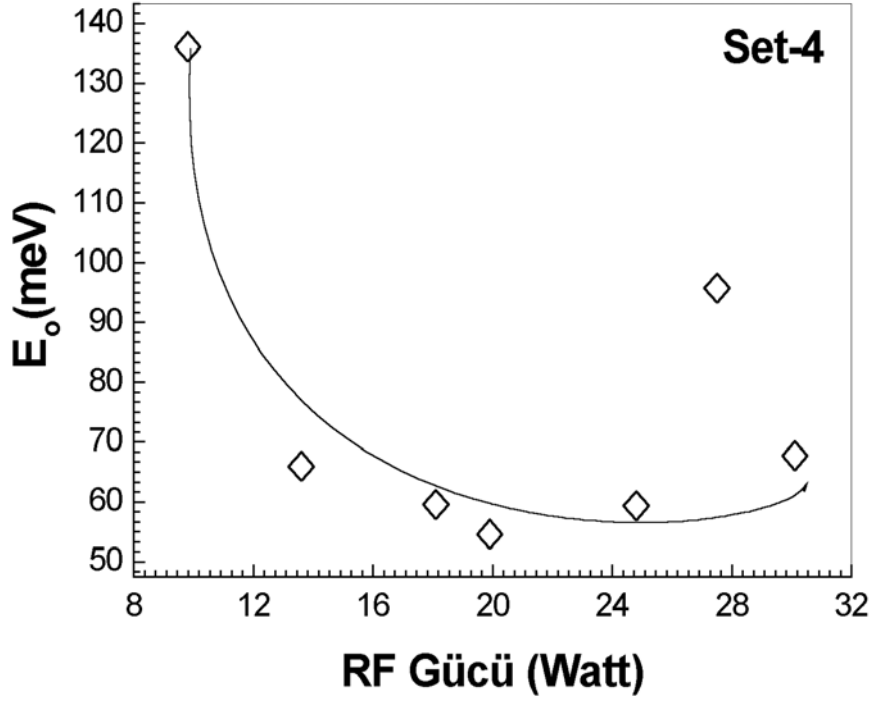
Şekil 4.76. Set-4 örneklerinin CPM spektrumları.

En düşük RF gücünde hazırlanan örneğin kusur yoğunluğu 10^{18} cm^{-3} civarında olup, yüksek RF güç değerlerine gidildiğinde kusur yoğunluğu artarak yaklaşık $7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ düzeyine ulaşmaktadır. Kusur yoğunluğu RF gücüne bağlı olarak parabolik bir değişim sergilemektedir. Parabolün ekstramum noktası en düşük kusur yoğunluklu örneklerin hazırlandığı bölgedir. Bu bölge ise yaklaşık, 20 W civarı RF gücüne karşılık gelmektedir. Bu noktada örneklerin büyüme hızı yaklaşık $3,5 \text{ Å/s}$ 'dir. $3,5 \text{ Å/s}$ büyüme hızı ve $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ kusur yoğunluğu ve yüksek kırma indisine değerine sahip örnekler gurubumuzda şimdiye kadar yapılan çalışmalarda ilk defa elde edilmesi açısından önemlidir. Bu özelliklerdeki bir amorf silisyum ince film, iyi bir fotovoltaik malzeme adaydır.



Şekil 4.77. Set-4 örneklerinin kusur yoğunluklarının RF gücüne bağlı değişimi.

Şekil 4.77’de 28 W civarında RF gücünde hazırlanan örneğin, parabolik değişimin dışında kalan saçılmış bir davranış sergilediği görünmektedir. Bu örneğin gösterdiği kusur yoğunluğu değeri $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ’tür. Bu değer diğer örneklerdeki fonksiyonel davranışa uymamaktadır. Bu nedenle, bu örneğin genel fabrikasyon sürecindeki safsızlık atomları yada diğer organik safsızlıkların neden olduğu kusur düzeylerine sahip olduğu düşünülmektedir. Şekil 4.78’de CPM ölçümünden elde edilen sonuçlardan hesaplanan Urbach enerji değişimleri verilmektedir. Urbach enerjilerinin RF gücüne bağlı değişimleri incelendiğinde Şekil 4.77’de verilen davranışa benzer bir değişim görülmektedir. Amorf yapıdaki kusur düzeylerinin artması sonucunda düzensizliğin de arttığını söyleyebiliriz. En düşük RF gücünde üretilen örnek oldukça yüksek Urbach enerjisine sahiptir. Düşük güçlerde gerçekleşen plazma reaksiyonunda, silisyum atomlarının daha kararlı enerji konfigürasyonuna geçebilecek yeterli kinetik yada ısı enerjisiye sahip olamamalarının, örgünün daha düzensiz bir şekilde yapılanmasına sebep olabileceği düşünülmektedir. Bu sonuç aynı örneğin neden yüksek kusur değeri sergilediğinin de bir kanıtı olabilir.

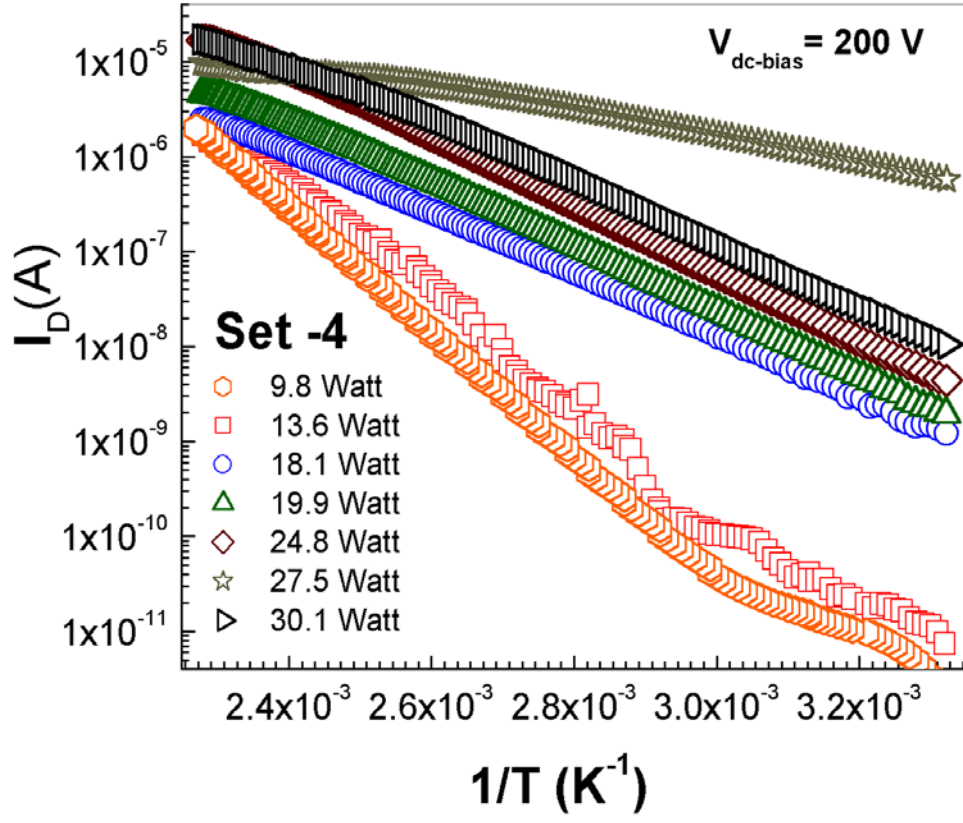


Şekil 4.78. Set-4 örneklerinin Urbach enerjilerinin RF gücüne bağlı değişimi.

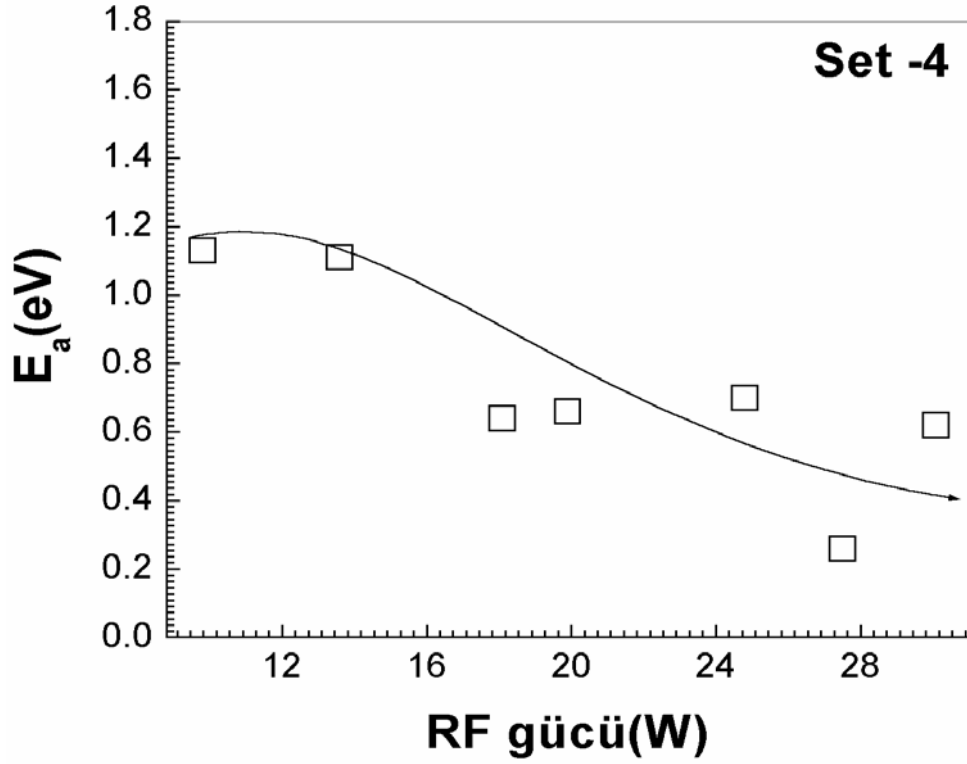
Şekil 4.78'deki değişim incelendiğinde yine genel fonksiyonel değişimi bozan tek bir örnek göze çarpmaktadır. Bu örneğin kusur düzeyindeki fazlalık benzer biçimde yapının düzensizliğini de artırarak Urbach enerjisinin de beklenenden yüksek bir düzeyde çıkmasına neden olmuştur. Hazırlanan örneklerden en düşük Urbach enerjisini (55 meV) sergileyen örnek, 20 W civarında RF gücünde hazırlanan örnektir.

4.5.4. Karanlık iletkenlik ölçümleri

Karanlık iletkenlik ölçümleri kapalı devre helyum soğutmalı sistemde gerçekleştirildi. Örneğin bulunduğu sıcaklıkta örnekten geçen akım değerleri qbasicte yazılan bir program yardımıyla veri dosyasına yazdırılmıştır. Her örnek için incelenen sıcaklık aralığı oda sıcaklığı ile 440 K arasındadır ve 1 K'lık adımlar ile ölçüm alınmıştır. Şekil 4.79'da set-4 örneklerinin karanlık akım sonuçları verilmektedir. Şekil 4.79'daki değişim incelendiğinde yarı logaritmik eksenlerdeki değişim doğrusal bir davranış sergilemektedir. Arrhenius gösterimindeki bu grafik yardımıyla denklem (4.3.) kullanılarak örneklerin karanlık iletkenlik aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır.



Şekil 4.79. Set-4 örneklerinin karanlık iletkenliklerinin RF gücüne bağlı değişimi.



Şekil 4.80. Set-4 örneklerinin aktivasyon enerjilerinin RF gücüne bağlı değişimleri.

Şekil 4.80’de farklı RF güçlerinde elde edilen örneklerin karanlık iletkenlik ölçümleri sonucunda elde edilen aktivasyon enerjilerinin RF gücüne bağlı değişimleri verilmektedir. Şekildeki değişim incelendiğinde aktivasyon enerjisinin Şekil 4.73’te verilen Tauc bant aralığındaki azalmaya paralel olarak küçüldüğü gözlenmektedir. Eğer hazırlanan örnekler katkısız ise bu enerji kabaca Tauc bant aralığının ortasında yer almış olmalıdır. Oysa bu ölçümler sonucunda gözlenen değişimler 0,25 eV seviyelerine kadar düşebilmektedir. Eğer 28 W civarında hazırlanan örnek katkısız bir yarıiletken olsaydı aktivasyon enerjisinin 0,8-0,6 eV arasında çıkmış olması gerekirdi. Aktivasyon enerjisinin bu denli küçük çıkması örneklerin bazılarının fabrikasyon sürecinde istemsiz olarak birtakım safsızlıklar tarafından katkılıandığını göstermektedir. Amorf yapı içersindeki kopuk bağ yoğunluğu yerelleşmiş enerji düzeylerinin konumunu kontrol eden önemli bir fizksel niceliktir. Yerelleşmiş enerji düzeylerinin çoğalması fermi enerji seviyesini iletim bandına doğru yaklaştırmaktadır. Bunun doğal bir sonucu olarak fermi enerjisi ile iletim bandı arasındaki enerjice mesafe kusur yoğunluğunun büyümesi sonucunda küçülebilmektedir.

4.6. Set-5 Örnekleri

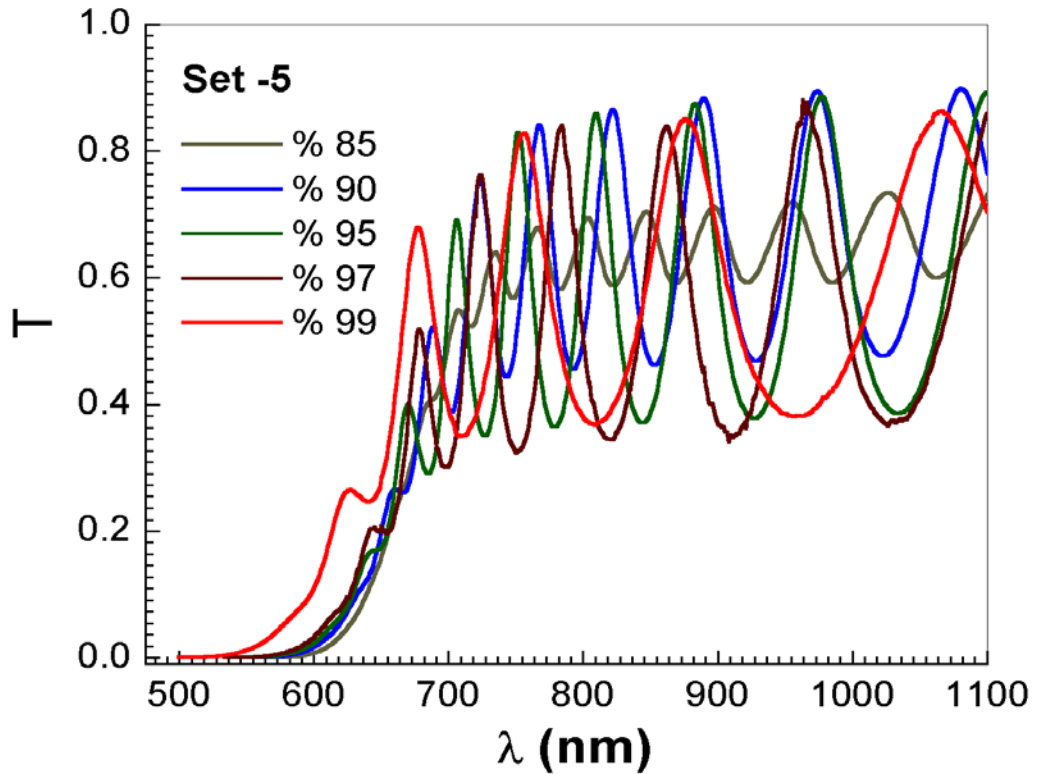
Bu kesimde, film hazırlama parametreleri Çizelge 4.1’de verilen set-5 örneklerinin optik ve elektriksel ölçüm sonuçları anlatılacaktır.

4.6.1. Optik geçirgenlik

Set-4’te hazırlanan örneklerin karakterizasyonu sonucunda; düşük kusur yoğunluklu ve büyüme hızı yüksek örneklerin 20 W civarında RF gücünde, %95 helyum seyreltme oranında ve 1200 mTorr toplam basınç değerinde hazırlanabileceği ortaya koyulmuştur.

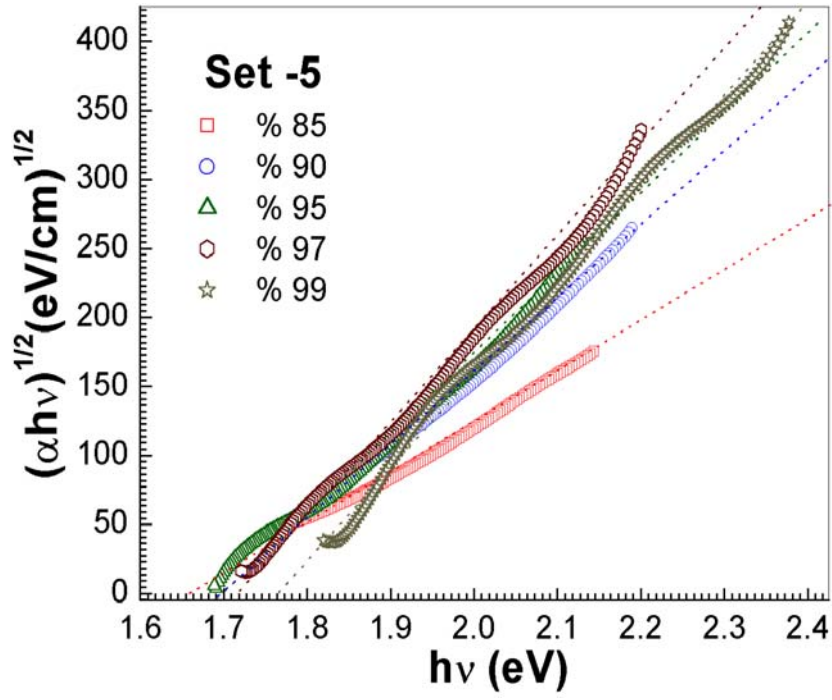
Plazma sisteminde hazırlanan örneklerin film hazırlama koşullarına bağlı olarak optiksel ve yapısal özelliklerinin değiştiği yapılan araştırmalar ve deneylerle ortaya koyulmuştur. Plazma sisteminde büyütülen örnekler silan gazının RF ile uyarılarak ayrışması sonucu elde edilmektedir. Bu ayrışma sonucunda oldukça reaktif olan bazı safsızlık türleri, radikaller, iyonlar yada yüksek kinetik enerjiye sahip

elektronlar da amorf yapının büyüme sürecine katılarak, filmin iyi olmayan optik ve elektriksel karakteristikler sergilemesine neden olabilmektedir. Bu nedenden, aynı başlangıç koşullarında hazırlanan örnekler bile birbirinden farklı bazı optik ve elektriksel özellikler sergileyebilmektedir. Hazırlanan bir set içindeki örneklerde de böyle beklenmedik durumlarla karşılaşılması durumunda, sözü geçen örnek dışındaki diğer örneklerin sergilediği davranışların genel davranışa uygunluğu önem taşımaktadır. Bu yüzden sürekli belirlenmeye çalışılan film optimizasyon koşullarının, daha dar bir aralıkta tanımlanması, fotovoltaiik malzeme adayı olabilecek düşük kusur yoğunluklu örnek hazırlamada yardımcı olacaktır. Şu ana kadar belirlenen optimizasyon koşullarından helyum seyreltme oranı, % 95-% 99 civarıydı. Seyreltme oranının optimum değerini olabildiğince düşük hata ile belirlemek amacıyla, helyum seyreltme oranının % 85-% 99 arasında değiştirildiği örnekler hazırlandı.

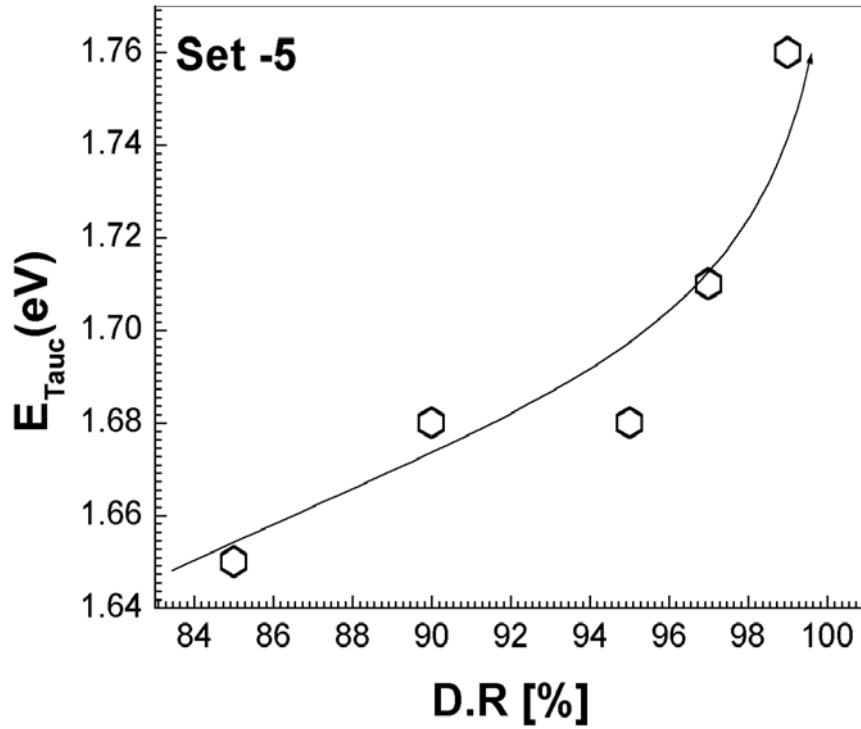


Şekil 4.81. Set-5 örneklerinin optik geçirgenlik spektrumları.

% 85-99 seyreltme oranı aralığında beş örnek hazırlanarak bu örneklerin optik ve elektriksel özellikleri incelenmiştir. Şekil 4.81’de beş örneğin optik geçirgenlik spektrumları verilmektedir.



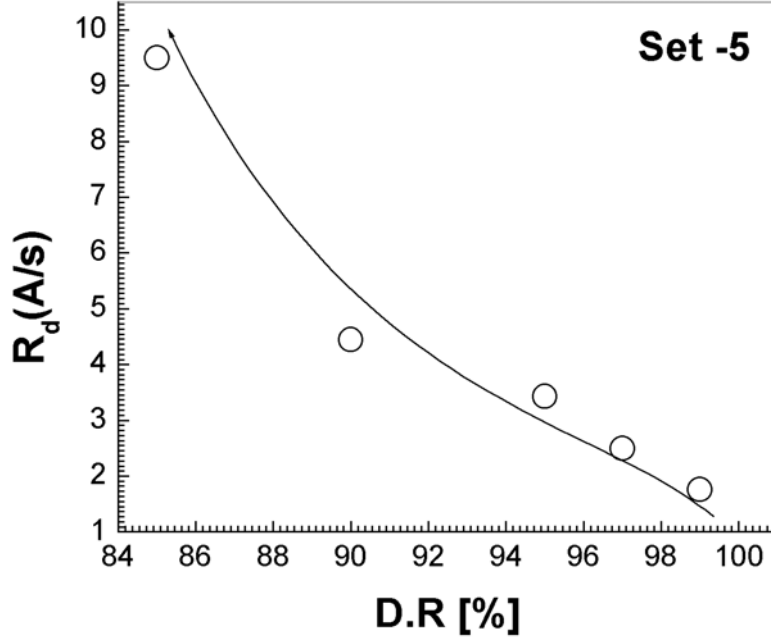
Şekil 4.82. Set-5 örneklerinin Tauc optik aralıklarının değişimleri.



Şekil 4.83. Set-5 örneklerinin Tauc bant aralıklarının helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.

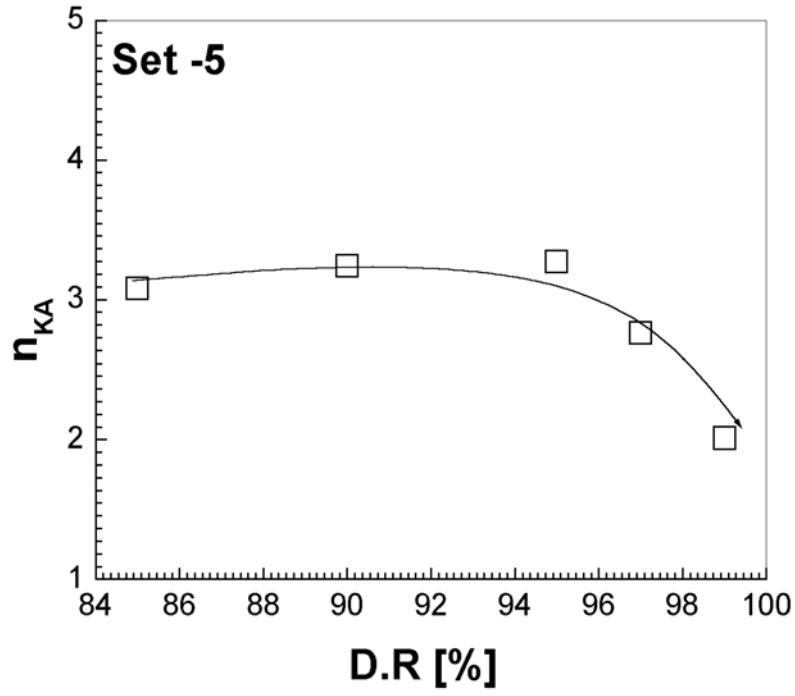
Optik geçirgenlik verilerinden faydalanarak hesaplanan Tauc optik bant aralıkları, Şekil 4.82'de verilmektedir. Şekil 4.82'de verilen çizimde doğrusal değişimlerin

foton enerjisi eksenini kestiği noktalar Tauc bant aralığını göstermektedir. Şekil 4.83’de Tauc çizimiyle elde edilen Tauc bant aralığının seyreltme miktarına bağlı değişimleri verilmektedir. Şekildeki değişim incelendiğinde Tauc bant aralığının artan seyreltme miktarıyla büyüdüğü gözlenmektedir. Helyum seyreltme oranı % 85-% 99 arasında değişirken, Tauc bant aralığı 1,65 eV’lardan 1,76 eV’lara yükselmiştir. Tauc bant aralığındaki değişim 0,11 eV kadardır.



Şekil 4.84. Set-5 örneklerinin büyüme hızlarının helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.

Sisteme sürülen helyum oranına bağlı olarak herhangi bir alaşım yada katkı gazı kullanmaksızın Tauc bant aralığı 0,11 eV civarında değiştirilebilmiştir. Şekil 4.84’de hazırlanan örneklerin seyreltme oranına bağlı olarak büyüme hızlarının değişimi verilmektedir. % 85 seyreltme oranında hazırlanan örneğin büyüme hızı 9,5 Å/s olup seyreltme oranı arttıkça film büyüme hızı düşmektedir. % 85-90 seyreltme aralığında film büyüme hızındaki değişim % 90-98 seyreltme aralığındakinden büyüktür. Bu da % 85-90 seyreltme aralığındaki plazma reaksiyonun, diğer aralıktakinden daha hızlı olduğunu göstermektedir.

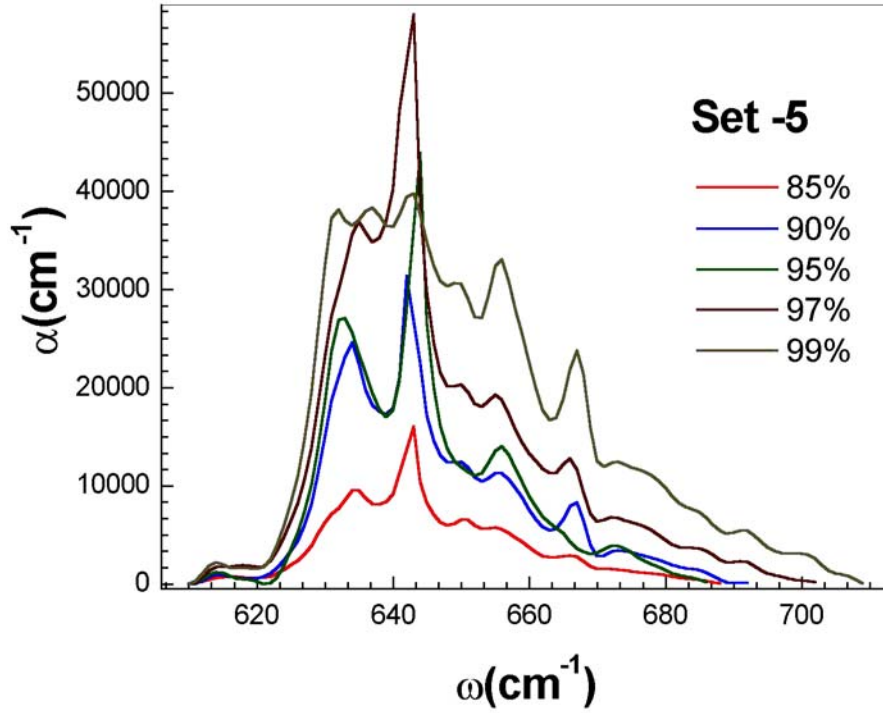


Şekil 4.85. Set-5 örneklerinin kırmızıaltı kırma indisi değerlerinin değişimi.

Şekil 4.85'te optik geçirgenlik verilerinden hesaplanan kırmızıaltı kırma indisi değerlerinin helyum seyreltme oranına bağlı değişimleri sunulmaktadır. Şekildeki değişimde % 85 seyreltme oranında büyüyen örneğin kalın olmasına rağmen, kırma indisi değeri 3 civarındadır. % 95 seyreltme oranından sonra filmlerin kırma indisi küçülerek yaklaşık 2'ye düşmüştür. Genel değişim incelendiğinde ise, tüm seyreltme oranı aralığında kırma indisindeki değişimin 3,25 ile 2 arasında olduğu görülmektedir. En düşük kırma indisi değeri sergileyen örneğin hazırlanmasında en düşük silan ve en yüksek helyum gaz miktarlarının kullanılması sebebiyle, bu örneğin büyüme sürecinde silisyum atomlarının enerjice kararlı sitelere yerleşememesi yada yüksek yüzey mobilitelerinden dolayı yapıdan dışarıya atılmış olabilecekleri ihtimali akla gelmektedir.

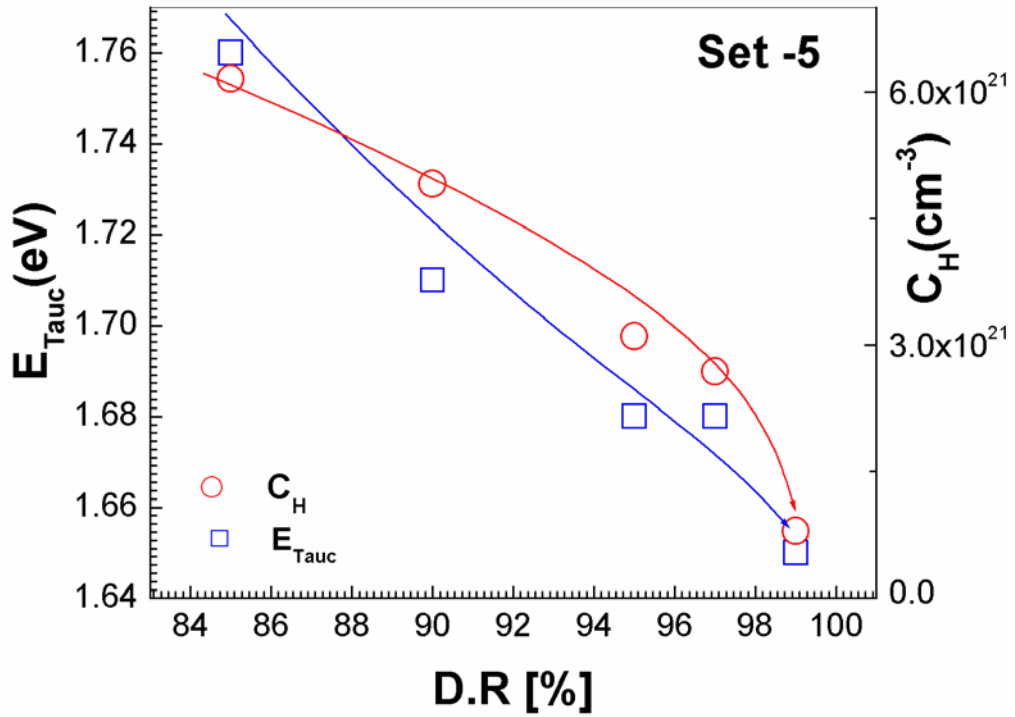
4.6.2. Fourier dönüşümü kırmızıaltı (KA) spektrumları

Şekil 4.86'da set-5 örneklerine ait 600-800 cm^{-1} dalga sayısı aralığında optik geçirgenlik verileri kullanılarak hesaplanan FTIR soğurma eğrileri verilmektedir.



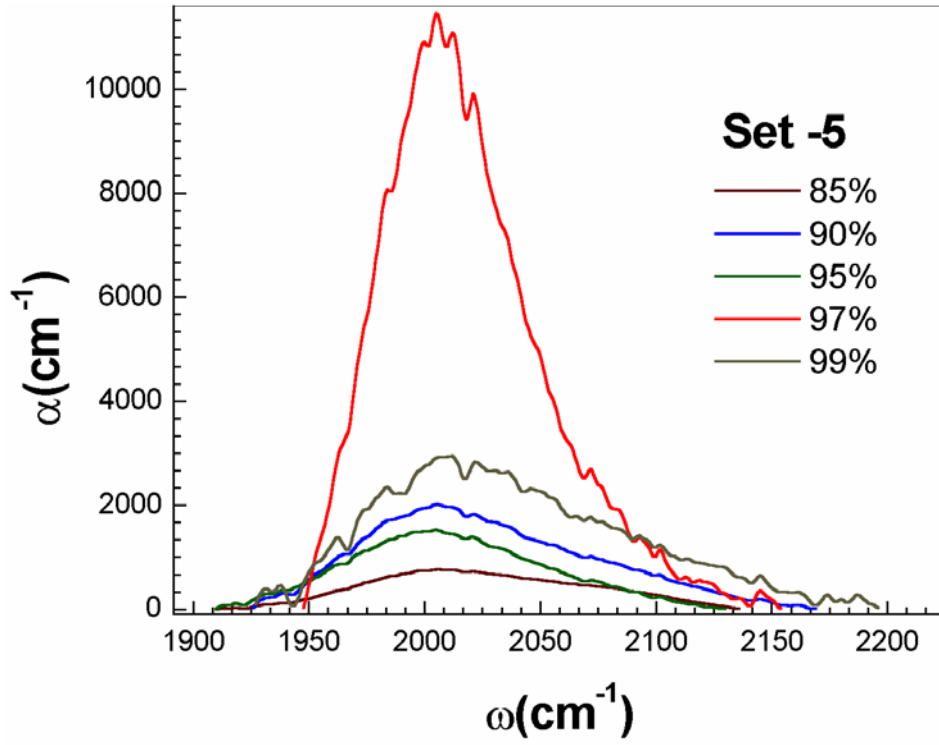
Şekil 4.86. Set-5 örneklerinin kırmızıaltı soğurma spektrumları.

Şekil 4.86'daki değişimler incelendiğinde 630 ve 640 cm^{-1} bandı civarlarında gözlenen soğurma pikleri, set-5 örneklerinin bağlı hidrojen bulundurduğunu göstermektedir. 630 cm^{-1} bandından 700 cm^{-1} bandına doğru uzanan bölgelerde soğurma piklerinin iç içe girmesi sonucunda geniş fakat düşük şiddetli yayvan soğurma pikleri gözlenmektedir. 640 cm^{-1} bandından 700 cm^{-1} bandına doğru uzanan bölgedeki soğurma piklerinin tanımlı olduğu bir titreşim modu bulunamamıştır. Film oluşum sürecinde yapı içine katılan safsızlıkların buna neden olabileceği düşünülmektedir. Bu yüzden yayvan soğurma eğrileri içine çoklu gausiyen fonksiyonların çakıştırılması ile elde edilen 630 cm^{-1} bandındaki titreşim modu kullanılarak bağlı hidrojen oranı hesabı yapılmıştır. Şekil 4.86'daki soğurma eğrileri kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen bağlı hidrojen oranının RF gücüne bağlı değişimi Şekil 4.87'de verilmektedir. Şekil 4.87'deki değişimde sol eksen optik geçirgenlik verilerinin değerlendirilmesi ile elde edilen Tauc optik aralığını, sağ eksen ise, 630 cm^{-1} bandından hesaplanan bağlı hidrojen oranını göstermektedir.



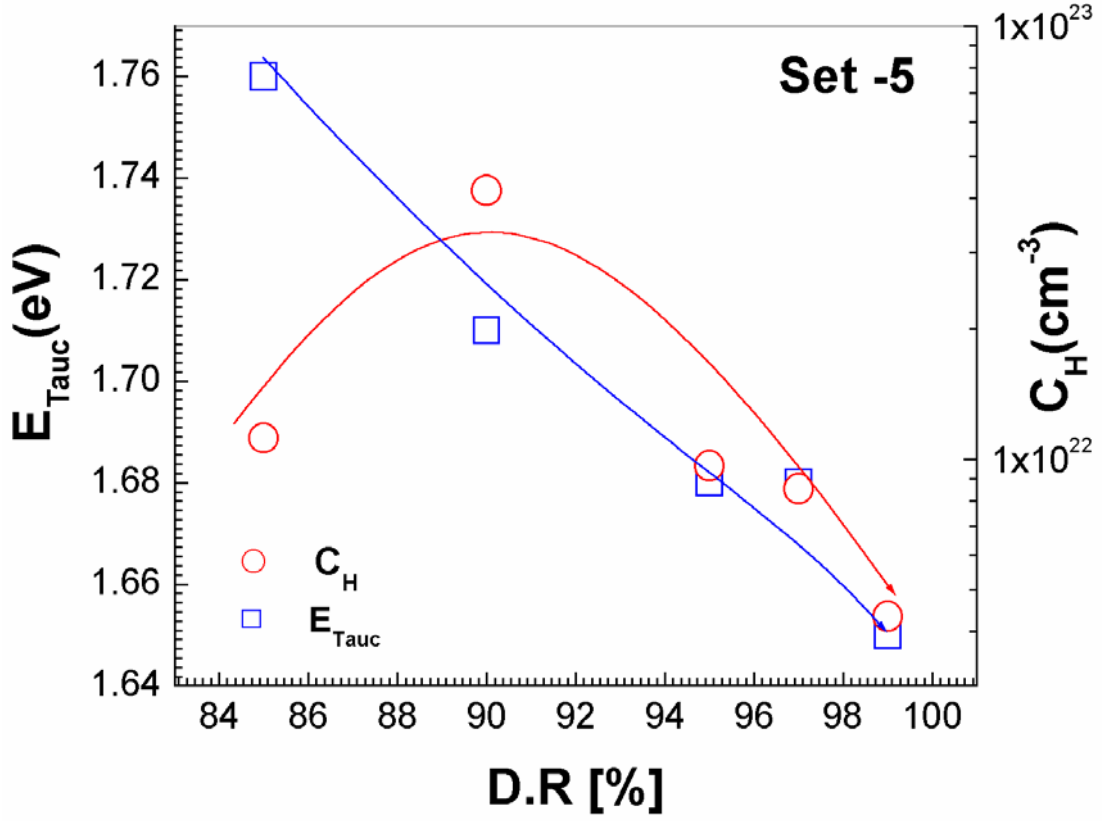
Şekil 4.87. Set-5 örneklerinin bağlı hidrojen oranları (630 cm⁻¹).

Şekil 4.87'deki değişim incelendiğinde seyreltme oranına bağlı olarak, Tauc bant aralığının küçüldüğü gözlemlenmektedir. Amorf yapı içindeki Si-H bükülme modundan hesaplanan bağlı hidrojen oranının Tauc bant aralığındaki değişime paralel olarak azaldığını görülmektedir. Bu gözlem, Tauc bant aralığını, bağlı hidrojen oranının kontrol ettiğini göstermektedir. Yapıdaki hidrojen oranının değişimi seyreltme oranına bağlı olarak $6,5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ - $0,5 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ arasında değişirken Tauc optik bant aralığı da 1,76 eV ile 1,65 eV arasında değişmektedir. Bu değerler literatürde rapor edilen standart a-Si:H örneklerin sergilediği değerlerle uyum içerisindedir.



Şekil 4.88. Set-5 örneklerinin kırmızıaltı soğurma spektrumları (1900-2200 cm^{-1}).

Şekil 4.88'de 1900-2200 cm^{-1} titreşim bandı aralığındaki soğurma spektrumu verilmektedir. Şekil 4.88'de verilen değişim incelendiğinde soğurma spektrumunun helyum seyreltme oranına bağlı olarak keskin değişimler sergilediği gözlemlenmektedir. Özellikle % 97 helyum seyreltme oranında hazırlanan örneğin, 2000 cm^{-1} 'deki titreşim bandı oldukça keskin bir soğurma pikine sahiptir ve yarı çizgi genişliği de diğer örneklerle kıyaslandığında daha dardır. % 97'den daha düşük seyreltme oranında hazırlanan örnekleri incelendiğinde ise, bu örneklerin soğurma piklerinin şiddetlerinin küçülerek yarı çizgi genişliklerinin genişlediği görülmektedir.



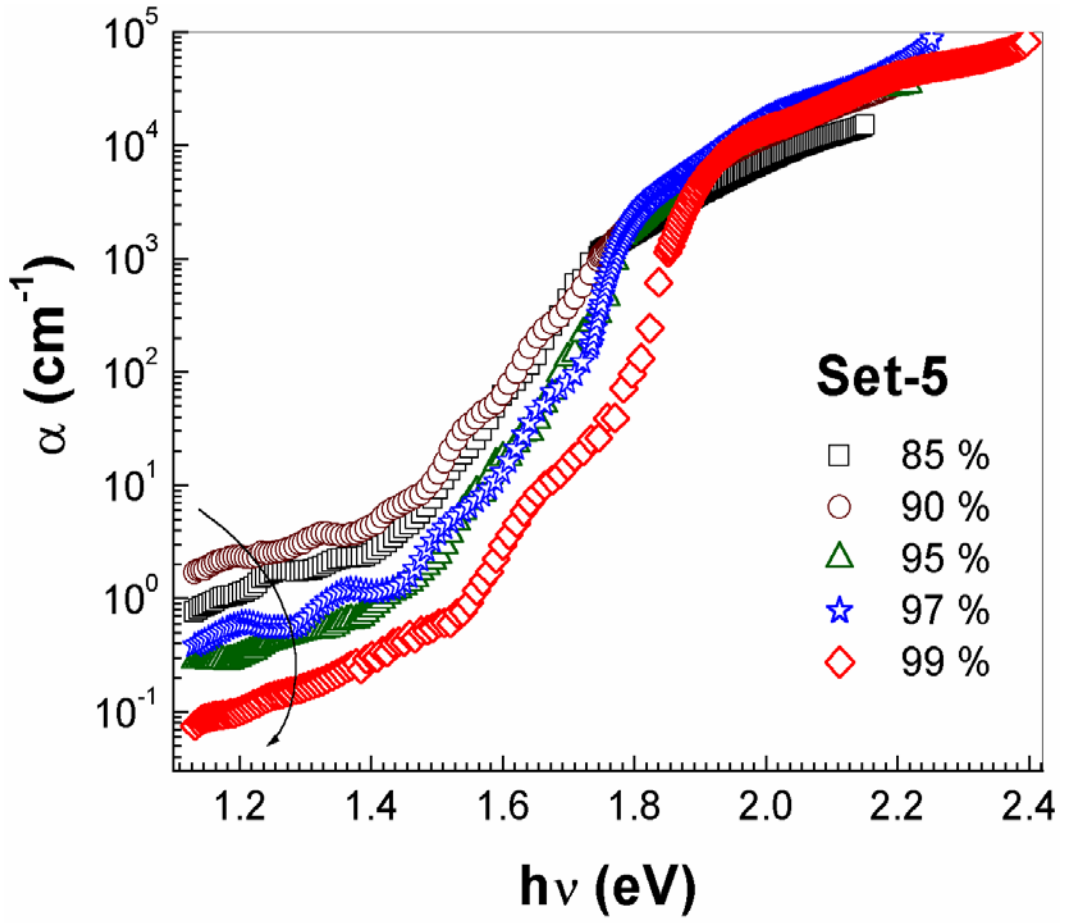
Şekil 4.89. Set-5 örneklerinin bağlı hidrojen oranları (2000 cm⁻¹).

Şekil 4.88'deki değişimler incelendiğinde, Si-H gerilme modlarının yapıda oldukça başat olduğunu fakat daha düşük helyum seyreltme oranlarına gidildiğinde, Si-H gerilme moduna eşlik eden başka yabancı titreşim modlarının aktive olmasıyla birlikte bu bandın genişlediği düşünülmektedir. Şekil 4.89'da 1900-2200 cm⁻¹ titreşim bandındaki soğurma spektrumu kullanılarak 2000 cm⁻¹ titreşim bandı üzerinden hesaplanan bağlı hidrojen oranları verilmektedir. Bağlı hidrojen oranları % 90 seyreltme oranına kadar artmış, fakat % 90 seyreltme oranından sonra hızla küçülmeye başlamaktadır. Tauc bant aralığı seyreltme oranı arttıkça azalmış ve 630 cm⁻¹ bandından hesaplanan Tauc bant aralığı değişimleri ile aynı davranışı sergilemektedir. Amorf yapı içerisindeki Si-H bağlarındaki hidrojen konsantrasyonunun azalması, Si-H gerilme modundaki hidrojen atomlarının sayısının azalmasına neden olduğundan, Si-H gerilme moduna ait titreşiminin şiddetinin düşmesine neden olmuştur. Şekil 4.89'daki değişimden bağlı hidrojen oranı miktarının 6x10²² cm⁻³ ile 4x10²¹ cm⁻³ arasında değiştiği görülmektedir. Bu değerler 630 cm⁻¹ bandından hesaplan hidrojen oranından bir mertebe daha büyüktür. Bu da set-5 örneklerinin Si-H gerilme modlarındaki hidrojen oranının daha fazla

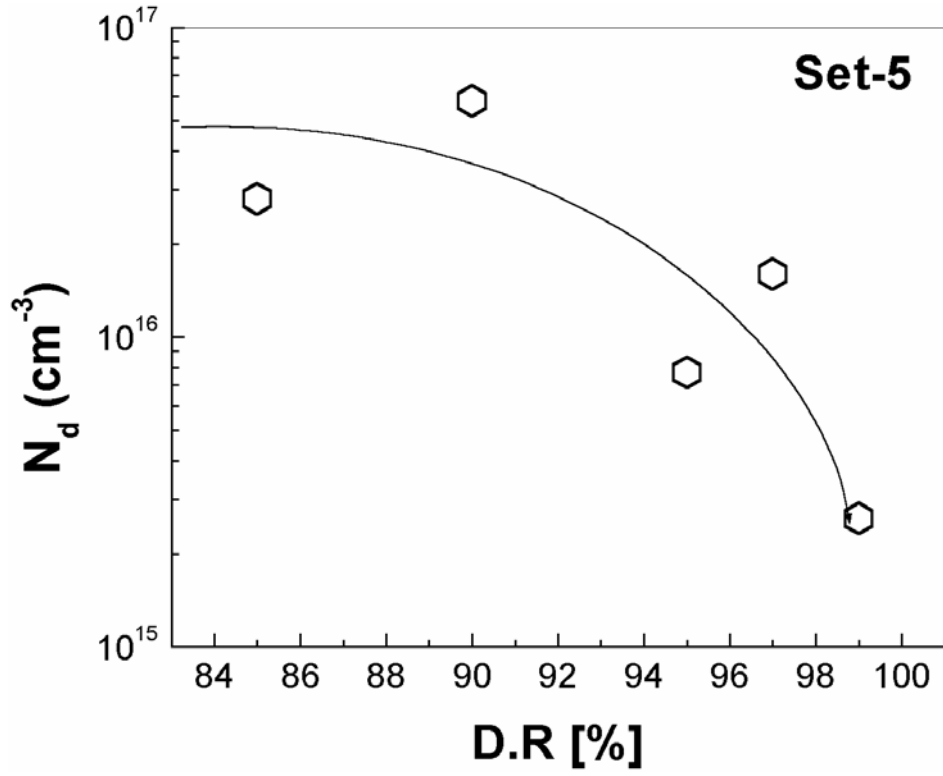
olduğunu, diğer bir deyişe yapıda Si-H bağına ait titreşim modlarından, gerilme modunun bükülme modundan daha muhtemel olduğunu söylemektedir.

4.6.3. CPM sonuçları

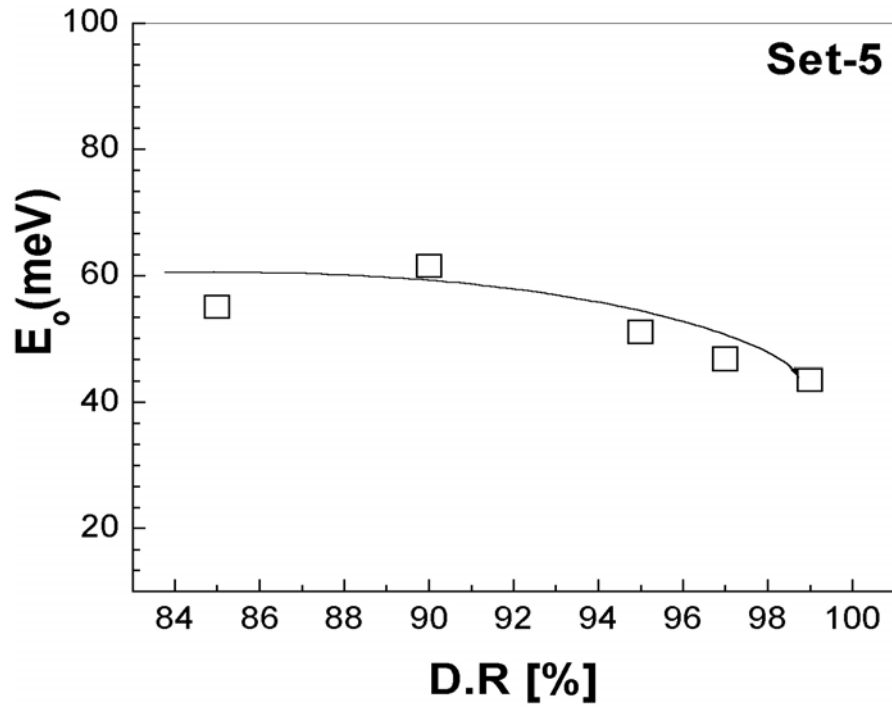
Şekil 4.90'da farklı helyum seyreltme oranlarında hazırlanmış örneklerin CPM spektrumları verilmektedir.



Şekil 4.90. Farklı helyum seyreltme oranlarında elde edilen örneklerin CPM spektrumları.



Şekil 4.91. Set-5 örneklerinin kusur yoğunluğunun helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.



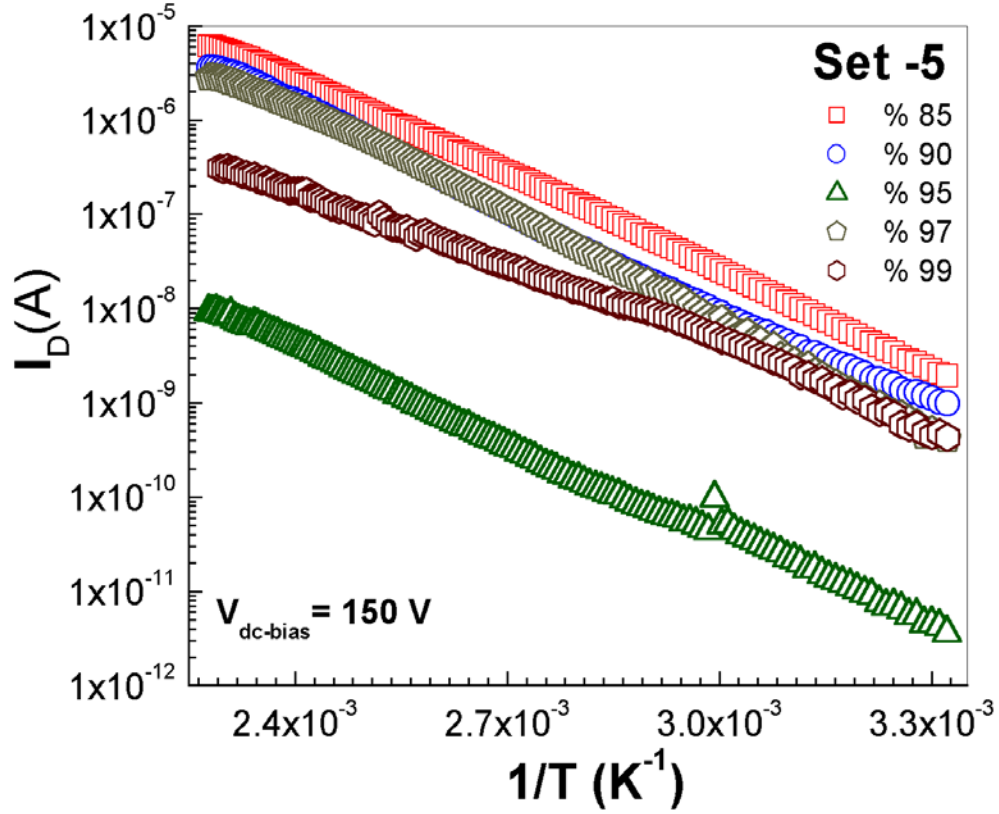
Şekil 4.92. Set-5 örneklerinin Urbach enerjisinin helyum seyreltme oranına bağlı değişimi.

Hesaplanan kusur yoğunluklarının helyum seyreltme oranına bağılı değişimi Şekil 4.91'de verilmektedir. Kusur yoğunluğu en düşük olan örnek ($2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) % 99 helyum seyreltme oranında hazırlanan örnektir.

Şekil 4.91'de verilen değişimde, seyreltme oranına bağılı olarak kusur yoğunluğunda bir mertebelik bir değişim gözlemlenmektedir. % 85 helyum seyreltme oranında hazırlanan örneğin kusur yoğunluğu $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ civarında iken % 99 seyreltme oranında hazırlanan örneğin kusur yoğunluğu $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 'tir. $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ kusur yoğunluğu, şu ana kadar literatürde rapor edilmiş en düşük kusur yoğunluğuna sahip olan örnek olarak dikkat çekmektedir. Şekil 4.92'de CPM spektrumundan faydalanılarak elde edilen Urbach enerjilerinin değişimi verilmektedir. Urbach enerjisinin helyum seyreltme oranına bağılı olarak değişimi incelendiğinde artan helyum oranıyla birlikte Urbach enerjisinin de küçülmeye başladığını gözlemlenmektedir. Urbach enerjisinin değeri % 99 helyum seyreltilmiş örnek için 43,5 meV değerlerine kadar düşmüştür. 43,5 meV'luk Urbach enerji değeri, literatürde yer alan en düşük Urbach enerji değerine oldukça yakın olması sebebiyle önemlidir. Seyreltme oranı ile Urbach enerjisinin değişimi incelendiğinde değerlerin, 43,5-61,5 meV arasında değişim sergilediğini gözlemlenmektedir. Bu değerler sadece saf silan gazı ile hazırlanan standart a-Si:H örneklerin sergilediği değerlerden oldukça küçük değerlerdir. Bu yüzden silan gazının uygun miktarlardaki helyumla seyreltilmesiyle hazırlanan plazmanın a-Si:H'in oluşum sürecine olumlu katkılar getirerek, örneklerin optik ve elektriksel özelliklerinin iyileşmesine neden olmaktadır. Bu noktaya kadar yapılan çalışmalarda çıkarılan sonuç; 1200mTorr toplam gaz basıncı, % 99 seyreltme oranı, 19,9 W RF gücü, 230 °C alttaş sıcaklığının düşük kusur yoğunluğuna sahip örnek hazırlamak için optimum koşullar olduğudur.

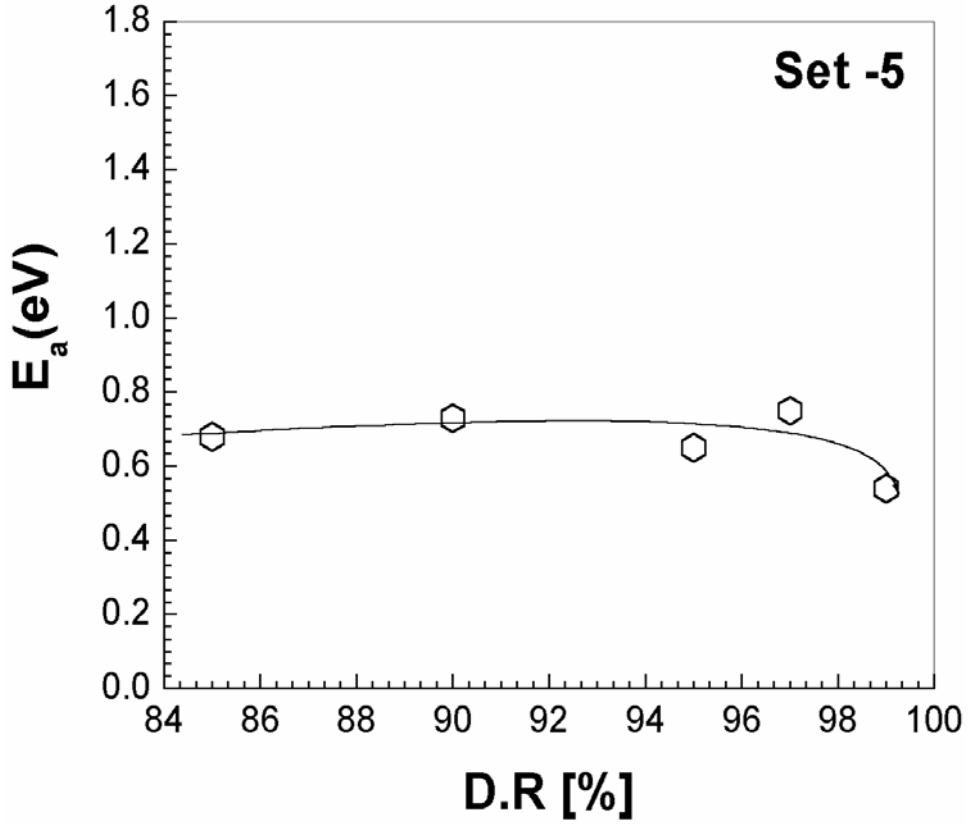
4.6.4. Karanlık iletkenlik ölçümleri

Karanlık iletkenlik ölçümleri kapalı devre helyum soğutmalı sistemde gerçekleştirildi. Ölçüm için yüksek gerilim kaynağı yardımıyla örneğe sabit bir gerilim uygulanmış ve ilgilenilen sıcaklık değerlerinde örnekten geçen akım elektrometre yardımıyla ölçülmüştür. Örneğe uygulanan dc gerilim değeri örneğin ohmik davrandığı bölge içinden seçilmiştir.



Şekil 4.93. Set-5 örneklerinin sıcaklığa bağlı karanlık akım ölçüm sonuçları.

Her örnek için incelenen sıcaklık aralığı oda sıcaklığı ile 440 K arasında olup 1 K'lık adımlar ile ölçüm yapılmıştır. Şekil 4.93' de set-5 örneklerinin karanlık iletkenlik sonuçları verilmektedir. Şekil 4.93 'deki değişim incelendiğinde yarı logaritmik eksenlerdeki değişimin oldukça doğrusal bir davranış sergilediği görülmektedir. Her örnek için Arrhenius gösterimindeki bu grafik yardımıyla denklem (4.3.) kullanılarak örneklerin karanlık iletkenlik aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır.



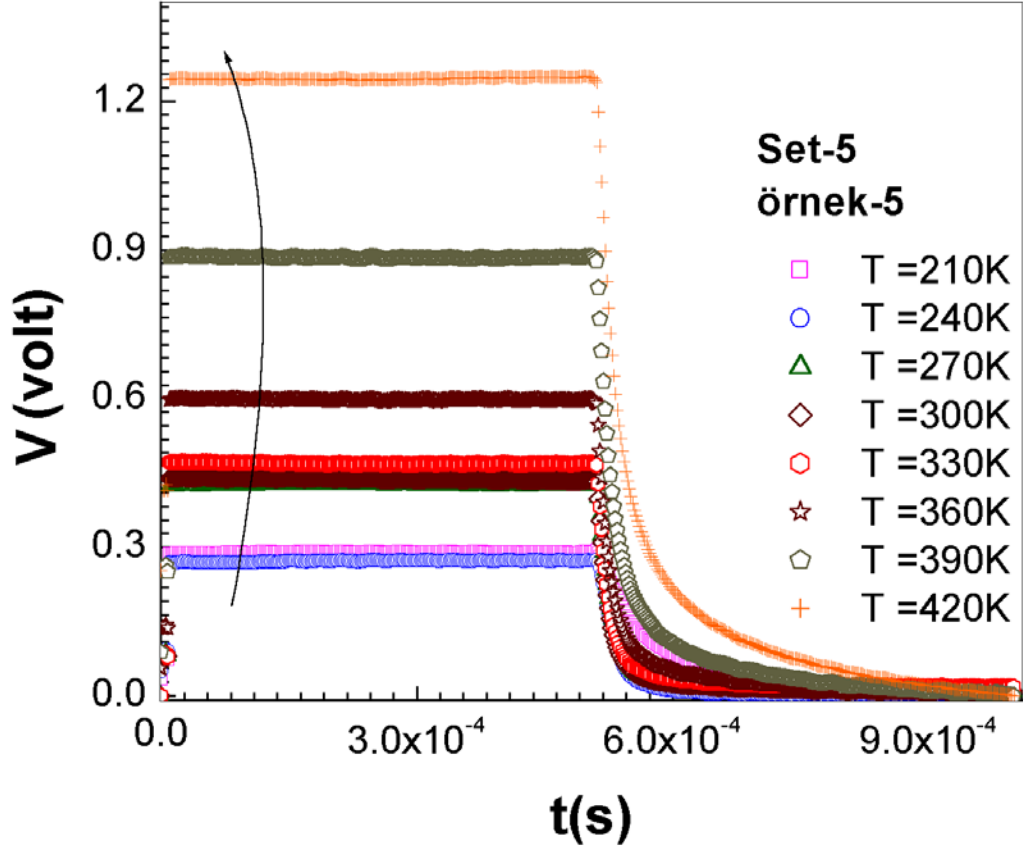
Şekil 4.94. Set-5 örneklerinin karanlık akım aktivasyon enerjilerinin değişimi.

Şekil 4.94'te farklı helyum seyreltme oranlarında elde edilen örneklerin karanlık akım ölçümleri sonucunda elde edilen aktivasyon enerjilerinin helyum seyreltme oranına bağlı değişimleri verilmektedir. Şekildeki değişim incelendiğinde aktivasyon enerjisi 0,1 eV düzeyinde bir artış göstermiş fakat, % 97 seyreltme oranından sonra düşüş sergilemektedir. Aktivasyon enerjisi katkısız bir yarı iletken için iletkenlik bandı ile fermi enerjisi arasındaki enerjice mesafeyi vermektedir. Yüksek helyum seyreltme oranlarına gidildiğinde bu mesafenin küçülerek 0,54 eV düzeyine ulaştığı gözlemlenmiştir. Benzer değişimler set-2 örneklerinde de gözlemlenmiştir.

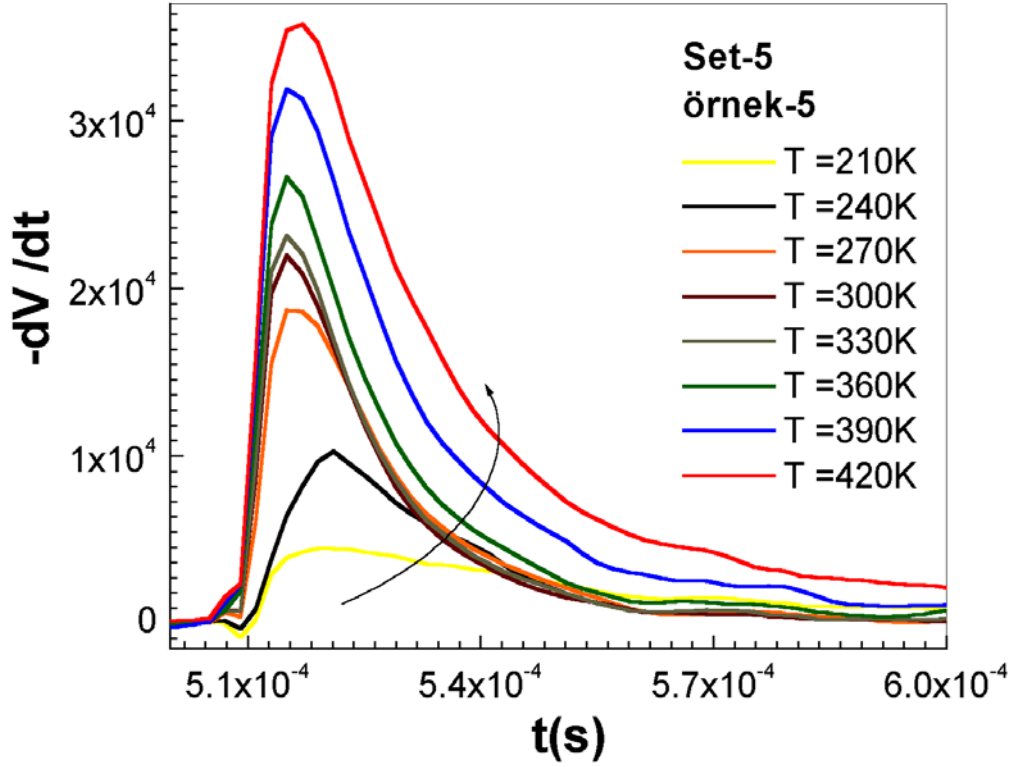
4.6.5. Fotoiletkenlik tepki süresinin ölçülmesi ve elektronların sürüklenme mobilitésinin hesaplanması

Bu kesimdeki deneylerin amacı, set-5 örneklerinden en düşük kusur seviyesine sahip olan örneğin kararlı durum fotoiletkenliğini ve sürüklenme mobilitésini

hesaplamaktır. Bu yüzden üzerinde fotoiletkenlik ve fotoiletkenlik tepki süresi ölçümleri yapılan örnek % 99 helyum seyreltme oranında hazırlanmış olan 5 numaralı örnektir. Ölçümler 210 K ile 420 K sıcaklık aralığında 10 K'lık adımlarla yapılmıştır. Şekil 4.95'de dijital osiloskop yardımıyla kaydedilmiş fotoiletkenlik tepki süresi verileri verilmektedir.

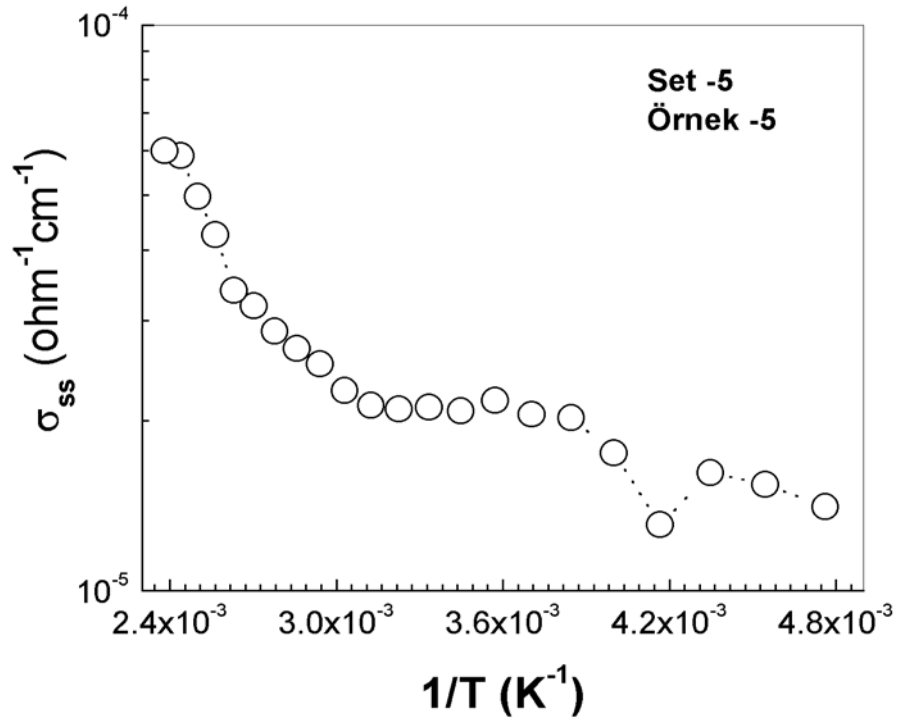


Şekil 4.95. Set-5 örnek-5'in fotoiletkenlik tepki süresinin birkaç sıcaklık değeri için gösterimi.

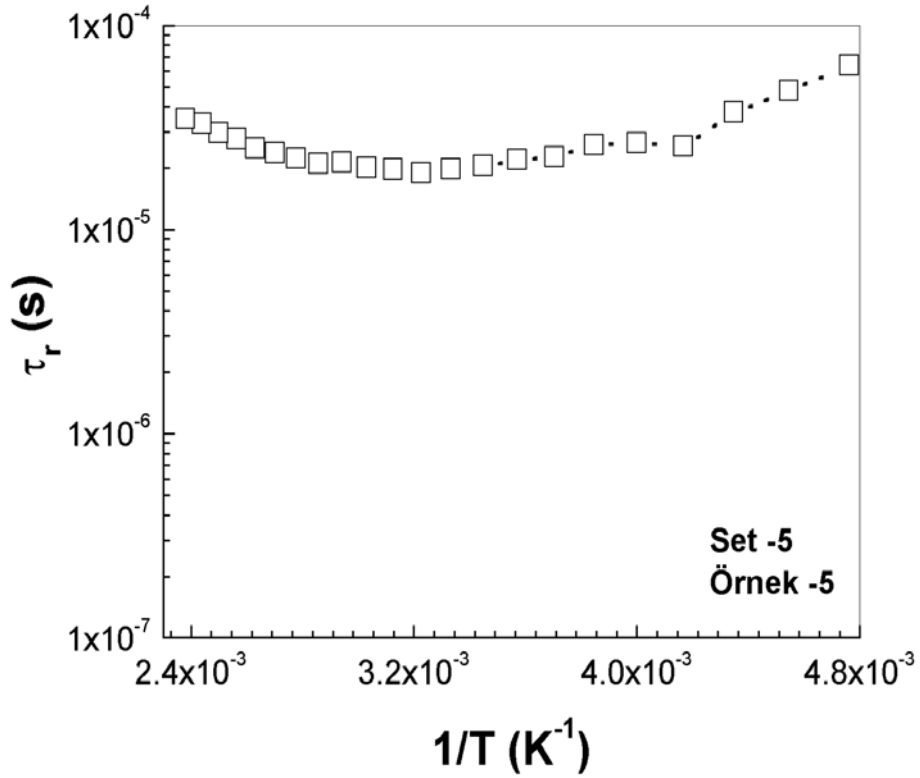


Şekil 4.96. Set-5 örnek-5'in fotoiletkenlik tepki süresi verilerinin zamana göre nümerik olarak alınmış birinci dereceden türev değerlerinin zamana bağlı değişimleri.

Şekil 4.95'deki değişim incelendiğinde, fotoiletkenlik değerlerinin kararlı bir değere ulaşmasından sonra, monokromatik ışık kaynağının kapanmasıyla fotoiletkenlik değerleri eksponasiyel olarak hızla küçülmeye başlamaktadır. Sıcaklığın yükselmesiyle birlikte kararlı fotoiletkenlik doyum bölgesinin şiddetinde de artmaya başladığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.96'da, fotoiletkenlik tepki süresi verilerinin zamana göre alınmış nümerik türev değerleri verilmektedir. Sıcaklığın yükselmesiyle birlikte ekstramum noktasının şiddetinin arttığı gözlemlenmektedir. Buda tepki süresi değerlerinin artan sıcaklıkla küçüldüğüne işaret etmektedir. Standart a-Si:H ince filmlerde de benzer değişim gözlenmişti. Şekil 4.97'de kararlı durum fotoiletkenlik değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri verilmektedir. 210 K ile 420 K sıcaklık aralığında gözlemlenen fotoiletkenlik değerlerinin 10^{-5} mertebesi içinde kaldığı, artan sıcaklıkla beraber fotoiletkenlik değerlerinin 1×10^{-5} 'lerden 6×10^{-5} değerlerine yükseldiği gözlenmektedir.



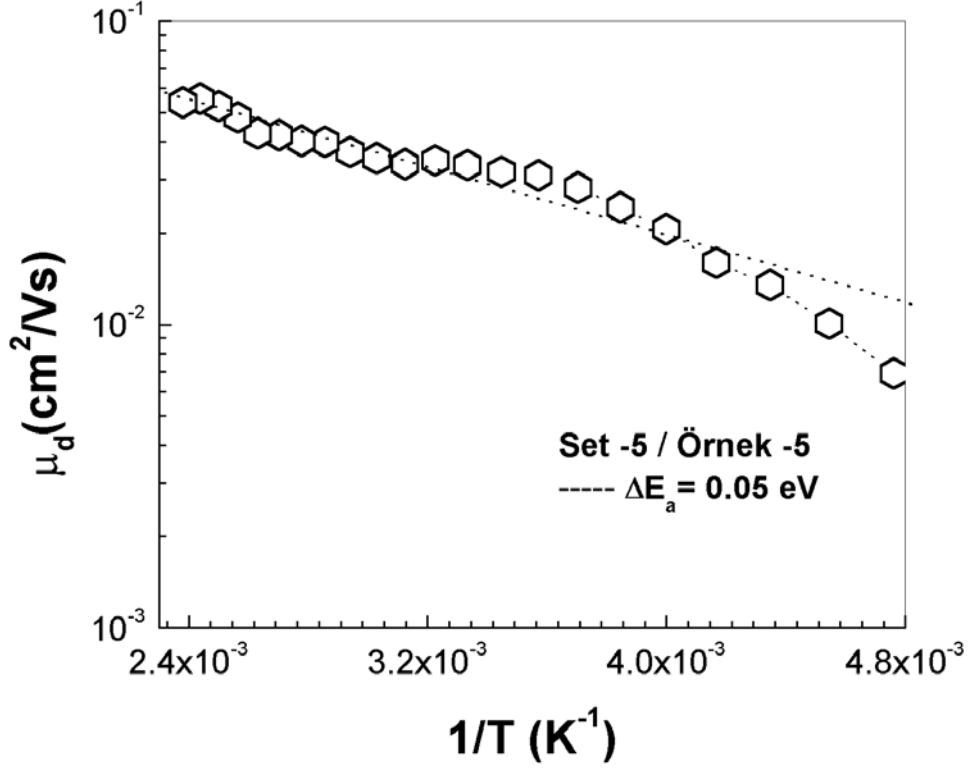
Şekil 4.97. Kararlı durum fotoiletkenliğinin 1/T ile değişimi.



Şekil 4.98. Fotoiletkenlik tepki süresinin 1/T ile olan değişimi.

Şekil 4.98’de fotoiletkenlik tepki süresi değerlerinin sıcaklıkla değişimi verilmektedir. Şekildeki değişim incelendiğinde artan sıcaklıkla birlikte fotoiletkenlik

tepki süresinin küçülmeye başladığı gözlemlenmektedir. 210 K ile 420 K sıcaklık aralığında tepki süresi düşük sıcaklıklarda 100 μ s civarında iken yüksek sıcaklarda ise 10 μ s'lere düşmüştür. Şekil 4.99'da kararlı durum fotoiletkenlik ve tepki süresi değerleri kullanılarak hesaplanan sürüklenme mobilitesinin sıcaklığa bağlı değişimi verilmektedir.



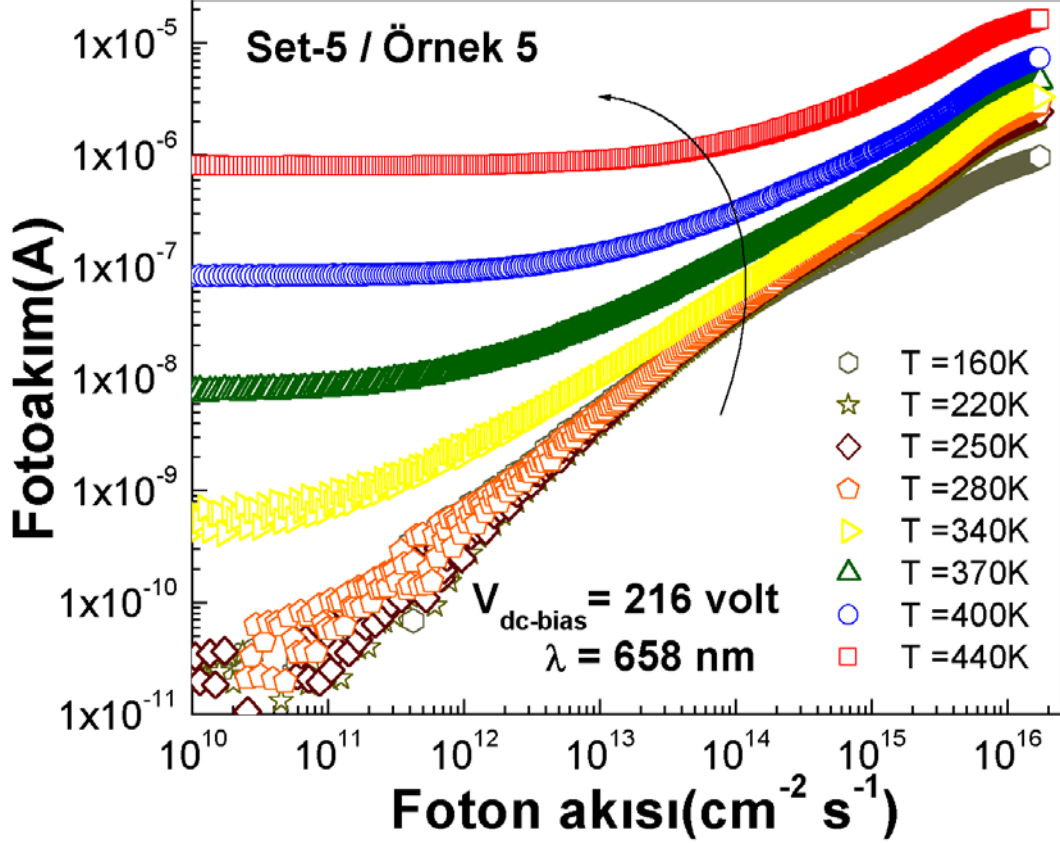
Şekil 4.99. Set-5 örnek-5'in (%99)'in sürüklenme mobilitesinin sıcaklıkla ($1/T$) değişimi.

Şekil 4.99'daki değişim incelendiğinde, sıcaklıkla aktivasyon türü bir davranış gözlemlenmektedir. Diğer örneklerde de benzer davranışın gözlemlendiği kaydedilmişti. Sürüklenme mobilitesinin sıcaklıkla gösterdiği aktivasyon türü davranış iletkenlik bant uzantısı genişliğinin bir ölçütüdür. Bu yüzden şekilde verilen değişimin üstel bir fonksiyona karşılaştırılmasıyla aktivasyon enerjisi hesaplanabilir. Sürüklenme mobilitesi verilerinin üstel bir fonksiyona karşılaştırılması sonucunda bulunan aktivasyon enerjisi 0,05 eV'tur.

4.6.6. Sıcaklığın fonksiyonu olarak foton akısına bağlı fotoiletkenlik ölçümleri

Sıcaklığın fonksiyonu olarak foton akısına bağlı fotoiletkenlik ölçümleri kapalı devre helyum soğutmalı sistemde 160 K-440 K sıcaklık aralığında 10 K'lik

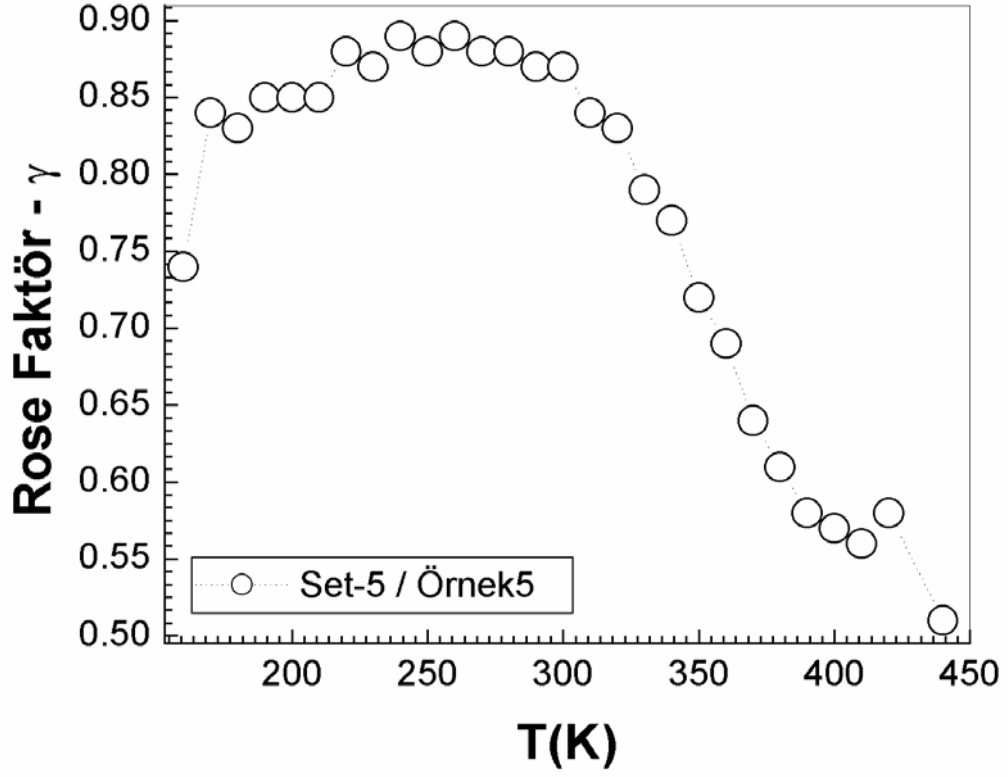
adımlarla yapılmıştır. Ölçümlerde örneğe 216 V dc gerilim uygulanmış ve elektrometre yardımıyla örnekten geçen akım ölçülmüştür. Foton akısı önceden kalibre edilmiş LED akımına karşın foton akısı değerleri ile tayin edilmiştir. Şekil 4.100'de foton akısına karşın örnekten okunan fotoakım değerleri kaydedilmiştir. Düşük sıcaklıklarda yüksek fotoiletkenlik değişimi sergileyen örnek yüksek sıcaklıklara gidildiğinde daha küçük değişimler sergilemektedir.



Şekil 4.100. Set-5 örnek-5'in farklı sıcaklıklarda foton akısına karşın fotoakımdaki değişimleri.

Şekil 4.100'deki değişim incelendiğinde 160 K sıcaklığında, değişen foton akılarında fotoiletkenlik 5 mertebe değişim sergilerken 440 K sıcaklığındaki değişimi sadece 1 mertebedir. Yüksek sıcaklıklarda elektronlar için sözde Fermi enerji seviyesinin iletkenlik bandına doğru yaklaşmasının bu tür bir değişime neden olabileceği düşünülmektedir. Düşük foton akısı değerlerinde fotoiletkenliğin sabit kaldıktan sonra artmaya başladığı ve bu artış noktalarının fotoiletkenliğin kurulmaya başladığı noktalar olduğu düşünülmektedir. Her sıcaklık değerinde fotoiletkenliğin doğrusal olarak arttığı gözlemlenen bölgelere doğrusal denklemler

çakıştırılarak Rose faktörü değerleri tayin edilmiştir. Her sıcaklık değeri için hesaplanan Rose faktörü değerleri Şekil 4.101'deki grafikte verilmektedir.



Şekil 4.101. Set-5 örnek-5'in Rose faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

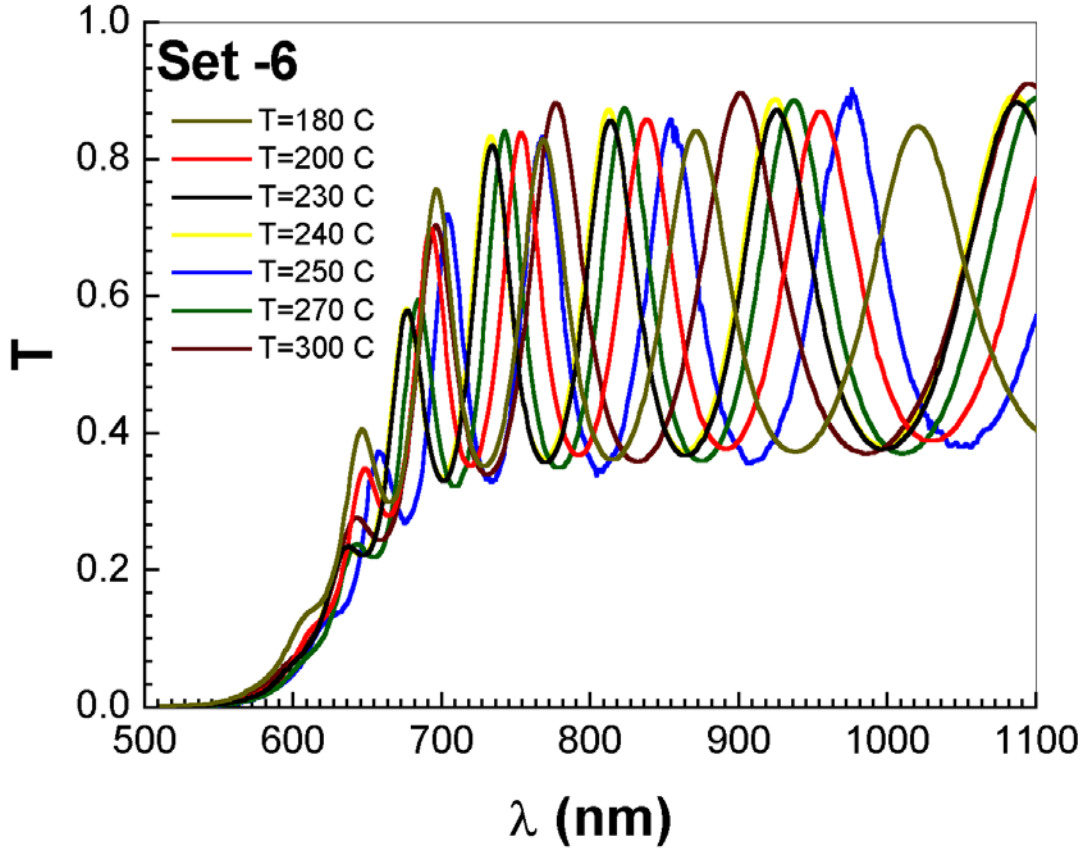
Şekil 4.101'deki değişim incelendiğinde Rose faktörü değerlerinin sıcaklığa bağlı olarak belirgin bir şekilde değiştiğini gözlemlemekteyiz. Sıcaklığa bağlı olarak 0,5-0,9 arasında değişim sergileyen Rose faktörü değerleri 270 K civarında maksimum değerine ulaştıktan sonra sıcaklığın yükselmesiyle birlikte exponansiyel olarak düşmektedir.

4.7. Set-6 Örnekleri

Bu kesimde, film hazırlama parametreleri Çizelge 4.1'de verilen set-6 örneklerinin optik ve elektriksel ölçüm sonuçları anlatılacaktır.

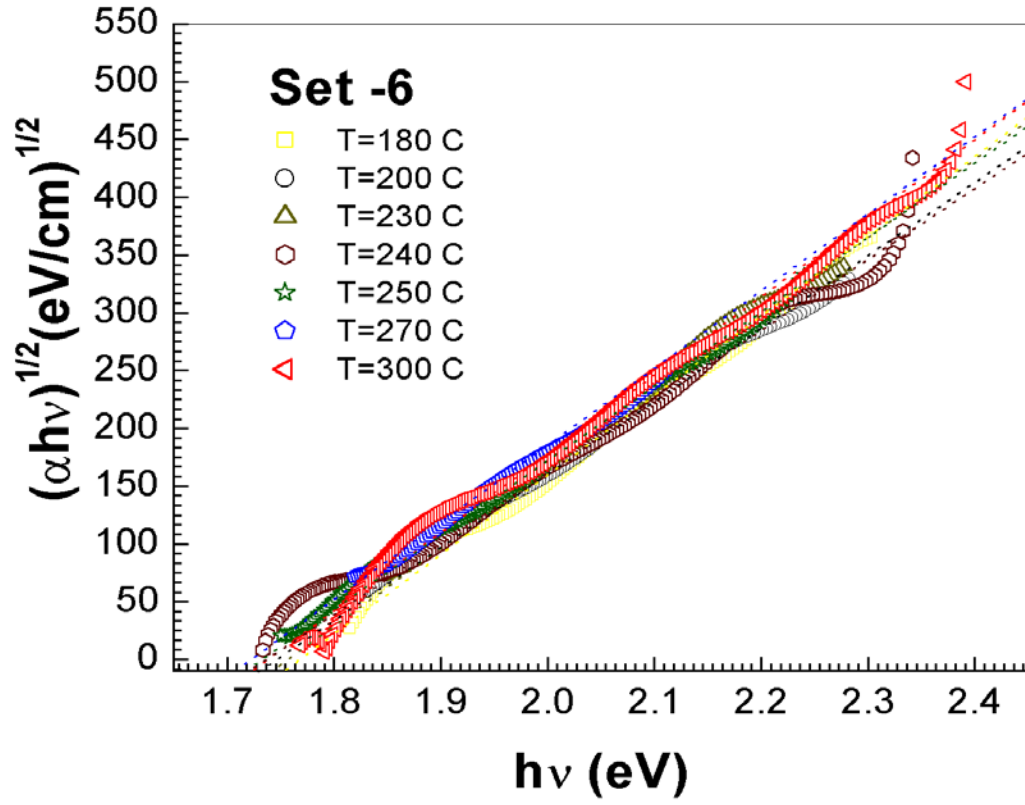
4.7.1. Optik geçirgenlik

Set 1-5 rneklerinin analizi sonucunda düşük kusur seviyeli örneklerin; 1200 mTorr toplam gaz basıncında, % 99 helyum seyreltme oranında, 19,9 W RF güç değerinde hazırlanabileceği saptanmıştır. Ancak alttaş sıcaklık optimizasyonu sadece saf silan gazı kullanılan örnekler için yapılmıştı.



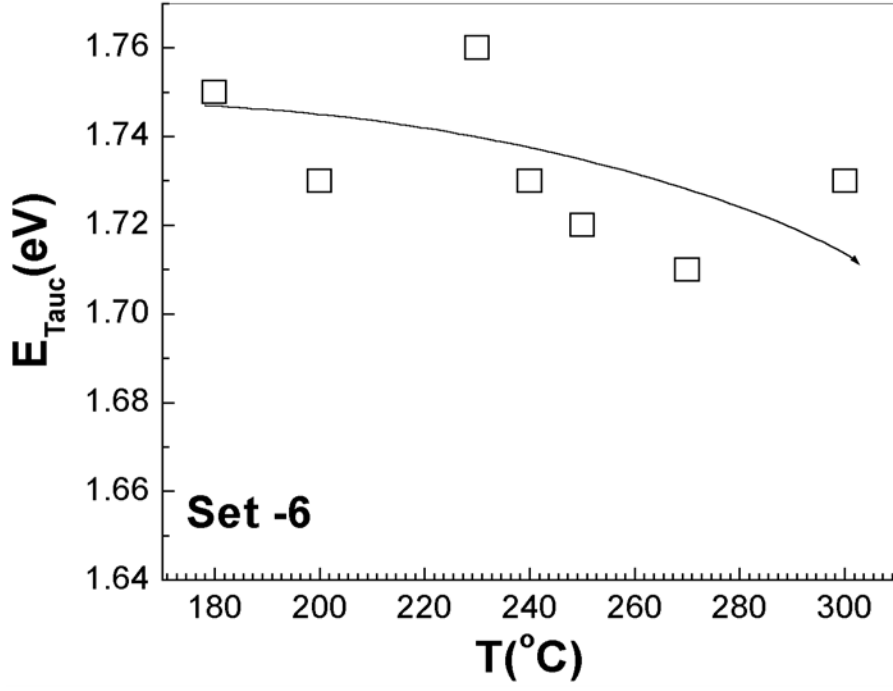
şekil 4.102. Set-6 rneklerinin optik geçirgenlik spektrumu.

Helyum silan gaz karışımının termodinamiksel yapısı saf silan gazınıninkinden farklı olabileceğinden, saf örnekler için optimize edilen alttaş sıcaklığı helyum seyreltilerek hazırlanmış örnekler için tekrar optimize edildi. Bu nedenden set-6 örnekleri, 180 C-300 C aralığında alttaş sıcaklıklarında hazırlanmıştır. Hazırlanan örneklerin optik geçirgenlik spektrumu şekil 4.102’de ve optik geçirgenlik verilerinden elde edilen Tauc izimi şekil 4.103’de verilmektedir. Alttaş sıcaklığına bağlı olarak Tauc bant aralığının belirgin bir şekilde değişmektedir.

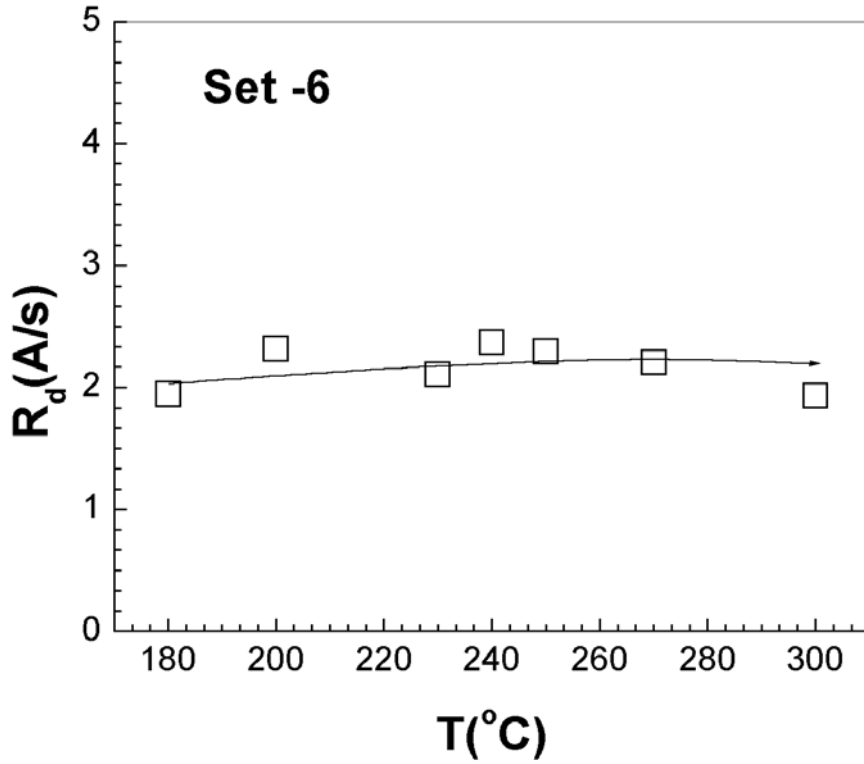


Şekil 4.103. Set-6 örneklerinin Tauc çizimleri.

Şekil 4.104’de, Tauc çizimiyle hesaplanan Tauc bant aralıklarının alttaş sıcaklığına bağlı değişimleri sunulmaktadır. Şekildeki değişim incelendiğinde alttaş sıcaklığının artmasıyla hazırlanan örneklerin Tauc bant aralıklarının 1,76-1,71 eV arasında olup 0,05 eV’lik bir değişim sergilediği görülmektedir.



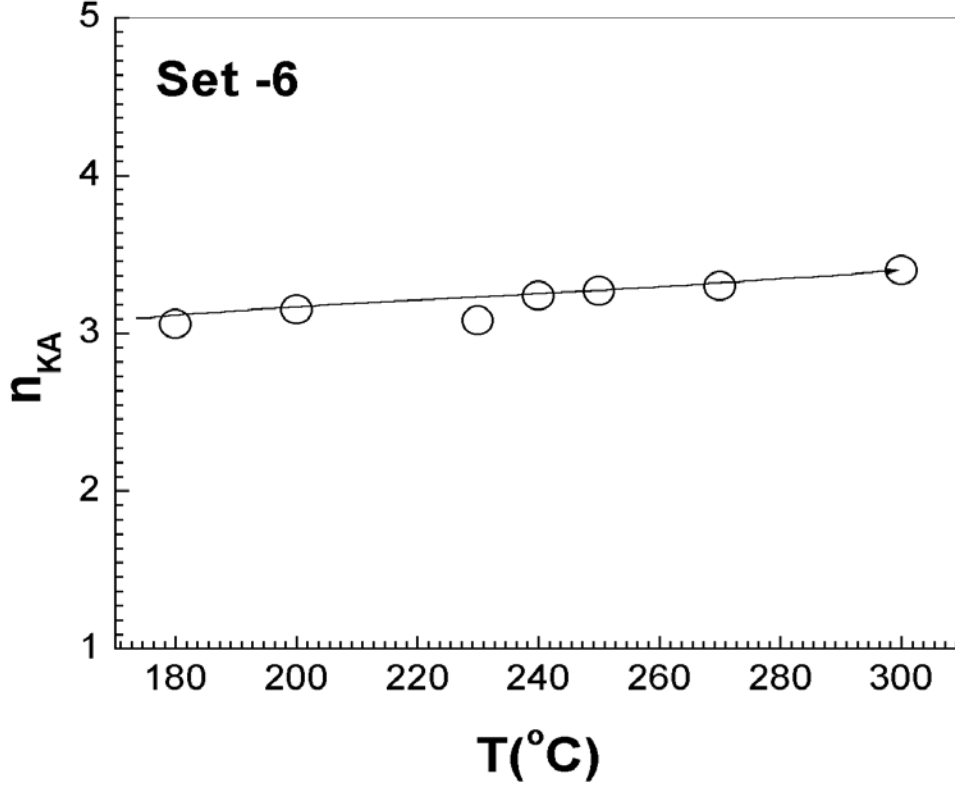
Şekil 4.104. Set-6 örneklerinin Tauc bant aralıklarının alttaş sıcaklığına bağlı değişimleri.



Şekil 4.105. Set-6 örneklerinin büyüme hızlarının alttaş sıcaklığına bağlı değişimi.

Optik parametrelerdeki değişimleri daha belirgin bir hale getirmek için optik geçirgenlik spektrumundan faydalanılarak, film kalınlıkları ve kırmızıaltı film kırma indisi değerleri hesaplanmıştır. Şekil 4.105'de film kalınlıklarından faydalanarak

hesaplanan film büyüme hızının alttaş sıcaklığı ile değişimi verilmektedir. Film alttaş sıcaklığına bağlı olarak film büyüme hızının 2-2,5 Å/s arasında değiştiği ve film büyüme hızının tüm örnekler için neredeyse aynı olduğunu varsayabiliriz. Film hazırlama süresi tüm örnekler için (70 dakika) eşittir.

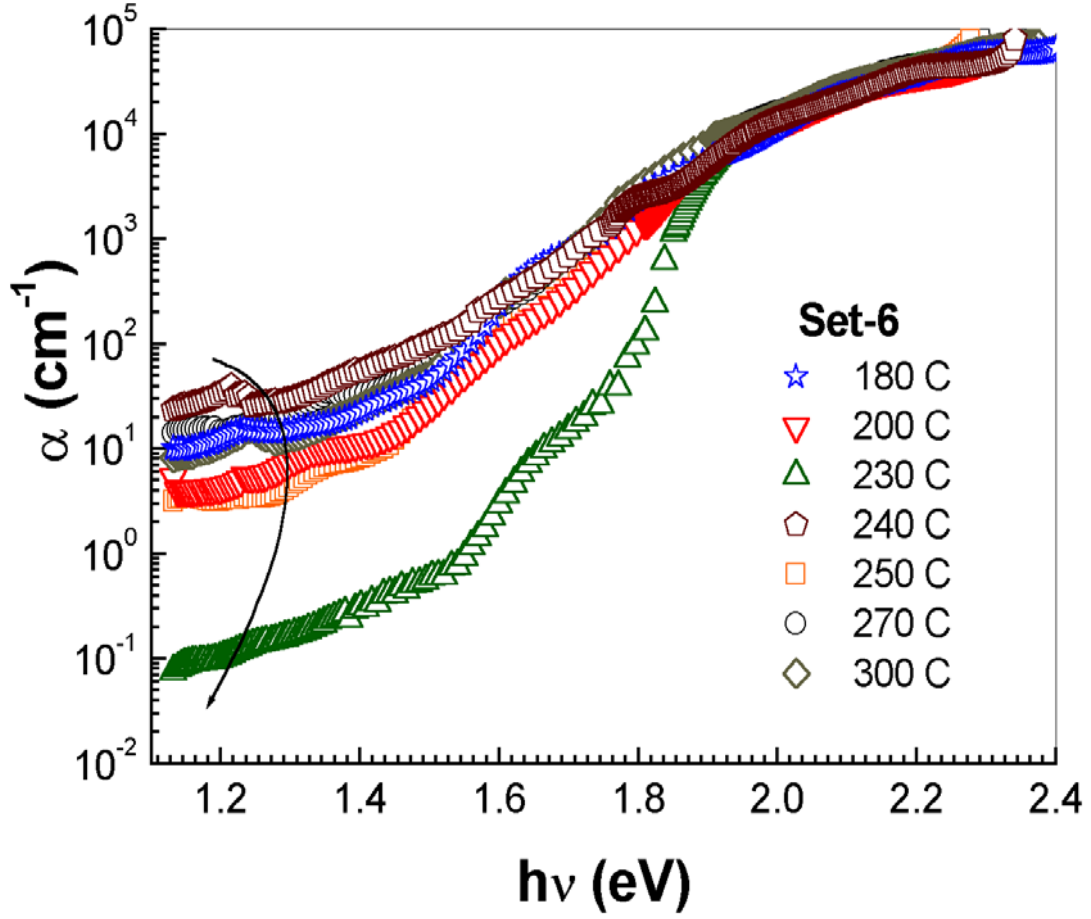


Şekil 4.106. Set-6 örneklerinin kırmızıaltı kırma indisi değerlerinin alttaş sıcaklığına bağlı değişimleri.

Şekil 4.106'da farklı alttaş sıcaklıklarında hazırlanan örneklerin kırmızı altı kırma indisi değerlerinin alttaş sıcaklığına bağlı değişimleri verilmektedir. Alttaş sıcaklığına bağlı olarak filmlerin kırma indisleri 3-3,4 arasında değişmektedir.

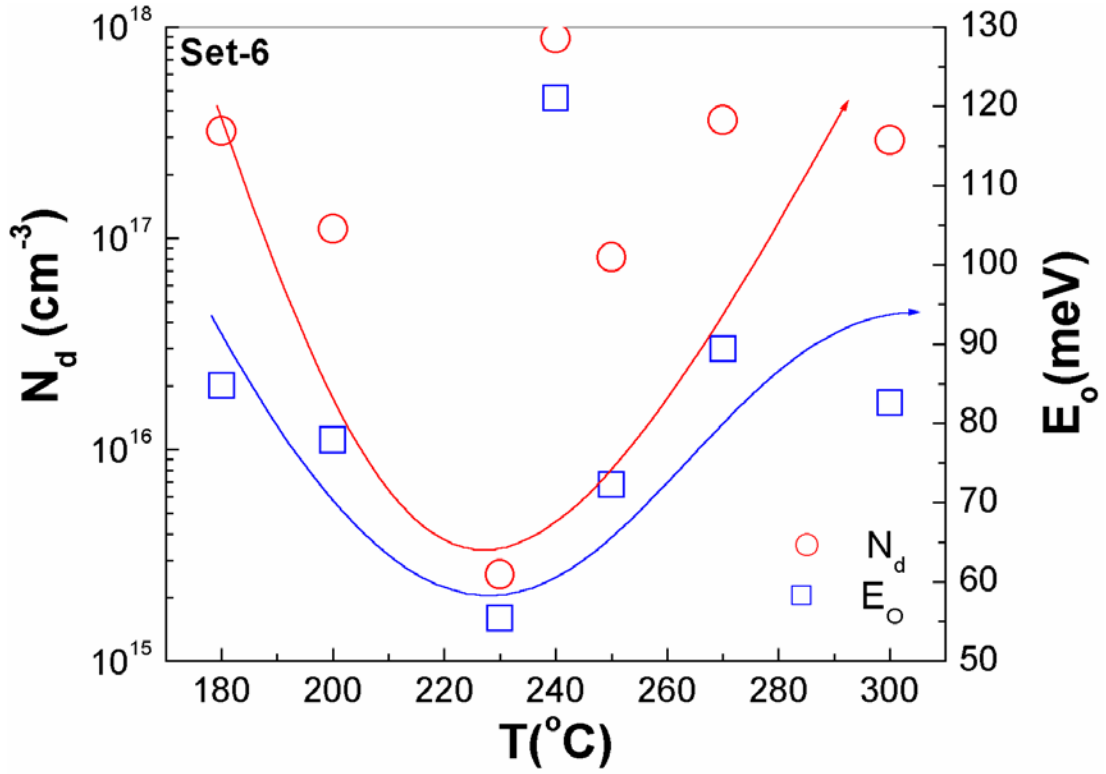
4.7.2. CPM sonuçları

Şekil 4.107'de set-6 örneklerinin oda sıcaklığında (293 K) ölçülen CPM spektrumları verilmektedir.



Şekil 4.107. Set-6 örneklerinin CPM spektrumları.

Şekil 4.107'deki değişim incelendiğinde 230 °C alttaş sıcaklığında hazırlanan örneğin 1,2 eV foton enerjisine karşılık gelen soğurma değerinin 0,1 olduğu görülmektedir. Bu da 230 °C alttaş sıcaklığında hazırlanan örneğin en düşük kusur seviyesine sahip olan örnek olduğunu göstermektedir. Şekil 4.108'de CPM spektrumlarından faydalanarak hesaplanan kusur yoğunluklarının ve Urbach enerjilerinin değişimleri verilmektedir. Grafiğin sol tarafındaki düşey eksen kusur yoğunluklarını sağ tarafındaki de Urbach enerji değerlerini göstermektedir. Urbach enerjisindeki değişimle kusur yoğunluğundaki değişimin birbirine paralel olması örgü içindeki düzensizliğin kusur düzeyleri ile kontrol edildiğini göstermektedir.

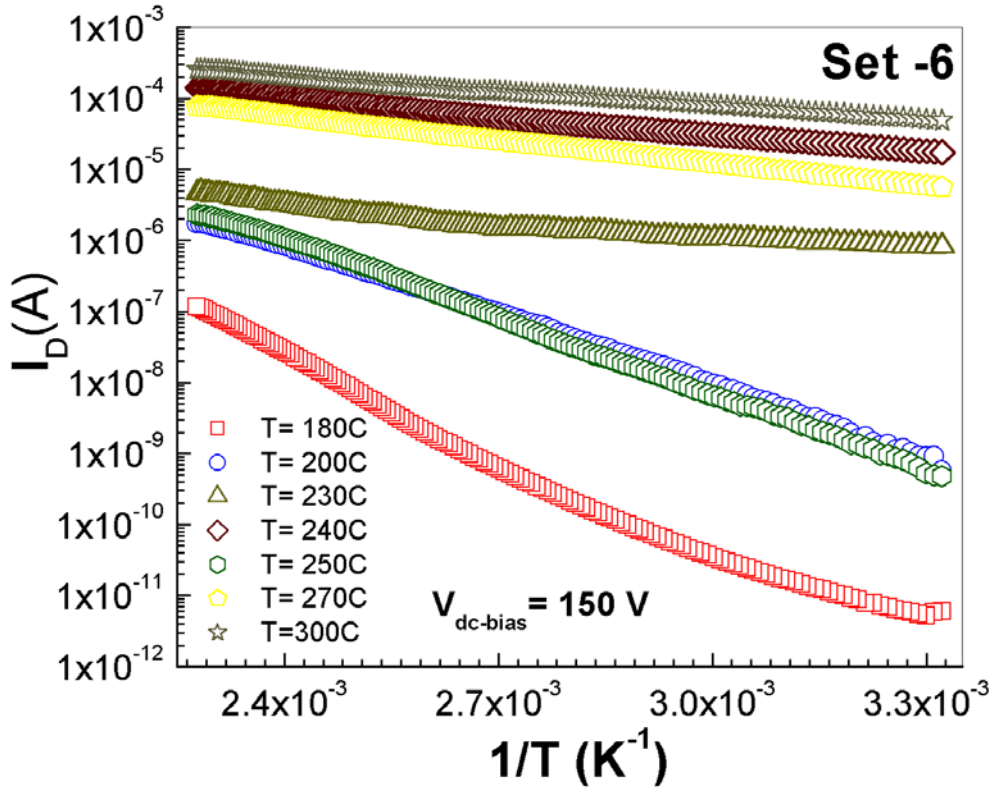


Şekil 4.108. Set-6 örneklerinin kusur yoğunluklarının ve Urbach enerjilerinin alttaş sıcaklığına bağlı değişimleri.

Düşük sıcaklıklarda hazırlanan örneklerin kusur yoğunluğu 10^{17} cm^{-3} seviyesinde iken, sıcaklığın artırılmasıyla beraber kusur düzeylerinin küçülüp $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ seviyesine indiği ve alttaş sıcaklığı arttıkça tekrar büyümeye başladığını görülmektedir. Urbach enerji değeri, $230 \text{ }^{\circ}\text{C}$ alttaş sıcaklığında hazırlanan örnekler için 55 meV 'dir. Set-6'da hazırlanan örneklerden $230 \text{ }^{\circ}\text{C}$ alttaş sıcaklığında hazırlanan örnek, yapılan çalışmada elde edilen en kaliteli sahip filmidir. Bu bakımdan $230 \text{ }^{\circ}\text{C}$, düşük kusur seviyeli standart a-Si:H örneklerin hazırlaması için gereken uygun alttaş sıcaklığı olarak görünmektedir. Diğer film hazırlama parametreleri olan toplam basınç, seyreltme oranı, RF gücü gibi koşullar daha önce hazırlanan örnek setlerinde belirlendiğinden plazma destekli kimyasal buharlaştırma sisteminin optimum koşulları tam olarak belirlenmiştir.

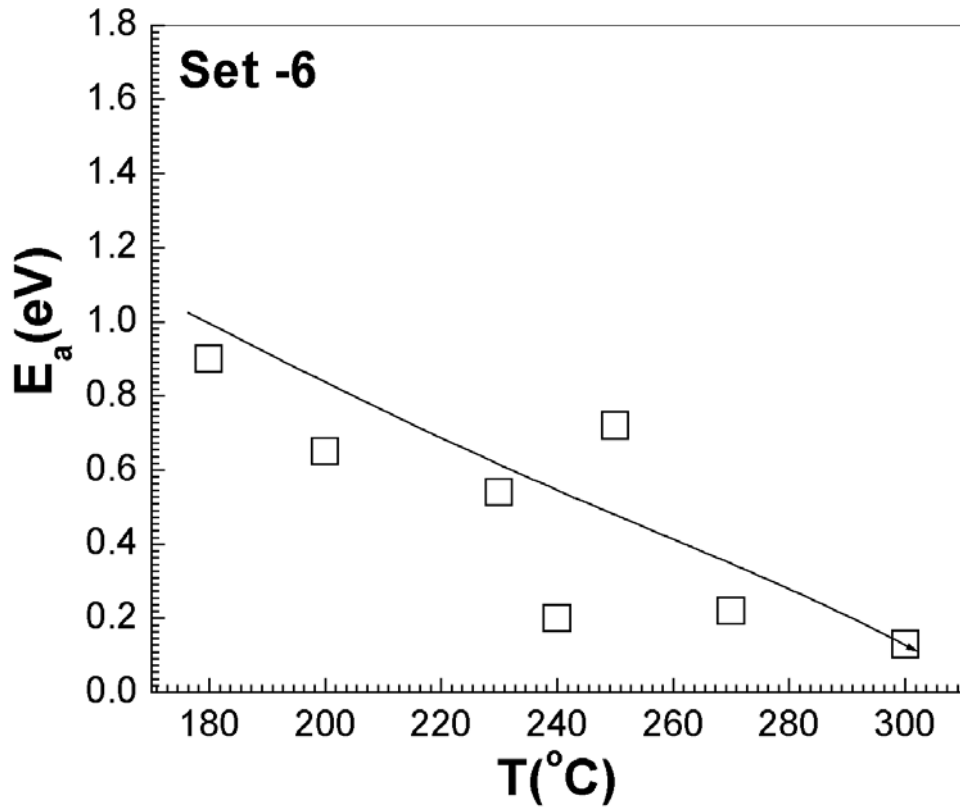
4.7.3. Karanlık iletkenlik ölçümleri

Karanlık iletkenlik ölçümleri kapalı devre helyum soğutmalı sistemde gerçekleştirildi.



Şekil 4.109. Set-6 örneklerinin karanlık akım değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri.

Her örnek için incelenen sıcaklık aralığı oda sıcaklığı ile 440 K arasında olup, 1 K'lık adımlar ile ölçüm alınmıştır. Şekil 4.109'da set-6 örneklerinin karanlık iletkenlik sonuçları verilmektedir. Şekil 4.109'daki değişim incelendiğinde yarı logaritmik eksenlerdeki değişimin sıcaklıkla aktivasyon türü davranış sergilediği gözlenmektedir. Her örnek için Arrhenius gösterimindeki bu grafik yardımıyla denklem (4.3.) kullanılarak örneklerin karanlık iletkenlik aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır.



Şekil 4.110. Set-6 örneklerinin karanlık akım aktivasyon enerjilerinin alttaş sıcaklığına bağlı değişimleri.

Şekil 4.110'da farklı alttaş sıcaklıklarında elde edilen örneklerin karanlık akım ölçümleri sonucu elde edilen aktivasyon enerjilerinin alttaş sıcaklığına bağlı değişimleri verilmektedir. Şekildeki değişim incelendiğinde aktivasyon enerjisinin film hazırlama sıcaklığının artmasıyla birlikte doğrusal olarak küçüldüğü gözlemlenmektedir. 180°C alttaş sıcaklığında hazırlan örneğin aktivasyon enerjisi 0,9 eV değerinde iken alttaş sıcaklığının artması ile birlikte aktivasyon enerjisi 0,2 eV seviyelerine inmektedir. Katkısız bir yarı iletken için iletkenlik bandı ile fermi enerjisi arasındaki enerjice mesafeyi vermektedir. Aktivasyon enerjisinin alttaş sıcaklığıyla değişiminden, yüksek alttaş sıcaklıklarında (>180°C) hazırlanan örneklerin Fermi enerji seviyesinin iletkenlik bandına doğru yaklaştığı sonucuna varabiliriz.

4.8. Helyum ile seyreltilerek hazırlanan a-Si:H ince filmlerde Staebler-Wronski etkisinin 293 K'de incelenmesi

Bu kesimde, Çizelge 4.2.'de verilen örneklerde Staebler-Wronski etkisi incelenmiştir. Üzerlerinde deney yapılan örneklerin Tauc optik bant aralığı 1,56-1,76 eV arasında değişmekte olup, bu örneklerin Urbach parametresi ve kusur yoğunluğunun küçük, büyüme hızının yüksek olmasına dikkat edilmiştir. Sadece % 99 ve % 50 Helyum seyreltilerek hazırlanan örneklerde fotoiletkenlik ölçümüne ek olarak CPM spektrumları da ölçülmüştür.

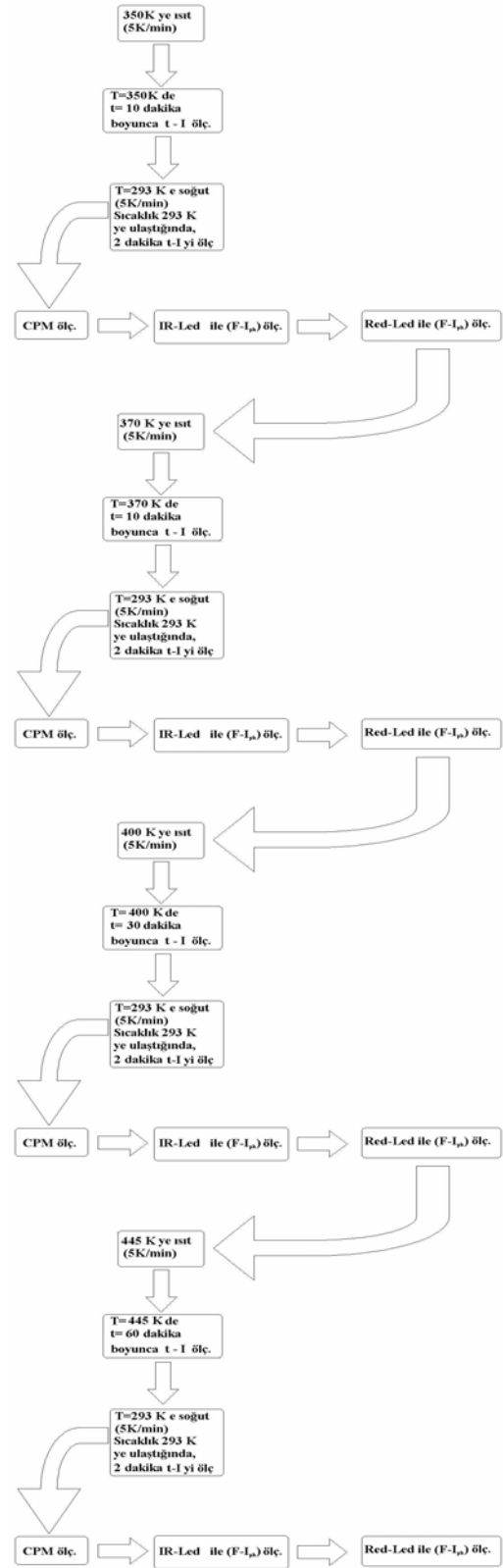
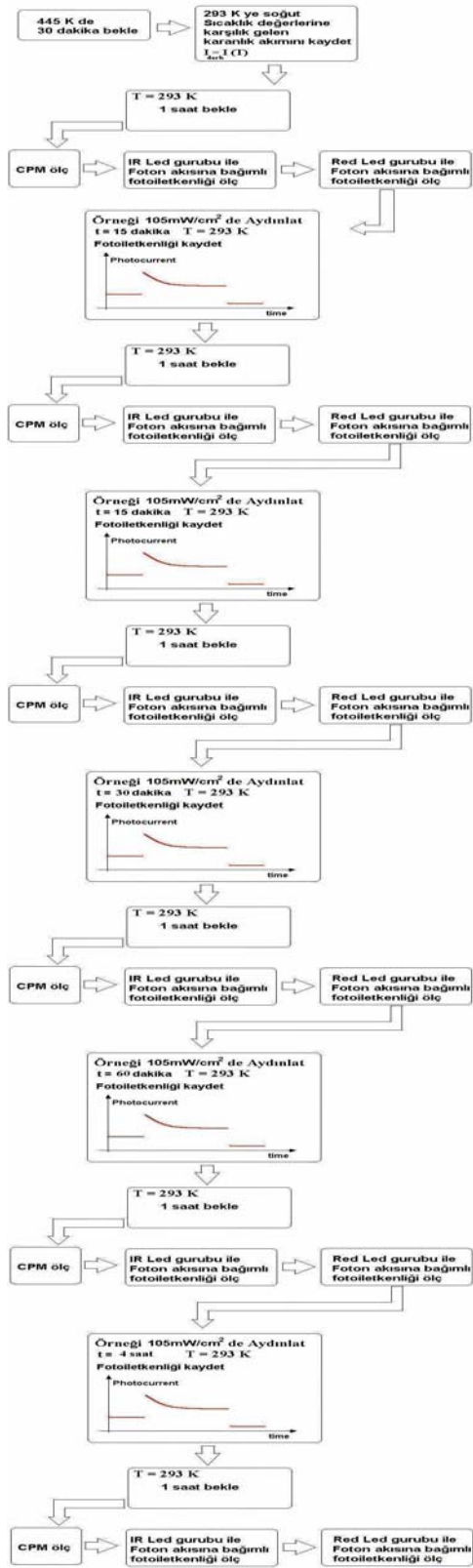
Çizelge 4.2. Kusur kinetiği incelenen örneklerin, optik geçirgenlik ve CPM ölçümleri sonucunda elde edilen, E_g^T Tauc optik bant aralığı, E_o Urbach parametresi ve N_{do} kusur yoğunlukları değerleri.

Örnekler	Toplam Basınç(mT)	He basıncı (mT)	Seyreltme Oranı (D)	RF Gücü(W)	E_g^T (eV)	E_o (meV)	N_{do} (cm ⁻³)
Set-5 – Örnek 5	1200	1188	99	19.9	1.76	43.5	2.60×10^{15}
Set-5 – Örnek 1	1200	1020	85	19.9	1.65	55.0	2.80×10^{16}
Set-2 – Örnek 3	350	175	50	19.9	1.56	71.1	8.02×10^{16}
Set-3 – Örnek 2	300	285	95	18.1	1.74	60.0	4.29×10^{16}
Set-3 – Örnek 5	1200	1140	95	18.1	1.67	67.0	7.05×10^{16}

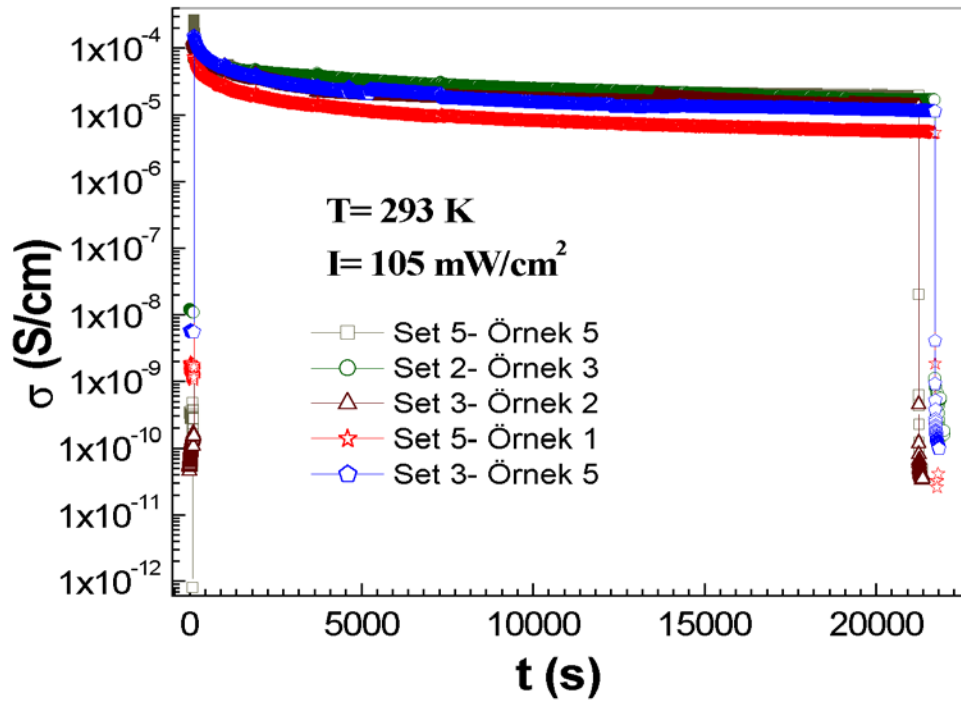
Oda sıcaklığında Staebler-Wronski etkisi, 105 mW/cm² lik ışık şiddetinde, zamanın fonksiyonu olarak incelenmiştir. Staebler-Wronski etkisinin tam olarak anlaşılabilmesi için, tavlanma kinetiğinin de incelenmesi gerekmektedir. Bu nedenle, Staebler-Wronski etkisi sonucunda tavlanma kinetiği deneyleri de yapılmıştır. Kusur yaratma sonrası, örneklerin kusur yoğunluklarındaki değişimi izlemiş olmak için, örneği bant üstü ve IR bölgede uyaraabilecek uygun dalga boylarında seçilmiş LED gurupları kullanılmıştır. LED'lerin pik dalga boyları 656 ve 950 nm'ye karşılık gelmektedir. Staebler-Wronski etkisinin gözlenebilmesi için kurulan ölçüm düzeneği ve ayrıntıları ise Bölüm 3'te tartışılmıştır. CPM ölçümü yardımıyla, Urbach parametresi, kusur yoğunluğu ve 0,8eV-1,6 eV enerji aralığında değerlik bandı kenarının değişimi hakkında bilgi edinilebilir. Fakat amaç sadece kusur yoğunluğundaki değişim miktarını ölçmek ise CPM harcadığı zaman açısından pratik değildir. Böyle bir durumda harcanacak zamanı aza indirecek bir

yöntem kullanmak daha uygun olabilir. Bu amaçla ayrıntıları Bölüm 2’de tartışılan farklı dalga boylarında elde edilen çift monokromatik demetli fotoiletkenlik bağıntısı kullanılarak kusur yoğunlukları hesaplanmaya çalışılmıştır.

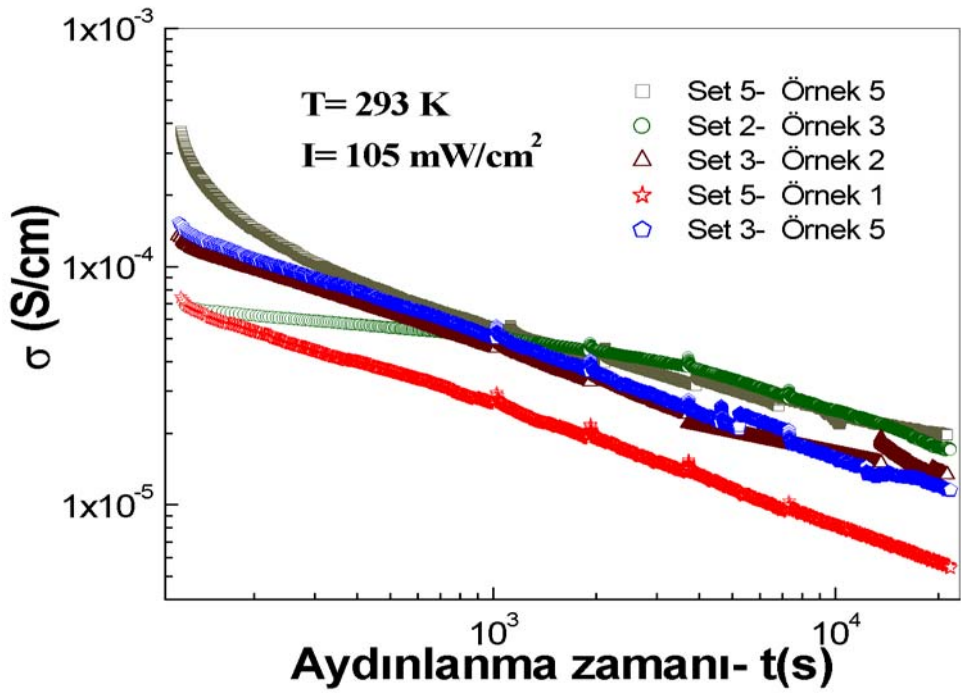
Işıl kusur yaratılma sürecinde, izlenen adımlar kısaca şöyle özetlenebilir; 445 K’de yarım saat süre ile tavllanmış örneğin CPM spektrumu, IR ve RED led ile foton akısına bağlı fotoakımları ölçülmüştür. Ardından, örnek, şiddeti bilinen bir ışık demeti ile belirlenen süre boyunca aydınlatılıp kararlı duruma ulaşması için bir saat beklendikten sonra, CPM ve foton akısına bağımlı fotoiletkenlik ölçümleri tekrarlanmıştır. Kusur yaratma ve ardından ölçme işlemi, toplam aydınlatma süresi 6 saat oluncaya kadar tekrar edilmiştir. Kusur yaratma ve tavlama amacıyla izlenen deneysel adımlar Şekil 4.111 ve 4.112’de sıralanmaktadır. Örneklerin 6 saatlik aydınlatma sonucunda elde kaydedilen iletkenlik (karanlık+fotoiletkenlik) değerlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 4.113.a’da verilmektedir. Şekil 4.113.b’de ise fotoiletkenlik değerlerinin zamana bağlı değişimleri sunulmaktadır.



Şekil 4.111. Işıl kusur yaratma adımları. Şekil 4.112. Işıl kusur tavlama kinetiği adımları.



Şekil 4.113.a) 105mW/cm² şiddetinde beyaz ışıkla aydınlatılan örneklerin deney sürecince kaydedilen karanlık ve fotoiletkenlik verilerinin zamana bağlı değişimi.



Şekil 4.113.b) 105mW/cm² şiddetinde beyaz ışıkla aydınlatılan örneklerin fotoiletkenlik değerinin zamanla değişimi.

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum örneklerde şiddetli ışıkla aydınlatma sonucunda karanlık iletkenlik ve fotoiletkenlikte gözlenen yarı kararlı azalma veya Staebler-Wronski olayı tüm örneklerde gözlenebilmiştir. Şekil 4.113.'te verilen eğriler denklem 4.8 ile verilen fonksiyona fit edilmiş ve bu fitler sonucunda elde edilen β değerleri Çizelge 4.3' te sıralanmıştır.

$$\sigma_{ph}(t) = \sigma_o . t^{-\beta} \quad (4.8.)$$

Çizelge 4.3. Fotoiletkenliğin azalış gösterdiği erken ve son zamanlarda elde edilen sönüm (decay) parametreleri.

Örnekler	β_1	β_2
Set-5 örnek-5	0.64	0.33
Set-5 örnek-1	0.43	0.51
Set-2 örnek-3	0.13	0.38
Set-3 örnek-2	0.46	0.40
Set-3 örnek-5	0.47	0.48

Çizelge 4.3'de verilen β_1 değerleri ilk 15 dakikalık aydınlanma sürecinde elde edilen fotoiletkenlik verileri kullanılarak, β_2 değerleri ise ilk 15 dakikanın sonrasında ölçülen fotoiletkenlik verileri kullanılarak elde edilmiştir. Çizelge 4.3'deki değerler incelendiğinde % 99 helyum ile seyreltilerek hazırlanmış örneğin diğer örneklerle kıyaslandığında oldukça hızlı bir şekilde doyuma ulaştığı gözlemlenmektedir. Şekil 4.113'te kırmızı renkle gösterilen değişim % 99 helyumla seyreltilmiş örneğe ait olan fotoiletkenlik değerindeki azalmayı belirtmektedir. Bu değişim, diğer örneklerle kıyaslandığında oldukça keskin bir düşüş sergilemektedir. Bu örneğin β_1 ve β_2 değerleri incelediğinde, aydınlanmanın erken zamanlarında fotoiletkenlikteki düşüş hızının, aydınlanmanın ilerleyen zamanlarında yarıya düştüğü görülmektedir. Benzer azalma Set-3 örnek-2 için de geçerlidir. Ancak set-5 örnek-5'teki kadar keskin olmadığı gözlenmiştir. Set-5 örnek-1 ve set-2 örnek-3'te ise diğer örneklerde gözlenenin aksine β_2 değeri artmıştır. Set-3 örnek-5'te ise tüm aydınlanma sürecinde β_1 ve β_2 değerlerinin sabit kaldığı görülmektedir. Fotoiletkenlikteki azalmayı, yük taşıyıcıların yaşam süresinin yaratılan kusurlar nedeniyle azalması veya Fermi enerjisinin bant ortasına yaklaşması oluşturabilir

(Stutzmann et. al.,1985, Wronski, 2000). Eğer kusurları yaratan mekanizma tersinir bir mekanizma ise, birkaç saatlik tavlama sonrası yaratılan bu kusurlar azalıp neredeyse eski değerine ulaşmalıdırlar. Gerçekleşen mekanizmanın tersinir veya tersinmez olması üretilen a-Si:H örneklerde Staebler-Wronski etkisinin nicel olarak ortaya koyulmasında önem taşımaktadır. Bu amaçla kusur yoğunluğunun, Rose faktörün ve $\eta_{\mu\tau}$ değerlerinin her bir aydınlanma ve tavlama adımları sonrası tayin edilebilmesi amacıyla CPM ve fotoiletkenlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

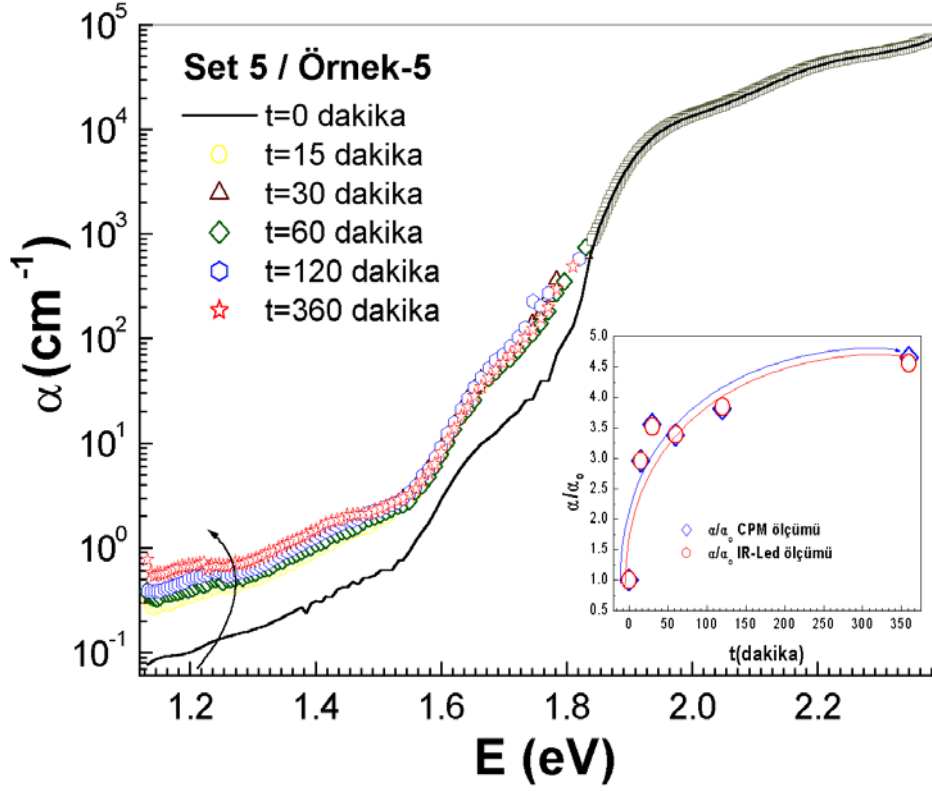
4.8.1. Set-5 örnek-5

4.8.1.1. Işıl kusur kinetiğinin incelenmesi

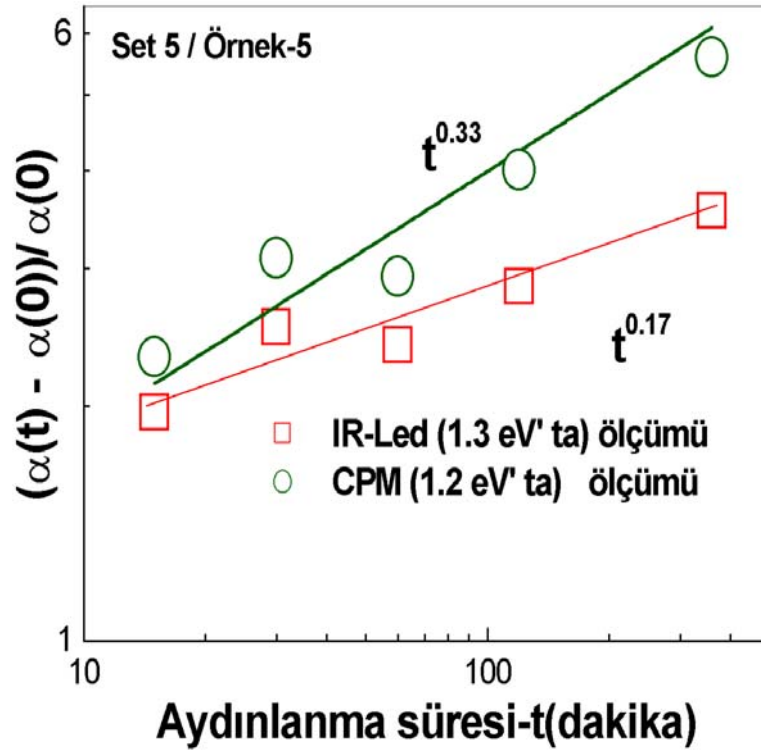
Şekil 114.a'da CPM spektrumunun aydınlanma sürecine göre değişimi verilmektedir. 1,2 –1,3 eV'luk enerji değerlerine karşılık gelen soğurma değerlerinin aydınlanma süreci artarken büyüdüğü gözlenmektedir. CPM spektrumunun bu enerji aralığındaki değişimi kusur yoğunluğu hakkında net bulgular vermektedir. Artan aydınlanma süresiyle birlikte spektrumun yukarıya doğru kaydığı görülmektedir. IR ve Red Led fotoiletkenlik ölçümleri sonucunda elde edilen normalize soğurma değerleriyle, CPM spektrumundan elde edilen normalize soğurma değerlerinin (1,3 eV'taki) üst üste çizilmesiyle elde edilen değişim, Şekil 4.114.a'daki grafikte verilmektedir. CPM ve fotoiletkenlik ölçümüyle elde edilen değerlerin oldukça iyi bir uyum içinde olduğu gözlemlenmektedir. Artan aydınlanma süresi sonunda büyüyen normalize soğurma değeri kusur yoğunluğunun artmaya başladığını ortaya koymaktadır. Şekil 6.b'deki grafikte verilen deneysel veri noktalarının denklem (4.9.)'da verilen fonksiyona fit edilmesi, kusurların artım hızının $t^{0.33}$ ile verilebileceğini ortaya koymuştur.

Hesaplanan bu değer Çizelge 4.3'te verilen fotoiletkenlikteki azalma parametresinin bir ölçütü olan β_2 değeri ile aynıdır. Eğer ışık ile aydınlanma sonucunda fotoiletkenlik kararlı bir şekilde azalıyorsa ve bu azalmaya neden olan mekanizma yaratılan kusur düzeyleri ise, şu halde kusur düzeylerindeki artış bu azalmaya paralel olarak gelişmelidir. Bu durumda kusurların artış hızı ile fotoiletkenlikteki azalış değerlerinin aynı olması fotoiletkenlik mekanizmasını ışıkla yaratılan kusurların kontrol ettiğini göstermektedir. Staebler-Wronski etkisinin

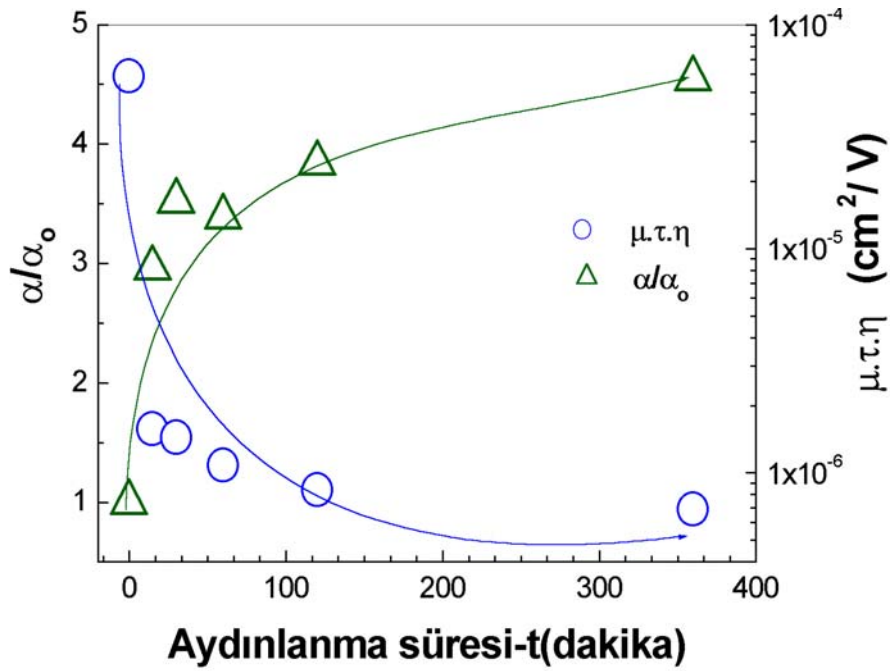
beklenen doğal bir sonucu olarak ortaya çıkan bu gözlem, yaratılan kusurların birkaç saat süren tavlama adımları sonrası azalıp eski değerine ulaşacağını söylemektedir.



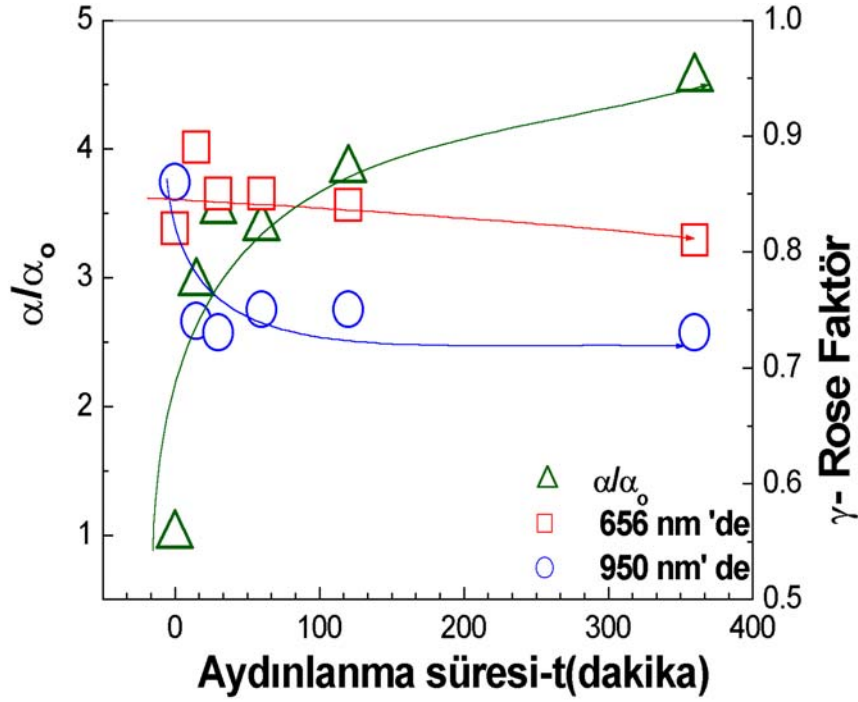
Şekil 4.114 a). CPM spektrumunun aydınlanma sürelerine bağlı değişimi.



Şekil 4.114.b) Normalize kusur yoğunluklarının aydınlanma süresine bağlı değişimleri.



Şekil 4.114.c) Normalize soğurma ve $\tau\mu\eta$ değerlerinin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.



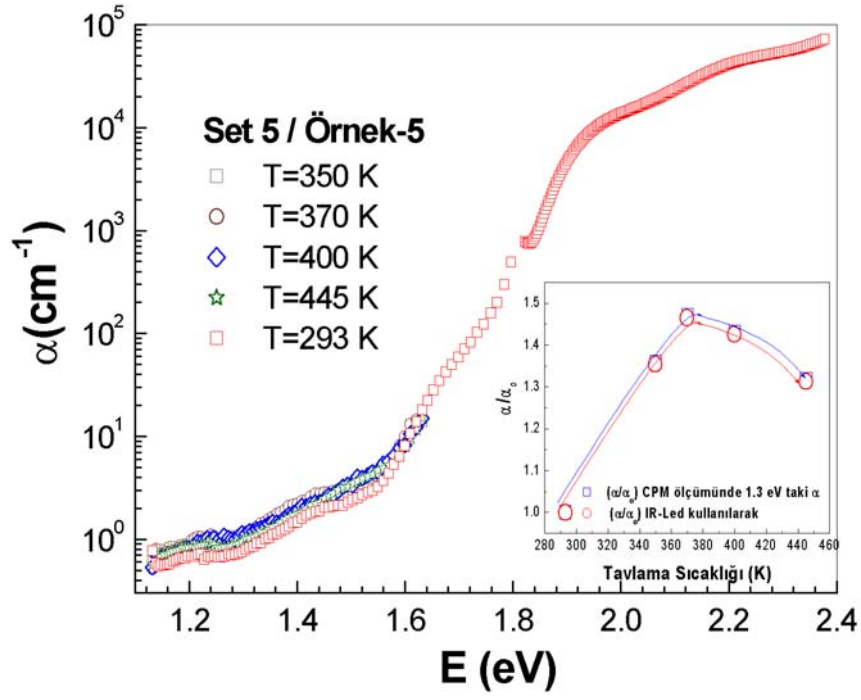
Şekil 4.114 .d) Rose Faktörlerin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.

$$\frac{\alpha(t)-\alpha_0}{\alpha_0} = \xi t^\chi \quad (4.9.)$$

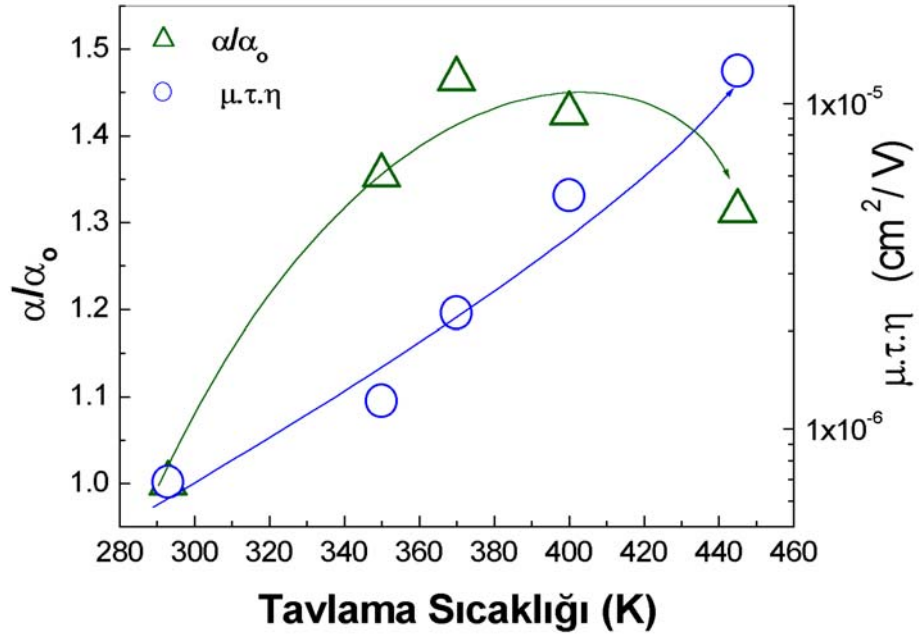
Şekil 4.114.c'deki değişim $\tau\mu\eta$ çarpanının aydınlanma sürecine bağlı olarak değişimini göstermektedir. Yaratılan kusur düzeylerinin artmasıyla birlikte $\tau\mu\eta$ çarpanının azalması, ışıkla uyarılan yük taşıyıcıların yaşam sürelerinin azalmış olabileceğini göstermektedir. Sözü geçen şekilde, Rose faktörü değerinin kusur yaratma süresine bağlı olarak azalması, fotoiletkenliğin azalıp, kusur düzeylerinin artmasının bir sonucu olarak ortaya çıkabilmektedir.

4.8.1.2. Tavlamanın ışııl kusur kinetiğine etkisi

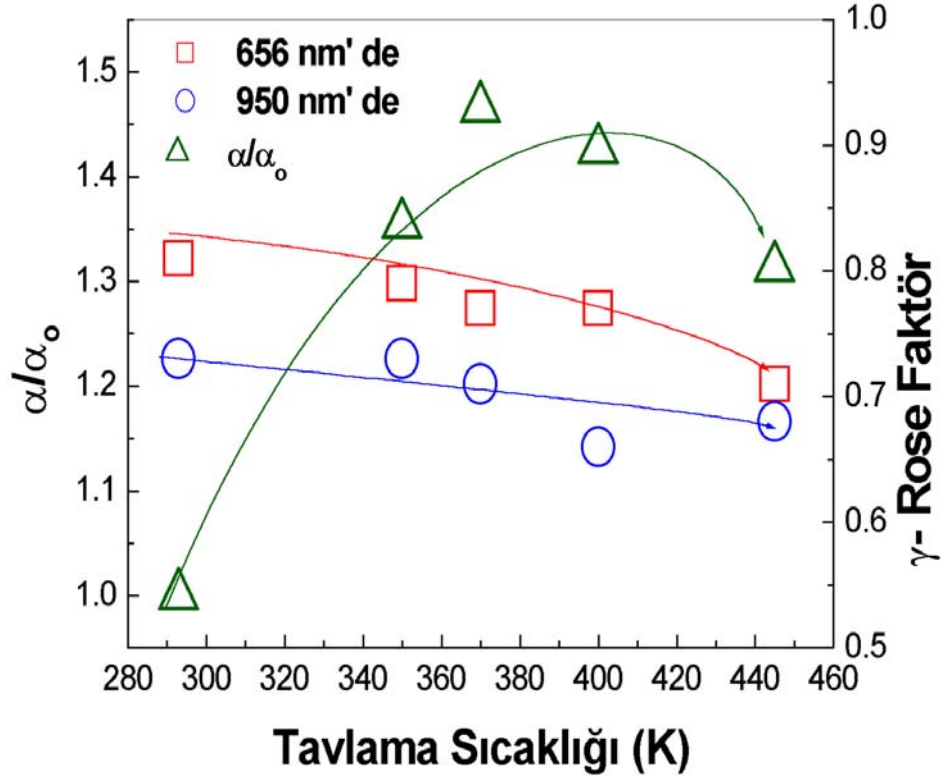
Şekil 4.115'de tavlama adımları sonrası elde edilen sonuçlar verilmektedir. Şekil 4.115.a'da sunulan CPM spektrumunda, 293 K'deki değişim, 293 K'de 6 saatlik aydınlanma sonrası elde edilen CPM spektrumunu göstermektedir.



Şekil 4.115. a) CPM spektrumlarının tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.



Şekil 4.115.b) Normalize soğurma ve $\tau\mu\eta$ değerlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.



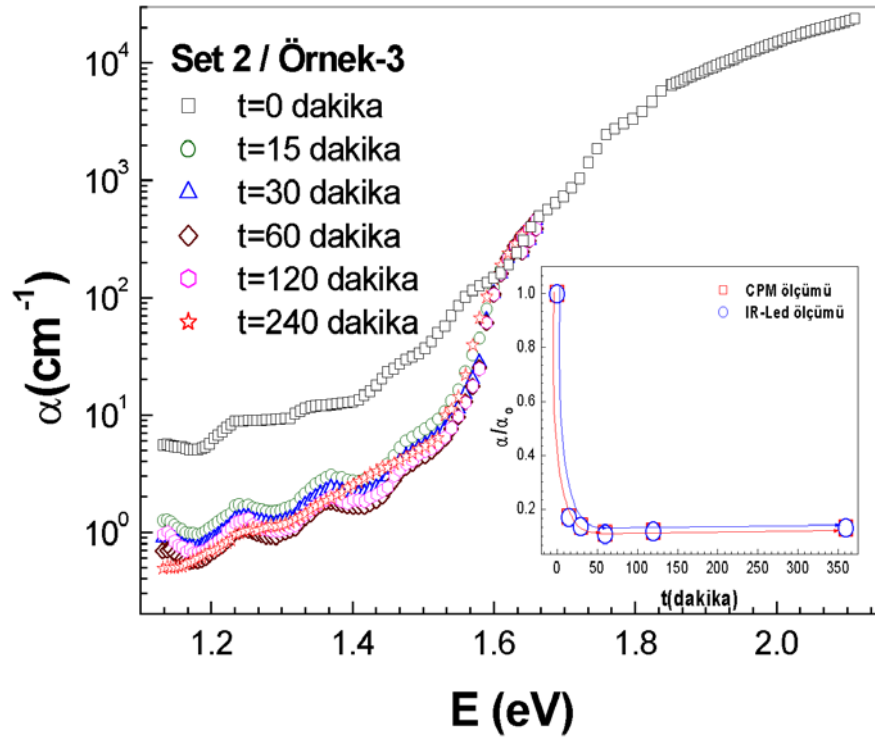
Şekil 4.115. c) Rose Faktörlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.

350 K'deki ilk tavlama adımı sonucunda kusur düzeyi yaklaşık % 45'e varan bir artış göstermiştir. Normalize soğurma değerinde 1,45 seviyesine karşılık gelen bu değer, 370 K'deki tavlama adımı sonrasında yaklaşık %15'lik bir azalış sergileyerek başlangıç değerinden % 35 daha fazla bir değere ulaşmıştır. Şekil 4.115.b'de verilen Rose Faktördeki azalma, kusur düzeylerinin arttığının bir habercisi olarak bir önceki aydınlanma adımında gözlenen değişimle tutarlı şekilde kendini göstermektedir. Şekil 4.115.c'de $\tau_{\mu\eta}$ çarpanının tavlama sıcaklığına bağlı değişimi incelendiğinde, $\tau_{\mu\eta}$ değerlerinin tavlama sıcaklığına bağlı olarak büyüdüğü görülmektedir. Kusur düzeylerindeki azalmaya paralel olarak gözlenen bu artış, ışıkla uyarılan yük taşıyıcıların yaşam süresinin arttığının bir göstergesi olabilir.

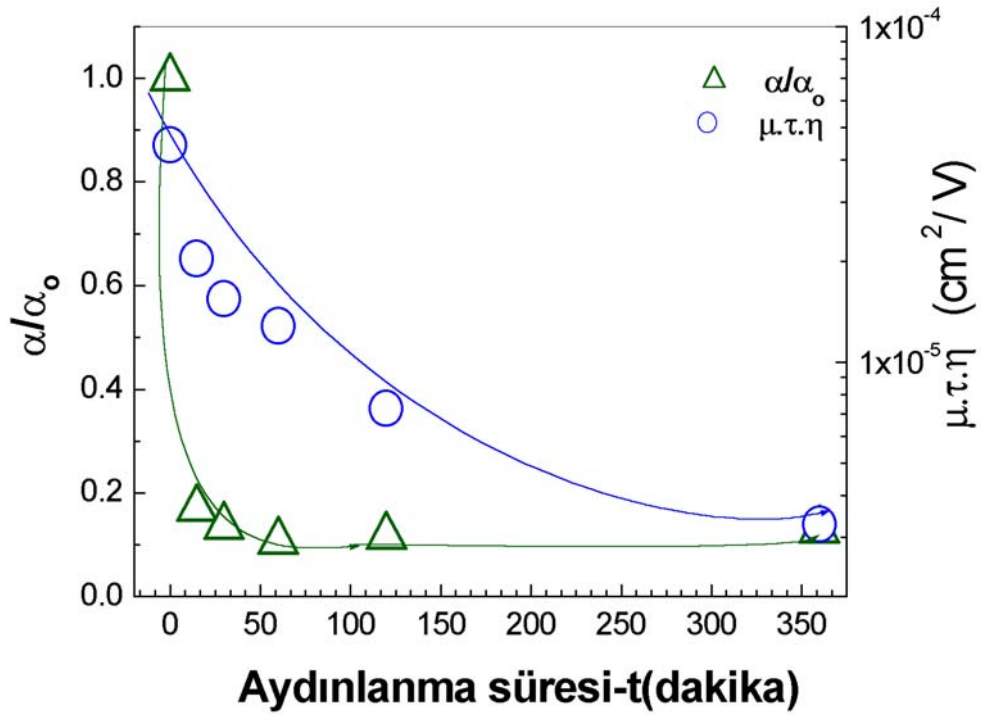
4.8.2. Set-2 örnek-3

4.8.2.1. Işıl kusur kinetiğinin incelenmesi

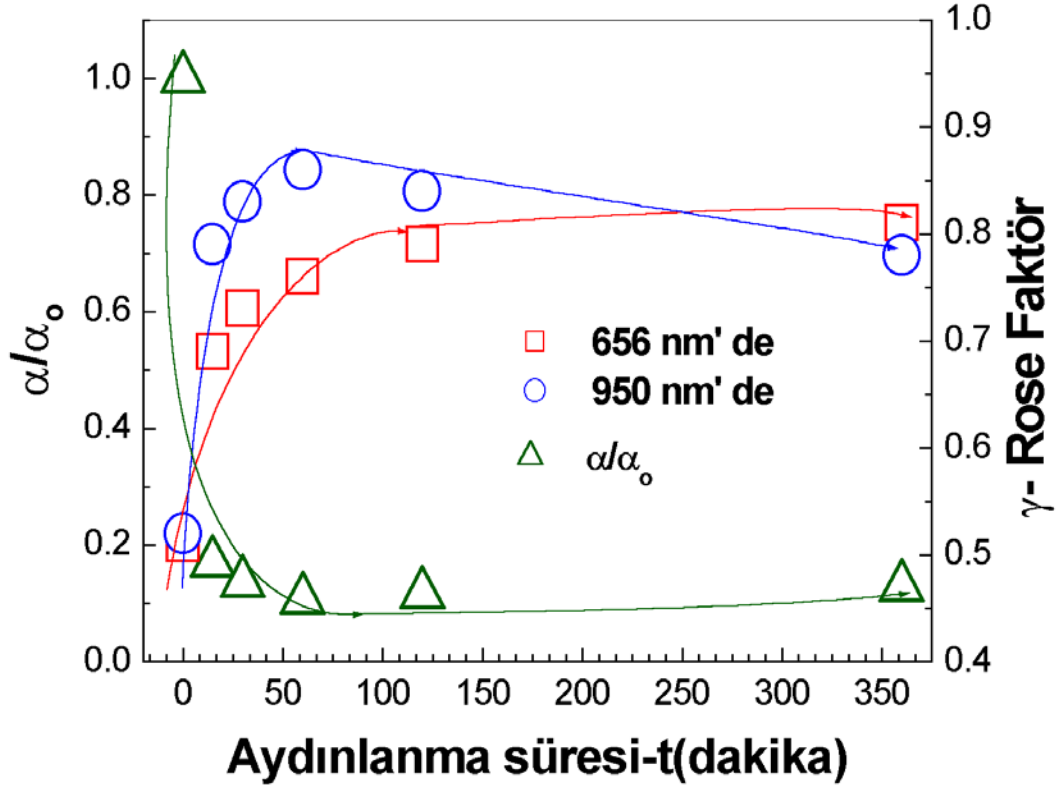
Şekil 4.116'da CPM spektrumunun kusur yaratma süresine göre değişimi verilmektedir. 1,2–1,3 eV'luk enerji değerlerine karşılık gelen soğurma değerlerinin kusur yaratma süresi artarken küçüldüğü gözlenmektedir. Artan kusur yaratma süresiyle birlikte spektrumun aşağıya doğru kaydığı görülmektedir. IR ve Red Led fotoiletkenlik ölçümleri sonucunda elde edilen normalize soğurma değerleriyle CPM spektrumundan elde edilen normalize soğurma değerlerinin üst üste çizilmesiyle elde edilen değişim, Şekil 4.116.a'daki grafikte verilmektedir. CPM ve fotoiletkenlik ölçümüyle elde edilen değerlerin oldukça iyi bir uyum içinde olduğu gözlemlenmektedir. Artan kusur yaratma süresi sonunda küçülen normalize soğurma değeri kusur yoğunluğunun azalmaya başladığını ortaya koymaktadır. Şekil 4.116.c'de Rose Faktörün kusur yaratma süresine bağlı olarak büyüdüğü gözlemlenmekte, bunun yanında kusur yoğunluğundaki azalma miktarı bu artış düzeyini sanki dengelercesine bir değişim göstermektedir.



Şekil 4.116.a) CPM spekturumunun aydınlanma sürelerine bağlı değişim.



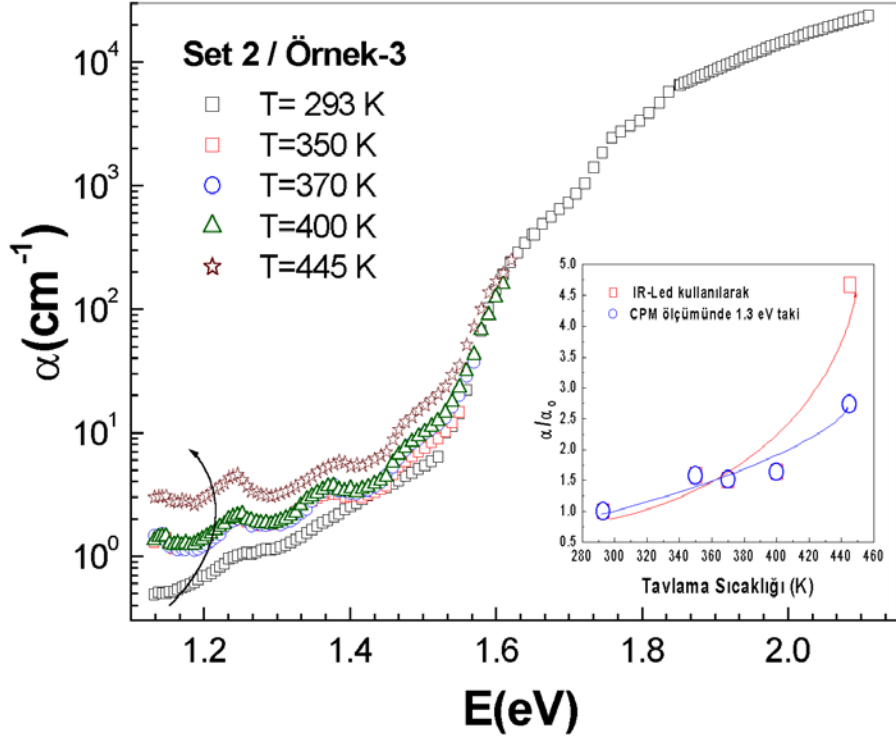
Şekil 4.116.b) Normalize soğurma ve $\tau\mu\eta$ değerlerinin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.



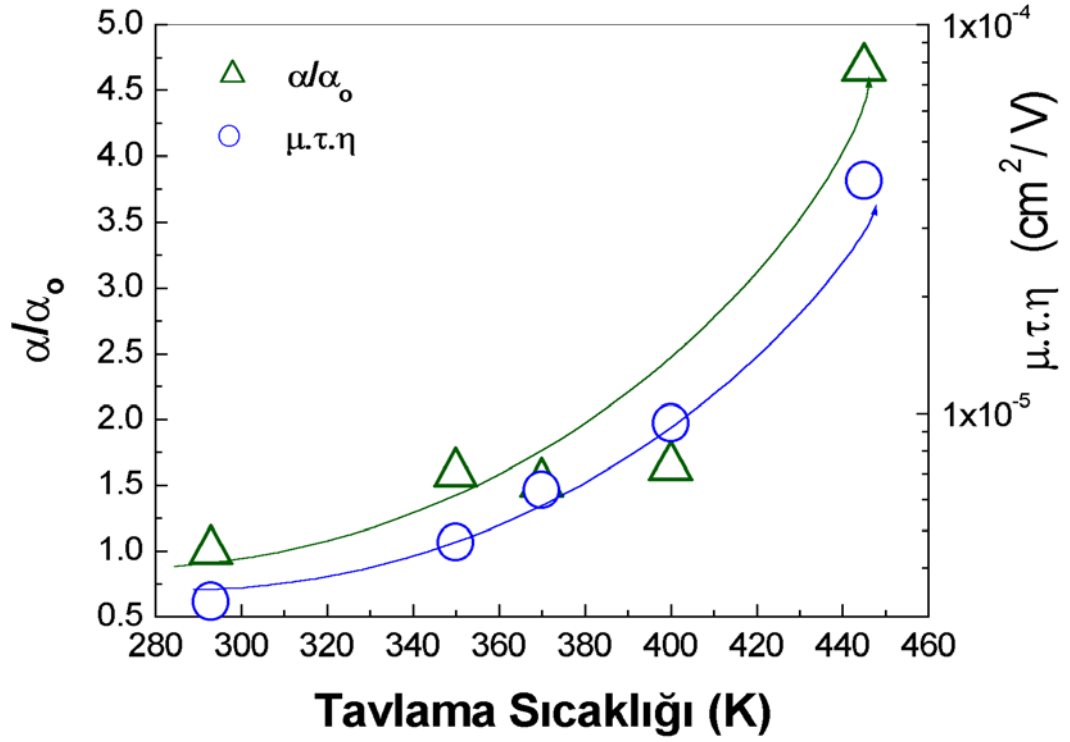
Şekil 4.116.c) Rose Faktörlerin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.

4.8.2.2. Tavlamanın ışııl kusur kinetiğine etkisi

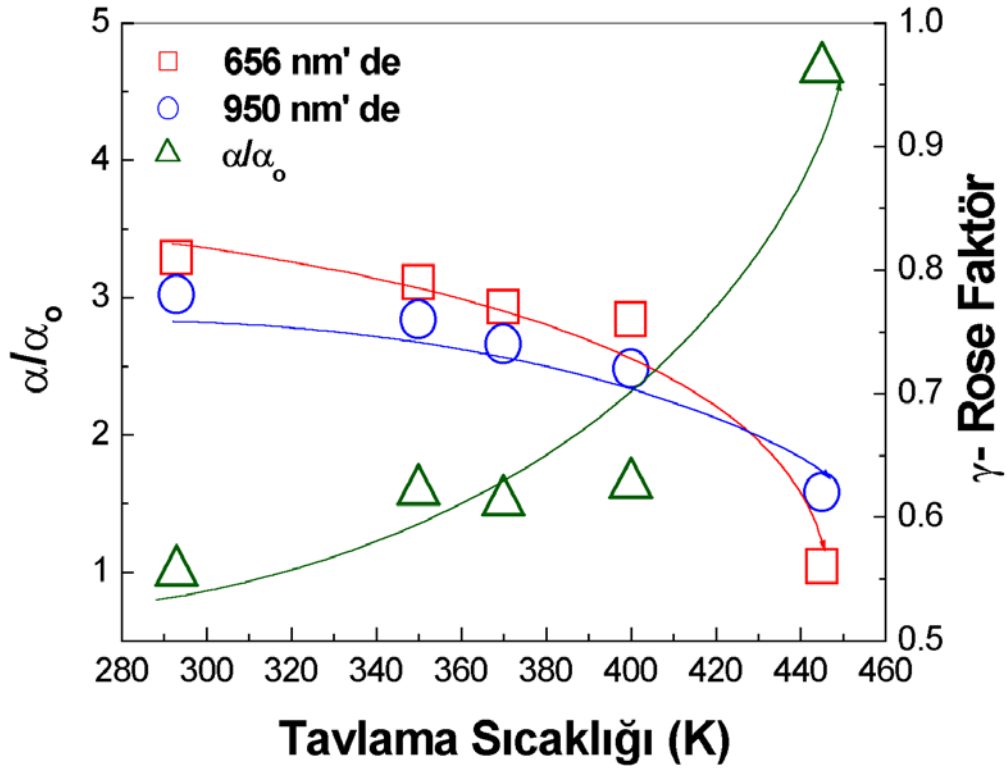
Şekil 4.117'de tavlama adımları sonrası elde edilen sonuçlar verilmektedir. Şekil 4.117.a'da sunulan CPM spektrumunda, 293 K'de verilen değişim, 293 K de 6 saatlik kusur yaratma süresi sonucu elde edilen CPM spektrum değerini göstermektedir. Tavlama adımları sonucunda kusur düzeyi yaklaşık 5 kat artış göstermiştir. Şekil 4.117.c'de verilen Rose Faktördeki azalma, kusur düzeylerinin arttığının bir habercisi olarak yine kendini göstermektedir. Şekil 4.117.b'de $\tau\mu\eta$ çarpanının tavlama sıcaklığına bağlı olan değişimi incelendiğinde, $\tau\mu\eta$ değerlerinin tavlama sıcaklığına bağlı olarak büyüdüğü gözlemlenmektedir. Kusur düzeylerindeki artmaya paralel olarak gözlenen bu artım, ışııkla uyarılan yük taşıyıcıların yaşam süresinin arttığının bir göstergesi olabilir.



Şekil 4.117.a) CPM spekturumlarının tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.



Şekil 4.117.b) Normalize soğurma ve $\tau\mu\eta$ değerlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.

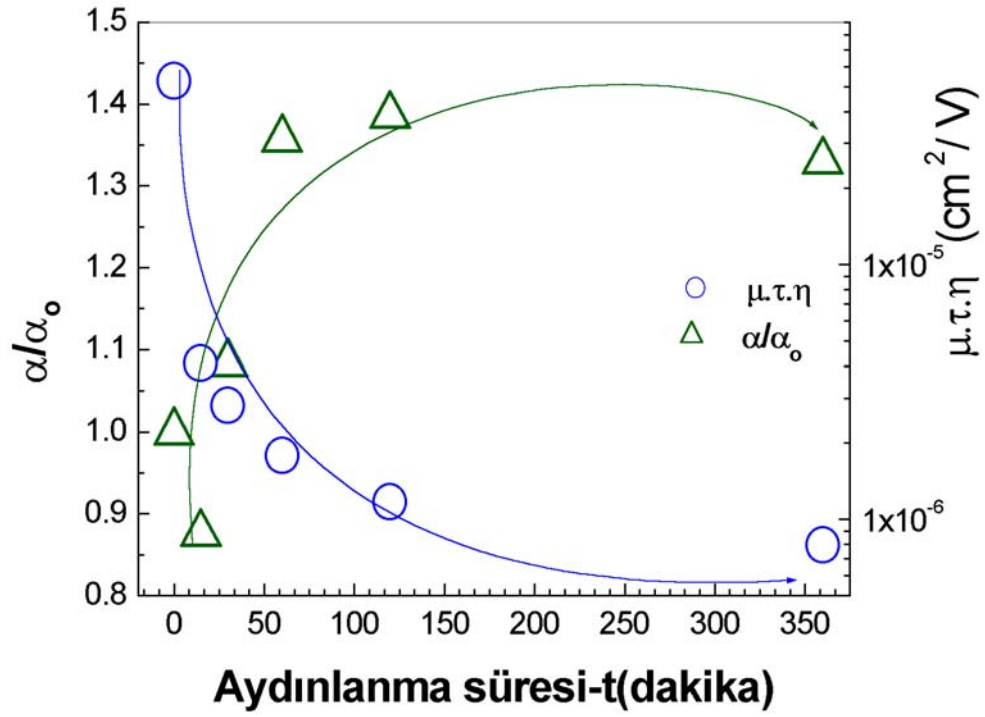


Şekil 4.117.c) Rose Faktörlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.

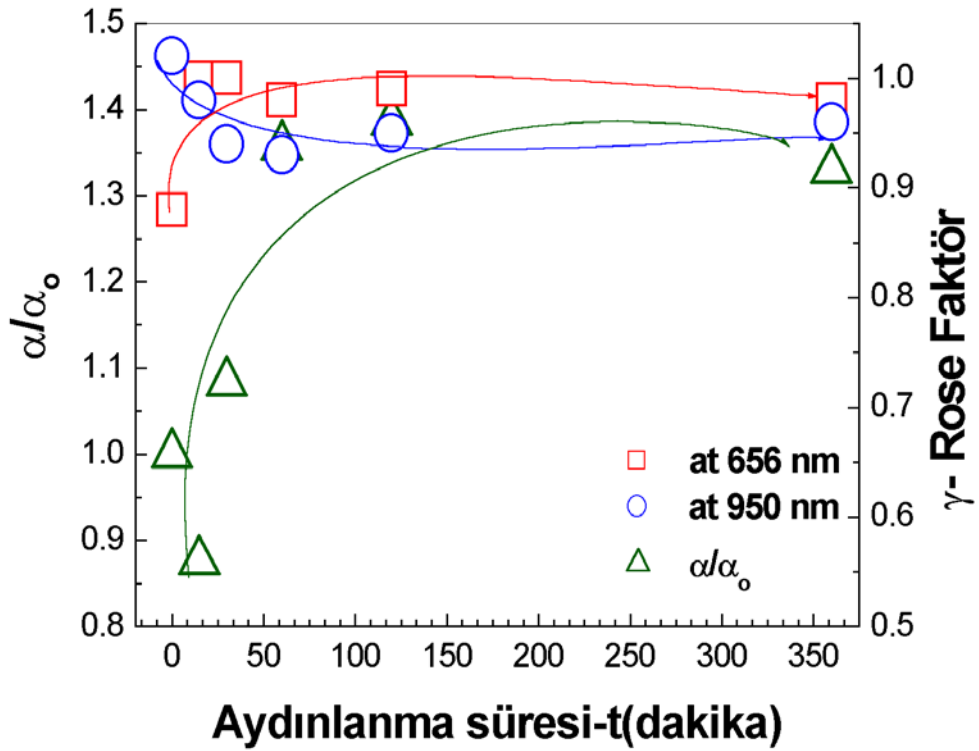
4.8.3. Set-3 örnek-2

4.8.3.1. Işıl kusur kinetiğinin incelenmesi

Şekil 4.118'de kusur yaratma adımları sonrası ölçülen foton akısına bağlı fotoiletkenlik ölçümüyle elde edilmiş, normalize soğurma değerleri, Rose faktör ve $\tau_{\mu\eta}$ değerlerinin kusur yaratma sürecine bağlı değişimleri verilmektedir. Şekil 4.118.a'daki değişimde aydınlanma süresine bağlı olarak kusur düzeylerinin arttığı gözlemlenmektedir. Artan kusur yoğunluğu ile $\tau_{\mu\eta}$ çarpanı değerinin de büyüdüğü gözlemlenmektedir. Şekil 4.118.b'de Rose Faktörün aydınlanma sürecine bağlı değişiminde IR Rose faktörünün azalıp daha sonra doyuma ulaştığı, Red Rose faktörü değerinin ise % 10 yükseldikten sonra uzun süreli aydınlanma sonucunda, doyuma ulaştığı gözlemlenmektedir.

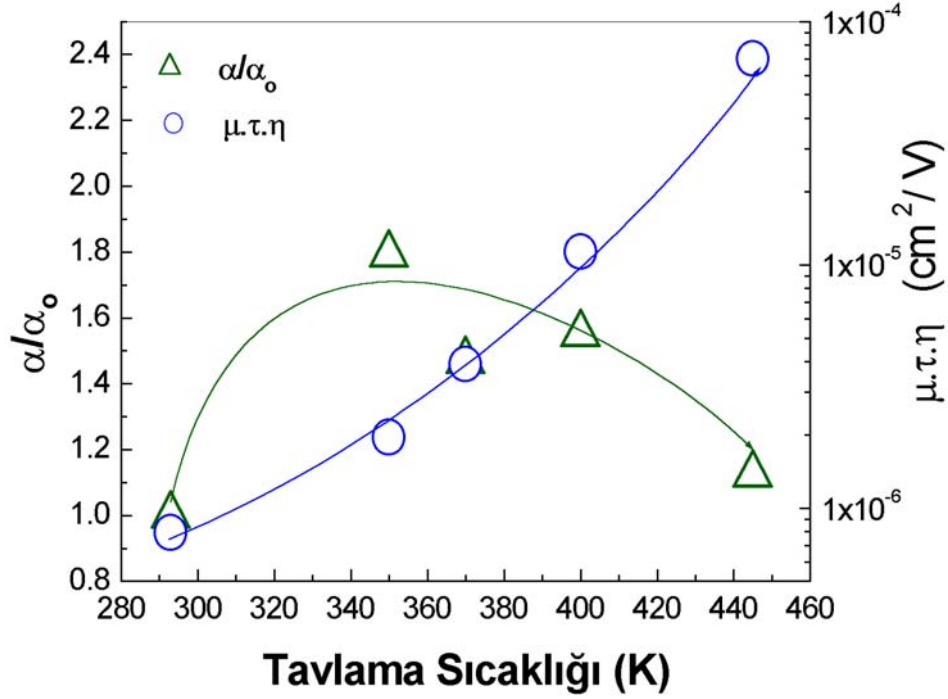


Şekil 4.118.a) Normalize soğurma ve $\tau\mu\eta$ değerlerinin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.

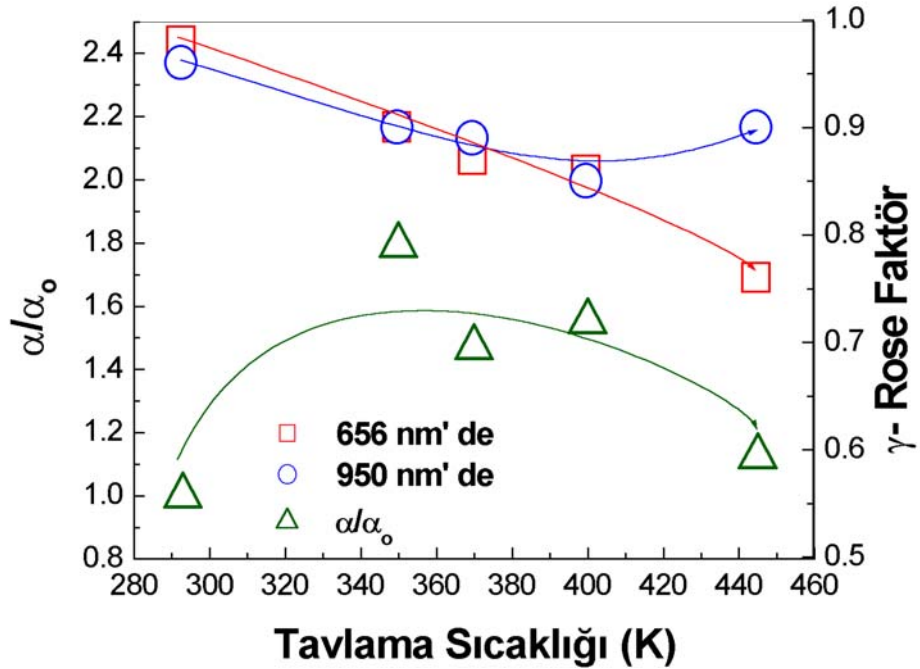


Şekil 4.118.b) Rose Faktörlerin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.

4.8.3.2. Tavlamanın ışıl kusur kinetiğine etkisi



Şekil 4.119.a) Normalize soğurma ve $\tau\mu\eta$ değerlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.



Şekil 4.119. b) Rose Faktörlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.

Şeki 4.119'da tavlama adımları sonrası elde edilen sonuçlar verilmektedir. Tavlama adımları sonucunda kusur düzeyi artış göstermiştir. 350 K'den sonraki

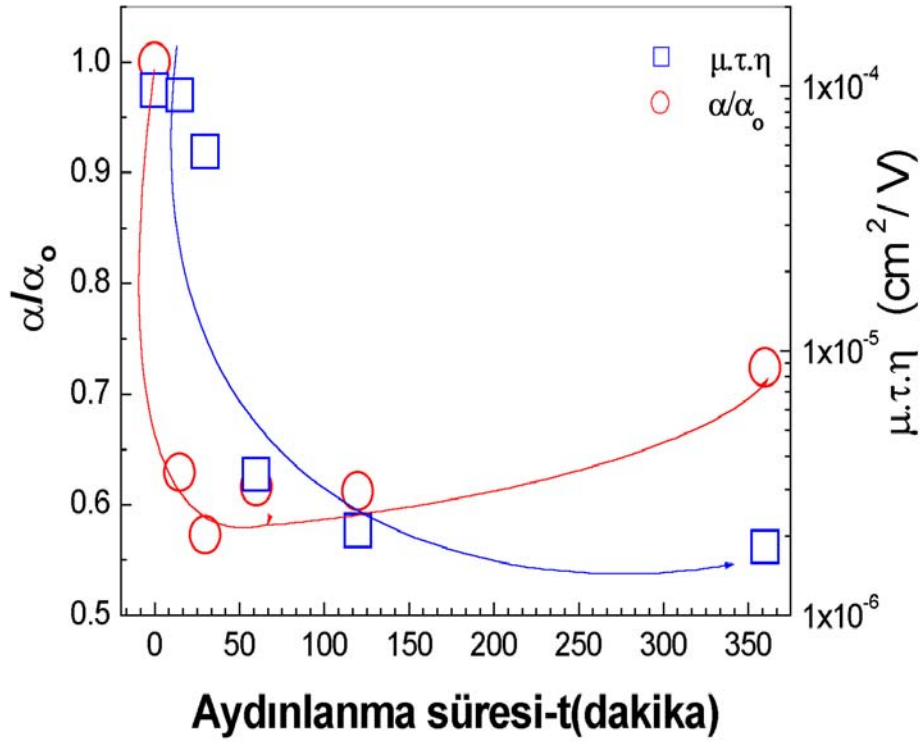
tavlama adımlarında ise azalarak ilk değerine ulaşmıştır. Şekil 4.119.b'de verilen Rose faktördeki azalma, kusur düzeylerinin arttığının bir belirteci olarak gözlemlenmektedir. Şekil 4.119.a'da $\tau_{\mu\eta}$ çarpanın tavlama sıcaklığına bağlı olan değişimi incelendiğinde, $\tau_{\mu\eta}$ değerlerinin tavlama sıcaklığına bağlı olarak büyüdüğü görülmektedir. Kusur düzeylerindeki artmaya paralel olarak gözlenen bu artım, ışıkla uyarılan yük taşıyıcıların yaşam süresinin arttığının göstergesi olabilir.

4.8.4. Set-3 örnek-5

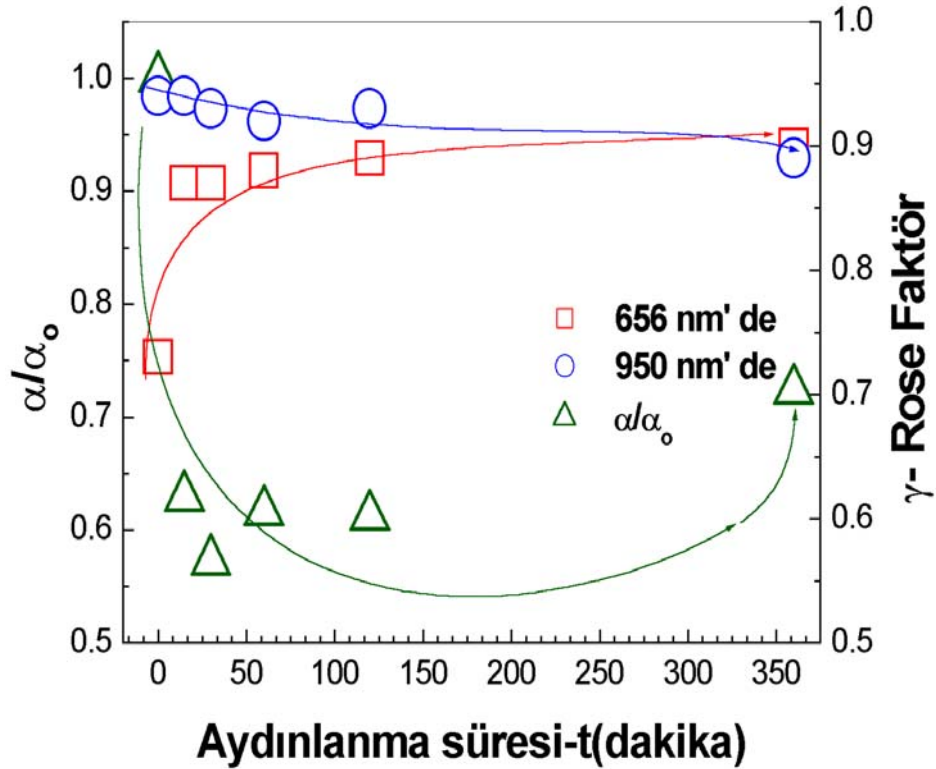
4.8.4.1. Işıl kusur kinetiğinin incelenmesi

Şekil 4.120'de ışııl kusur yaratma kinetiği adımları sonrası ölçülen foton akısına bağlı fotoiletkenlik ölçümüyle elde edilmiş, normalize soğurma değerleri, Rose faktör ve $\tau_{\mu\eta}$ değerlerinin aydınlanma sürelerine bağlı değişimleri verilmektedir.

Şekil 4.120.a'daki değişimde kusur yaratma süresine bağlı olarak kusur düzeylerinin azaldığı gözlemlenmektedir. Azalan kusur yoğunluğu ile $\tau_{\mu\eta}$ çarpanı değerinin de küçüldüğü gözlemlenmektedir. Şekil 4.120.b'de Rose Faktörün aydınlanma sürecine bağlı değişiminde IR Rose faktörünün azalıp daha sonra doyuma ulaştığı, RED Rose faktörü değerinin ise %10 miktarında yükseldikten sonra uzun süreli kusur yaratma süresi sonucunda, doyuma ulaştığı gözlemlenmektedir.



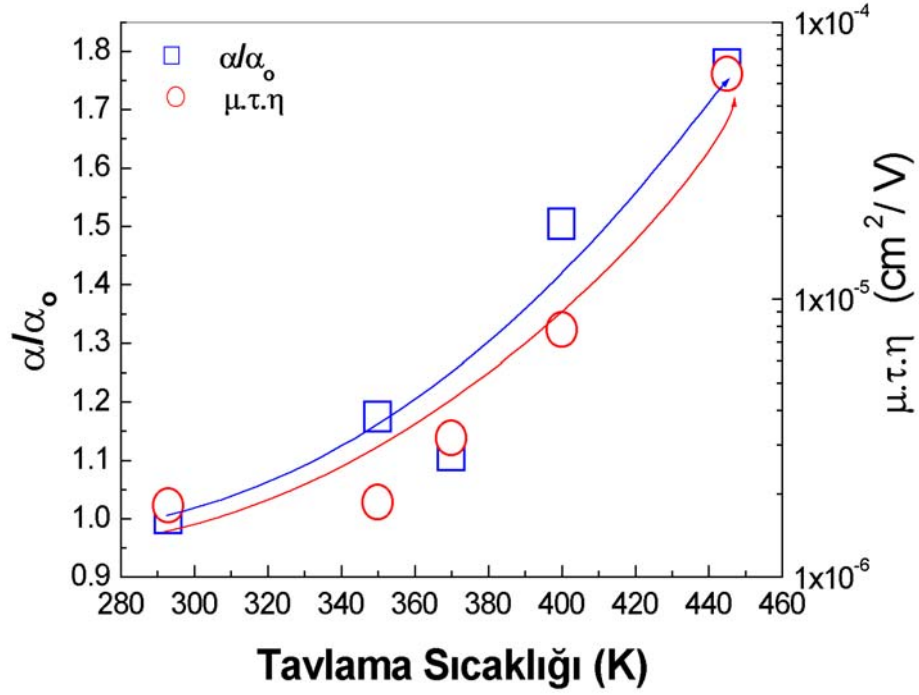
Şekil 4.120.a) Normalize soğurma ve $\tau\mu\eta$ değerlerinin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.



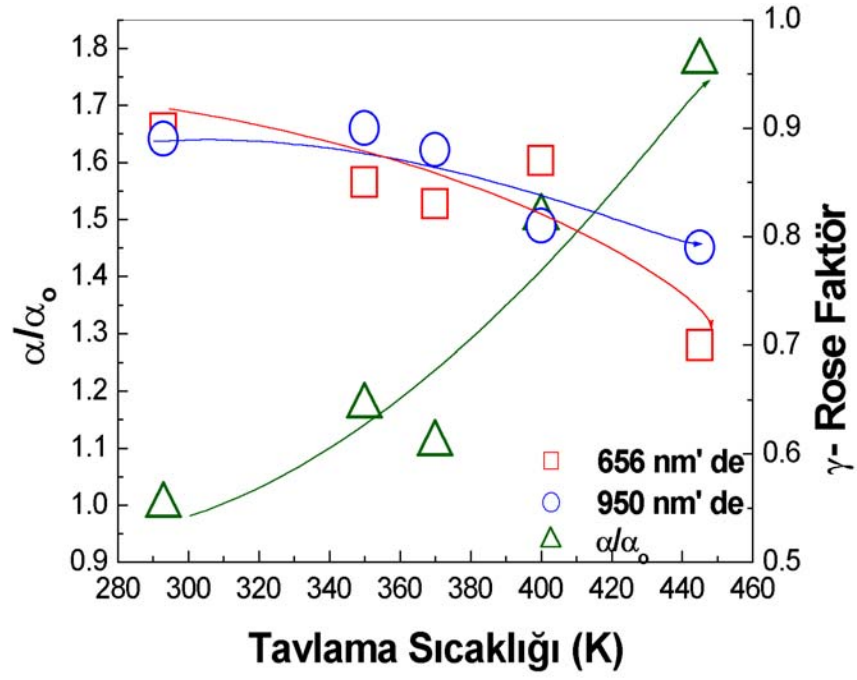
Şekil 4.120.b) Rose Faktörlerin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.

4.8.4.2. Tavlamanın ısı kusur kinetiğine etkisi

Bu örnekte de diğer örneklere benzer şekilde tavlama sıcaklığının artmasıyla birlikte kusur yoğunluklarının büyüdüğünü gözlemlenmektedir. Şekil 4.121.a'da gözlenen bu artışı yine $\tau\mu\eta$ çarpanındaki büyümede takip etmektedir. Şekil 4.121.b'de IR ve Red dalga boylarına karşılık gelen Rose faktörü değerlerinin, tavlama sıcaklığının büyümesi ile birlikte azalmaya başladığı gözlemlenmektedir.



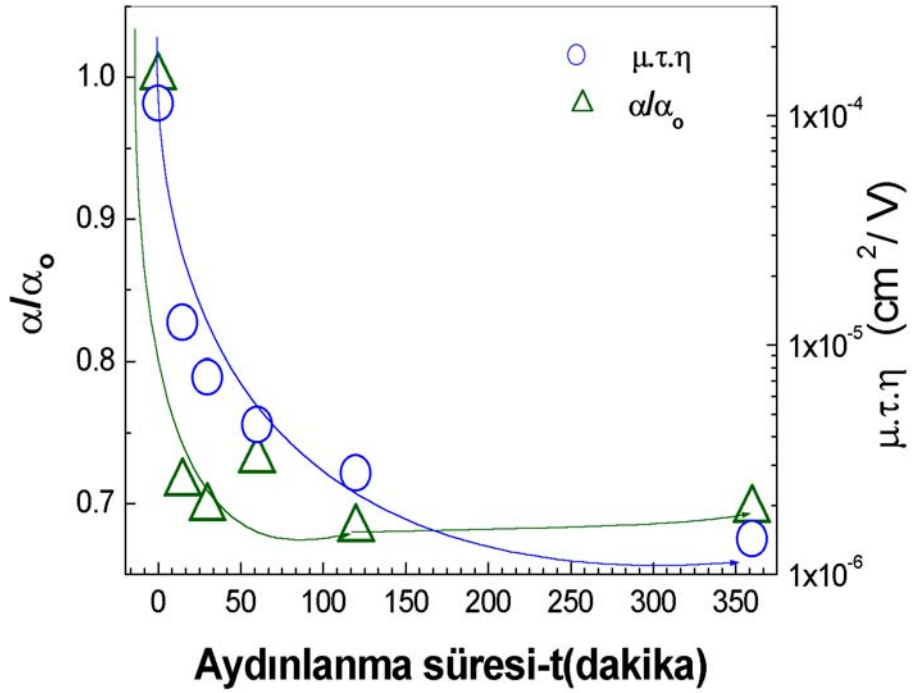
Şekil 4.121.a) Normalize soğurma ve $\tau\mu\eta$ değerlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.



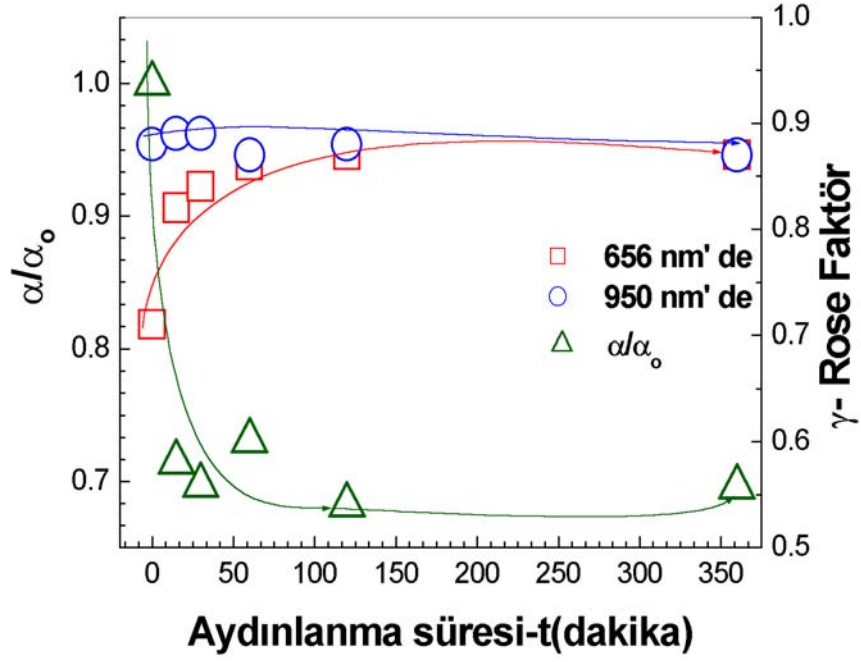
Şekil 4.121. b) Rose Faktörlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.

4.8.5. Set-5 örnek-3

4.8.5.1. Işıl kusur kinetiğinin incelenmesi



Şekil 4.122.a) Normalize soğurma ve $\tau\mu\eta$ değerlerinin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.

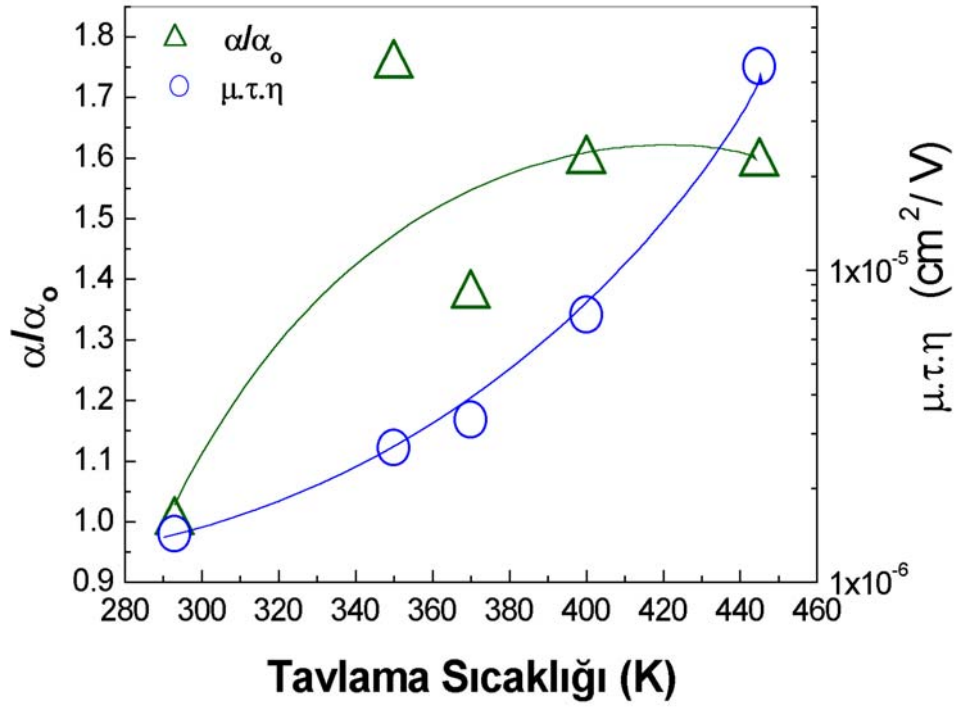


Şekil 4.122.b) Rose Faktörlerin aydınlanma süresine bağlı değişimleri.

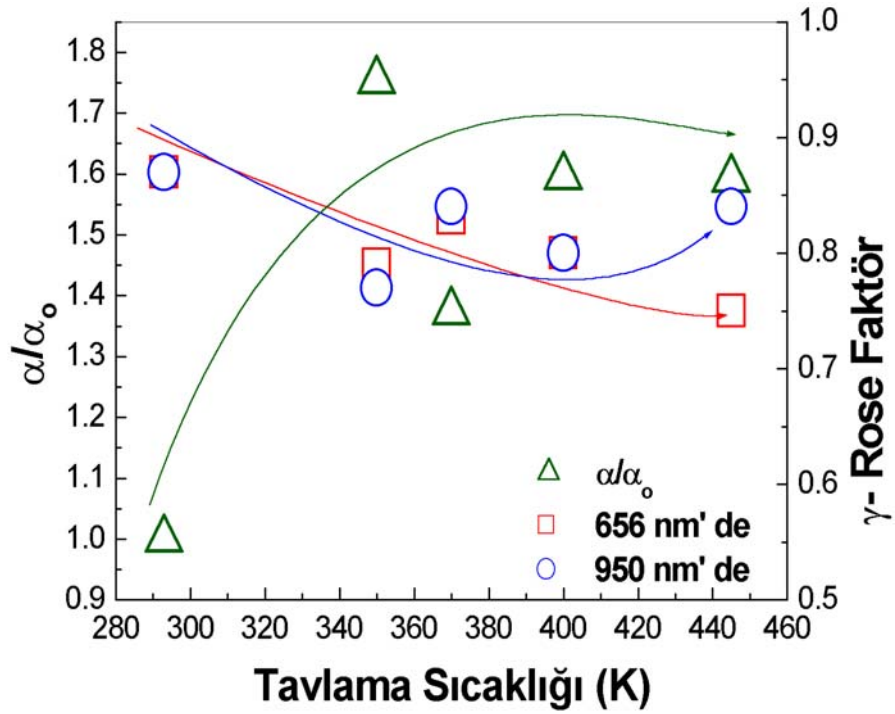
Şekil 4.122'de ısı kusur yaratma kinetiği adımları sonrası ölçülen foton akısına bağlı fotoiletkenlik ölçümüyle elde edilmiş, normalize soğurma değerleri, Rose faktör ve $\tau\mu_n$ değerlerinin kusur yaratma süresine bağlı değişimleri verilmektedir. Şekil 4.122.a'daki değişimde ısı kusur yaratma süresine bağlı olarak kusur düzeylerinin azaldığı gözlemlenmektedir. Azalan kusur yoğunluğu ile $\tau\mu_n$ çarpımı değerinin de küçüldüğü gözlemlenmektedir. Şekil 4.122.b'de Rose Faktörün kusur yaratma süresine bağlı değişiminde IR Rose faktörünün sabit bir değerde doyuma ulaştığı, Red Rose faktörü değerinin ise %15 civarında yükseldikten sonra uzun süreli ısı kusur yaratma süreci sonucunda doyuma ulaştığı gözlemlenmektedir.

4.8.5.2. Tavlamanın ısı kusur kinetiğine etkisi

% 85 helyum ile seyreltilerek hazırlanmış a-Si:H ince filminde, diğer örneklerle benzer şekilde tavlama sıcaklığının artmasıyla birlikte kusur yoğunluklarının büyüdüğü gözlemlenmektedir.



Şekil 4.123.a) Normalize soğurma ve $\tau\mu\eta$ değerlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.



Şekil 4.123.b) Rose Faktörlerinin tavlama sıcaklığına bağlı değişimleri.

Şekil 4.123.a'da gözlenen bu artışı yine $\tau_{\mu\eta}$ çarpanındaki büyüme takip etmektedir. Şekil 4.123.b'de IR ve Red dalga boylarına karşılık gelen Rose faktörü değerlerinin de, tavlama sıcaklığının büyümesi ile birlikte azalmaya başladığı gözlemlenmektedir.

Yapılan ısı kusur yaratma ve tavlama deneyleri boyunca takip edilen kusur yoğunluğu, Rose faktörü ve $\eta\mu\tau$ değerleri, kopuk bağ yoğunluğunun ve değerlik bandı kenarının değişimi hakkında fikir edinilmesine yardımcı olmaktadır.

Bölüm 4.8'de verilen sonuçlar, literatürde a-Si:H için gözlenen değişimlerden oldukça farklıdır ve bunların a-Si:H'daki etkiyi açıklamak amacıyla önerilmiş modeller (Wronski, 2000, Stutzmann et. al., 1985, Takeda et. al., 1998, Miyanishi et. al., 1989, Kolodziej, 2004) çerçevesinde değerlendirilmesi mümkün değildir.

Literatürde, $\mu\text{c-Si:H}$, nc-Si:H veya pm-Si:H filmlerde ısı kusurların yaratılma yada tavlama süreçlerinin incelendiği çok sınırlı sayıda çalışma olduğu görülmektedir. Bunlar arasında en detaylı olanı Longeaud (2002) tarafından yapılan çalışmadır. Bu çalışmada, silan gazı farklı oranlarda argon, helyum veya hidrojen gazları ile seyreltilerek değişik RF güçlerinde, alttaş sıcaklıklarında ve gaz basınçlarında filmler hazırlanmıştır. Bu filmler üzerinde gerçekleştirilen ısı kusur yaratma ve tavlama adımları sonrası yapılan MPC ve CPM ölçümleriyle filmlerin durum yoğunluklarındaki değişim incelenmiştir. Şiddetli ışıkla aydınlatmayı takiben filmlerdeki kusur yoğunluğunun arttığı ve iletkenlik bandı kenarının genişlediği gözlenmiştir. Kristallenmenin hemen sınırında hazırlanmış veya polymorphous filmlerde, aydınlatma ve takibindeki tavlama işlemlerinden sonra durum yoğunluğunda geri dönüşümü olmayan (tersinmez) değişimler gözlenmiştir. Longeaud'un gözlemlerini açıklamak için önerdiği model şöyle özetlenebilir: Tavlama sürecine tabi tutulan örneklerde, Si-H bağlarından hidrojen uzaklaşmaya başlamıştır. Hidrojenin yapıdan uzaklaşmaya başlaması, hidrojen molekülünün tıpkı bir katalizör olarak görev yapmasını sağlar. Klastırlar yada kristal tabakaları arasındaki bölgelerde voidler bulunur. Voidler çoğu zaman içlerinde rastgele dağılmış hidrojen molekülü barındırırlar. Isı kusur yaratma sürecinde salınan hidrojenler, void içerisinde bulunan hidrojenler tarafınan yaklanırlar. Diğer bir

değişle voidler yada kristal tabakaları arasındaki çatlaklar tıpkı bir hidrojen kapını gibi davranırlar. Tavlama sürecine geçildiğinde, voidlerin içine dolan hidrojen atomları malzemedeki yapısal modifikasyondan dolayı dışarı salınamazlar. Dışarıya serbest bırakılamayan bu hidrojenlerin kopuk bağları pasive edememeleri sebebiyle kusur yoğunluğunda bir azalma gözlenememektedir.

Longeaud yaptığı MPC ölçümleri ile, ışııl kusur yaratma süreçleri sonunda iletkenlik bandı kenarının genişlediğini göstermiştir. Bu tez çalışmasında ışııl kusur yaratma süreçleri sonunda ölçülen Rose faktörü değerlerinde gözlenen artış (set-5 örnek-5 ve set-3 örnek-2), Longeaud'un gözlemine ek olarak değerlik bandı kenarının da genişlediğini göstermektedir. Şekil 4.114.a'da verilen CPM spektrumu incelendiğinde, ışııl kusur yaratma adımları sonrası Urbach kenarının artış gösterdiği çok açık bir şekilde gözlemlenmektedir. Bu açıdan bakıldığında Rose faktörünün değişimi, CPM spektrumlarından ulaşılan Urbach parametresi değişimini doğrulamaktadır.

Longeaud, film hazırlama süreci henüz bitmiş olan pm-Si:H örnekte ölçtüğü CPM spektrumu ile, film hazırlama sıcaklığından daha yüksek sıcaklıklarda tavlanan örneğin CPM spektrumlarını karşılaştırmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda elde ettiği kusur yoğunlukları değerlerinin öncekine kıyasla (ilk üretildiği andaki değeri ile kıyaslandığında) küçüldüğünü (bir mertebe) gözlemlemektedir. Bu gözlem standart hidrojenlendirilmiş amorf silisyum örneğin sergilemesi gereken davranıştan oldukça farklıdır. Longeaud bu gözlemini, foto taşıyıcıların ışıınımsız rekombinasyonu sonucu amorf yapı içindeki zayıf Si-H bağlarının kopması, kopan H atomlarının bir araya gelerek oluşturdukları H_2^i 'nin yapı içerisinde mevcut mikroboşluklarda tuzaklanması ve tavlama sürecinde H_2^i 'nin ayrışarak H atomlarının kopuk bağları doyurabilmesi şeklinde açıklamaktadır. Yapılan bu çalışmalar pm-Si:H olan yada içerisinde nanokristal adacık bulunduran örneklerin standart a-Si:H örneklerden oldukça farklı özellikler sergileyebileceğini göstermektedir.

Bölüm 4.8'de ışııl kararlılıkları incelenen filmlerin FTIR spektrumlarında, Si-O'ya ilişkin titreşim modlarının bulunmaması, bu filmlerin çoğunlukla pm-Si:H ve nc-Si:H olabileceğine işaret etmektedir (Finger et. al., 2003, Longeaud, 2002).

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum ve ilgili alaşımlarında SWE'sini açıklamak için önerilen mikroskopik modellerin önemli bir bölümünde, yapı içerisinde bulunan hidrojen atomunun, yarı-kararlılığı sağlamakta anahtar rol üstlenebileceği önerilmiştir. Bu, bağ değişimi ile olabileceği gibi (Stutzman et. al.,1985), uzun erimli hidrojen difüzyonu ile de olabilir (Branz et. al.,1999). Silan gazının helyum ile seyreltilmesi ile hazırlanan $\mu\text{c-Si:H}$, nc-Si:H ve pm-Si:H filmlerde mevcut mekanizmanın ana hatları ile korunması beklenmelidir. Ancak bu filmlerde bulunan mikro boşluklar, ara yüzeyler yada kristal adacık sınırlarında, atomların tuzaklanabileceğine işaret edilmektedir (Finger et. al., 1998, 2003).

Tüm örneklerin Rose faktörü değerlerinde gözlenen büyüüp küçülmeler değerlik bandı uzantısındaki değişimleri göstermektedir. Urbach kenarının amorf yapı içerisindeki bağ açılarının ve bağ uzunluklarının farklılığından kaynaklandığı açıkça bilindiğinden, ısı kusur yaratma yada tavlama adımları sonrası Rose faktörü değerlerinde gözlenen salınımlar amorf matris içerisinde meydana gelen yapısal değişimlerin varlığına işaret edebilir. Sözü geçen yapısal değişimler, Longeaud'un önerdiği gibi, zayıf Si-H bağlarının kopması sonucunda ortaya çıkan hidrojen atomlarının, yapı içinde bir ara yüzeyde veya mikro boşlukta tuzaklanıncaya kadar yapıda ilerleyebilmesi sebebiyle oluşmuş olabilir. Bu işlemin nc-Si:H ve pm-Si:H 'da gibi kristallenme oranı daha düşük filmlerde başat bir mekanizma olması beklenmektedir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Hazırlama koşulları Çizelge 4.1’de verilen hidrojenlendirilmiş amorf silisyum ince filmlerin, optik ve elektriksel özellikleri belirlenmiştir. Hazırlanan filmlerin optik ve elektriksel karakterizasyonu yardımıyla film hazırlama parametreleri (alttaş sıcaklığı, RF gücü, toplam gaz basıncı ve helyum seyreltme oranı) optimize edilmiştir.

Çalışmanın en başında, bilgisayar kontrollü bir sıcaklık kontrolcüsü ve 13,56 MHz RF jeneratörü tasarımı yapılarak PECVD sisteminde kullanılmıştır. İlk hazırlanan Set-1 örnekleri, 300 °C alttaş sıcaklığında, 4,5 W RF gücünde, toplam basıncın sabit tutulması kaydıyla silan gazının % 50-% 98 seyreltme oranlarında helyum ile seyreltilmesiyle hazırlandılar. Seçilen film hazırlama parametreleri (seyreltme oranı hariç) gurubumuzda önceki deneysel çalışmalarda araştırmacı arkadaşların düşük kusur yoğunluklu has örnek hazırlamak için belirledikleri film hazırlama koşullarıydı. Hazırlanan örnekler üzerinde yapılan ölçümler sonucu birkaç örneğin beklenenden daha büyük Tauc bant aralığı sergilediğinin ($>1,71$ eV) gözlemlenmesi sebebiyle vakum odacığı içerisindeki kaplama mekanik yöntemlerle aşındırılıp, set-2 örnekleri hazırlandı. Hazırlanan örneklerin karakterizasyonu sonucunda helyum seyreltme oranına bağlı olarak Tauc bant aralığı ve kusur yoğunluğunda belirgin değişimler gözlemlendi. En düşük Tauc bant aralığına (1,55 eV) sahip örnek % 50 helyum seyreltme oranında, en düşük kusur düzeyi ($6,88 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) sergileyen örnek ise % 98 helyum seyreltme oranında hazırlanabilmiştir.

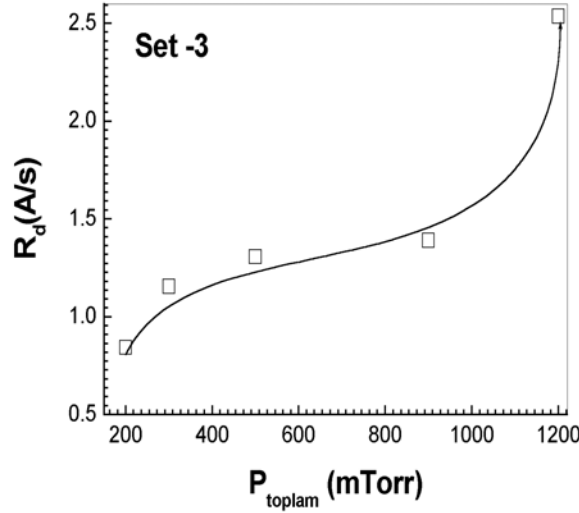
Örneklerin büyüme hızlarında helyum oranının artmasıyla birlikte artış gözlemlenmesine rağmen, kusur yoğunluğunun istenilenden yüksek olması sebebiyle vakum odacığı kimyasal temizlik sürecinden geçirildi. Bu aşamalardan sonra, termoçiftin konumunun değişmesi sebebiyle tekrar alttaş sıcaklık optimizasyonun yapılması gerekti. Bu nedenle, sadece saf silan gazı kullanılarak literatürde tanımlanmış a-Si:H örneğin özelliklerine yakın, a-Si:H örnek hazırlamak için gerekli olan film optimizasyon koşulları araştırıldı. Standart örnek seti adı altında hazırlanan örneklerde, RF gücü ve toplam gaz basıncı sabit tutularak

literatürde rapor edilen alttaş sıcaklık aralığında (200-300 °C), yedi örnek hazırlanmıştır. Hazırlanan örneklerin optik ve elektriksel karakterizasyonu sonucunda, düşük kusurlu örneklerin 230 °C alttaş sıcaklığı civarında hazırlanabileceği tespit edilmiştir. Bu değer literatürde, düşük kusur yoğunluğunda amorf silisyum ince film hazırlaması için rapor edilen alttaş sıcaklığı ile oldukça uyumludur. Fakat optiksel ölçümler sonucunda bulunan film kalınlıklarının, alttaş sıcaklığına bağlı olarak tutarsız değişimler sergilemesi sebebiyle RF jeneratöründe bir problem olduğunun anlaşılması üzerine ikinci bir yeni RF jeneratörü, RF güç ölçeri ve RF empedans uyuşturucusu tasarımı ve uygulaması yapıldı. Standart örnek setinin içinden, 300 °C hazırlanmış örnek seçilerek bu örnek üzerinde, FTIR ve fotoiletkenlik tepki süresi ölçümleri yapılmıştır. Saf silan gazı ile hazırlanarak elde edilen bu örneği seçmiş olunmasındaki sebep; helyumun a-Si:H örneklerin optik ve elektriksel özelliklerine getirdiği katkının anlaşılmasında bu örneğin referans örneği olarak kullanılacak olmasıdır.

Literatürde yüksek fotoiletkenlik değerine sahip (10^{-5} S/cm), Staebler-Wronski etkisine karşı kararlı, düşük kusur yoğunluğuna sahip (10^{15} cm⁻³) ve büyüme hızı yüksek (2,5 Å/s) a-Si:H örneklerin elde edildiğini rapor eden çalışmalar vardır (Middya et. al., 1996,1993, Souffi et. al., 2002, Banerjee et. al., 2002, Carabe et. al., 1999, Saadane et. al., 2003, Cabarrocas et. al.,1998). Bu çalışmaların büyük çoğunluğu, kapasitif elektrotlu PECVD sisteminde silan ve hidrojen gaz karışımları ile elde edilmişlerdir. Hidrojen, kopuk bağ yoğunluğunu azaltarak kusur seviyesinin küçülmesini sağlayıp, yapı içinde amorf matris içine gömülmüş kristal adacıkların oluşma sürecine katkıda bulunup yüksek fotoiletken örneklerin oluşumuna neden olmaktadır. Takip eden çalışmalar bu örneklerin Staebler-Wronski etkisine karşın diğer sıradan a-Si:H örneklerden daha kararlı olduğunu rapor etmektedir (Cabarrocas et. al., 1998, Midyya et. al., 1996, 1993). Oldukça hızlı büyüeyebilen (1,2 Å/s) bu tür a-Si:H örnekler içindeki kristalite fazı kritik bir oranı geçtikten sonra ortaya çıkan bu yapıya mikro kristal adı verilmektedir. Sözü geçen amorf yapı içine gömülmüş olan kristal fazlar, HTEM (high resolution transmission electron microscopy) ölçümlerinde belirgin olarak gözlemlenebilmektedir. Middya ve gurubu yaptığı bir çalışma ile helyumla seyreltmenin hidrojenle seyreltmeye alternatif olabileceğini gösterdi (Middya et. al., 1993,1996). Şekil 2.8, Middya ve gurubunun 1999'da yapmış oldukları bir çalışmadan alınan grafiktir. Şekilde görüldüğü gibi,

silan gazının hidrojenle seyreltilmesi ile 1,2 Å/s büyüme hızına ulaşılırken, helyumla seyreltme sonucu 1,9 Å/s hıza ulaşılmıştır. Middya ve gurubunun gözlemleri, silan gazı akış hızı yada toplam reaktör gaz basıncına göre filmlerin optik ve elektriksel özelliklerinin nasıl bir değişim sergilediğini açıklamaktaydı. Yapılan literatür araştırmasında helyumla seyreltme tekniği ile hazırlanan a-Si:H filmlerin optik ve elektriksel özelliklerinin RF gücüne, alttaş sıcaklığına ve seyreltme oranına bağlı olarak nasıl bir değişim sergilediği konusunda bir çalışmaya rastlanamıştır.

Silan gazının helyum ile seyreltilmesi ile hazırlanacak a-Si:H örneklerin optik ve elektriksel özelliklerinin film büyütme koşullarına bağımlılığının belirlenmesi gereklidir. Bu nedenle öncelikle toplam reaktör gaz basıncı optimizasyonu yapılabilmesi amacı ile seyreltme oranı sabit tutulmak koşuluyla farklı toplam basınçlarda örnekler (set-3) hazırlandı. Yapılan deneysel analizler, set-3 örneklerinin film büyüme hızlarının, Middya ve arkadaşlarının 1996 yılında yaptığı çalışma ile oldukça tutarlı sonuçlar gösterdiğini ortaya koymuştur. Şekil 5.1'de Middya ve arkadaşlarının 1996 yılında yaptığı bir makaleden alınan grafikle set-3 örneklerinin karakterizasyonu sonucunda elde edilen film büyüme hızı grafiklerini göstermektedir.

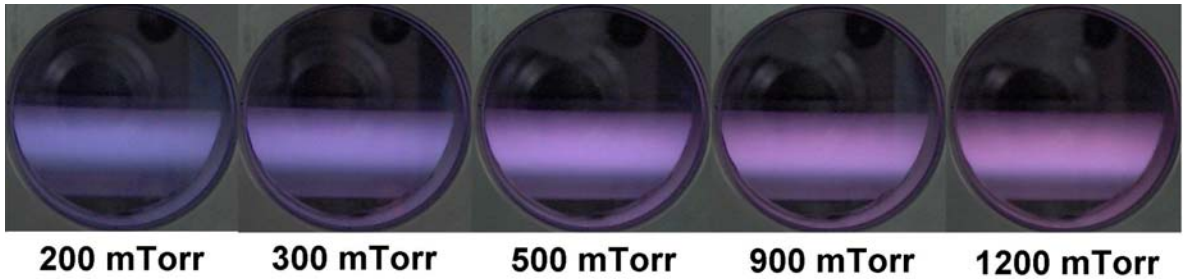


Şekil 5.1. Film büyüme hızının toplam gaz basıncına bağlı değişimi

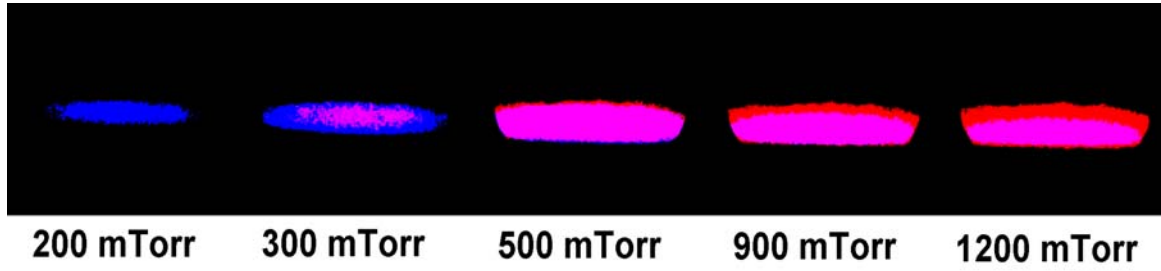
Şekil 2.5'de, 1200 mTorr toplam basınç değerine karşılık gelen film büyüme hızı değeri 0,4 Å/dakikadır (2,4 Å/s). Set-3 örneklerinden, 1200 mTorr toplam basınçta ulaşılan film büyüme hızı 2,5 Å/s olup elde edilen sonuçların literatürle uyumu

görülmektedir. Ayrıca büyüme hızının toplam basınca fonksiyonel bağıllığı da, set-3 örneklerinde gözlenen değişimle oldukça iyi uyum içerisinde. Middya ve arkadaşlarının Şekil 2.5.a'da verilen gözleminde, 1 Torr'dan daha yüksek toplam basınçta elde edilen örneklerin optik ve elektriksel özelliklerinin diğer örneklerden oldukça farklı olduğuna da değinilmektedir (Middya et. al., 1993,1996). Şekil 5.1'deki değişim incelendiğinde, 200-900 mTorr basınç aralığında büyüme hızındaki artışın eğimi ile 900-1200 mTorr aralığındaki artışın eğiminin oldukça farklı olduğu görülmektedir. Bu yüzden 0,9 Torr'luk toplam basınç değeri, set-3 örnekleri için plazma reaksiyonun farklılaşım gösterdiği bir geçiş noktası olarak düşünülebilir.

Silan ve helyum gazlarının belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen plazmanın vakum odacığındaki reaksiyona fiziksel ve kimyasal etkisi, tanımlanması oldukça karmaşık bir problemdir. Plazma reaksiyonu sonucu gerçekleşen atomik seviyelerdeki geçişler hakkında bilgi edinmek amacıyla, plazma lüminesans spektroskopi ölçümleri yapılarak plazma içindeki iyon yada parçacık türleri hakkında bilgiler elde edilebilmektedir. Bu sayede, farklı özellikler sergilediği düşünülen a-Si:H örneklerin mikroskopik yapısı tahmin edilmeye çalışılmaktadır. Plazmadan yayımlanan kısa süreli (ns, ps) fotonları algılamak çoğu zaman mümkün olmayabilir. a-Si:H örneğinin kuluçka döneminden başlayarak makroskopik bir geometriye sahip oluncaya kadar geçirdiği evre içerisinde, onun optik ve elektriksel özelliklerinin şekillenmesini başat olarak kontrol edecek parçacıklar, ölçülebilir yaşam süresine sahip olan iyonlar, radikaller yada moleküllerdir. Şekil 5.2'de set-3 örneklerinin film büyüme süreçlerinin sonuna doğru dijital CCD kamera ile aynı noktadan alınmış fotoğrafları verilmektedir.



Şekil 5.2. Set-3 örnek setinin hazırlanma sürecinde CCD kamera ile alınmış plazma görüntüleri.



Şekil 5.3. Set-3 örnek setinin hazırlanma sürecinde CCD kamera ile alınıp dijital filtrelerden geçirilmiş plazma görüntüleri (Adobe Photosohpe).

Şekil 5.3’de ise dijital renk filitresinden geçirilmiş görüntüler verilmektedir. Şekildeki değişim incelendiğinde, başlangıçta 200 mTorr gaz basıncında (% 95 helyum seyreltme oranında) gözlenen mavi renge karşılık gelen spektrumun, seyreltme oranı sabit kalmak koşuluyla toplam gaz basıncının artmasıyla birlikte kırmızıya doğru kaydığı görülmektedir. 1200 mTorr toplam gaz basıncına gelindiğinde, elektrotlar arasında hapsolan plazmanın bölgesel olarak daha da genişlediği ve plazmadan yayımlanan fotonik spektrumun hem bant genişliğinin hem de şiddetinin arttığı görülmektedir. Bu gözlem, plazma içindeki iyonizasyon enerjisinin büyüdüğünü göstermektedir. İyon enerjilerinin büyümesi, plazma reaksiyonu içindeki parçacık türlerinin çarpışma olasılığının artmasını sağlayarak, atomların ortalama serbest yolunun ksalmasına neden olur. Sonuçta, amorf silisyumu oluşturmak için bir araya gelen silisyum ve hidrojen atomlarının daha kararlı enerji sitelerine yerleşmeleri sağlanır. Yüksek iyon enerjisine maruz kalan plazma içindeki gaz türlerinin moleküllerine yada radikallere ayrışmadan vakum odacığını terk etme olasılığı oldukça düşüktür. Diğer bir deyişle plazma içindeki iyonların enerjisi büyüdükçe silan gaz molekülünün israf olasılığı azalır, bu da film büyüme sürecine daha çok silisyum ve hidrojen atomun katkıda bulunması anlamına gelir. Optimize edilen toplam basınç, RF gücü ve helyum seyreltme oranı değerleri film büyüme hızının maksimum değere ulaşmasını sağlayacaktır.

Set-3 örneklerinin optik ve elektriksel karakterizasyonu sonucu, en düşük kusur yoğunluğuna ($3,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) sahip örneğin 300 mTorr toplam basınç altında hazırlanabileceği ve set-3 örneklerinin tümünün kusur yoğunluklarının 10^{16} cm^{-3} düzeyinde olduğu gözlemlenmektedir (Şekil 4.64.). Tauc bant aralıkları ise toplam

gaz basıncı değerine bağlı olarak 1,66-1,76 eV arasında değiştirilebilmiştir. Kusur yoğunluğunun aynı mertebede kalması şartıyla, Tauc bant aralığının 1,66-1,76 eV arasında değiştirilebilmesi, heteroeklem aygıt üretimi için oldukça cazip bir uygulama olarak görünmektedir. Set-3 örnekleri içinde en yüksek büyüme hızına sahip örnek (2,54 Å/s), 1200 mTorr toplam gaz basıncında hazırlanan örnektir. Bu yüzden bundan sonra hazırlanacak örneklerde toplam basınç değeri sabit tutulmuş, en hızlı büyümenin kaydedildiği 1200 mTorr olarak seçilmiştir.

Set-4 örnek setinde ise, örnek hazırlama değişkeni RF gücüdür. Toplam basınç 1200 mTorr, alttaşı sıcaklığı 230 °C olmak üzere, farklı RF güçlerinde örnekler hazırlanıp, karakterize edilmiştir. Yapılan ölçümler sonucu 24,8 W RFgücünde hazırlanan örneğin büyüme hızının 4,6 Å/s olmasına rağmen, en düşük Urbach enerjisine (54,6 meV) ve kusur seviyesine sahip ($2,95 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) örneğin 19,9 W RF gücünde hazırlanabileceği görülmüştür. En düşük Urbach enerjisini ve kusur seviyesini sergileyen örneğin 19,9 W'ta hazırlanması sebebiyle, bundan sonra hazırlanacak örneklerde RF gücü 19,9 W değerinde sabit tutulmuştur.

Set-5'te hazırlanan örneklerde film hazırlama koşullarındaki değişken helyum seyreltme (% 85-% 99) oranıdır. Bu sette hazırlanan örneklerde, seyreltme oranı küçüldükçe film büyüme hızının arttığı, özellikle % 85 seyreltme oranında elde edilen örneğin büyüme hızının 9,5 Å/s olduğu kaydedilmesine rağmen, en düşük kusur yoğunluğu ($2,6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) ve Urbach enerjisi (43,5 meV) sergileyen örnek % 99 seyreltme oranında hazırlanmıştır. Bu örnek şu ana kadar literatürde kaydedilmiş en düşük kusur seviyesine ve Urbach enerjisine sahip olan örnektir. Diğer bir önemli sonuç ise; Tauc bant aralığının helyum seyreltme oranıyla (%85-%99) artmasıdır. Benzer gözlemler set-2 örneklerinde de %50'den daha yüksek seyreltme oranlarında gözlemlenmekteydi. Çalışmanın bu kesiminde; amorf silisyumun herhangi bir alaşımı elde edilmeksizin, standart hidrojenlendirilmiş amorf silisyum özellikleri sergileyen, fakat farklı Tauc gap aralığına sahip örnekler silan gazının helyum ile seyreltilmesiyle elde edilebilmiştir.

Helyum gazının, hazırlanan örneklerin optik ve elektriksel özelliklerine etkisinin karşılaştırılması amacı ile üç örnek seçilmiştir. Seçilen örneklerin film hazırlama

koşulları, Çizelge 5.1’de ve ölçülen bazı film parametreleri de Çizelge 5.2’de verilmektedir.

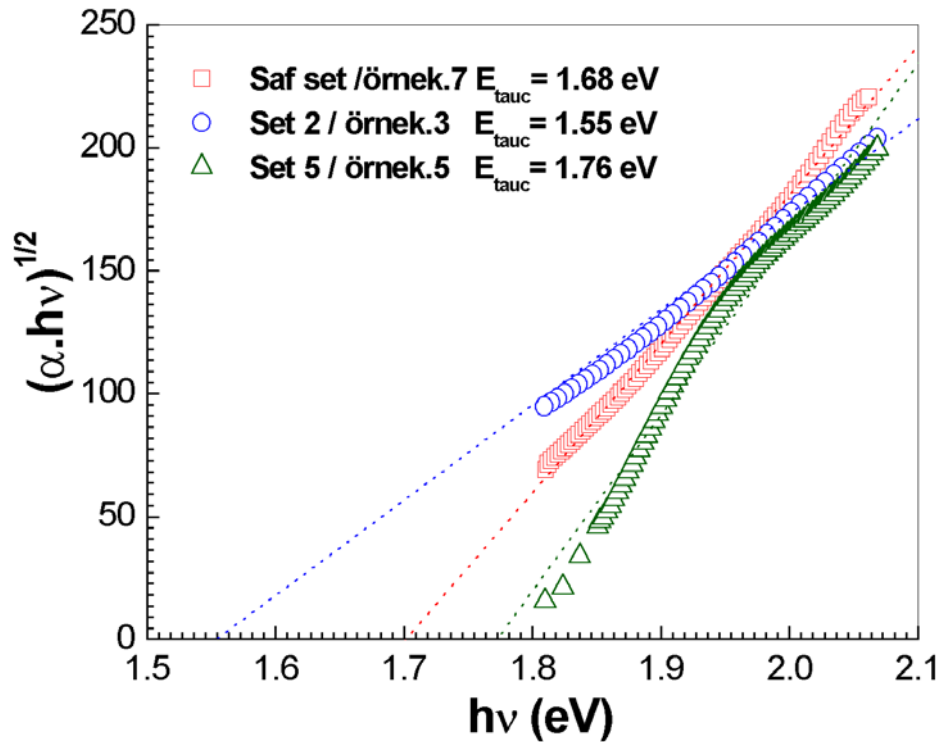
Çizelge 5.1. Saf silan gazı ve helyum ile seyreltilerek hazırlanmış örnekleri karşılaştırmak amacıyla seçilen örnekler.

Örnekler	Seyreltme oranı D.R[%]	Toplam gaz basıncı P(mTorr)	Alttaş sıcaklığı T(°C)	RF gücü (W)
Standart set örnek-7	0	200	300	4,5
Set-2 örnek-3	50	500	300	4,5
Set-5 örnek-5	99	1200	230	19,9

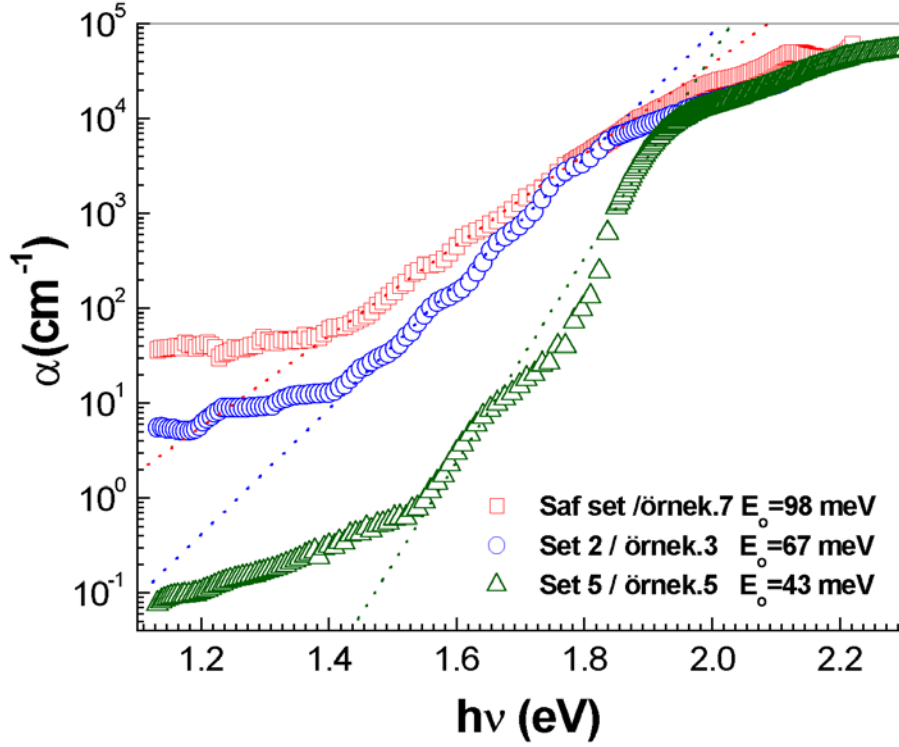
Çizelge 5.2. Seçilen örneklerin karakterizasyonu sonucunda elde edilen bazı film parametreleri.

Örnekler	N_d (cm ⁻³)	E_o (meV)	E_T (eV)	μ_d (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹) _{300K}	ΔE_a (eV)	γ
Standart set örnek-7	1.0×10^{18}	98	1.68	1	0.15	0.70
Set-2 örnek-3	1.5×10^{17}	67	1.55	10^{-2}	0.09	0.73
Set-5 örnek-5	2.6×10^{15}	44	1.76	4×10^{-2}	0.05	0.86

* Çizelgedeki 4,5 W’lık RF güç değerinin, detayları Bölüm 3’te anlatılan RF güç ölçer ekipmanları ile yapılan kalibrasyonlar sonunda 19,9 W değerine karşılık geldiği hesaplanmıştır.



Şekil 5.4. Çizelge 5.1’de verilen örneklerin Tauc çizimleri.



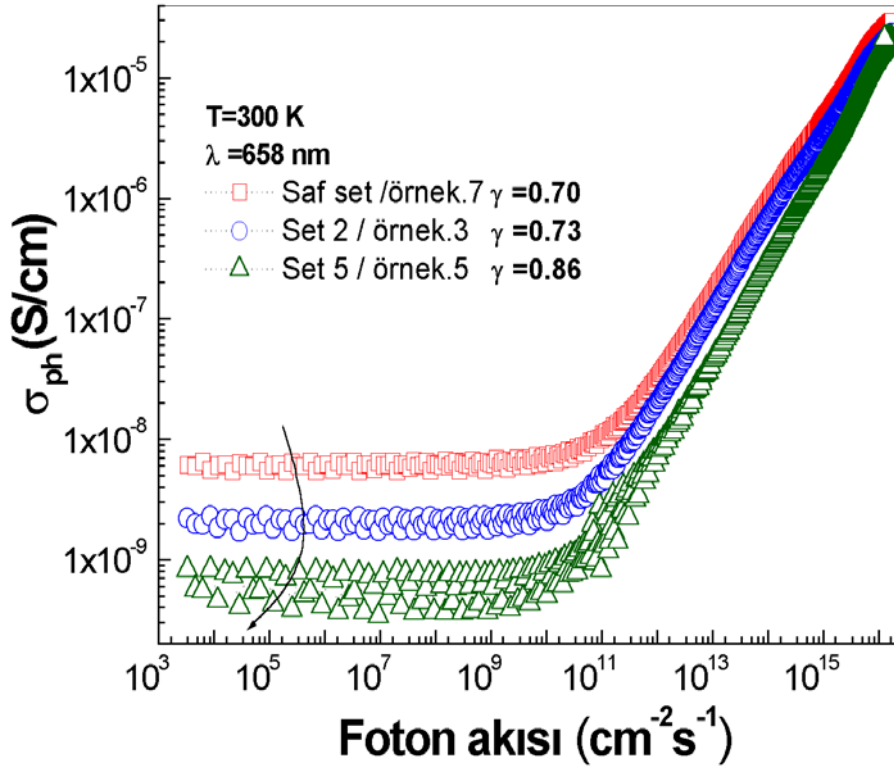
Şekil 5.5. Çizelge 5.1’de verilen örneklerin CPM spektrumları.

Şekil 5.4’de, Çizelge 5.1’de verilen örneklerin Tauc çizimleri sunulmaktadır. Şekilde görüldüğü gibi, helyum seyreltme oranına bağlı olarak Tauc optik aralığı 1,55-1,76 eV arasında değişim sergilemektedir. Şekil 5.5’de ise aynı örneklerin CPM ölçüm sonuçları sunulmaktadır. Helyum seyreltme oranına bağlı olarak CPM spektrumu, özellikle de 1,2 eV’deki soğurma değerinin belirgin şekilde değişim gösterdiği ve kusur yoğunluğunun helyum seyreltme oranı ile azaldığı görülmektedir. Çizelge 5.1’de verilen örneklerin sıcaklık ve foton akısına bağlı fotoiletkenlik verileri Bölüm 4’de verilmişti. Bu verilerden hesaplanan Rose faktörü değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri Şekil 5.6’da verilmektedir.

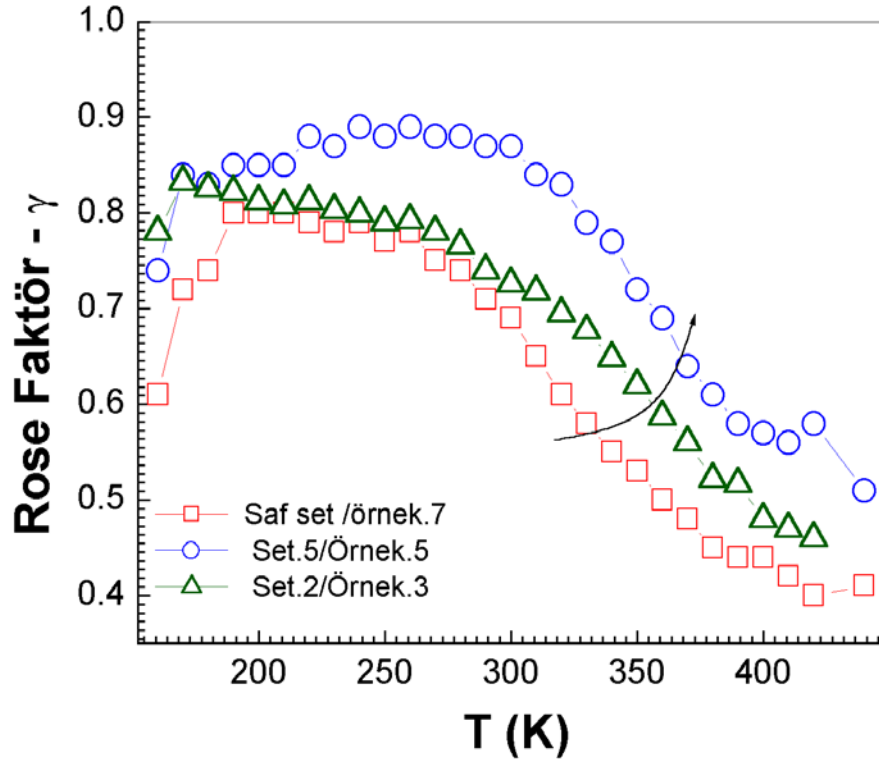
Şekil 5.6’deki değişim incelendiğinde, helyum seyreltme oranının artmasıyla birlikte Rose Faktörü değerlerinin arttığı gözlemlenmektedir. Rose faktörü değerinin sıcaklığa bağlı olarak sergilediği değişim değerlik bandı kenarı uzantısının bir ölçütüdür. Rose faktörü değerlerinin örnekten örneğe yüksek değerlere doğru kayması değerlik bandı kenarının giderek büyüdüğüne işaret etmektedir. CPM spektrumundan elde edilen Urbach enerjisi değerlerinin helyum oranının artmasıyla birlikte küçük enerji değerlerine kayması da yukarıda sözü geçen gözlemi doğrulamaktadır.

Şekil 5.7’de 300 K’de ölçülen foton akısına bağımlı fotoiletkenlik sonuçları verilmektedir. Şekilde verilen değişim incelendiğinde, % 0 ve % 50 seyreltme oranına sahip a-Si:H örneklerde, foton akısının yaklaşık 10^{10} - 10^{11} $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ değerine kadar fotoiletkenliğin neredeyse sabit kaldığı, sonraki foton akılarında fotoiletkenliğin Rose bağıntısına uygun olarak arttığı gözlemlenmektedir.

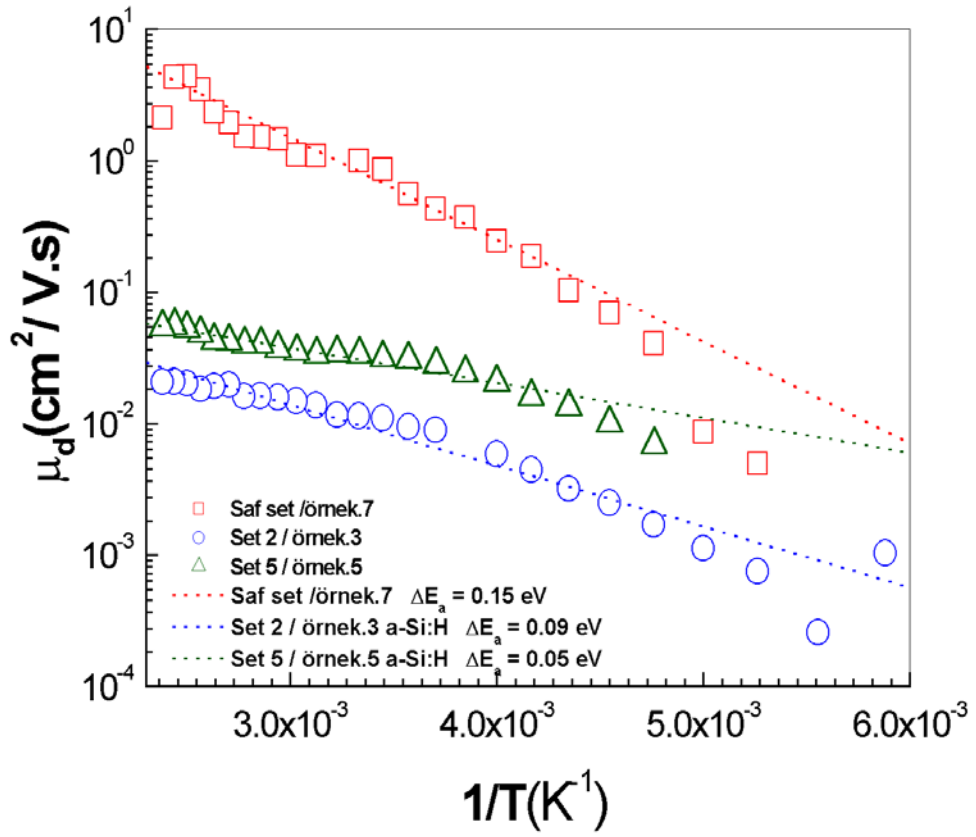
% 99 helyum gazı ile seyreltilen örnek incelenecek olursa, bu örmekte fotoiletkenliğin kurulmaya başladığı foton akısı değerinin diğer örneklerden daha düşük olduğunun görülmesi, yüksek oranda helyum gazı ile seyreltilerek hazırlanmış a-Si:H örneklerin, saf silan gazı veya düşük seyreltme oranlarında hazırlanan örneklere göre fotonik duyarlılıklarının daha fazla olduğu görülmektedir.



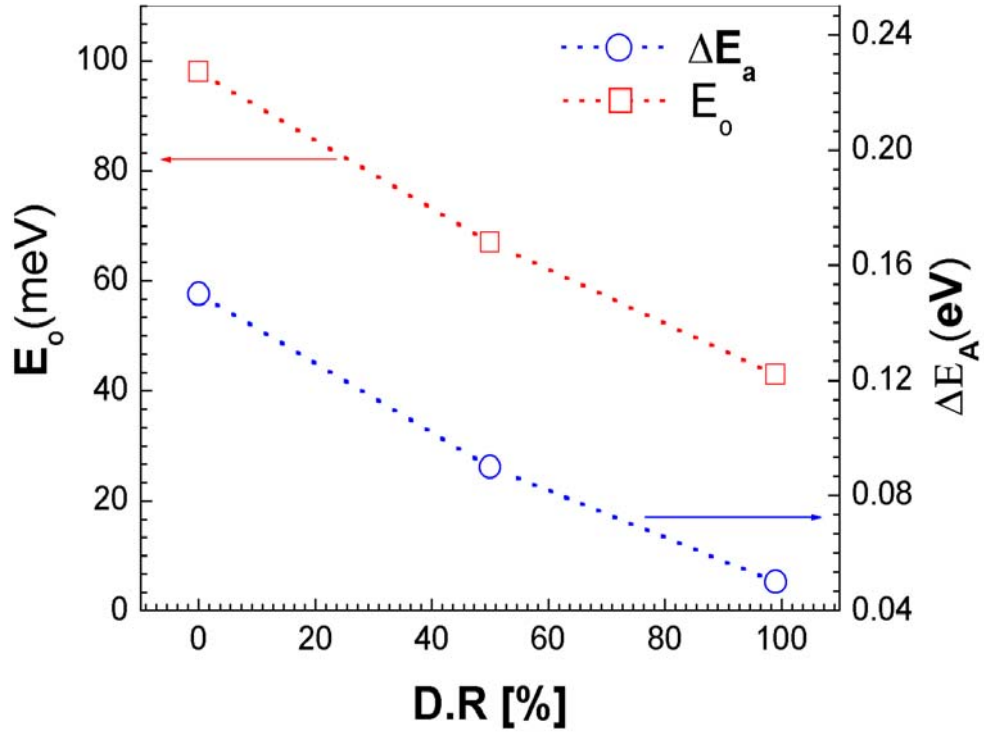
Şekil 5.6. Çizelge 5.1.’de verilen örneklerin oda sıcaklığındaki foton akısına bağlı fotoiletkenlik değişimleri.



Şekil 5.7. Çizelge 5.1.'de verilen örneklerin sıcaklığa bağlı olarak Rose faktörlerinin değişimi.

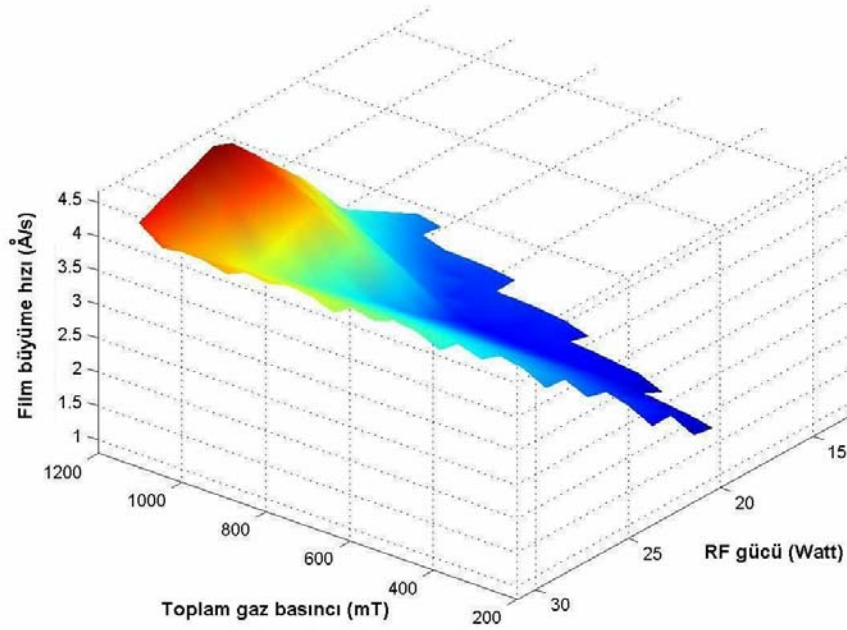


Şekil 5.8. Çizelge 5.1'de verilen örneklerin sıcaklığa karşı sürüklenme mobilitelerinin değişimi.



Şekil 5.9 Çizelge 5.1’de verilen örneklerin, helyum seyreltme oranına bağlı olarak Urbach enerjilerinin ve sürüklenme mobilitesi aktivasyon enerjilerinin değişimi.

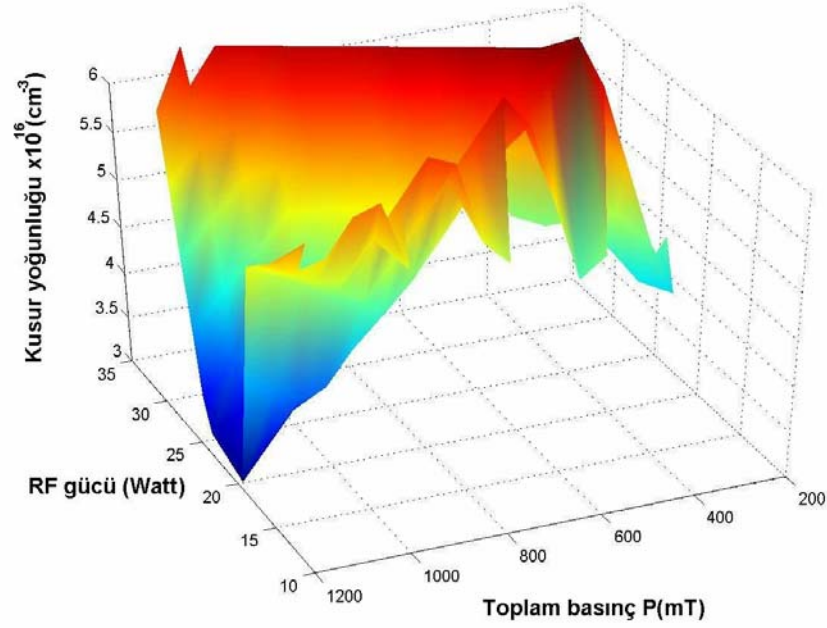
Şekil 5.8’de fotoiletkenlik tepki zamanı ölçümü yardımıyla elde edilen sürüklenme mobilitesi değerlerinin sıcaklığa bağlı değişimleri sunulmaktadır. Şekildeki değişim incelendiğinde, sürüklenme mobilitesinin sıcaklıkla aktivasyon türü bir davranış sergilediği görülmektedir. Gözlemlenen aktivasyon türü davranış gösteren eğrilere exponansiyel fonksiyonlar çakıştırılarak hesaplanan aktivasyon enerjisi değerleri, Şekil 5.9’da verilmektedir. Şekil 5.9’ da sol düşey eksen CPM ölçümü sonucunda bulunan Urbach enerjisi değerlerini, sağ düşey eksen ise sürüklenme mobilitesi değerlerinden hesaplanan aktivasyon enerjilerini göstermektedir. Sürüklenme mobilitesi değerlerinden hesap edilen aktivasyon enerjisi değerleri iletkenlik bandı uzantısı kenarının bir ölçütüdür. Bu sebeple, Şekil 5.9’daki değişimi incelenerek, helyum seyreltme oranının artması ile birlikte hem iletkenlik hemde değerlik bandı kenarının keskinleşmeye başladığı söylenebilir.



Şekil 5.10. % 95 helyum seyreltme oranında ve 230 °C alttaş sıcaklığında hazırlanan örneklerin film büyüme hızlarının, RF gücüne ve toplam gaz basıncına bağlı değişimi.

Altı setten oluşan a-Si:H filmlerin karakterizasyonu sonucu optimum film hazırlama parametrelerinin belirlenebilmesi amacıyla üç boyutlu grafikler çizilmiştir. Şekil 5.10'da % 95 helyum seyreltme oranında ve 230 °C alttaş sıcaklığında hazırlanan örneklerin, RF gücüne ve toplam gaz basınca bağlı olarak film büyüme hızının değişimi verilmektedir. Şekil 5.10 incelendiğinde, toplam basıncın 500 mTorr ve RF gücünün 20 W'tan daha büyük değerlerindeki koyu kırmızı bölgelerde film büyüme hızı büyük değişimler sergilemekte olup, toplam basıncın 200-500 mTorr olduğu bölgelerde ise film büyüme hızında fazla bir değişim görülmemektedir. Ayrıca 20 W'tan küçük RF güçlerinde ve 200-500 mTorr toplam gaz basıncındaki koyu mavi renkli bölgede hazırlanan örneklerin oldukça düşük büyüme hızı sergilediği görülmektedir. Büyüme hızındaki doğrusal değişimin eğiminin değiştiği geçiş noktası 500 mTorr toplam gaz basıncı ve 20 W RF gücü civarındadır. Bu nokta, Şekil 2.5' de verilen değişim ile oldukça uyumludur ve Şekil 2.5 incelenecek olursa, özellikle 1 Torr'dan daha büyük basınç değerlerinde hazırlanan örneklerin büyüme hızlarının artan toplam basınçla hızla arttığı görülmektedir. Middya ve gurubu, 1 Torr'dan daha düşük toplam gaz basıncındaki bölgeyi alfa bölgesi ve daha yüksek toplam gaz basıncı bölgesini gama bölgesi olarak adlandırarak her iki bölgede elde

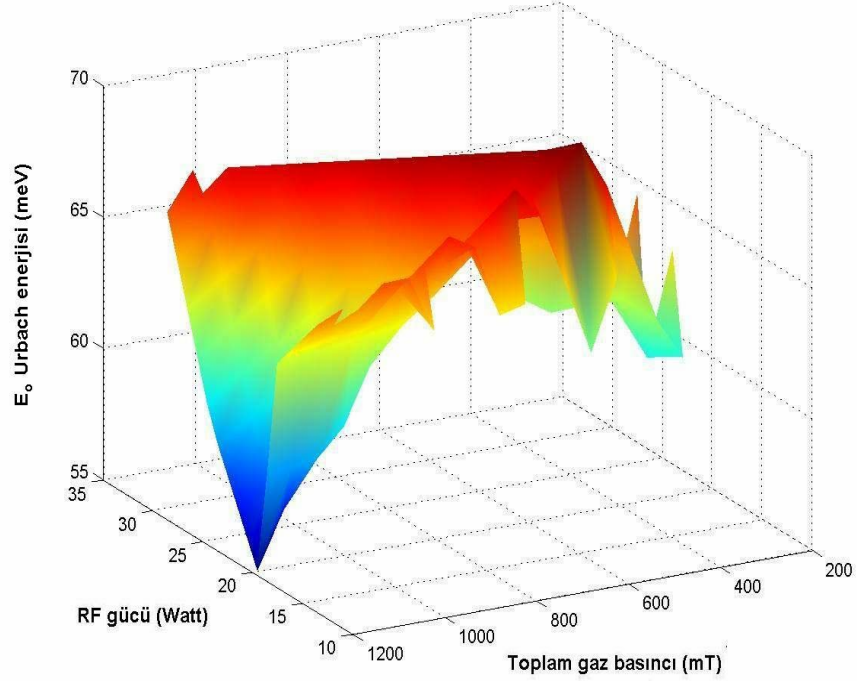
edilen a-Si:H örneklerin optik ve elektriksel özelliklerinin birbirlerinden oldukça farklı olduğunu vurgulamaktadırlar. Bu gurubun yaptığı çalışmalarda, 1 Torr'dan daha büyük toplam basınç altında hazırlanan örneklerin fotoiletkenliklerinin daha yüksek olduğu ve Staebler Wronski etkisine karşı daha kararlı oldukları farklı deneysel yöntemlerle ortaya konulmuştur.



Şekil 5.11. %95 helyum seyreltme oranında ve 230 °C alttaş sıcaklığında hazırlanan örneklerin kusur yoğunluklarının , RF gücüne ve toplam gaz basıncına bağlı değişimi.

Şekil 5.11'de 230 °C alttaş sıcaklığında ve %95 helyum seyreltme oranının sabit tutularak hazırlanmış örneklerin kusur yoğunluklarının, RF gücüne ve toplam gaz basıncına bağlı (Middya ve gurbunun α ve γ bölgesine karşılık alınabilir.) değişimleri verilmektedir. Şekildeki değişim incelendiğinde kırmızı bölgeler kusur yoğunluğunun yüksek değerler sergilediği film hazırlama koşullarını, kırmızı renkten mavi renge geçiş bölgeleri ise kusur yoğunluğunun bu bölgede küçülmeye başladığını ifade temektedir. Üç boyutlu bu grafik kabaca, ters dönmüş ve dikey olarak ikiye bölünmüş bir koniye benzetilebilir. Koninin sivri noktasına doğru yaklaşıldıkça kusur yoğunluğu küçülmeye başlamaktadır. Kusur yoğunluğunun en düşük olduğu bölgeler koyu mavi renkli olan bölgeler olup, düşük kusur yoğunluklu filmlerin, seyreltme oranı % 95, alttaş sıcaklığı 230 °C, RF gücü 20 W düzeyinde ve toplam gaz basıncı ise 1200 mTorr civarında seçilerek büyütülebildiği Şekil 5.12'den anlaşılmaktadır. Eğer RF gücünü 20 W düzeyinde tutup toplam gaz

basıncı 500 mTorr'dan daha düşük değerlere çekilirse, kusur düzeylerinin sarı ve yeşil bölgelerle temsil edilen bölgeye doğru kayarak azalma sergileyebileceği gözlemlenmektedir.



Şekil 5.12. % 95 helyum seyreltme oranında ve 230 °C alttaş sıcaklığında hazırlanan örneklerin Urbach enerjilerinin , RF gücüne ve toplam gaz basıncına bağlı değişimi.

Şekil 5.12'de geniş bir toplam gaz basıncı taranarak hazırlanmış örneklerin kusur yoğunluklarının, RF gücüne ve toplam gaz basıncına bağlı değişimleri verilmektedir. Şekil 5.11' deki gözlemlerle oldukça iyi bir uyum içerisinde olan Urbach enerjileri daha keskin uçlu ters bir koni ile temsil edilebilir. Koniğin üst bölgeleri kırmızı renkle temsil edilmekte maviye doğru geçiş tonu sergileyen bölgeler gidildikçe Urbach enerjideki değişimin küçüldüğü rengin maviye geçişi ile kendini göstermektedir. Urbach enerjisi değeri oldukça küçük olan a-Si:H filmlerin 19,9 W RF gücü ve 1200 mTorr toplam gaz basıncında hazırlanabileceği koyu mavi renkle gösterilen bölgeden anlaşılmaktadır. Kusur yoğunluğu değişimini gösteren grafikte (Şekil 5.11), bu bölge biraz daha geniş bir aralıkla kendini göstermekteydi. Düşük toplam gaz basınçlarına doğru gidildiğinde (<300mTorr) yine kırmızı renk ile gösterilen bölgede mavi renge geçiş tonlarının görülmesi, bu

bölgede de, Urbach enerji değerleri nispeten küçük filmler hazırlanabileceğini işaret etmektedir.

Çizilen üç boyutlu grafikler yardımıyla film optimizasyon koşulları belirlenerek, silan gazının helyum ile seyreltilmesi sonucunda büyüme hızı yüksek, düşük kusur yoğunluklu ve kabul edilebilir küçük Urbach enerjisi değerlerine sahip örnekler hazırlanabileceği açıkça gösterilmiştir. Hazırlanan örneklerde hidrojen bağlanma yapıları ortaya konularak optik ve elektriksel ölçümler ile aralarında bağlantı kurulabilmesi amacıyla örneklerden bazılarının FTIR ölçümleri de yapılmıştır. Yapılan FTIR analizleri sonucunda, örneklerin tümünde Si-H bağ konfigürasyonun başat olduğu gözlenmiştir. Bazı örneklerin Si-H bağı gerilme modunun yarı çizgi genişliğinde artmalar kaydedilmiş ve bant genişlemesinin 2100 yada 2090 cm⁻¹ titreşim bandının belirginleşmesinden kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Yapılan literatür araştırmaları sonunda, genellikle 2090 cm⁻¹ yada 2100 cm⁻¹ titreşim bantlarına 875 cm⁻¹ ve 845 cm⁻¹ soğurma bantlarının eşlik edebileceği ve bu bantların amorf yapı içinde SiH₂ ve [SiH₂]_n bağları titreşim modlarına karşılık geldiği ifade edilmektedir. Bu bağ yapılarına polyhidrit yada multihidrit bağları adı verilmektedir. Amorf yapı içine gömülmüş olan bu yapıların, yapı içerisinde ılımlı bir miktarda bulunması, örneğin optik ve elektriksel kalitesinin iyileşip fotoiletkenliğinin artmasına sebep olmaktadır (Middya et. al., 1996). Polyhidrit ([SiH₂]_n) yada multihidrit (SiH₂, SiH₃) bağlarının bulunduğu yapılarda, yüksek aydınlanmalar altında fotoiletkenlik değerinin çok hızlı bir şekilde küçülerek, kısa sürede doyuma ulaştığı ve bu değerde kararlı kaldığı da gözlemlenmiştir. Bu tez çalışmasında bazı örneklerin FTIR ölçümleri sonucunda hesaplanan soğurma piklerinin 2100 cm⁻¹ doğru kayma gözlenmesine rağmen bu kayma polyhidrit yada multihidrit bağlarının yapıdaki varlığının tam olarak kanıtı değildir. Lucovsky'nin literatürde rapor edilmiş bir çalışmasında (Lucovsky et. al.,1979) amorf yapı içindeki mikroboşlukların artmasının,

$$I_i = \int_{Bant} \frac{\alpha_i(\omega)}{\omega} d\omega \quad (5.1.)$$

$$R^* = \frac{I_{2100}}{I_{2100} + I_{2000}} \quad (5.2.)$$

FTIR spektrumundaki 2100 cm^{-1} bandına katkı getireceği, bu şekilde de 2000 cm^{-1} bandının genişleyeceği vurgulanmaktadır. 2100 cm^{-1} bandından faydalanarak mikroboşluk oranının (veya mikroyapı faktörü, R^*) hesaplanabileceği ifade ise denklem (5.1.) ve (5.2.)'de verilmektedir. Burada I_i , ilgili banda ait soğurma değerinden hesaplanan integrasyonun değeri, R^* ise mikroyapı faktörüdür. R^* 'nin 0,1'den küçük olması tercih edilen bir durumdur. Çünkü bu durumda, mikro boşluk oranı oldukça küçülmüş film yoğunluğu kristal yoğunluğuna yaklaşmıştır. Bu nedenle 2100 cm^{-1} soğurma bandının olmaması tercih edilen bir durumdur. Mikro boşluk oranının küçülmesi, paketleme faktörünün büyüyerek yapının daha rijit olabileceğini ifade etmektedir. Çizelge 5.3'de mikro boşluk yüzdesi hesaplanan örnekler listelenmiştir.

Çizelge 5.3. 2100 cm^{-1} titreşim bandı belirgin olan örneklerin FTIR spektrumlarından hesaplanan mikroyapı faktörlerinin diğer film parametreleriyle birlikte verilen değerleri.

Örnekler	R^*	$E_{\text{Tauc}}(\text{eV})$	$E_a(\text{eV})$	$N_d(\text{cm}^{-3})$
Set 2 / Örnek 3	0,29	1,56	0,56	$1,4 \times 10^{17}$
Set 3/ Örnek 3	0,11	1,76	0,88	$0,3 \times 10^{16}$
Set 3/ Örnek 5	0,29	1,67	0,68	7×10^{16}
Set 5/ Örnek 1	0,29	1,65	0,68	$2,8 \times 10^{16}$
Set 5/ Örnek 2	0,45	1,68	0,73	$5,8 \times 10^{16}$
Set 5/ Örnek 3	0,12	1,68	0,65	$7,7 \times 10^{15}$
Set 5/ Örnek 4	0,31	1,71	0,75	$1,6 \times 10^{16}$
Set 5/ Örnek 5	0,55	1,76	0,54	$2,6 \times 10^{15}$

Bu tez çalışmasında silan gazının helyum ile seyreltilmesi ile hazırlanan a-Si:H örneklerin optik ve elektriksel özelliklerinin ortaya konulması hedeflendiğinden, hazırlanan örneklerin ışık altında gösterdiği değişimler, tavlama kinetiği deneyleri ile birlikte ortaya koyulmuştur. Katkısız a-Si:H örneklerde Staebler-Wronski mekanizmasından sorumlu başat mekanizma, foto taşıyıcıların ışısız rekombinasyonu sonucunda amorf silisyum şebekesinde önceden var olan zayıf bağların koparak, yapı içinde yarı kararlı kopuk bağlar yaratmasıdır. Bu süreç içinde ölçülen fotoiletkenlik yaklaşık 2 mertebelik düşüş sergilemekte ve uzun süren aydınlanmalar sonunda (yaklaşık 6 saat) ışık kapatıldıktan sonra karanlık iletkenlik değeri neredeyse bir mertebe düşmektedir. Işık ile yaratılan, yarı kararlı kopuk bağların bant ortasındaki bölgede bulunması ve bunların sayıca artması, Fermi enerji seviyesinin küçülmesine ve aynı zamanda yük taşıyıcıların

rekombinasyon olasılığının artmasına neden olarak fotoiletkenliğin ve karanlık iletkenliğin azalmasını sağlar (Stutzmann et. al.,1985, Ohagi et. al.,1988).

Bu tez çalışmasında, Staebler-Wronski deneysel ölçüm sonuçları sunulan örneklerde, ışııl kusur yaratma süreci sonunda kusur oluşumu sergileyen iki adet örnek tespit edilmiştir. Bu örnekler set-5 örnek-5 ve set-3 örnek-2'dir. Tüm örneklerin oda sıcaklığında (ışııl kusur yaratma sürecinde) ve 105 mW/cm^2 aydınlanma sürecince kaydedilen fotoiletkenlik değişimleri incelendiğinde fotoiletkenlik değerlerinde sürekli bir azalmanın olduğu gözlemlenmektedir. Zamana karşı gözlemlenen bu azalmalar denklem (4.8.)'de verilen fonksiyona karşılaştırılarak farklı iki bölge için sönüm faktörleri bulunmuştur. Çizelge 4.3'te verilen sönüm faktörü değerleri incelendiğinde set-5 örnek-5'in β değerleri iki kat değişim sergileyerek küçülmüştür. Benzer şekilde set-3 örnek-2'nin de beta değerleri azalma sergilemektedir. Bu örneklerin dışında kalan tüm örnekler, önceki beta değerleriyle kıyaslandığında artım göstermektedirler. Sadece set-3 örnek-5'in beta değerinin kararlı kaldığı söylenebilir. Çizelge 5.3'de verilen örneklerin mikro boşluk faktörü değerlerine bakıldığında en yüksek mikro boşluk değerine sahip örneğin set-5 örnek-5 olduğunu gözlenmektedir. Set-5 örnek-1 ve set-2 örnek-3'ün mikro boşluk faktörü değerleri ise 0,29'dur. Bu değerler set-5 örnek-5'in değerinin neredeyse yarısıdır. Bu nedenle en yüksek mikro boşluk faktörüne sahip olan örnekte kusur yaratma sürecinin en etkin şekilde oluşacağı söylenebilir. Çizelge 4.3'de verilen örneklerin, ışııl kusur yaratma süreci sonunda maruz bırakıldıkları tavlama işlemi sonrası ışııl kusur yoğunluklarında küçük azalma gözlenmiş olmasına rağmen, kusur değerleri başlangıç değerlerine ulaşamamıştır. Diğer bir deyişle kusur yaratma mekanizması tersinmez bir süreçtir. Bu deneysel gözlem, yüksek helyum seyreltme oranında hazırlanan örneklerin, standart hidrojenlendirilmiş a-Si:H örneklerle kıyasla oldukça kararlı olduklarının bir göstergesidir. Diğer örneklerin tümünde 6 saatlik ışııl kusur yaratma sürecince kusur düzeyleri sürekli azalmıştır. Tavlama adımlarında ise azalan kusur yoğunlukları bir miktar artım gösterdikten sonra, sabit bir kusur yoğunluğu değerinde doyuma ulaşmıştır. Yapılan literatür araştırmalarında bu tez çalışmasındaki gözlemle uyumlu herhangi bir kayda rastlanamamıştır. Başlangıçta, gözlemlenen bu değişimlerin, Negatif Staebler-Wronski (Inverted Staebler-Wronski) mekanizması olduğu düşünüldüyse de deneysel gözlemlerin bu modele uymadığı anlaşılmıştır (Kolodiej et. al., 2004, Miyanishi et. al., 1989)

Bu tez çalışmasında silan helyumla seyreltilerek hazırlanan a-Si:H örneklerin optik ve elektriksel özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Hazırlanan örneklerin fiziksel özelliklerinin daha detaylı olarak anlaşılabilmesi; deneysel yöntem çeşitliliğinin artırılması ile mümkün olabilir. Hazırlanacak yeni örneklerin hazırlanma sürecinde yapılacak eş zamanlı plazma spektroskopisi deneyleri yardımıyla, plazma içinde süregelen reaksiyonlar ve film oluşum süreçleri hakkında daha net bulgular elde edilebilir. FTIR ölçümlerine ek olarak raman ve fotoluminesans ölçümleri de yapılarak örneğin yapısal özellikleri hakkında daha ayrıntılı bilgilere ulaşılabilir. Bunun yanında HTEM ve SEM ölçümleri yardımıyla hazırlanan ince filmlerin morfolojisi hakkında bilgi edinilebilir. Yukarıda sayılan deneysel ölçümlerin gerçekleştirilmesi sonucunda yarı kararlı ışııl kusur yaratma deneyinin daha uzun aydınlanma süreçlerine uzatılabilir (24 saat). Kusur yaratma süreci sonunda yapılan tavlama kinetiği deneylerinde sıcaklığının artırılması ve bunun yanında her ışııl kusur yaratma ve tavlama adımı sonrası yapılacak FTIR ölçümleri ile hazırlanan örneklerin mikroskobik yapısındaki değişim süreçleri daha iyi anlaşılabilir.

KAYNAKLAR

- Águas, H., Cabarrocas, P. R., Lebib, S., Silva, V., Fortunato, E. and Martins, R., 2003, Polymorphous silicon deposited in large area reactor at 13 and 27 MHz, *Thin Solid Films*, 427(1-2), 6-10.
- Andriaennes, G. J., Baranovskii, S.D., Fuhs, W., Jansen, J. And Öktü, Ö., 1995, Photoconductivity response time in amorphous semiconductors, *Phys.Rev. B.*, 51(15), 9661-9667.
- Banerjee, C., Sarker, A. and Barua, A. K., 2002, Development of stabilized dual gap double junction a-Si solar cell using helium diluted a-Si:H intrinsic layer, *J.Phys. D: Appl. Phys.*, 35, 3060-3064.
- Baumann, A., Bhargava, Y., Liu, Z.X., Nemet, G., Wilcox, J., 2004 , PhotoVaic Technology Review, MSE/ C226, Berkeley.
- Branz, H.M., 1999, Hydrogen collision Quantitative description of metastability in amorphous model: silicon, *Phys. Rev. B*, 59, 5498-5512.
- Bronner, W., Kleider, J.P., Brüggemann, R., Cabarrocas, P. R., Mencaraglia, D. and Mehring, M., 2002, Comparison of transport and defects properties in hydrogenated polymorphous and amorphous silicon, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 299-302 (1), 551-555.
- Cabarrocas, P. R., Hamma, S., Sharma, S. N., Viera, G., Bertran, E. and Costa, J., 1998, Nanoparticle formation in low-pressure silane plasmas: bridging the gap between a-Si:H and μ c-Si films, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 227-230(2), 871-875.
- Cabarrocas, P. R., 2000, Plasma enhanced chemical vapor deposition of amorphous, polymorphous and microcrystalline silicon films *Journal of Non- Crystalline Solids*, 266-269(1), 31-37.
- Capezzuto, P., and Bruno, G., 1988, Plasma deposition of amorphous silicon films: an overview on some questions, *Pure & Appl. Chem.*, 60(5), 633-644.
- Cárabe, J., Gandía, J. J., González, N., Rodríguez, A. and Gutiérrez, M. T., 1999, Microstructure of thin films prepared by plasma-enhanced chemical vapour deposition of helium-diluted silane, *Applied Surface Science*, 143(1-4), 11-15.
- Carlson, D. E. and Wronski, C. R., 1976, *Appl. Phys. Lett.*, 28, 671.
- Chittick, R. C., Alexander, J. H., and Sterling, H. F., 1969, *J. Electrochemical Soc.*, 116, 77.

- Cordes, H., Bauer, G.H. and Brüggemann, R., 1998, Transient decay from the steady state in the photoconductivity of amorphous semiconductors, *Phys. Rev. B.*, 58(24), 16160–16166.
- Cody, G. D., 1984, A Comparison of the Optical Absorption Edge of Crystalline and Amorphous Silicon, *Semiconductor and Semimetals* (Academic Press, Orlando), Vol. 21B, p. 11.
- Dersch, H., Schweitzer, L. and Stuke, J., 1983, Recombination process in a-Si:H spin dependent photoconductivity, *Phys. Rev. B*, 28, 4678-4684.
- Energy for the Future: Renewable sources of energy. White Paper for a Community Strategy and Action Plan, European Commission COM(97)599final (1997).
- Finger, F., Müller, J., Maltz, C., Wagner, H., 1998, Electronic states in hydrogenated microcrystalline silicon, *Philosophical Magazine*, 77(3), 805-830.
- Finger, F., Carius, R., Dylla, T., Klein S., Okur, S., Gunes, M., 2003, Stability of microcrystalline silicon for thin film solar cell applications, *IEE Proc.-Circuits Devices Syst.*, 150(4), 300-308
- Firtzsche, H., Yoon, B. -G., Chi, D.-Z. And Tran, M. Q., 1992, Some observations on the photoconductivity of amorphous semiconductors, *J. Of Non-Cryst. Solids*, 141, 123-132.
- Globus, T., Cabarrocas, P. R. and Gelmont, B., 2002, Defect-related absorption in hydrogenated silicon films, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 299-302(1), 615-620
- Gillet, N. P., Zwiers, F. W., Weaver, A. J. and Stott, P. A., 2003, *Nature* 422, 292.
- Goetzberger, A., Hebling, C., Schock, H.W., 2003, PhotoVaic materials, history, status and outlook, *Materials Science and Engineering*, 40, 1-46.
- Green, M.A., Emery, K., King, D., Igari, S, Warta, W., 2004, Progress in PhotoVaic: Research and Applications, 12, 55 .
- Güngör, T., 2001, Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum filmlerin optik katsayılarını belirlemede kullanılan deneysel yöntemlerin karşılaştırılması, Hacettepe Üniversitesi, Doktora tezi.
- Hoheisel, M., Carius, R., and Fuhs, W., 1984, Photoconductivity and photoluminescence of a-Si:H at low temperature, *J. Of Non-Cryst. Solids*, 63, 313-319.

- Hoheisel, M. And Fuhs, W., 1988, Drift mobility in n-and p-conducting a-Si:H, Phil. Mag. B, 57(3), 411-419.
- Jozwiak, J., 2002, Boise State University, Seland College of Applied Techn., PECVD system lecture notes, IDAHO
- Kharchenko, A.V., Suendo, V. and Cabarrocas, P.R., 2003, Plasma studies under polymorphous silicon deposition conditions, Thin Solid Films, 427(1-2), 236-240.
- Kleider, J. P., Gauthier, M., Longeaud, C., Roy, D., Saadane, O. and Brüggemann, R., 2002, Spectral photoresponses and transport properties of polymorphous silicon thin films, Thin Solid Films, 403-404, 188-192.
- Kodolbaş, A.O., 1999, Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum ve Silisyum-Karbon Alaşımlarında ışık ile yaratılan yarı-kararlı kusurların incelenmesi, Hacettepe Üniversitesi, doktora tezi.
- Kolodziej, A., 2004, Staebler-Wronski effect in amorphous silicon and its alloys, Opto-Electronics Review 12(1), 21-32
- Longeaud, C., 2002, Mediation of light-induced metastable defect formation in hydrogenated amorphous silicon by interstitial hydrogen and voids, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 4(3), 461-479.
- Lucovsky, G., Nemanich, R.J., Knights J.C., 1979, Physical Review B, 19 (4) 2064.
- Luterová, K., Knápek, P., Stuchlík, J., Koka, J., Poruba, A., Kudrna, J., Malý, P., Valenta, J., Dian, J., Hönerlage, B. and Pelant, I., 1998, Hydrogenated amorphous silicon deposited by glow discharge of SiH₄ diluted with He: photoluminescence and electroluminescence in the visible region, Journal of Non-Crystalline Solids, 227-230(1), 254-258.
- Matsuda, A., Takai, M., Nishimoto, T. and Kondo, M., 2003, Control of plasma chemistry for preparing highly stabilized amorphous silicon at high growth rate, Solar Energy Materials and Solar Cells, 78(1-4), 3-26
- Matsuda, A., 2004, Microcrystalline silicon: Growth and device application, Journal of Non-Crystalline Solids, 338-340, 1-12.
- Middya, A. R., Hazra, S. and Ray, S., 1994, Growth of device quality amorphous SiGe:H alloys with high deposition rate under helium dilution, Journal of Applied Physics, 76(11), 7578-7582.
- Middya, A. R., Hazra, S. and Ray, S., Barua, A. K. and Longeaud, C., 1996, Low band gap amorphous silicon deposited under He dilution in the γ regime of an rf glow discharge: properties and stability, Journal of Non-Crystalline Solids, 198-200(2), 1067-1071

- Middya, A. R, Wood, G., Lin, G.H., and Carlson, D.E., 1999, He-dilution for the increase of deposition rate and feedstock utilization during the growth of a-Si:H and its alloys, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc*, 557, 151-156.
- Miyanishi, A., Nakata, J.I., Imao, S., Shirafuji, J., Kubo, U. and Inuishi, Y., 1989, Negative Staebler-Wronski Effect in Undoped a-Si:H, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 28 (2,12), L2125-L2127.
- Morigaki, K., 1999, *Physics of Amorphous semiconductors*, Imperial College Press, London.
- Morral, A. F., Hofmeister, H. and Cabarrocas, P. R., 2002, Structure of plasma-deposited polymorphous silicon, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 299-302(1), 284-289.
- Mott, N. F., and Davis, E. A., *Electronic Process in Non-Crystalline Materials*, 2nd Ed. (Oxford Univ. Press, Oxford, 1979).
- Moustakas, T. D. And Weiser, K., 1975, Transport and recombination properties of amorphous arsenic telluride, *Phys. Rev. B*, 12(6), 2448
- Nguyen, V.S., 1983, *Proceedings of Silicon Nitride Thin insulating Films*, Electrochemical Society Spring Meeting 83-8, 453-460.
- Rose, A., 1963, *Concept in Photoconductivity and Allied Problems*, Interscience, New York.
- Saadane, O., Longeaud, C, Lebib, S., and Cabarrocas, P. R., 2003, What makes a thin films semiconductor suitable for solar cells applications, *Thin Solid Films*, 427(1-2), 241-246.
- Shanks, H., Fang, C.J., Ley, L., Cardona, M., Demond, F.J. and Kalbitzer, S., 1980, Infrared Spectrum and Structure of Hydrogenated Amorphous Silicon, *Phys. Stat. Sol., B*, 100, 43-56.
- Sahin, M. and Kaplan, R., 2006, Intensity and temperature dependence of photocurrent of a-Si:H Schottky diodes, *Current Applied Physics*, 6(1), 114-118.
- Smail, T. And Mohammed-Brahim, T., 1991, Temperature dependence of steady-state photoconductivity in hydrogenated amorphous silisyum, *Phi. Mag. B.*, 64(6), 675-688.
- Souffi, N., Daouahi, M., Chahed, L., Zellama, K. and Cabarrocas, P. R., 2002, Effect of light soaking and annealing on the stability of hydrogenated amorphous silicon films deposited using pure and highly helium diluted silane, *Solid State Communications*, 122(5), 59-264.
- Spear, W. E. and LeComber, P. G., 1975, *Solid state Commun.*, 17, 1193.

- Swannepoel, R., 1983, Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon, *J. Phys. E; Sci. Instrum.*, 16, 1214-1222.
- Staebler, D. L., And Wronski, C. R., 1977, Reversible conductivity changes in discharge produced amorphous Si, *App. Phys. Lett.*, 31, 292-294.
- Street, R.A., 1991, *Hydrogenated Amorphous Silicon*, Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Stuke, J., 1987, *J. Non-Cryst., Solids* 97-98, 1.
- Stutzmann, M., 1985, Light-induced metastable defects in hydrogenated amorphous silicon: A systematic study, *Phys. Rev. B* 32, 23-47
- Takeda, K., Hikita, H., Kondo, A., Ganjoo, A., Shimakawa, K. and Morigaki, K., 1998, Light-induced annealing of dangling bonds in He-diluted glow discharge a-Si:H films, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 227-230(1), 311-315.
- Tauc, J., 1972, *Optical Properties of solids*, ed. F. Abeles, North Holland Publ., Amsterdam.
- Tett, S.F.B., Stott, P.A., M.R. Allen, Ingram, W. J., and J. F. B. Mitchell, *Nature* 399, 569 (1999).
- Tran, M., Fritzsche, H., and Stradins, P., 1993, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, 297, 195.
- Valizadeh, P., *Amorphous Silicon Solar Cells: Efficiency and Stability Issues*, Electrical Engineering and Computer Science Department, University of Michigan
- Wronski, C.R., 2000, Amorphous silicon photoVolts: order from disorder, *PhotoVolc Specialists Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE*, 15-22, 1-6.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung, *Welt im Wandel – Energiewende zur Nachhaltigkeit* (Springer, Berlin, Germany, 2003).