

T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

FOSFOR KATKILANMIŞ HİDROJENLENMİŞ
AMORF SİLİSYUM KARBÜR İNCE FİLMLEİN
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN
KARAKTERİZASYONU

Burak ALÇINKAYA

Fizik Anabilim Dalı

Tezin Sunulduğu Tarih: **16/01/2017**

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Kıvanç SEL

ÇANAKKALE

Burak ALÇINKAYA tarafından Doç. Dr. Kıvanç SEL yönetiminde hazırlanan ve 16/01/2017 tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**Fosfor Katkılanmış Hidrojenlenmiş Amorf Silisyum Karbür İnce Filmlerin Elektriksel Özelliklerinin Karakterizasyonu**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik Anabilim Dalı**’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

Prof.Dr. Vildan BİLGİN

.....

Başkan

Doç.Dr. Kıvanç SEL

.....

Üye

Doç.Dr. Kadir ERTÜRK

.....

Üye

Prof. Dr. Levent GENÇ

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

Sıra No:

İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI



Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

Burak ALÇINKAYA

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde gerek lisans gerek yüksek lisans öğrenimim boyunca bilimsel tecrübeleri ile bana çok büyük katkılar sağlayarak üzerimde büyük emekleri olan, en yoğun zamanlarında bile maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyip zamanını beni bilgilendirmek için ayıran çok saygı değer danışman hocam Doç. Dr. Kıvanç SEL'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasındaki ince filmlerin biriktirilmesindeki değerli katkıları için ve laboratuvar olanaklarını paylaştıkları için Prof. Dr. İsmail ATILGAN hocama teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında karşılıklı bilimsel tartışmalar yaparak bilgilerinden faydalandığım ve maddi manevi desteklerini benden esirgemeyen Araş. Gör. Dr. Emre COŞKUN hocama teşekkürlerimi sunarım.

Benim için büyük fedakarlıkları ve emekleri olan, evlatları olmaktan gurur ve onur duyduğum, hayatımın her döneminde karşıma çıkan zorluklara karşı güçlü bir şekilde yanımda olup, desteklerini bir an olsun benden esirgemeyerek bugünlere kadar gelmemi sağlayan; çok değerli annem Semahat YILDIZ'a, Babam Güngör ALÇINKAYA'ya, kardeşim Başak ALÇINKAYA'ya, teyzem Deniz AKYAVUZ ile ailesine sonsuz saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Burak ALÇINKAYA
Çanakkale, Ocak 2017

SİMGELER VE KISALTMALAR

$a\text{-SiC}_x\text{:H}$	Hidrojenlenmiş amorf silisyum karbür
$a\text{-Si:H}$	Hidrojenlenmiş amorf silisyum
$a\text{-C:H}$	Hidrojenlenmiş amorf karbon
α	Soğurma katsayısı
BE	Elektronların bağlanma enerjisi
B_{Tauc}	Tauc enerjisi eşitliğinde sabit
C	Karbon
C_2H_4	Etilen
C_2HCl_3	Trikloretilen
d	Kalınlık
ds	Diferansiyel kesit alanı
DMS	Değişken menzilli sıçrama
DS	Deiyonize su
dj	Diferansiyel akım yoğunluğu
E_{04}	Soğurma katsayısının 10^4 cm^{-1} olduğu durumdaki optik enerji
E_0	Soğurma katsayısı eşitliğinde materyale bağlı enerji sabiti
E_{Tauc}	İzinli indirekt geçişler için Tauc enerjisi
E_{Tauc}^*	İzinli direk geçişler için Tauc enerjisi
E_U	Urbach enerjisi
E_F	Fermi enerjisi
E_a	Aktivasyon enerjisi
E_d	Kusur durumdaki elektronun enerjisi
E_p	Verici durumundaki elektronun enerjisi
E_i	İletim bandı enerjisi
E_v	Valans bandı enerjisi
EYKS	En yakın komşuya sıçrama
F	Elektrik alan
$f(E)$	Fermi dağılım fonksiyonu
H	Hidrojen
H_2O_2	Hidrojen peroksit
I_i	XPS spektrumundaki her bir pikin alanı

k	Bolztmann sabiti
LED	Işık yayan diyot
n-tipi a-SiC _x :H	N tipi hidrojenlenmiş amorf silisyum karbür
n	Filmin kırılma indisi
n _v	Mobildeşiklerin yoğunluğu
n _i	Mobil elektron yoğunluğu
n.d	Optik yol
N	Valans elektronlarının sayısı
N(E)	Durum yoğunluğu
N _C (Z)	Bağların gerilme ve bükülmelerine bağlı koordinasyon sayısı
P	Fosfor
PH ₃	Fosfin
P ₄ ⁺	Dört katlı iyonize fosfor koordinasyonu
P ₃ ⁰	Üç katlı nötr fosfor koordinasyonu
P ₄ ⁰	Dört katlı nötr fosfor koordinasyonu
PDKBB	Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme
RF	Radyo frekansı
R _m	Sıçrama durumları arası mesafe
s	Alttaşın kırılma indisi
S _i	Her bir elementin XPS hassasiyet faktörü
Si	Silisyum
SiH ₄	Silan
Si ₄ ⁰	Silisyum kristal yapısının koordinasyonu
Si ₃ ⁰	Amorf silisyum yapısının koordinasyonu
Si ₃ ⁻	Kopuk bağlı silisyum yapısının koordinasyonu
T	Sıcaklık; geçirgenlik
T _m	Girişim saçaklarının minimumundaki geçirgenlik
T _M	Girişim saçaklarının maksimumundaki geçirgenlik
UV-Vis	Morötesi-görünür bölge geçirgenlik
U _{p₄⁺}	İyonize fosfor kusur durumunun oluşum enerjisi
U _{p₄⁰}	Nötr fosfor kusur durumunun oluşum enerjisi
U _{D⁻}	İyonize kusur durumunun oluşum enerjisi
U _{D⁰}	Nötr kusur durumunun oluşum enerjisi

Z	Koordinasyon sayısı
λ	Dalgaboyu
μ	Mobilite
x	Karbon içeriği
XPS	X-ışını foto-elektron spektroskopisi
ω_p	Eşik frekansı
δP	Durumlar arası diferansiyel geğış olasılığı
σ	Elektriksel öziletkenlik; sigma bağı
π	Pi bağı
ϕ	İş fonksiyonu



ÖZET

FOSFOR KATKILANMIŞ HİDROJENLENMİŞ AMORF SİLİSYUM KARBÜR İNCE FİLMLERİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU

Burak ALÇINKAYA

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman : Doç. Dr. Kıvanç SEL

16/01/2017, 74

Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile dört farklı karbon içeriğinde fosfor katkılanarak biriktirilmiş hidrojenlenmiş amorf silisyum karbür (n-tipi a-SiC_x:H) ince filmlerin elektriksel özellikleri analiz edilmiştir. İnce filmlerin karbon içerikleri (x) X-ışını foto-elektron spektroskopisi ile sırasıyla 0, 0.19, 0.46 ve 0.62 olarak belirlenmiştir. İnce filmlerin kalınlıkları, optik enerjileri morötesi-görünür bölge geçirgenlik spektroskopisi ile belirlenmiştir ve optik enerjilerinin karbon içeriği ile arttığı gözlenmiştir. İnce filmlerin elektriksel özellikleri sıcaklığa bağlı akım-voltaj ölçümleri ile analiz edilmiştir. N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin karbon içeriğinin artmasıyla oda sıcaklığındaki öziletkenliğin azaldığı ve en yüksek öziletkenlik aynı yöntemle biriktirilmiş has a-SiC_x:H filmlerin öziletkenlikleri ile karşılaştırıldığında yaklaşık 10⁶ katlık bir artış olduğu belirlenmiştir. N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin elektriksel aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır ve karbon içeriğinin artmasına bağlı olarak 0.24 eV'tan 0.76 eV'a arttığı belirlenmiştir. İnce filmlerin elektriksel iletim mekanizmaları analiz edilmiştir. Has a-SiC_x:H ince filmlerde silisyum zengin karbon içeriğinde standart iletim mekanizmasının ve karbon zengin durumda ise en yakın komşuya sıçrama (EYKS) mekanizmasının baskın iletim mekanizması olmasına karşın n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerde baskın iletim mekanizmasının standart iletim mekanizması olduğu belirlenmiştir.

Anahtar sözcükler: N-tipi Hidrojenlenmiş Amorf Silisyum Karbür, XPS, Öziletkenlik, Standart İletim Mekanizması, En Yakın Komşuya Sıçrama İletim Mekanizması

ABSTRACT

THE CHARACTERIZATION OF ELECTRICAL PROPERTIES OF PHOSPHORUS DOPED HYDROGENATED AMORPHOUS SILICON CARBIDE THIN FILMS

Burak ALÇINKAYA

Çanakkale Onsekiz Mart University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Master of Science Thesis in Animal Science

Advisor : Doç. Dr. Kıvanç SEL

16/01/2017, 74

The electrical properties of phosphorus doped hydrogenated amorphous silicon carbide (n-type a-SiC_x:H) thin films, that were deposited at four different carbon content (x) by plasma enhanced chemical vapor deposition, were analyzed. The carbon content (x) of the films were determined by X-ray photoelectron spectroscopy as 0, 0.19, 0.46 and 0.62, respectively. The thickness and optical energies of the thin films were determined by ultraviolet-visible transmission spectroscopy and it was observed that the optical energies were increased with increasing carbon content. The electrical properties of the thin films were analyzed by temperature dependent current-voltage measurements. Room temperature conductivities of n-type a-SiC_x:H thin films were decreased as a function of increasing carbon content and when the conductivities were compared with that of the intrinsic a-SiC_x:H thin films, which were deposited by the same method, an increase of about 10⁶ times was determined. The electrical activation energies were calculated and it was determined that they were increased from 0.24 eV to 0.76 eV as a function of increasing carbon content. The conduction mechanisms of the thin films were analyzed. Instead of fact that, the dominant conduction mechanism was standart transport mechanism in silicon rich carbon content intrinsic a-SiC_x:H thin films, wheras it was nearest neighbour hopping mechanism in carbon rich state; it was determined that the dominant mechanism in the n-type a-SiC_x:H thin films was standart transport mechanism.

Keywords: N-type Hydrogenated Amporhous Silicon Carbide, XPS, Conductivity, Standart Transport Mechanism, Nearest Neighbour Hopping Conduction Mechanism

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ SINAV SONUÇ FORMU	ii
İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	v
ÖZET	viii
ABSTRACT.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Hidrojenlenmiş Amorf Silisyumun Özellikleri.....	3
1.3. Fosfor Katkılamasının Hidrojenlenmiş Amorf Silisyumun Özelliklerine Etkileri.....	4
1.4. Karbonun Hidrojenlenmiş Amorf Silisyum Karbür İnce Filmlerin Yapısal ve Elektriksel Özelliklerine Etkileri	8
1.5. Amaç	10
BÖLÜM 2	12
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	12
2.1. Giriş.....	12
2.2. N-Tipi ve Has a-SiC _x :H İnce Filmlerin Özellikleri ile İlgili Önceki Çalışmalar.....	12
BÖLÜM 3	
MATERYAL VE METOT	18
3.1. Giriş.....	18
3.2. N-Tipi a-SiC _x :H İnce Filmlerin Hazırlanması	18
3.2.1. Alttaşların Temizlenmesi.....	18
3.2.2. Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme Sistemi ve İnce Filmlerin Biriktirilmesi.....	19
3.2.3. N-Tipi a-SiC _x :H İnce Filmlerin Biriktirilme Parametreleri.....	22
3.3. X-Işını Foto-Elektron Spektroskopisi Sistemi ve Elemental Kompozisyonların İncelenmesi	22
3.4. Morötesi-Görünür Bölge Geçirgenlik Spektroskopisi Sistemi ve Optik Özelliklerin İncelenmesi	24
3.5. Sıcaklık Bağımlı Akım-Voltaj Ölçüm Sistemi ve Elektriksel İletkenliklerin İncelenmesi	29

3.5.1. İnce Filmlerin Metallenmesi.....	29
3.5.2. Sıcaklık Bağımlı Akım-Voltaj Ölçüm Sistemi.....	31
3.5.3. İletim Mekanizmaları	34
3.5.3.1. Standart İletim Mekanizması.....	34
3.5.3.2. Sıçrama İletim Mekanizması.....	35
3.6. Öziletkenlik ve Aktivasyon Enerjilerinin İncelenmesi	37
BÖLÜM 4	
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	38
4.1. X-Işını Foto-Elektron Spektroskopisi Ölçüm ve Analizleri	38
4.2. Morötesi-Görünür Bölge Geçirgenlik Spektroskopisi Ölçüm ve Analizleri	43
4.3. N-tipi a-SiC _x :H İnce Filmlerin Elektriksel Özelliklerinin Ölçüm ve Analizi	53
BÖLÜM 5	66
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	66
KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	I

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Hidrojenlenmiş amorf silisyumun durum yoğunluğu.....	3
Şekil 1.2. a) c-Si, b) Has a-Si, c) a-Si:H, d) $Si_3=P_3^0$, e) $Si_4=P_4^+$ elektron konfigürasyonları ve enerji bant yapıları	6
Şekil 1.3. Fermi enerjisinin pozisyonunun bir fonksiyonu olarak n-tipi katkılayıcı ve kusur oluşum enerjilerinin grafiği (Street, 1991)	8
Şekil 1.4. Karbon ve silisyum atomlarının yapısı. a) sp^3 , b) sp^2 , c) sp^1 türü hibritleşmeler ..	9
Şekil 1.5. a-SiC _x :H ince filmlerin enerji bant yapısının karbon içeriğine bağlı değişimi (Robertson, 1992a)	10
Şekil 3.1. PDKBB sisteminin şeması.....	21
Şekil 3.2. XPS sisteminin şematik gösterimi	23
Şekil 3.3. UV-Vis spektrometre sisteminin şematik gösterimi (Güneş, 2012).....	25
Şekil 3.4. Alttaş üzerine biriktirilmiş ince filmde geçen ve yansıyan ışınların şeması (Sel, 2007)	26
Şekil 3.5. Metalleme sisteminin şematik gösterimi (Sel, 2007)	30
Şekil 3.6. Elektrotların şematik gösterimi	31
Şekil 3.7. Sıcaklık bağımlı akım-voltaj ölçüm sistemi (Sel, 2007)	33
Şekil 4.1. N-tipi a-SiC _x :H ince filmlerin genel tarama XPS spektrumları	38
Şekil 4.2. N-tipi a-SiC _x :H ince filmlerin Ar iyonu ile aşındırılma sonrasındaki genel tarama XPS spektrumları	39
Şekil 4.3. N-tipi a-SiC _x :H ince filmlerin Si 2p ve C 1s piklerinin normlanmış çözümlmeleri.....	41
Şekil 4.4. N-tipi a-SiC _x :H ince filmlerin bağ kompozisyonlarının gaz akı oranının fonksiyonu olarak grafiği.....	42
Şekil 4.5. N-tipi a-SiC _x :H ince film N1 örneğinin UV-Vis spektrumu	43
Şekil 4.6. N-tipi a-SiC _x :H ince film N2 örneğinin UV-Vis spektrumu	43
Şekil 4.7. N-tipi a-SiC _x :H ince film N3 örneğinin UV-Vis spektrumu	44
Şekil 4.8. N-tipi a-SiC _x :H ince film N4 örneğinin UV-Vis spektrumu	44
Şekil 4.9. N-tipi a-SiC _x :H ince film N1 örneğinin soğurma katsayısı dik enerji grafiği	45
Şekil 4.10. N-tipi a-SiC _x :H ince film N2 örneğinin soğurma katsayısı dik enerji grafiği	45
Şekil 4.11. N-tipi a-SiC _x :H ince film N3 örneğinin soğurma katsayısı dik enerji grafiği	46
Şekil 4.12. N-tipi a-SiC _x :H ince film N4 örneğinin soğurma katsayısı dik enerji grafiği	46
Şekil 4.13. N-tipi a-SiC _x :H ince film N1 örneğinin $(h\nu\alpha)^{1/2}$ dik $h\nu$ grafiği.....	47
Şekil 4.14. N-tipi a-SiC _x :H ince film N2 örneğinin $(h\nu\alpha)^{1/2}$ dik $h\nu$ grafiği.....	47
Şekil 4.15. N-tipi a-SiC _x :H ince film N3 örneğinin $(h\nu\alpha)^{1/2}$ dik $h\nu$ grafiği.....	47
Şekil 4.16. N-tipi a-SiC _x :H ince film N4 örneğinin $(h\nu\alpha)^{1/2}$ dik $h\nu$ grafiği.....	48
Şekil 4.17. N-tipi a-SiC _x :H ince film N1 örneğinin $(h\nu\alpha)^2$ dik $h\nu$ grafiği.....	48
Şekil 4.18. N-tipi a-SiC _x :H ince film N2 örneğinin $(h\nu\alpha)^2$ dik $h\nu$ grafiği.....	49
Şekil 4.19. N-tipi a-SiC _x :H ince film N3 örneğinin $(h\nu\alpha)^2$ dik $h\nu$ grafiği.....	49
Şekil 4.20. N-tipi a-SiC _x :H ince film N4 örneğinin $(h\nu\alpha)^2$ dik $h\nu$ grafiği.....	49
Şekil 4.21. N-tipi a-SiC _x :H ince film N1 örneğinin $\ln\alpha$ dik $h\nu$ grafiği.....	50
Şekil 4.22. N-tipi a-SiC _x :H ince film N2 örneğinin $\ln\alpha$ dik $h\nu$ grafiği.....	50
Şekil 4.23. N-tipi a-SiC _x :H ince film N3 örneğinin $\ln\alpha$ dik $h\nu$ grafiği.....	51
Şekil 4.24. N-tipi a-SiC _x :H ince film N4 örneğinin $\ln\alpha$ dik $h\nu$ grafiği.....	51
Şekil 4.25. N-tipi a-SiC _x :H ince film N1 örneğinin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafikleri	53
Şekil 4.26. N-tipi a-SiC _x :H ince film N2 örneğinin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafikleri	54

Şekil 4.27. N-tipi a-SiC _x :H ince film N3 örneğinin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafikleri	54
Şekil 4.28. N-tipi a-SiC _x :H ince film N4 örneğinin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafikleri	54
Şekil 4.29. N-tipi a-SiC _x :H ince filmlerin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafikleri	55
Şekil 4.30. Karbon içeriğinin bir fonksiyonu olarak oda sıcaklığında n-tipi a-SiC _x :H ve has a-SiC _x :H ince filmlerin öziletkenlikleri	56
Şekil 4.31. N-tipi a-SiC _x :H ince film N1 örneğinin a) 104-310 K, b) 328-420 K sıcaklık aralığındaki akım-voltaj grafikleri	57
Şekil 4.32. N-tipi a-SiC _x :H ince film N2 örneğinin a) 234-350 K, b) 363-414 K sıcaklık aralığındaki akım-voltaj grafikleri	58
Şekil 4.33. N-tipi a-SiC _x :H ince film N3 örneğinin a) 256-305 K, b) 319-416 K sıcaklık aralığındaki akım-voltaj grafikleri	59
Şekil 4.34. N-tipi a-SiC _x :H ince film N4 örneğinin a) 295-363 K, b) 376-415 K sıcaklık aralığındaki akım-voltaj grafikleri	60
Şekil 4.35. N-tipi a-SiC _x :H ince film N1 örneğinin Arrhenius grafiği	61
Şekil 4.36. N-tipi a-SiC _x :H ince film N2 örneğinin Arrhenius grafiği	61
Şekil 4.37. N-tipi a-SiC _x :H ince film N3 örneğinin Arrhenius grafiği	62
Şekil 4.38. N-tipi a-SiC _x :H ince film N4 örneğinin Arrhenius grafiği	62
Şekil 4.39. N-tipi a-SiC _x :H ve has a-SiC _x :H ince filmlerin standart iletim mekanizması ve EYKS mekanizması dikkate alınarak hesaplanan aktivasyon enerjilerinin karbon içeriğine bağlı grafiği	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. PDKBB sistemi ince film biriktirme parametreleri (Kılıç, 2006)	22
Çizelge 3.2. Si 2p ve C 1s çekirdek seviyeleri için bağ tipleri ve bağlanma enerjileri	24
Çizelge 4.1. N-tipi ve has a-SiC _x :H ince filmlerin karbon içerikleri (*Sel, 2007; Akaoglu, 2008; Sel, 2011)	40
Çizelge 4.2. N-tipi a-SiC _x :H ince filmlerin bağ kompozisyon yüzdeleri	42
Çizelge 4.3. N-tipi a-SiC _x :H ince filmlerin kalınlıkları (Kılıç, 2006)	45
Çizelge 4.4. N-tipi a-SiC _x :H ince filmlerin E _{Tauc} , E _{Tauc} [*] , E ₀₄ ve E _U enerjileri	51
Çizelge 4.5. Has a-SiC _x :H ince filmlerin E _{Tauc} , E ₀₄ ve E _U enerjileri (Akaoglu, 2008; Sel, 2007)	52
Çizelge 4.6. N-tipi a-SiC _x :H ince filmlerin oda sıcaklığındaki öziletkenlikleri	55
Çizelge 4.7. N-tipi a-SiC _x :H ince filmlerin aktivasyon enerjileri	62

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1. Giriş

Günümüzde bilim ve mühendislikteki gelişmeler sonucunda teknolojik malzemeler ve aygıtlar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu gelişmelerin en yoğun olarak gerçekleştirildiği teknolojilerden birisi de modern elektronik teknolojisidir. Elektronik teknolojisi 20. yüzyılda pn eklemine icadıyla önemli bir atılım gerçekleştirmiştir. Pn eklemi sayesinde elektronik aygıtlarda yarı iletkenlerin kullanımı kaçınılmaz olmuştur. Bu yarı iletkenlerden silisyum, dünyada en bol bulunan elementlerden biri olması, has, p- ve n-tipi yapılarda bulunabilmesi, oksijen, azot, karbon, bor, fosfor... gibi elementlerle bileşik oluşturabilmesi, doğal oksitinin (SiO_2) olması gibi başlıca özellikleri sayesinde elektronik teknolojisinin en çok kullanılan malzemelerinden birisi olmuştur. 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren ince film biriktirme teknolojilerinin de ilerlemesiyle elektronik teknolojisi öncelikle entegre devrelerin üretilmesi ve sonrasında bu devrelerin minimizasyonu ile hızla gelişmiştir. Günümüzde mikro ve nano ölçekli ince filmlerin ve bu filmlerden oluşan elektronik ve opto-elektronik aygıtların üretilmesi teknolojik olarak bilişim, iletişim, medya, görüntüleme, uzaktan algılama, enerji... gibi birçok alanda ilerlemelerin kaydedilmesine olanak sağlamıştır. Dolayısıyla elektronik aygıtlarla kullanıcıların arayüzü olan monitörlerin ve ışıklı sinyallerin önemi de artmıştır. Elektronik aygıtların kullanımının yaygınlaşması sonucunda göreceli olarak küçük sayılabilecek mobil telefonların ve bilgisayarların monitörlerinin yanı sıra çok daha büyük ölçekli geniş alanlı ekranların da uygun ekonomik maliyetler ve yöntemler gözetilerek üretilmesi ihtiyaç haline gelmiştir.

Hidrojenlenmiş amorf silisyum karbür ($\text{a-SiC}_x\text{:H}$) elektromanyetik spektrumun görünür bölgesindeki ışıma özellikleri sebebiyle özellikle ışık yayan diyot (LED) gibi elektronik ve opto-elektronik aygıtlarda kullanılmaya uygun bir yarı iletkendir. Yapısal, optik ve elektronik özellikleri karbon içeriğine (x) bağlı olarak hidrojenlenmiş amorf silisyumdan (a-Si:H) hidrojenlenmiş amorf karbüre kadar ayarlanabilmektedir ve ayrıca silisyum tabanlı bir yarı iletken olarak has olabilmesinin yanında p- ve n-tipi de katkılanabilmektedir.

Bu tez çalışmasında, plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PDKBB) yöntemiyle çeşitli karbon içeriklerinde ve fosfor katkılanarak biriktirilmiş n-tipi $\text{a-SiC}_x\text{:H}$

ince filmlerin elektriksel özellikleri, yapısal ve optik analizler ile desteklenerek incelenmiştir.

Tezin giriş bölümünde n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin özelliklerinin daha iyi açıklanabilmesi amacıyla öncelikle a-Si:H'un yapısal özellikleri ve fosfor katkılamının bu özelliklere etkileri incelenmiştir. Sonrasında ise a-SiC_x:H ince filmlerin yapısındaki karbon içeriğine bağlı olarak enerji bant yapısının özellikleri anlatılmıştır.

Önceki çalışmalar bölümünde, n-tipi ve has a-SiC_x:H ince filmlerin özellikleri ile ilgili literatürde sunulmuş olan çalışmalar incelenmiştir.

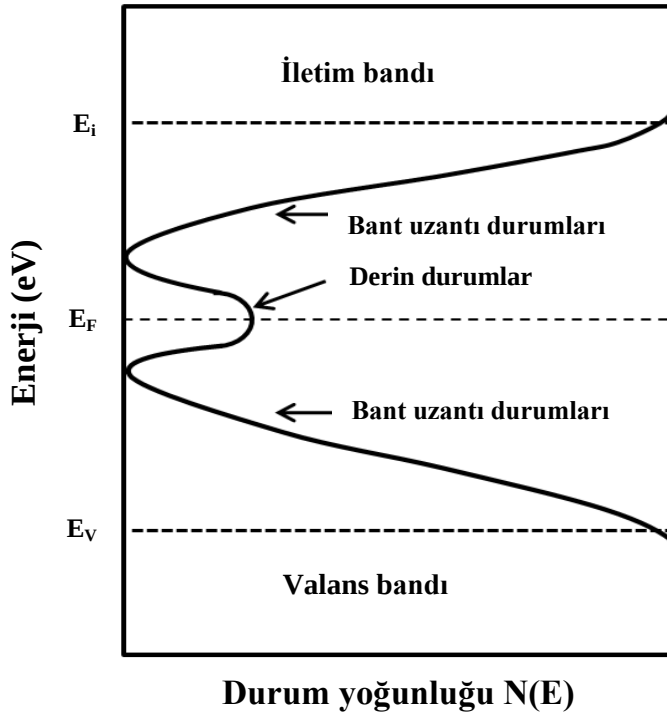
Materyal ve metot bölümünde, n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin biriktirildiği PDKBB sistemi tanıtılmıştır. N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin PDKKB sistemi ile biriktirilme işlemleri ve parametreleri sunulmuştur. XPS sistemi ve bu sistem ile ince filmlerin karbon içeriklerinin ve elementlerin bağ kompozisyonlarının analiz edilme metotları sunulmuştur. Sonrasında optik analizler için morötesi-görünür bölge geçirgenlik (UV-Vis) sistemi kullanılarak ince filmlerin kalınlıklarının ve optik enerjilerinin belirlenmesi metodu anlatılmıştır. Elektriksel analizler için sıcaklık bağımlı akım-voltaj ölçüm sistemi ile iletkenliklerin ve aktivasyon enerjilerinin belirlenmesi metodu ve elektriksel iletim mekanizmaları tanımlanmıştır.

Araştırma bulguları ve tartışma bölümünde, ilk kısımda n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin XPS spektrumları ve bu spektrumların analiz edilmesiyle belirlenen karbon içerikleri ve n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin yapısında bulunan Si, C ve H elementlerinin bağ kompozisyonları rapor edilmiştir. İkinci kısımda n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin UV-Vis spektrumları sunulmuş ve ince film kalınlıkları, izinli endirekt ve direk geçişlere bağlı Tauc enerjileri (E_{Tauc} , E_{Tauc}^*), E_{04} ve Urbach (E_U) enerjilerinin analizleri rapor edilmiştir (Kılıç, 2006). Son kısımda n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin elektriksel özellikleri rapor edilmiştir. Sıcaklık bağımlı akım-voltaj eğrileri sunulmuştur. İnce filmlerin iletkenlikleri ve aktivasyon enerjileri belirlenmiştir. Elektriksel iletim mekanizmaları standart iletim ve en yakın komşuya sıçrama (EYKS) iletim mekanizmaları (Nearest neighbour hopping conduction mechanism) ile analiz edilmiştir. N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin özelliklerine fosforun etkileri has a-SiC_x:H ince filmlerin özellikleri ile karşılaştırılarak rapor edilmiştir (Street, 1991; Sel, 2007, 2012).

Sonuç ve öneriler bölümünde n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin yapısal, optik ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesi için gerçekleştirilmiş tüm analizlerin sonuçları değerlendirilerek fosfor katkılamının hidrojenlenmiş amorf silisyum karbür ince filmlerin elektriksel özelliklerine etkileri rapor edilmiş ve öneriler sunulmuştur.

1.2. Hidrojenlenmiş Amorf Silisyumun Özellikleri

Silisyumun yapısı 109.5 derecelik açılarla birbirine bağlanan dört bağdan oluşan tetrahedral yapı biçimindedir. Amorf silisyumun (a-Si) yapısındaki düzensizlik sonucunda birçok kusur oluşmaktadır. Bağ açılarının tam olarak 109.5 derecelik açılarla oluşamaması, bağ uzunluklarının olması gerekenden farklı olması gibi kusurlar sonucunda enerji bant yapısında iletim ve valans bantlarının kenarlarında bant uzantı durumları oluşmaktadır. Bunlara ek olarak amorf yapının koordinasyonunun izin vermemesi sebebi ile birçok Si-Si bağı oluşamamaktadır. Bu bağlar kopuk bağ olarak adlandırılır. Kopuk bağlar yasak enerji aralığında derin durum olarak adlandırılan ve bant uzantı durumlarına kıyasla daha büyük enerjili olan kusur durumlarının oluşmasına sebep olur (Şekil 1.1). Enerji bant yapısının bu durumu ile a-Si yarı iletken olarak elektronik uygulamalarda fonksiyonel özellik gösteremeyecek durumdadır ve bu durumun işlevsellik kazanacak şekilde düzeltilebilmesi için hidrojenleme kaçınılmaz bir şekilde gereklidir. Hidrojenleme sonucunda kopuk bağların yoğunluğu göreceli olarak büyük oranda azalır ve böylece Fermi enerji seviyesi (E_F) civarında derin durum yoğunluğu dağılımı olacak şekilde tüm yasak enerji aralığındaki derin durum yoğunluğu büyük ölçüde azaltılmış olur. Buna ek olarak hidrojenleme sonucunda zayıf Si-Si bağları kırılarak yerlerine Si-H bağları da oluşabilir (Street, 1991).



Şekil 1.1. Hidrojenlenmiş amorf silisyumun durum yoğunluğu

1.3. Fosfor Katkılamanın Hidrojenlenmiş Amorf Silisyumun Özelliklerine Etkileri

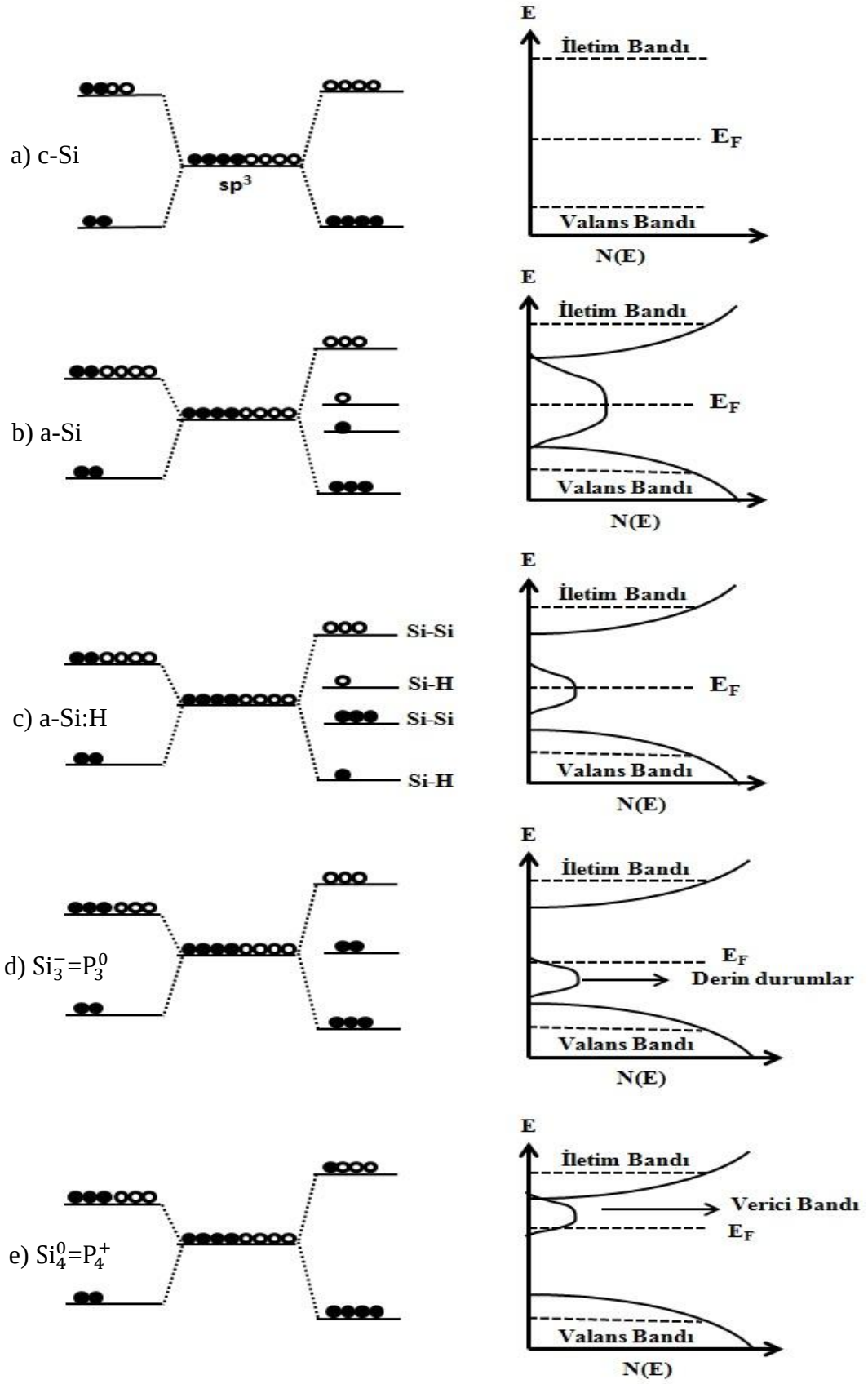
a-Si:H, p-tipi ve n-tipi katkılanabilmektedir. P-tipi katkılama için genellikle bor, n-tipi katkılama için ise genellikle fosfor kullanılmaktadır. Dört bağ yapabilen a-Si'un koordinasyon sayısı (Z) 4 olarak ifade edilir. Buna bağlı olarak katkılayıcı atomlar bu koordinasyon sayısına sahip olmaya zorlanırlar. Fakat amorf yapıdaki düzensizlik sebebiyle katkılayıcı atomların koordinasyon sayılarını optimize ederek 4'e adapte edebilmelerine uygun lokal çevre yeterince bulunmamaktadır. Atomlar arası bağların koordinasyon sayısının belirlenmesi için Mott N/8-N kuralını önermiştir (Mott, 1969). Bu kuralda N valans elektronlarının sayısıdır. Bu kurala göre $N \geq 4$ için $Z=8-N$ ve $N < 4$ için $Z=N$ olur. Dolayısıyla koordinasyon sayısı ve yapının düzensizliği arasında bir ilişki vardır. Koordinasyon sayısı 4 olan düzensiz bir yapının bağlarının gerilmesine ve bükülmesine bağlı olarak sınırlama sayıları ($N_C(Z)$) (Constraints),

$$N_C(Z) = \frac{Z}{2} + \frac{Z(Z-1)}{2} = \frac{Z^2}{2} \quad (1.1)$$

eşitliği ile ifade edilmiştir (Street, 1991). Buradaki '1/2' terimi her bir bağın iki atomu sınırlamasından kaynaklanmaktadır. Kesirli ilk terim bağlardaki gerilmeyi, ikinci terim ise bağlardaki bükülmeyi ifade etmektedir. Atomlar 3-boyutlu bir katıda 3 farklı yönde hareket edebilecekleri için bağ açılarının ve uzunluklarının sabit olabileceği durumda $N_C(Z) \leq 3$ olabilmektedir. Fakat a-Si için $Z=4$ olan durum yüksek derecede düzensizdir ($N_C(Z)=8$). Dolayısıyla bu stresin azaltılması için Z'nin azaltılması gerekir ve bu durum $Z=3$ ve hatta $Z=2$ koordinasyonlarının oluşmasıyla sağlanabilir ki bu koordinasyonlar sağlandığında da çok sayıda kopuk bağ oluşur. Bu kopuk bağların azaltılması için hidrojenlemenin yanı sıra katkılama da önemli ölçüde etkilidir. Fakat katkılayıcı atomlar bu durumu sağladıklarında yük taşıyıcı konsantrasyonunda bir artışa sebep olamazlar ve dolayısıyla elektriksel olarak aktif değildirler.

Yapıda bulunan silisyum ve fosfor atomlarının N/8-N kuralına göre elektron konfigürasyonları ve enerji bant yapılarının gösterimi Şekil 1.2'de sunulmuştur. Şekil 1.2. (a)'da c-Si olarak silisyumun ideal (kusursuz) kristal yapısının enerji bant yapısı gösterilmiştir. Bu durumda iletim ve valans bantlarının bant uzantıları yoktur ve yasak enerji aralığında durum yoğunluğu dağılımı mevcut değildir. Şekil 1.2.(b)'de a-Si'un (Si_3^0) şematik olarak enerji bant yapısı sunulmuştur ve bant uzantı durumlarının dağılımına ek

olarak yasak enerji aralığında kopuk başlardan oluşan derin durumların dağılımı gösterilmiştir. şekil 1.2.(c)’de a-Si:H’un enerji bant yapısında hidrojenlemenin etkisiyle derin durum yoğunluğunun büyük oranda azaldığı ve Fermi enerji seviyesi civarında göreceli olarak önceki duruma kıyasla daha az olan derin durum yoğunluğu belirtilmiştir. şekil 1.2.(d)’de ise a-Si:H, fosfor ile katkılандıęında ($Si_3^- = P_3^0$) genel olarak oluşan iki durumdan ilki sunulmuştur. Bu durumda fosfor hidrojenin benzeri bir etki oluşturarak kopuk bağ yoğunluğunun azaltılmasını sağlarken elektriksel olarak aktif değildir ve derin durum yoğunluğu dağılımı göreceli olarak Fermi seviyesinin altında daha fazla olacak şekildedir (nötr durum) (Street, 1991; Demichelis ve ark, 1991, 1992). şekil 1.2.(e)’de ise ($Si_4^0 = P_4^+$) fosforun elektriksel olarak aktif olduğu ve amaçlanan n-tipi katkılایıcı olarak yapıda bulunduğu iyonize verici durumu diye de adlandırılan durum gösterilmiştir. Fosforun dört katlı koordinasyonu, üç katlı koordinasyonuna göre daha yüksek enerjili olmasına rağmen göreceli olarak katkılایıcı etkisinin görülebilmesi için yeterli konsantrasyonlarda oluşabilmektedir. Bu durumda fosforun etkisiyle iletim bandının yakınında verici bant diye de adlandırılabilcek olan durum yoğunluğu dağılımları oluşmaktadır ve Fermi enerji seviyesi göreceli olarak iletim bandına yaklaşmaktadır.



Şekil 1.2. a) c-Si, b) Has a-Si, c) a-Si:H, d) $Si_3=P_3^0$, e) $Si_4=P_4^+$ elektron konfigürasyonları ve enerji bant yapıları

P_4^+ durumu (iyonize verici durum), derin durumlarla etkileşerek nötr verici durumunun oluşmasına da (P_4^0 , Nötr verici) sebep olabilir. Bir iyonize vericinin oluşumu verici durumların enerji seviyesinden Fermi enerji seviyesine bir elektron transferiyle olur. Dolayısıyla toplam oluşum enerjisi;

$$U_{p_4^+} = U_{p_4^0} - (E_P - E_F) \quad (1.2)$$

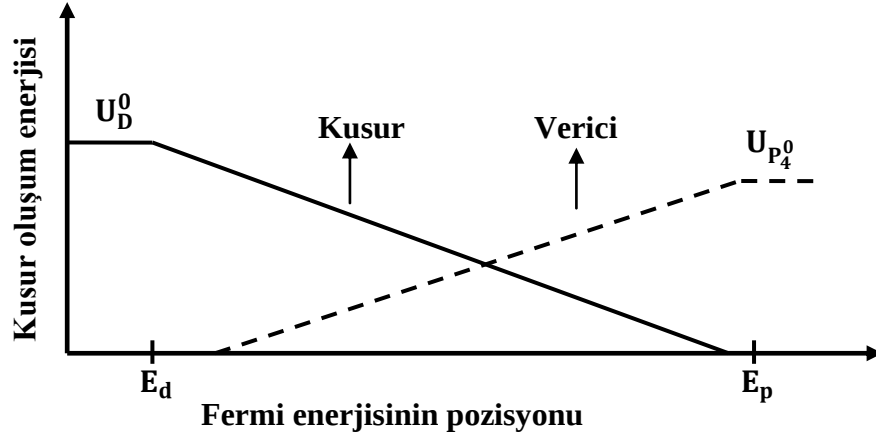
ile ifade edilir. Bu ifadede ' $U_{p_4^+}$ ' iyonize fosfor kusur durumunun oluşum enerjisi, ' $U_{p_4^0}$ ' nötr fosfor durumunun oluşum enerjisi, ' E_P ' verici durumundaki elektronun enerjisidir. İyonize kusur durumunun oluşum enerjisi ise;

$$U_{D^-} = U_{D^0} - (E_F - E_d) \quad (1.3)$$

ile ifade edilir. Bu ifadede ' U_{D^-} ' iyonize kusur durumunun oluşum enerjisi, ' U_{D^0} ' nötr kusur durumunun oluşum enerjisi, ' E_d ' kusur durumundaki elektronun enerjisidir. Bu durumda n-tipi katkılama sunucunda verici-kusur durum çifti etkileşimi için toplam enerji;

$$U_{p_4^+} + U_{D^-} = U_{p_4^0} + U_{D^0} - (E_P - E_d) \quad (1.4)$$

ile ifade edilir. Dolayısıyla derin durumun ve verici durumunun oluşmasında Fermi enerji seviyesinin önemli rolü bulunmaktadır. Şekil 1.3'te sunulduğu gibi Fermi enerjisi büyüdüğünde verici durumların oluşması baskılanır; bununla beraber kusur durumlarının oluşma enerjisi küçülür ve kusur durumlarının oluşması daha baskın hale gelir. Diğer yanda, Fermi enerjisi küçüldüğünde ise tersi durum geçerli olmaya başlar. Dinamik denge Fermi seviyesinin E_P 'den daha küçük ve verici durumuyla etkileşen derin durum enerjisinden (E_d) daha büyük olmak üzere bir seviyede sabitlenmesi ile sağlanmış olur (Street, 1991).



Şekil 1.3. Fermi enerjisinin pozisyonunun bir fonksiyonu olarak n-tipi katkılayıcı ve kusur oluşum enerjilerinin grafiği (Street, 1991)

Amorf silisyum yapılar da iletkenlik yaklaşık %1-1.5 değerinde bir katkılama konsantrasyonu ile artabilir. Daha yüksek seviyelerde katkılama ise iletkenlik üzerinde büyük bir düşüşe ve aktivasyon enerjisinde bir artışa sebep olur (Leidich ve ark., 1983).

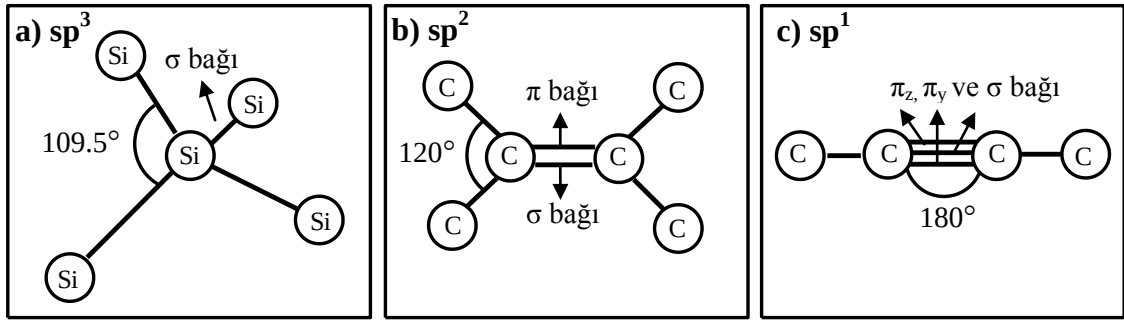
1.4. Karbonun Hidrojenlenmiş Amorf Silisyum Karbür İnce Filmlerin Yapısal ve Elektriksel Özelliklerine Etkileri

a-Si:H'un alaşımlarından biri olan a-SiC_x:H'nin yapısı üç farklı atomdan oluşur. Bunlar silisyum, karbon ve hidrojen atomlarıdır. Karbonun a-SiC_x:H yapısı içerisindeki konsantrasyon miktarının değiştirilmesine bağlı olarak farklı özelliklerde yapılar oluşmaktadır.

a-SiC_x:H yapısında karbon içeriği (x) 0 ile 1 (0 ≤ x ≤ 1) arasındaki değerlerde olabilmektedir. Buna göre karbon içeriğinin x=0 olduğu durumda yapıda karbonun bulunmadığı ve silisyum atomlarının kendi aralarında ve hidrojenle yaptığı bağları içeren a-Si:H oluşmaktadır. Karbon içeriğinin yapıda arttırılmasına bağlı olarak silisyum zengin (x<0.5) durumunda silisyumun kendisiyle ve hidrojen ile yaptığı tetrahedral bağların yanında az oranda Si-C kovalent bağları mevcuttur. Eğer karbon içeriği daha da arttırılırsa oluşan karbon zengin durumda (x>0.5) a-SiC_x:H yapısında bulunan Si-Si ve Si-H bağlarının yerini çoğunlukla karbon atomu ile yapılan bağlar almaktadır. Eğer karbon içeriği x=1 olursa bu yapı artık hidrojenlenmiş amorf karbürdür (a-C:H). Sonuç olarak a-SiC_x:H'nin yapısı karbon içeriğine bağlı olarak a-Si:H ile a-C:H yapılarının özelliklerinin birleşiminden meydana gelir (Robertson, 1986, 1987, 1991, 1992a, 1992b).

Karbon ve silisyum atomları dört valans elektronuna (bağ yapan elektrona) sahiptir. Karbon atomları sp³, sp² ve sp¹ türü hibritleşmeleri yapabilirler (Şekil 1.4). Bu hibritleşme

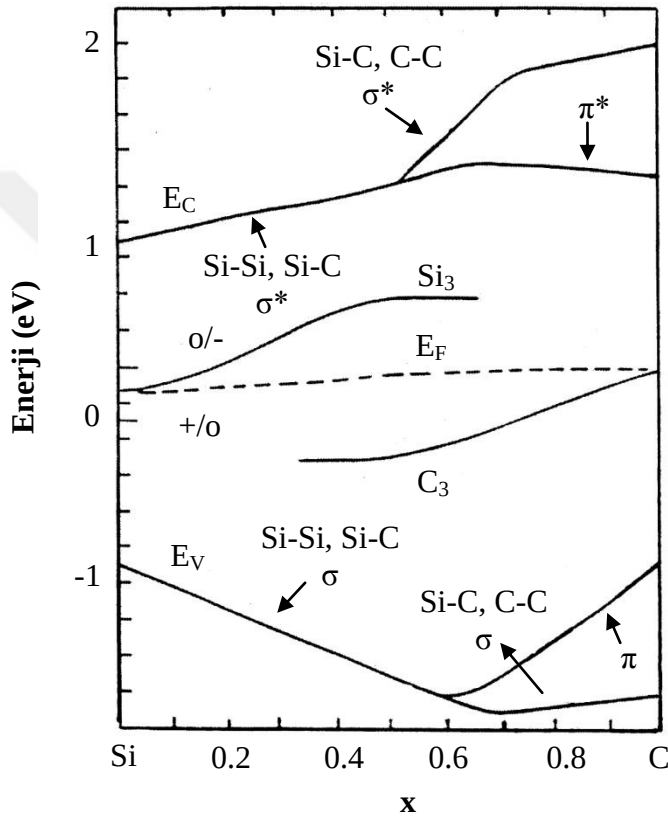
türlerinden biri olan sp^3 türü hibritleşme yapısında silisyum atomlarında olduğu gibi tetrahedral yapıda bağlanırlar. Bu hibritleşme türünde atomlar birbirlerine sigma (σ) bağlarıyla bağlanırlar. sp^2 türü hibritleşmede, karbon atomları aralarında 120 derecelik bağ yaparak düzlemsel yapılar oluştururlar. Bu bağların ikisi sigma bağları iken diğerleri ise biri sigma biri pi (π) türü bağdır. sp^2 türü hibrit yapısına grafitik (Aromatik) yapılar da denir. Bu düzlemsel yapılar birleşerek altıgen şeklinde halkalar oluşturur. Sigma türü bağlar sp^3 , sp^2 , sp^1 hibritleşmesi yapan atomlar arasında meydana gelirken, π türü bağlar ise sadece sp^2 ve sp^1 türü hibritleşmede meydana gelir. sp^1 türü hibritleşmede ise karbon atomları toplamda dört bağ yapacak şekilde iki atoma bağlanırlar. Bu doğrusal dört bağdan biri sigma türü iken diğer atoma bağlı üç bağdan biri sigma, diğer ikisi ise pi bağından oluşur. sp^1 hibritleşmesinde karbon atomları arasındaki açı 180 derecedir. Bu yapılara olefinik yapılar da denir.



Şekil 1.4. Karbon ve silisyum atomlarının yapısı. a) sp^3 , b) sp^2 , c) sp^1 türü hibritleşmeler

a- $SiC_x:H$ ince filmlerin enerji bant yapılarının karakteri a-Si:H ve a-C:H ince filmlerin bant yapılarının özelliklerinin bileşkesinden oluşmaktadır. a-Si:H için enerji bant aralığı 1.8 eV civarında iken a-C:H için enerji bant aralığı yaklaşık olarak 3 eV civarındadır. Bu iki enerji bandı arasındaki enerji değerlerinin elektromanyetik spektrumun görünür bölgesine denk gelmesi, a- $SiC_x:H$ ince filmlerin opto-elektronik uygulamalarda kullanılmasına imkan sağlamaktadır. Enerji bant aralığı karbon içeriğine bağlı olarak 1.8 eV ile 3 eV enerjileri arasında ayarlanabilmektedir. a- $SiC_x:H$ 'ün enerji bant yapısı Şekil 1.5'de sunulmuştur. Karbon içeriği $x < 0.5$ iken a-Si:H'ün enerji bant yapısının özelliklerinin baskın olduğu görülür. Karbon içeriğinin artması ile birlikte enerji bant aralığı genişlemektedir. Karbon zengin durumda ($0.5 < x$) a-C:H'ün enerji bant yapısının özellikleri baskın duruma geçmektedir. Karbon içeriğinin artmasıyla, karbonun silisyumdan daha elektronegatif bir element olmasına bağlı olarak yapı içerisindeki Si-Si

ve Si-H bağları yerine Si-C, C-H, C-C kovalent bağları oluşmaktadır. Buna bağlı olarak a-SiC_x:H'de enerji bant aralığı artmaktadır. Ancak karbon zengin bölgede grafitik ve hatta olefinik yapılardan kaynaklı π türü bağlarının yoğunluklarının artması sonucu enerji bant aralığındaki artış ters bir trend göstererek göreceli olarak azalmaktadır. a-SiC_x:H'ün enerji bant yapısında Fermi enerji seviyesi civarında silisyum (Si₃) ve karbon (C₃) atomlarının oluşturduğu derin durum kusurları mevcuttur (Robertson, 1986, 1987, 1991, 1992a, 1992b).



Şekil 1.5. a-SiC_x:H ince filmlerin enerji bant yapısının karbon içeriğine bağlı değişimi (Robertson, 1992a)

1.5. Amaç

Bu tez çalışmasının amacı PDKBB yöntemi ile dört farklı karbon içeriğinde biriktirilmiş olan fosfor katkılanmış n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin elektriksel özelliklerinin incelenmesi ve elektriksel iletim mekanizmalarının analiz edilmesidir. Karbon içeriği, n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin özelliklerinde önemli etkiye sahiptir. Dolayısıyla tezin ilk basamağında XPS analizleri sonucu karbon içerikleri ile silisyum, karbon ve fosfor atomlarının elemental kompozisyonlarının analiz edilmesi amaçlanmıştır. İnce filmlerin kalınlıkları, öziletkenliklerin belirlenmesinde; optik enerjiler aktivasyon enerjileri ile

karşılaştırılarak iletim mekanizmalarının belirlenmesinde gereklidir. Dolayısıyla ince filmlerin kalınlıklarının ve E_{Tauc} , E_{04} , E_U optik enerjilerinin UV-Vis spektrumu ile analiz edilmesi amaçlanmıştır. N-tipi $a-SiC_x:H$ ince filmlerin öziletkenliklerinin ve aktivasyon enerjilerinin sıcaklık bağımlı akım-voltaj ölçümleri ile analiz edilmesi ve sonrasında iletim mekanizmalarının standart iletim mekanizması ve EYKS mekanizması modellenerek incelenmesi amaçlanmıştır. Finalde, analiz sonuçlarının has $a-SiC_x:H$ ince filmlerin özellikleri ile karşılaştırılmasıyla fosfor katkılanmanın $a-SiC_x:H$ ince filmlerin özelliklerine etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.



BÖLÜM 2

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Giriş

Literatürde rapor edilmiş olan araştırmalarda fosfor katkılanmış ve has hidrojenlenmiş amorf silisyum karbür ince filmlerin elektriksel, optik ve yapısal özellikleri incelenip özetlenmiştir.

2.2. N-Tipi ve Has a-SiC_x:H İnce Filmlerin Özellikleri ile İlgili Önceki Çalışmalar

Leidich ve arkadaşları (1983) tarafından yapılan çalışmada fosfor katkılanmış a-Si ince filmler, radyo frekanslı PDKBB sistemi ile silan ve fosfin gazları kullanılarak biriktirilmiştir. İnce filmler biriktirilirken 0.02 W/cm² güç yoğunluğu uygulanmıştır. Fosfin gazının akısının toplam gaz akısına oranı 10⁻⁴-10⁻¹ aralığında değiştirilerek biriktirilmiş ince filmlerin akım-voltaj ölçümleri analiz edilerek öziletkenlikleri ve aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır. Fosfin gazı akı oranının 10⁻⁴ değeri için öziletkenlik 5×10⁻³ S.cm⁻¹ olarak ölçülmüştür. Akı oranı arttırıldığında öziletkenlik 10⁻² S.cm⁻¹ mertebesine doğru artarak pik yapmış ve sonrasında hızla 10⁻¹⁶ S.cm⁻¹ mertebesine düşmüştür. Aktivasyon enerjisi ise fosfin gazı akı oranının 10⁻⁴ olduğu durumda yaklaşık 1 eV değerinde iken akı oranının 10⁻¹ olduğu durumda 0.9 eV değerindedir. Fosfin akı oranı 10⁻¹ değerinin üzerine çıktığında ise aktivasyon enerjisinde keskin bir düşüş gözlenmiştir ve fosfin akı oranı 1'e ulaştığında, aktivasyon enerjisinin yaklaşık 0.2 eV civarında olduğu görülmüştür. Katkılama veriminin %0.3 civarında olduğu hesaplanmıştır. Amorf silisyumun 4-katlı koordinasyona ve amorf fosforun ise 3-katlı koordinasyona sahip olduğu, silisyum ve fosfor karışımından oluşan yapının ise 3- ve 4-katlı koordinasyonun kompozisyonundan oluştuğu belirtilmiştir. Analizler sonucunda amorf silisyum yapısında fosforun 4-katlı koordinasyonunun 3-katlı koordinasyonuna göre daha az gözlemlendiği rapor edilmiştir.

Demichelis ve arkadaşları (1992) tarafından yapılan çalışmada silan, metan ve fosfin gazları kullanılarak PDKBB sistemiyle biriktirilmiş amorf ve mikrokristal silisyum karbür ince filmlerin yapısal, optik ve elektriksel özelliklerine fosfor katkılamanın etkileri incelenmiştir. 62 mW/cm³ güç yoğunluğunda, 70 sccm SiH₄ ve 100 sccm CH₄ akılarına 0.1×10³ ile 4.2×10³ oranında PH₃ karıştırılarak ve 150 mW/cm³ güç yoğunluğunda 4 sccm SiH₄ ve 0.5 sccm CH₄ akılarına 4.1×10³ ile 8.8×10³ oranında PH₃ karıştırılarak ince

filmler biriktirilmiştir. İnce filmlerin karbon içeriğinin yaklaşık olarak 0.1 olduğu rapor edilmiştir. Filmlerin optik özellikleri UV-Vis ölçümleri ile analiz edilmiştir. Düşük güç yoğunluğunda biriktirilen filmlerin Tauc enerjileri 1.9 eV ve 2.0 eV ve E_{04} enerjileri 2.0 eV ve 2.2 eV olarak belirlenmiştir. Yüksek güç yoğunluğundaki filmlerin Tauc enerjileri 1.8 eV ve 2.1 eV, E_{04} enerjileri ise 1.9 eV ve 2.10 eV olarak belirlenmiştir. Filmlerin optik enerjilerinin fosfor içeriğindeki değişimi ile hemen hemen aynı kaldığı gözlemlenmiştir. Akım-voltaj ölçümleri ile analiz edilen has filmlerin elektriksel iletkenliğinin $10^{-12} \text{ S.cm}^{-1}$ olduğu ve değişik fosfor oranlarına göre düşük güçte biriktirilen katkılanmış filmlerin iletkenliğinin 10^3 - 10^5 kat, yüksek güç filmlerin iletkenliğinin ise 10^4 - 10^{10} kat aralığında arttığı rapor edilmiştir. a-Si:H filmlere kıyasla a-SiC:H filmlerde karbon içeriğinin artmasıyla elektriksel iletkenliğin ve katkılama konsantrasyonunun azaldığı, amorf matristeki mikrokristal yapıların ise elektriksel iletkenliği ve katkılama verimini artırıcı etki gösterdiği fakat filmlerin optik enerjisinde önemli bir değişikliğe sebep olmadığı belirtilmiştir. Fosforun P_3^0 bağlanma konfigürasyonunun katkılایıcı olarak davranmamakla beraber yapıda hidrojenin etkisini gösterdiği, bunun yanında P_4^0 konfigürasyonunun katkılایıcı etki yaptığı rapor edilmiştir ve P_4^0 'ün (Adler, 1978) silisyum matrisinde daha kararlı olduğu açıklanmıştır.

S.F.Yoon ve arkadaşları (1997), Yoon (1997), Ji ve arkadaşları (1997) tarafından birbirini takip eden çalışmalarda fosfin gazı ile katkılanmış n-tipi $\text{SiC}_x\text{:H}$ ince filmler elektron siklotron rezonans kimyasal buhar biriktirme (ESR-KBB) sistemiyle 150 W ve 600 W mikrodalga (2.45 GHz) gücü uygulanarak biriktirilmiştir. 1:1 gaz akı oranında metan ve silan kaynak gazları kullanılmış ve fosfin akı oranı %0 ile %3.8 arasında ayarlanmıştır. Fosfor seviyesinin ince filmlerin optik enerjisine ve elektriksel iletkenliğine etkileri incelenmiştir. Filmlerin yapısal özellikleri Raman saçılma ile analiz edilmiş ve fosforun filmlerin yapısındaki mikrokristal fazı artırıcı etkisi olduğu ve bu etkinin yüksek güçte daha baskın olduğu rapor edilmiştir. Optik özellikler UV-Vis geçirgenlik ve yansıma spektroskopileri ile analiz edilmiş, E_{Tauc} ve E_{04} enerjileri hesaplanmıştır. İnce filmlerin optik enerjileri 2.15 ± 0.5 eV aralığında bulunmuş ve fosfor içeriğine bağlı olarak çok az değiştiği belirtilmiştir. İnce filmlerin elektriksel özellikleri akım-voltaj ölçümleri ile analiz edilmiş ve yüksek güçte biriktirilmiş filmlerin elektriksel iletkenliğinin fosfor içeriğine bağlı olarak $10^{-8} \text{ S.cm}^{-1}$ mertebesinde $10^{-1} \text{ S.cm}^{-1}$ mertebesine hızla yükseldiği rapor edilmiştir. Dolayısıyla katkılama veriminin yüksek olduğu ve düşük güçteki filmler için iletkenliğin yaklaşık 10 kat arttığı belirtilmiştir. İletkenlikteki bu artışa bağlı olarak filmlerin aktivasyon enerjisinin azaldığı gözlemlenmiştir. İletkenlikteki bu değişimin enerji

bant aralığındaki durum yoğunluğu dağılımına bağlı olduğu, mikrokristal yapının artmasıyla bant aralığındaki kusur durumlarının yoğunluğunun azalmasının bunda etkili olduğu belirtilmiştir. Biriktirme sürecinde gaz karışımındaki fosfor atomlarının tetrahedral yapıdaki silisyum matrisinde göreceli olarak daha kararlı konfigürasyonda olmalarına uygun olarak filmlerde kristalleşme merkezleri olarak davrandıkları rapor edilmiştir. Elektrik akımının silisyum-karbon matrisindeki mikrokristal adacıklarda ve bu adacıklar arasındaki sıçrama mekanizmaları ile gerçekleştiği ve mikrokristal yapıdaki yüksek serbest taşıyıcı yoğunluğunun iletkenliğin artmasına katkıda bulunduğu açıklanmıştır.

Aida ve arkadaşları (1997) tarafından yapılan çalışmada fosfor katkılanmış n-tipi a-SiC:H ince filmler silisyum hedef kaynağı kullanılarak argon/hidrojen gazı atmosferinde çığlama (Sputtering) yöntemiyle hazırlanmıştır. Karbon ve fosfor kaynağı olarak trifenilfosfin diski kullanılmıştır. Tauc enerjileri, n-tipi a-SiC_x:H ince filmler için 1.6 eV ve has filmler için ise 1.8 eV olarak hesaplanmıştır. Filmlerdeki karbonun 3-katlı ve 4-katlı koordinasyonları gösterdiği rapor edilmiştir. Yapıdaki hidrojenin tavlama, yüksek biriktirme sıcaklığı ve yüksek iyon bombardımanı uygulamaları sonucunda azalması ile karbonun grafitik yapıda bulunma eğiliminin arttığı belirtilmiştir. Sıcaklık bağımlı akım-voltaj ölçümleri sonucunda öziletkenlikler ve aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır. Katkılanmış ve has ince filmlerin oda sıcaklığındaki öziletkenlikleri sırasıyla $2 \times 10^{-5} \text{ S.cm}^{-1}$ ve $1.5 \times 10^{-9} \text{ S.cm}^{-1}$ ve aktivasyon enerjileri ise sırasıyla 0.40 eV ve 0.76 eV hesaplanmıştır. Aktivasyon enerjisindeki azalmanın Fermi seviyesinin iletim bandına yaklaşmasından kaynaklandığı rapor edilmiştir.

Carreno ve arkadaşları (1998) tarafından yapılan çalışmada radyo frekanslı PDKBB sistemiyle silan ve metan kaynak gazlarıyla ‘silana aç plazma’ (silane starving plasma) koşullarında biriktirilmiş a-Si_{1-x}C_x:H ince filmler ion ekme (implantation) yöntemi ile n-tipi katkılanmışdır. Silana aç plazma koşullarının sağlanabilmesi için plazma ortamının güç yoğunluğu, silan gaz akısı ve plazma ortamındaki bulunma süresi düşük tutulmuş ve bunun yanında metan gaz akısı göreceli olarak yüksek tutulmuştur. Bu şartlar sayesinde kristal silisyum karbürün kimyasal ve yapısal düzenine yakın filmlerin elde edilmesi amaçlanmıştır. Böylece filmlerde verimli yerdeğiştirme katkılarının sağlanabileceği, yapısal düzensizliğin göreceli olarak daha az olacağı varsayılmıştır. Katkılayıcı olarak fosfor ve azot kullanılmıştır. İnce filmler 300°C’de, %80 ve %97 metan gaz konsantrasyon oranı uygulanarak biriktirilmiştir. Filmlerin optik enerjileri sırasıyla 3.6 eV ve 3.2 eV ve karbon içerikleri sırasıyla x=0.57 ve 0.68 olarak hesaplanmıştır. Oda sıcaklığındaki elektriksel öziletkenlikler sırasıyla fosfor katkısı için $2.0 \times 10^{-7} \text{ S.cm}^{-1}$ ve $3.5 \times 10^{-8} \text{ S.cm}^{-1}$

ve azot için $6.4 \times 10^{-6} \text{ S.cm}^{-1}$ ve $6.2 \times 10^{-8} \text{ S.cm}^{-1}$ olarak rapor edilmiştir. 300 K ile 500 K aralığında yapılan sıcaklık bağımlı elektriksel analizlerden hesaplanan aktivasyon enerjileri ise sırasıyla fosfor katkılı filmlerde 0.35 eV ve 0.53 eV ve azot katkılılarda ise 0.24 eV ve 0.31 eV olarak bulunmuştur. Ayrıca karbon içeriği yaklaşık 0.30 ve 0.45 olan fosfor ve azot katkılanmış ince filmler için aktivasyon enerjileri sırasıyla yaklaşık olarak 0.75 eV, 0.40 eV ve azot için 0.70 eV, 0.35 eV rapor edilmiştir. $x=0.5$ 'e doğru aktivasyon enerjilerinin azaldığı ve sonrasında $x=0.7$ civarında çok az bir artış gösterdiği belirtilmiştir. Analizlere göre azot katkılı ince filmlerin aktivasyon enerjilerinin aynı karbon içerikli fosfor katkılı filmlerinkinden göreceli olarak daha düşük olduğu rapor edilmiştir. Fosfor katkısıyla silana aç plazma koşullarının aç olmayan koşulda biriktirilmiş filmlere kıyasla oda sıcaklığı öziletkenliklerinde göreceli olarak yaklaşık 10 katlık bir artış oluşturduğu rapor edilmiştir.

Kadas ve arkadaşları (1998) tarafından yapılan çalışmada p- veya n- tipi katkılanmış 4-kat koordineli amorf karbon ve silisyumdaki katkılama çiftlerine ait enerji seviyelerinin pozisyonları, Hartree-Fock ab initio ve Fragment kendi kendine oluşan alan (Fragment Self-Consistent field) metoduyla incelenmiştir. 45 ile 583 karbon veya silisyum atomu içeren amorf yapı modellerine bor, fosfor ve azot katkıları uygulanmıştır. 8-N kuralına göre üç ya da 5 komşulu durumların elektriksel olarak aktif olmadıkları belirtilmiş ve bu sebeple bu analizlerde amorf yapıdaki sadece 4-kat koordineli durumlar hesaplamalara katılmıştır. Modele dahil edilen 2 katkılama çiftlerinden birinin pozisyonu daima aynı olurken diğerinki değiştirilmiştir. N-tipi katkılanmış amorf karbondaki bant aralığında 2 seviye olduğu hesaplanmıştır. Bu seviyelerden birinin bant aralığı içinde derin durum olduğu diğerinin ise iletim bandının hemen altında olduğu belirtilmiştir. Fosfor katkılanmış amorf silisyumda da benzer şekilde bir derin durum enerji seviyesi olduğu ve diğer yandan iletim bandına doğru kayan bir enerji seviyesinin de var olduğu belirtilmiştir.

F. Giorgis ve arkadaşları (2001) tarafından a-SiC_x:H ince filmler PDKBB sistemiyle biriktirilmiştir. Kaynak gazı olarak silan gazı ve karbon kaynak gazı olarak metan ve etilen gazları kullanılmıştır. Metan kullanılan filmlerde plazma gücü 10 W ve 32 W olarak, etilen kullanılan filmlerde ise 4 W olarak ayarlanmıştır. Filmler, karbon içerikleri 0.2 ile 0.8 aralığında olacak şekilde biriktirilmiştir. Filmlerin optik özellikleri UV-Vis spektrometresi ile analiz edilmiştir ve filmlerin E₀₄ ve E_U enerjileri hesaplanmıştır. 2.71 eV ve 3.4 eV çizgilerinde Ar lazer ve ayrıca Xe-Hg lamba ışık kaynakları ile oda sıcaklığında ve 77 K'de foto-ışınma ölçümleri yapılmıştır. Karbon içeriğinin artmasıyla, E₀₄'ün yaklaşık olarak 1.9 eV'tan 3.2 eV'a ve Urbach enerjisinin ise 50 meV'tan 300 meV'a arttığı belirtilmiştir.

Yapıda Si-Si bağlarının yerini daha kuvvetli olan Si-C ve C-C bağlarının almasının bunda etkili olduğu yorumu yapılmıştır. Karbon içeriğinin daha da artması durumunda ise karbonun grafitik yapısının oluşmaya başlaması sonucunda enerji bant aralığının genişlemesinin durduğu ve azalmaya başladığı belirtilmiştir.

Wang ve arkadaşları (2002) tarafından yapılan çalışmada a-SiC_x:H ince filmler PDKBB sistemiyle silan ve etilen kaynak gazları kullanılarak 50 ve 100 W radyo frekansı güçleri uygulanarak biriktirilmiştir. XPS analizleri ile filmlerin karbon içeriklerinin 0.4 ile 0.9 aralığında olduğu belirlenmiştir. Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi ile karbon içeriğinin artmasına bağlı olarak Si-C, C-C ve C-H bağlarının, Si-Si ve Si-H bağlarına kıyasla filmlerin yapısında göreceli olarak daha fazla bulunduğu belirlenmiştir. UV-Vis spektroskopisi analizleri sonucunda optik enerjileri x=0 için 1.87 eV, x=0.33 için 2.10 eV, x=0.36 için 2.19 eV, x=0.5 için 2.43 eV, x=0.64 için 2.58 eV ve x=1 için 2.84 eV olarak hesaplanmıştır.

Terasa ve arkadaşları (2003) tarafından yapılan çalışmada fosfin gazına alternatif olarak hidrojenle seyreltilmiş trimetilfosfin buharı, silan ve hidrojen gazları kullanılarak 13.56 MHz, 27.12 MHz ve 163 MHz yüksek rezonans frekanslarında plazma yöntemiyle n-tipi a-Si:H ince filmler biriktirilmiştir. Katkılayıcı konsantrasyonunun (Katkılayıcı/silan) ve çeşitli plazma rezonans frekanslarının artırılmasına bağlı olarak biriktirilen tüm filmlerin oda sıcaklığındaki iletkenlikleri 10⁻³ S.cm⁻¹ değerine ulaşmıştır. Katkılayıcı konsantrasyonunun yaklaşık 10⁻⁴e yükseltilmesi ile orantılı olarak tüm ince filmlerin iletkenliklerinin hemen hemen aynı yükseliş trendine sahip olduğu bunun yanında konsantrasyonun daha yüksek değerlerinde ise fosfin ile biriktirilmiş filmlerin iletkenliklerinin göreceli olarak artmaya devam ettiği ve 10⁻¹ S.cm⁻¹'e ulaştığı rapor edilmiştir. Diğer yanda trimetilfosfin ile biriktirilen ince filmlerin iletkenliklerinin, konsantrasyonun 10⁻⁴-10⁻³ aralığında göreceli olarak sabit kaldığı, daha yüksek konsantrasyonlarda ise 13.56 MHz rezonans frekansında biriktirilen ince filmler dışındakilerin 10⁻⁴ S.cm⁻¹ civarına düştüğü belirtilmiştir. 13.56 Mhz rezonans frekansında biriktirilen ince filmlerin iletkenliğinin ise konsantrasyonun yaklaşık olarak 5×10⁻² değerinde maksimuma ulaşarak 10⁻² S.cm⁻¹ civarına ulaştığı ve sonrasında diğer filmlerin iletkenliklerinin düşüş trendine göreceli olarak uygun bir azalmayla 10⁻³ S.cm⁻¹ civarına düştüğü rapor edilmiştir. Ayrıca filmlerin optik özellikleri UV-Vis-yakın kızıl ötesi spektroskopisi ile analiz edilmiştir. Kırılma indisleri, 10⁻⁸-10⁻³ katkılayıcı konsantrasyonu aralığında 3.27 civarında hesaplanmıştır. 10⁻³-10⁻¹ aralığında ise göreceli olarak azalarak 3.3 civarına düşmüştür. Tauc enerjileri ise 10⁻⁸-10⁻³ katkılayıcı konsantrasyonu aralığında

yaklaşık olarak 1.74 eV hesaplanmış ve katkılayıcı konsantrasyonunun 10^{-1} e doğru artmasıyla göreceli olarak artarak 1.90 eV değerine yükselmiştir. Katkılayıcı konsantrasyonunun artmasıyla oluşan kırılma indislerindeki ve Tauc enerjilerindeki değişimlerin kusur yoğunluklarının artmasına bağlı olduğu rapor edilmiştir. Buna ek olarak katkılayıcı konsantrasyonunun artmasının SiC formasyonlarının oluşumunu desteklediği ve böylece filmlerin optik bant enerjisinin arttığı belirtilmiştir. Ayrıca katkılayıcı konsantrasyonunun artmasıyla ince filmlerdeki hidrojen içeriğinin de arttığı bunun sonucunda filmlerde göreceli olarak fazla miktarda $(\text{SiH}_2)_n$ gruplarından bulunduğu ve bu grupların da a-Si:H yapısına bağlanmaları sonucunda yapıdaki mikro-boşlukların arttığı belirtilmiştir.

Vetter ve arkadaşları (2006) tarafından yapılan çalışmada a-SiC_x:H ince filmler radyo frekanslı PDKBB sistemiyle silan ve metan gazları kullanılarak ve metan gazının akı oranı 0 ile 1.8 aralığında değiştirilerek farklı karbon içeriklerinde biriktirilmiştir. Katkılanmış ince filmlerin biriktirilmesi için silan gazının %5'i oranında fosfin gazı karıştırılmıştır. Plazma güç yoğunluğu 31 mW/cm² ile 186 mW/cm² aralığındaki değerlere ayarlanarak ince filmler biriktirilmiştir. Filmlerin Tauc enerjileri yaklaşık 2 eV olarak hesaplanmıştır. -20°C ile 260°C aralığında yapılan akım-voltaj ölçümleri ile ince filmlerin elektriksel iletkenlikleri analiz edilmiştir. Yüksek güç filmlerinde iletkenliğin göreceli olarak daha düşük olduğu, sıcaklığın yavaşça arttırılması sonucunda yaklaşık olarak 80°C civarından başlamak üzere iletkenliklerin arttığı rapor edilmiştir. Bu değişim, tavlama sonucunda sarkık bağların yerini P-H, Si-H ve C-H bağlarının almasıyla açıklanmıştır. Filmlerin aktivasyon enerjileri 0.3 eV ile 0.5 eV aralığında hesaplanmıştır.

BÖLÜM 3

MATERYAL VE METOT

3.1. Giriş

Fosfor katkılanmış n-tipi a-SiC_x:H ince filmler corning cam ve mikroskop camı alttaşları üzerine PDKBB sistemiyle biriktirilerek hazırlanmıştır. Biriktirme işlemi öncesinde alttaşlara detaylı bir yüzey temizlik işlemi uygulanmıştır. Bu işlemin hemen sonrasında PDKBB sistemine yerleştirilen alttaşlar üzerine ince filmler biriktirilmiştir. Mikroskop camı alttaşlar üzerine biriktirilmiş ince filmler kullanılarak gerçekleştirilen XPS ölçümleri ile filmlerin karbon içerikleri (x) ve içerdikleri elementlerin birbirleri ile yaptıkları bağların kompozisyonları analiz edilmiştir. İnce filmlerin optik özelliklerinin belirlenmesi için corning cam alttaşlar üzerine biriktirilmiş filmlerden UV-Vis ölçümleri yapılmış ve filmlerin kalınlıkları, soğurma katsayıları, E_{Tauc}, E₀₄ ve E_U enerjileri hesaplanmıştır. İnce filmlerin elektriksel özellikleri sıcaklık bağımlı akım-voltaj ölçümleri yapılarak analiz edilmiştir. Akım-voltaj ölçümleri için mikroskop camı alttaşlar üzerine biriktirilmiş ince filmlerin üzerine metalleme işlemi uygulanarak uygun boyut ve geometrilerde elektrotlar oluşturulmuştur. Sonrasında kriyostat ve sıcaklık kontrol ünitesi ile sıcaklıkları ayarlanarak akım-voltaj ölçümleri gerçekleştirilmiş ve öziletkenlikleri hesaplanmıştır. Ayrıca elektriksel ölçümler ile filmlerin aktivasyon enerjileri de hesaplanmıştır.

3.2. N-Tipi a-SiC_x:H İnce Filmlerin Hazırlanması

3.2.1. Alttaşların Temizlenmesi

Alttaşların yüzeylerinde bulunabilecek kirler biriktirme sırasında ince filmlerin alttaş yüzeyinde tam olarak birikmemesine ve biriktirme sonrasında da zamanla filmlerin yüzeyden kalkmasına sebep olmaktadır. Ayrıca bu kirlilikler ince filmlerin özelliklerinin analizleri için gerçekleştirilecek ölçümlerin doğruluğunu da etkilemektedir. Bu sebeple ince filmlerin biriktirilmesinden önce alttaşların yüzeyleri detaylı bir temizlik işleminden geçirilerek temizlenmiştir. Bu temizlik işlemi beş basamaktan oluşmaktadır.

1) Alttaşlar akan deiyonize suda (DS) yıkanmıştır ve sonrasında ultrasonik karıştırıcıda 5 dakika boyunca bekletilmiştir. Bu basamak temizlik işleminin diğer her basamağından sonra tekrarlanmıştır.

2) Alttaşlar deterjan/DS karışımında beşer dakika kaynatılmıştır.

3) Alttaşlar hidrojen peroksit (H_2O_2)/DS karışımında beş dakika boyunca kaynatılmıştır.

4) Trikloretilen (C_2HCl_3)/DS karışımında beş dakika kaynatılmıştır.

5) Temizlik işlemlerinden sonra alttaşların yüzeyleri basınçlı azot gazı (N_2) ile kurutulmuştur.

3.2.2. Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme Sistemi ve İnce Filmlerin Biriktirilmesi

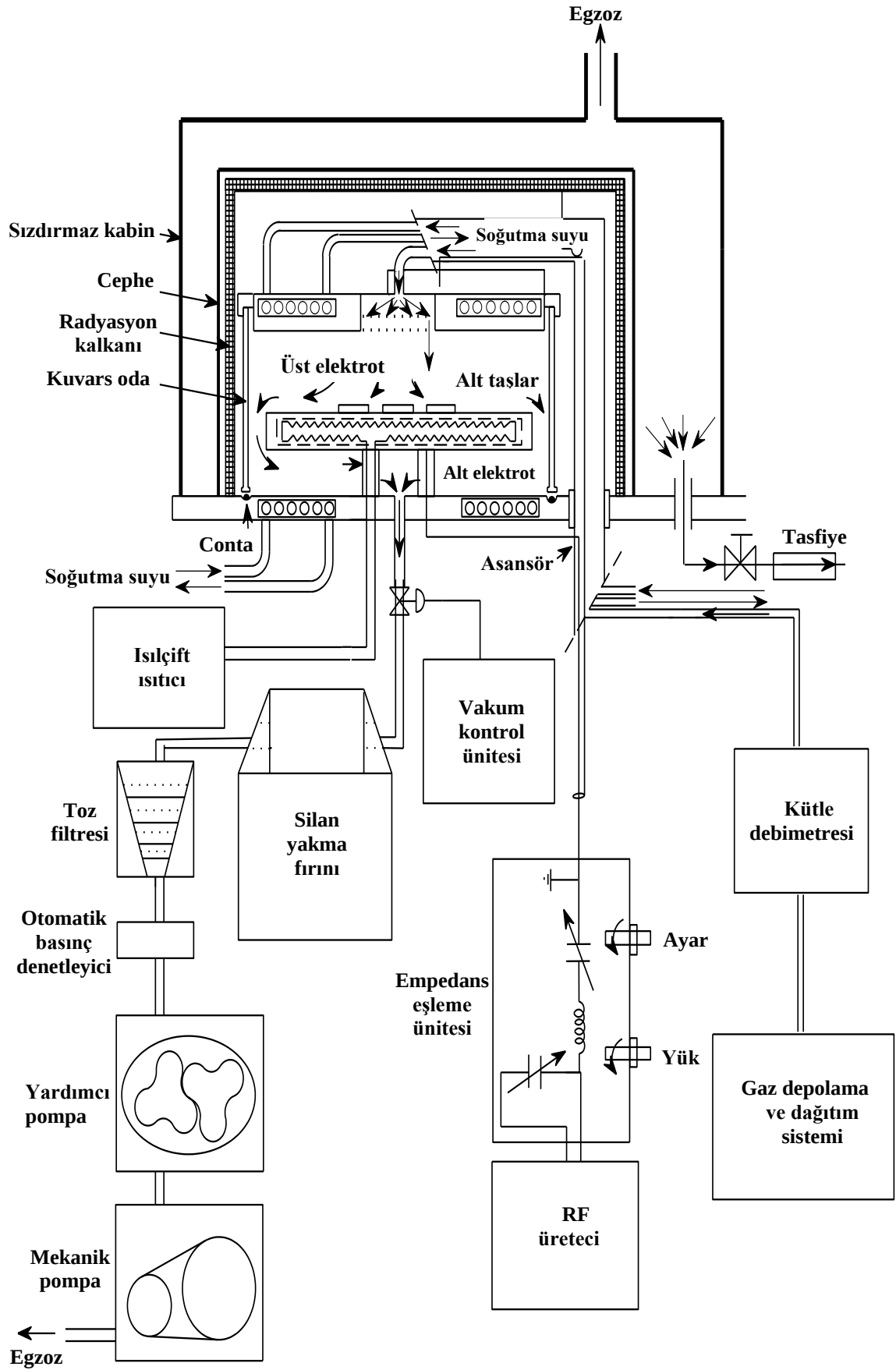
N-tipi a- $SiC_x:H$ ince filmlerin biriktirilmesinde Plasma Lab μP 80 model, 13.56 MHz radyo frekanslı PDKBB sistemi kullanılmıştır. PDKBB sisteminin reaktör, vakum, güç, empedans eşleme ve sıcaklık kontrol ünitelerinin şeması Şekil 3.1’de gösterilmektedir.

Plazma reaktörü sızdırmaz kutunun içine yerleştirilmiştir. Sızdırmaz kabinin içi reaktörden ayrı olarak sürekli vakumda tutularak alttaşlar yerleştirilirken ya da ince filmler biriktirildikten sonra reaktörden alınırken reaktörün içi açılıp kapatıldığı sırada reaktörün kirlenmesi engellenmektedir. Bu amaçla önceden temizlik işleminden geçirilen alttaşlar bu işlemin hemen sonrasında öncelikle sızdırmaz kabinin içindeki tasfiye bölmesine yerleştirilmiştir. Sonrasında tasfiye bölmesi tekrar vakuma alınmış ve sızdırmaz kutunun eldivenleri yardımıyla alttaşlar tasfiye bölgesinden alınarak reaktörün içinde alt elektrotun üstüne yerleştirilmiştir. Reaktör kısmının en dışında radyasyon kalkanı bulunmaktadır. Bu kısım plazma ortamında oluşan radyasyonun dışarıya geçmesini engelleyerek sistemin kullanıcılarını zararlı elektromanyetik ışınlardan korur. Dış kalkanın içi silindirik kuvarstan oluşmaktadır ve dış kısım asansör ile açılıp kapatılabilmektedir. Plazma reaktörünün alt ve üst olmak üzere 24 cm yarıçaplı disk şeklinde iki elektrotu bulunmaktadır. Her bir elektrotun içinde soğutma suyu kanalları bulunmaktadır ve sistem çalıştığı sürece bu kanallardan akan su ile elektrotların aşırı ısınması önlenmektedir. Ayrıca alttaşların yerleştirildiği alt elektrotun içindeki rezistanslar ve ısı çiftin bağlı olduğu elektronik otomatik kontrol sistemiyle alttaşların sıcaklığı $0^{\circ}C$ ile $400^{\circ}C$ aralığında ayarlanabilmektedir. Bu tez çalışmasında incelenen filmlerin biriktirme sırasındaki alttaş sıcaklığı $250^{\circ}C$ ’ye ayarlanmıştır.

PDKBB sisteminde ince filmler biriktirilirken her bir kaynak gazının gaz akı oranları 1 ccm ile 200 ccm arasında elektronik otomatik kontrollü kütle debimetresiyle ayarlanabilmektedir. Silisyum kaynağı olarak silan (SiH_4) gazı ve karbon kaynağı olarak etilen (C_2H_4) gazı kullanıştır.

Toplam gaz akısı 20 ccm olmak üzere, etilen gazı oranı ($M=C_2H_4/(C_2H_4+SiH_4)$) $M=0, 0.2, 0.5$ ve 0.7 'ye ayarlanarak ayrı ayrı biriktirme işlemleri sonucunda dört farklı karbon içeriğinde ince filmler hazırlanmıştır. Ayrıca n-tipi katkılayıcı fosfor kaynağı ve hidrojenlenme için her bir biriktirmede 200 ccm ve 1000 ppm'lik fosfin (PH_3) gazı kullanılmıştır. Plazma reaktörünün vakum seviyesi entegre mekanik vakum pompaları ve otomatik vakum kontrol ünitesi ile 760 Torr ile 0.1 mTorr arasında ayarlanabilmektedir. N-tipi $a-SiC_x:H$ filmler 0.5 Torr basınçta biriktirilmiştir. Kullanılan gazlar silan yanma fırınında kontrollü olarak yakıldıktan sonra egzozdan dışarıya atılmaktadır.

PDKBB sisteminin güç kaynağı maksimum 0.66 W/cm^2 yoğunluğunda güç üretebilmektedir. Üretilen gücün maksimum verimde plazma oluşturabilmesi için reaktörün çıkış empedansı ile güç kaynağının empedansının eşlenmesi için güç kaynağına ek olarak empedans eşleme ünitesi kullanılmaktadır.



Şekil 3.1. PDKBB sisteminin şeması (Sel, 2007)

3.2.3 N-Tipi a-SiC_x:H İnce Filmlerin Biriktirilme Parametreleri

Fosfor katkılanmış n-tipi a-SiC_x:H ince filmler 13.56 Mhz radyo frekansı (RF) ve 90 mW/cm² lik güç yoğunluğunda, silan (SiH₄), etilen (C₂H₄) ve fosfin (PH₃) kaynak gazları kullanılarak, dört farklı gaz akı oranında ($M = C_2H_4 / (SiH_4 + C_2H_4)$; $M=0.0, 0.2, 0.5$ ve 0.7) PDKBB sistemiyle biriktirilmiştir (Kılıç, 2006). PDKBB sisteminde uygulanan ince film biriktirme parametreleri Çizelge 3.1’de sunulmuştur. Biriktirilen ince filmler gaz akı oranları ve dolayısıyla karbon içeriklerine göre artan sırada, $M=0$ için N1, $M=0.2$ için N2, $M=0.5$ için N3 ve son olarak $M=0.7$ için N4 olarak isimlendirilmişlerdir.

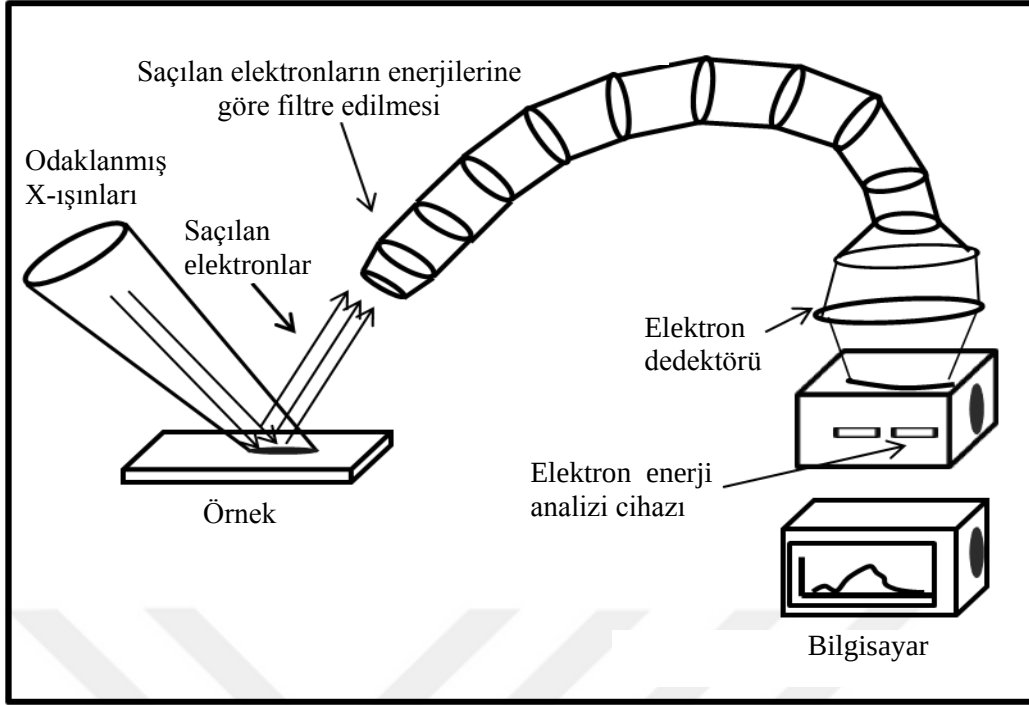
Çizelge 3.1. PDKBB sistemi ince film biriktirme parametreleri (Kılıç, 2006)

Biriktirme parametreleri	N1	N2	N3	N4
Basınç (Torr)	0.5	0.5	0.5	0.5
Alttaş sıcaklığı (°C)	250	250	250	250
Gaz akı oranı ($M = C_2H_4 / (SiH_4 + C_2H_4)$)	0	0.2	0.5	0.7
Plazma güç yoğunluğu (mW/cm ²)	90	90	90	90
SiH ₄ akı oranı (ccm)	20	16	10	6
C ₂ H ₄ akı oranı (ccm)	0	4	10	14
PH ₃ akı oranı (1000 ppm) (ccm)	200	200	200	200

3.3. X-Işını Foto-Elektron Spektroskopisi Sistemi ve Elemental Kompozisyonların İncelenmesi

N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin karbon içerikleri (x) ve elementlerin birbirleriyle yaptıkları bağların (Si-H, C-H, Si-C) kompozisyonları XPS sistemi ile incelenmiştir. XPS ölçümleri SPECS ESCA (Berlin/ALMANYA) sistemi ile yapılmıştır. XPS sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.2’de sunulmaktadır.

X-ışınları 90 derecelik açı ile 250 W güçte örnekler gönderilmiştir ve monokromatik olmayan Al K α ışınımı kullanılmıştır. Foto-elektronların kinetik enerjilerinin belirlenmesinde 18 farklı kanaldan ölçüm yapabilen ve 144 eV sabit giriş enerjisi modunda çalıştırılan EA 200 yarım küresel elektrostatik enerji analizörü kullanılmıştır.



Şekil 3.2. XPS sisteminin şematik gösterimi

X-ışınlarının enerjisini ($h\nu$) soğurarak çekirdeğe yakın enerji seviyelerinden iyonlaşan foto-elektronların kinetik enerjileri (KE),

$$KE = h\nu - BE - \phi \quad (3.1)$$

eşitliği ile ifade edilir. Bu eşitlikte ' $h\nu$ ' gelen fotonun enerjisi, ' BE ' elektronların bağlanma enerjisi, ' ϕ ' iş fonksiyonudur. Foto-elektronların oluşabilmesi için $h\nu > BE + \phi$ olmalıdır.

XPS ölçümlerinden önce örneklerin yüzeylerinde atmosferik etkiler ve laboratuvar koşulları sonucunda oluşabilecek kirlenmelerin giderilebilmesi için ince filmlerin yüzeyleri ultra yüksek vakumlu XPS reaktörü içerisinde 5 keV enerjili Ar iyonları kullanılarak iyon sıçratma sistemiyle 15 dakika boyunca aşındırılarak temizlenmiştir. Bu işlemde hemen sonra genel bir ön tarama yapılarak her bir pikin enerji aralığı belirlenmiş ve sonrasında bu enerji aralıklarında piklerin detaylı taramaları yapılarak XPS spektrumları kaydedilmiştir. Ölçüm sırasında filmlerde oluşabilecek elektrik yüklenmesi etkisiyle spektrumlarda oluşabilecek kaymanın düzeltilmesi için XPS spektrumları 284.5 eV'ta bulunan C 1s piki referans alınarak düzeltilmiştir.

N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin elemental kompozisyonları (x),

$$x = \left(\frac{I_i}{S_i} \right) / \sum_{i=1}^N \left(\frac{I_i}{S_i} \right) \quad (3.2)$$

eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır. Bu eşitlikte ‘i=1’ karbona, ‘i=2’ silisyuma, ‘i=3’ fosfora karşılık gelir ve, ‘I_i’ spektrumda elemente ait pikin alanı ve ‘S_i’ ise her bir elementin hassasiyet faktörüdür. Hassasiyet faktörü karbon için 0.25, silisyum için 0.27 ve fosfor için 0.39 olarak alınmıştır (Briggs, 1990).

Her bir örnek için spektrumdan elde edilen silisyum ve karbon pikleri Gauss fonksiyonları kullanılarak çözümlenmiş ve böylece elementlerin birbirleriyle yaptıkları bağların kompozisyonu incelenmiştir. Silisyum (Si 2p) ve karbon (C 1s) piklerine karşılık gelen bağ tipleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir. Si 2p için pik maksimumları Si-Si/Si-H bağları için 99.8 eV değerine (P₁) (Choi, 1998), Si-C bağları için 101.2 eV değerine (P₂) ve O-Si-C/Si-O bağları için ise 102.7 eV değerine (P₃) karşılık (Choi, 1998) gelen Gauss pikleri fit edilmiştir. Karbon (C 1s) için pik maksimumları C-Si bağı için 283.2 eV değerine (P₄) (Avila, 2001; Toneva, 1999; Halac, 1999; Sha, 2005), C-C/C-H bağı için (P₅) 284.5 eV değerine (Avilla, 2001) ve sırasıyla C-O-H ve C=O bağları için ise 286 eV (P₆) ve 288.4 eV değerlerine (P₇) Gauss pikleri fit edilmiştir.

Çizelge 3.2. Si 2p ve C 1s çekirdek seviyeleri için bağ tipleri ve bağlanma enerjileri

Pikler	Çekirdek seviyesi	Bağlanma enerjisi	Bağ tipleri
P1	Si 2p	99.8	Si-Si/Si-H
P2		101.2	Si-C
P3		102.7	O-Si-C/Si-O
P4	C 1s	283.2	C-Si
P5		284.5	C-C/C-H
P6		286	C-O-H
P7		288.4	C=O

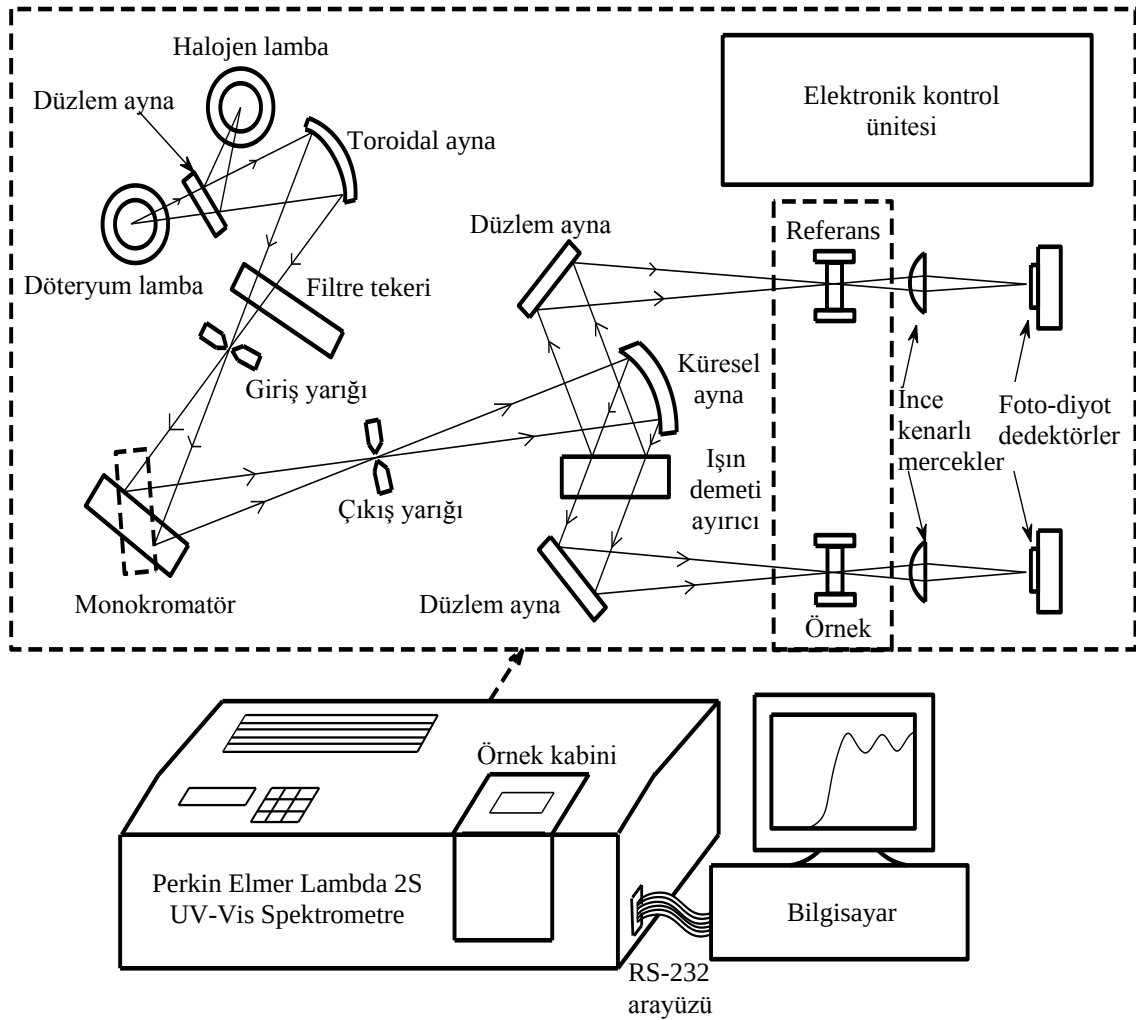
3.4. Morötesi-Görünür Bölge Geçirgenlik Spektroskopisi Sistemi ve Optik

Özelliklerin İncelenmesi

UV-Vis spektroskopi ölçümleri çift ışıklı Perkin Elmer Lambda 2 sistemiyle gerçekleştirilmiştir. Bu sistem ile ince filmlerin geçirgenlik spektrumları analiz edilmiş ve ince filmlerin kalınlıkları (d), soğurma katsayıları (α), E_{Tauc}, E₀₄ ve E_U enerjileri belirlenmiştir. UV-Vis spektrometrenin şeması Şekil 3.3’te sunulmuştur. Bu sistem 200-1100 nm dalgaboyu aralığında ölçüm yapabilmektedir. Sistemde morötesi ışık kaynağı

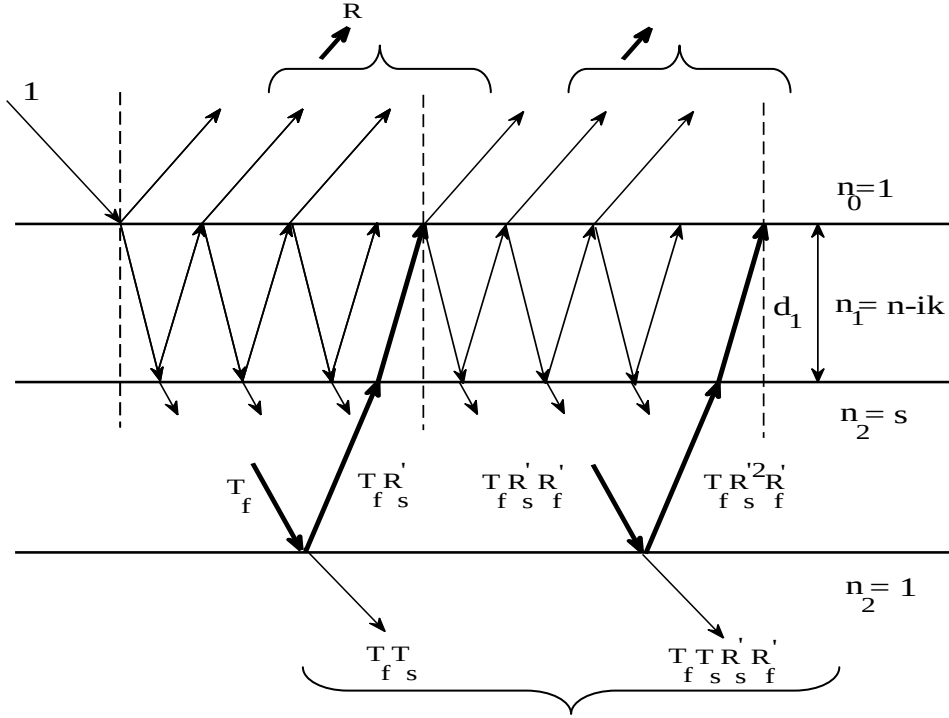
olarak döteryum lamba ve görünür bölge ışık kaynağı olarak halojen lamba kullanılmaktadır. Işıklar ilk olarak düzlem ve toroidal aynalardan filtre tekerine yönlendirilir ve uygun dalgaboyu aralığı filtre edildikten sonra monokromatöre ulaşır. Sonrasında ışın demeti ayırıcı ile iki eşit şiddette ışına ayrıldıktan sonra düzlem aynalardan ışın demetinin biri referans foto-diyot detektöre diğeri ise örnekten geçerek ölçüm foto-diyot detektörüne ulaşır. Ölçümler RS-232 arayüzlü bilgisayarla uyumlu olarak çalışan elektronik kontrol ünitesi tarafından otomatik olarak gerçekleştirilmektedir ve ölçüm verileri bilgisayar ortamına kaydedilmektedir.

Spektrumların analizinde Swanepoel metoduna ek olarak OptiChar yazılımı kullanılmıştır (Manifacier ve ark., 1976; Swanepoel, 1983, 1984; Optichar Software, 2002). Çoklu çözümler bu iki metodun karşılaştırılması ile test edilerek sonuçların doğruluğunun sağlanması yapılmıştır.



Şekil 3.3. UV-Vis spektrometre sisteminin şematik gösterimi (Güneş, 2012)

Şekil 3.4'te hava ortamında alttaş üzerine biriktirilmiş ince filmden geçen ve yansıyan ışınların şeması sunulmuştur. 'T_x' geçen, 'R_x' yansıyan ışınlar, 'n₀' havanın kırılma indisi, 'n₁' filmin kırılma indisi ve 'n₂' alttaşın kırılma indisidir. UV-Vis geçirgenlik (T) Eşitlik 3.3 ile ifade edilir (Haevens, 1991).



Şekil 3.4. Alttaş üzerine biriktirilmiş ince filmden geçen ve yansıyan ışınların şeması (Sel, 2007)

$$T = \frac{A \cdot x}{B - C \cdot x \cdot \cos \phi + D \cdot x^2}, \quad x = e^{(-\alpha \cdot d)}, \quad \alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (3.3)$$

A, B, C ve D katsayıları;

$$A = 16n^2s \quad (3.4)$$

$$B = (n + 1)^3 \cdot (n + s^2) \quad (3.5)$$

$$C = (n^2 - 1) \cdot (n^2 - s^2) \cdot 2 \quad (3.6)$$

$$D = (n - 1)^2 \cdot (n - 1) \cdot (n - s^2), \quad \phi = \frac{4\pi n \cdot d}{\lambda} \quad (3.7)$$

T eşitliğinde paydada bulunan kosinüslü terim optik yol (n.d) ile bağlantılı olarak geçirgenlik spektrumunda girişim saçaklarının oluşmasına sebep olur. Bu girişim saçakları;

$$2nd = m\lambda \quad (3.8)$$

eşitliği ile ifade edilir. Bu eşitlikte ‘m’ değeri tamsayı ise girişim saçaklarında maksimumu, yarım tamsayı ise minimumu ifade eder. Eşitlik (3.3) ifadesinde x=1 alınırsa;

$$T_M = \frac{2s}{s^2+1}, \quad (3.9)$$

$$T_m = \frac{4n^2s}{n^4+n^2(s^2+1)+s^2}, \quad (3.10)$$

$$n = [N + (N^2 + s^2)^{\frac{1}{2}}]^{\frac{1}{2}} \quad (3.11)$$

$$N = \frac{2s}{T_m} - \frac{s^2+1}{2} \quad (3.12)$$

eşitlikleri elde edilir. ‘T_M’ girişim saçaklarının maksimumlarındaki geçirgenlik ve ‘T_m’ minimumlarındaki geçirgenliktir. Eşitlik 3.9’dan alttaşın kırılma indisi (s) hesaplanır. Sonrasında Eşitlik 3.9 ve Eşitlik 3.10 kullanılarak elde edilen Eşitlik 3.11 ile filmin kırılma indisi (n) hesaplanır.

N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin geçirgenlik spektrumu soğurma, zayıf soğurma ve geçirgen olmak üzere genel olarak üç bölgeden oluşmaktadır. UV-Vis spektrumun geçirgen bölgesindeki girişim saçaklarının iki komşu maksimumunun karşılık geldiği dalgaboyları ve kırılma indisleri kullanılarak filmin kalınlığı (d) hesaplanır.

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1)} \quad (3.13)$$

UV-Vis spektrumunun soğurma bölgesi için ayrı olarak hesaplanan kırılma indislerini ve Eşitlik 3.13’ten hesaplanan filmin kalınlığını içeren Eşitlik 3.16 ile soğurma katsayıları (α) hesaplanır.

$$x = e^{-(\alpha.d)} = \frac{[F - [(F^2 - (n^2 - 1)^3 \cdot (n^2 - s^4))^{1/2}]}{(n-1)^3 \cdot (n-s^2)} \quad (3.14)$$

$$F = \frac{8n^2.s}{T_M} + (n^2 - 1) \cdot (n^2 - s^2) \quad (3.15)$$

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{1}{x} \right) \quad (3.16)$$

İnce filmlerin Tauc enerjileri izinli indirekt bant geçişleri için Eşitlik 3.17 ile ifade edilmiştir (Tauc, 1966).

$$\sqrt{hv\alpha} = B_{Tauc}(hv - E_{Tauc}) \quad (3.17)$$

eşitlikte 'B_{Tauc}' bileşik durum yoğunluğu dağılımına ve dipol matris elementine bağlı bir sabittir. E_{Tauc}, $\sqrt{hv\alpha}$ dik hv grafiği doğrusal bir fonksiyona uydurulduktan sonra bu doğrunun enerji eksenini kestiği noktadan bulunan $\sqrt{hv\alpha} = 0$ değerinin karşılık geldiği enerjiden belirlenir. Amorf silisyum yapısında, kristal yapıdaki periyodikliğin olmamasına bağlı olarak potansiyellerin periyodikliğinin de bozulması sonucu enerji bant yapısının indirekt bant yapısı yerine direkt bant yapısında olabileceği düşünülerek izinli direk bant geçişleri için de filmlerin Tauc enerjileri hesaplanmıştır. İzinli direk bant geçişleri için Tauc enerjisi Eşitlik 3.18 ile ifade edilmiştir (Tauc, 1966).

$$(hv\alpha)^2 = B_{Tauc}(hv - E_{Tauc}^*) \quad (3.18)$$

E₀₄ enerjisi soğurma katsayısının 10⁴ cm⁻¹ değerine karşılık gelen enerjiden hesaplanır.

Amorf ince filmlerin yasak enerji aralığında yapısal düzensizliklere ve kusurlara bağlı olarak bant uzantı durumları bulunmaktadır. Yapının düzensizliğinin artmasına bağlı olarak yasak enerji aralığından iletim ve valans bandına doğru bu enerji durumlarının yoğunlukları da artmaktadır. Urbach enerjisi (E_U) bant uzantı durumlarının yaygınlığı hakkında bilgi vermektedir ve soğurma katsayısına eksponansiyel olarak bağlıdır.

$$\alpha = \alpha_0 \exp [(hv - E_0)/E_U] \quad (3.19)$$

Buradaki ' α_0 ' ve E_0 materyale bağılı sabitlerdir. E_U , $\ln(\alpha)$ dik $h\nu$ grafigine uydurulan doğrunun eğimin tersinden hesaplanır.

3.5. Sıcaklık Bağımlı Akım-Voltaj Ölçüm Sistemi ve Elektriksel İletkenliklerin İncelenmesi

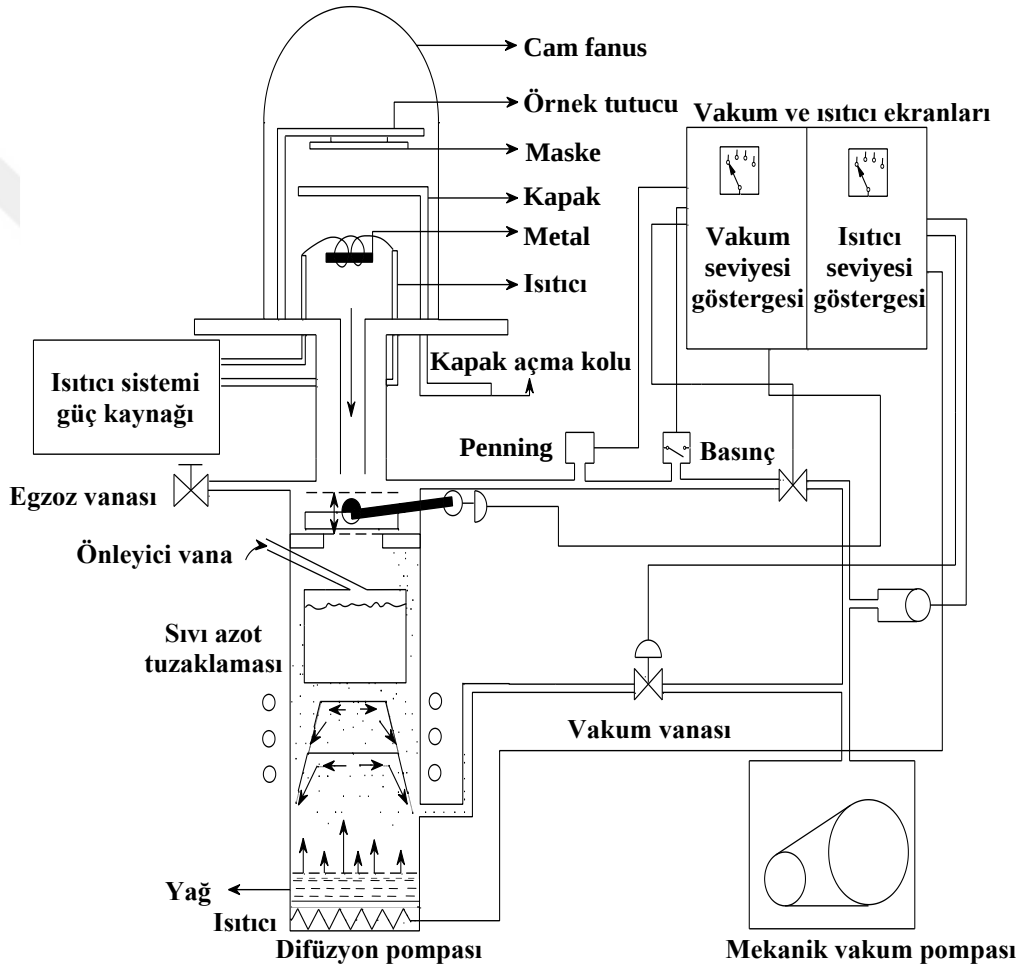
Sıcaklık bağımlı akım-voltaj ölçümleri için öncelikle biriktirilen filmlere uygun boyut ve geometrilerde elektrotlar metalleme sistemi kullanılarak kaplanmıştır. Sonrasında sıcaklık bağımlı akım-voltaj ölçümleri gerçekleştirilmiştir ve filmlerin öncelikle oda sıcaklığında olmak üzere 100-450 K sıcaklık aralığında çeşitli sıcaklıklardaki iletkenlikleri belirlenmiştir. Elektriksel aktivasyon enerjileri hesaplanmış ve elektriksel iletim mekanizmaları analiz edilmiştir.

3.5.1. İnce Filmlerin Metallenmesi

İnce filmlerin sıcaklık bağımlı akım-voltaj ölçümleri için metalleme sistemi kullanılarak filmlerin yüzeyine uygun boyut ve geometrilerde Al elektrotlar kaplanmıştır. Bu işlem için Şekil 3.5'te sunulan metalleme sistemi kullanılmıştır. Metalleme sistemi metal buharlaştırma reaktörü ve vakumlama sisteminden oluşmaktadır. Reaktör kısmı basınca dayanıklı cam fanus ile çevrelenmiştir. Örnekler, film biriktirilmiş yüzeyleri aşağıya doğru gelecek şekilde örnek tutucuya yerleştirilir. Elektrotların şekilleri boşluk olacak şekilde hazırlanmış maskeler örnek tutucunun altına filmlerin yüzeylerine denk gelecek şekilde yerleştirilir. Reaktörün en alt kısmında yeterli miktarda Al'un buharlaştırılmak üzere yerleştirildiği rezistanstan oluşan ısıtıcı/buharlaştırıcı bulunmaktadır. Buharlaştırıcı ile örnekler arasında istenilen buharlaştırma seviyesine erişilene kadar örnekleri koruyan ve istenildiği zaman açılarak örneklerin metalleme işleminin başlamasını sağlayan elle kontrol edilen kapak bulunmaktadır. Isıtıcı sistemi güç kaynağından ve elektronik güç kontrol ünitesinden oluşmaktadır. İstenilen sıcaklık rezistansa iletilen akımın artırılması ile ayarlanabilmektedir.

Elektriksel iletkenliği yüksek ve filmlerin yüzeyini homojen şekilde kaplayan elektrotların oluşturulabilmesi için reaktörün vakumlanması önem taşımaktadır. İstenilen vakum seviyesine erişebilmek için öncelikle mekanik pompa devreye alınarak vakum seviyesi düşürülür. Bu sırada difüzyon pompası önleyici vana ile reaktörden ayrı tutulur. Böylece difüzyon pompasından reaktöre yağ buharının geçmesi engellenir. Sonrasında mekanik pompa devre dışı bırakılarak difüzyon pompası devreye sokulur. Difüzyon pompasının alt kısmında yağ karteli ısıtılarak yağ buharlaştırılır ve yükselen yağ buharı su

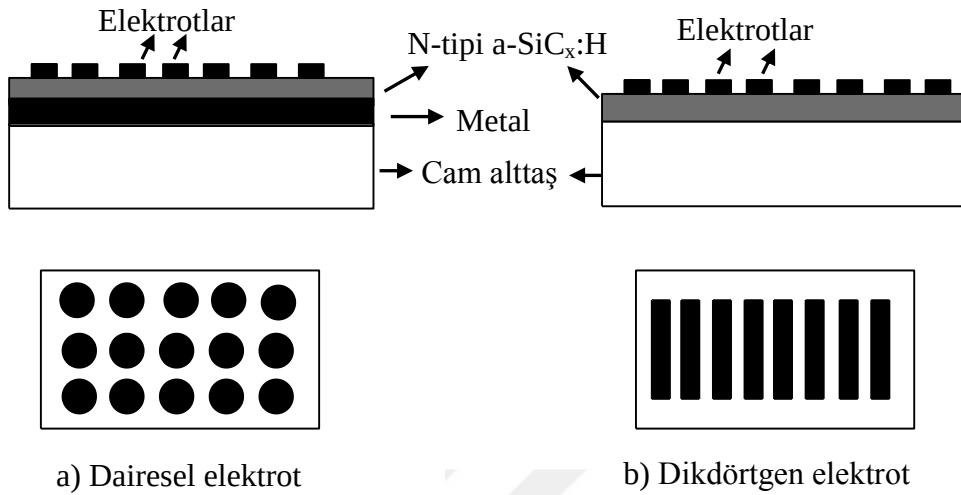
ile soğutulan yoğunlaştırıcılara eriştiğinde yoğunlaşan yağ tekrar aşağı doğru inerken reaktördeki havayı da aşağıya çekerek vakum etkisi oluşturur. Yoğunlaştırıcıların üst kısmında difüzyon pompası devredeyken reaktöre yağ buharının kaçmasını engelleyen sıvı azot tuzaklığı bulunmaktadır. Yeterli miktarda Al'un örneklerin yüzeyinde elektrotları oluşturması sonrasında ısıtma sistemi kapatılır ve vakum sistemi reaktörden vanalar kapatılarak ayrılır. Egzoz vanasının kontrollü bir şekilde açılmasıyla reaktörün içinin basıncı atmosferik basınca eşitlendikten sonra metalleme işlemi sonlandırılmış olur.



Şekil 3.5. Metalleme sisteminin şematik gösterimi (Sel, 2007)

Akım-voltaj ölçümleri için dairesel ve dikdörtgen olarak iki tür elektrot oluşturulmuştur (Şekil 3.6). Dairesel elektrotlar alttaşın yüzeyine bir katman metal kaplandıktan sonra ince filmlerin bu metal yüzey üzerine biriktirilmesi ve son olarak da filmlerin yüzeyine dairesel şekilde elektrotların kaplanması ile oluşturulmuştur. Dairesel elektrotlardan akım-voltaj ölçümü yapıldığında filmin alttaş ara yüzeyi ve üst yüzeyleri arasından akım geçmektedir. Dikdörtgen elektrotlar 2-3 mm aralıklarla filmin üst yüzeyine

kaplanmıştır. Dikdörtgen elektrotlardan akım-voltaj ölçümü yapıldığında yüzeydeki elektrotlardan biri bir kutup olarak seçilmekte ve sırasıyla diğer elektrotlar diğer kutup olarak ayarlanarak ölçüm yapılmaktadır. Sonrasında elektrotlar arasındaki mesafeler dikkate alınarak öziletkenlikler ayrı ayrı hesaplanmakta ve hesaplanan öziletkenliklerin birbirleri ile uyumlu olup olmadığı test edilmektedir. Böylece akımın kaçak yollardan iletilip iletilmediği ve filmin homojen olarak yüzeyde birikip birikmediği de analiz edilebilmektedir.



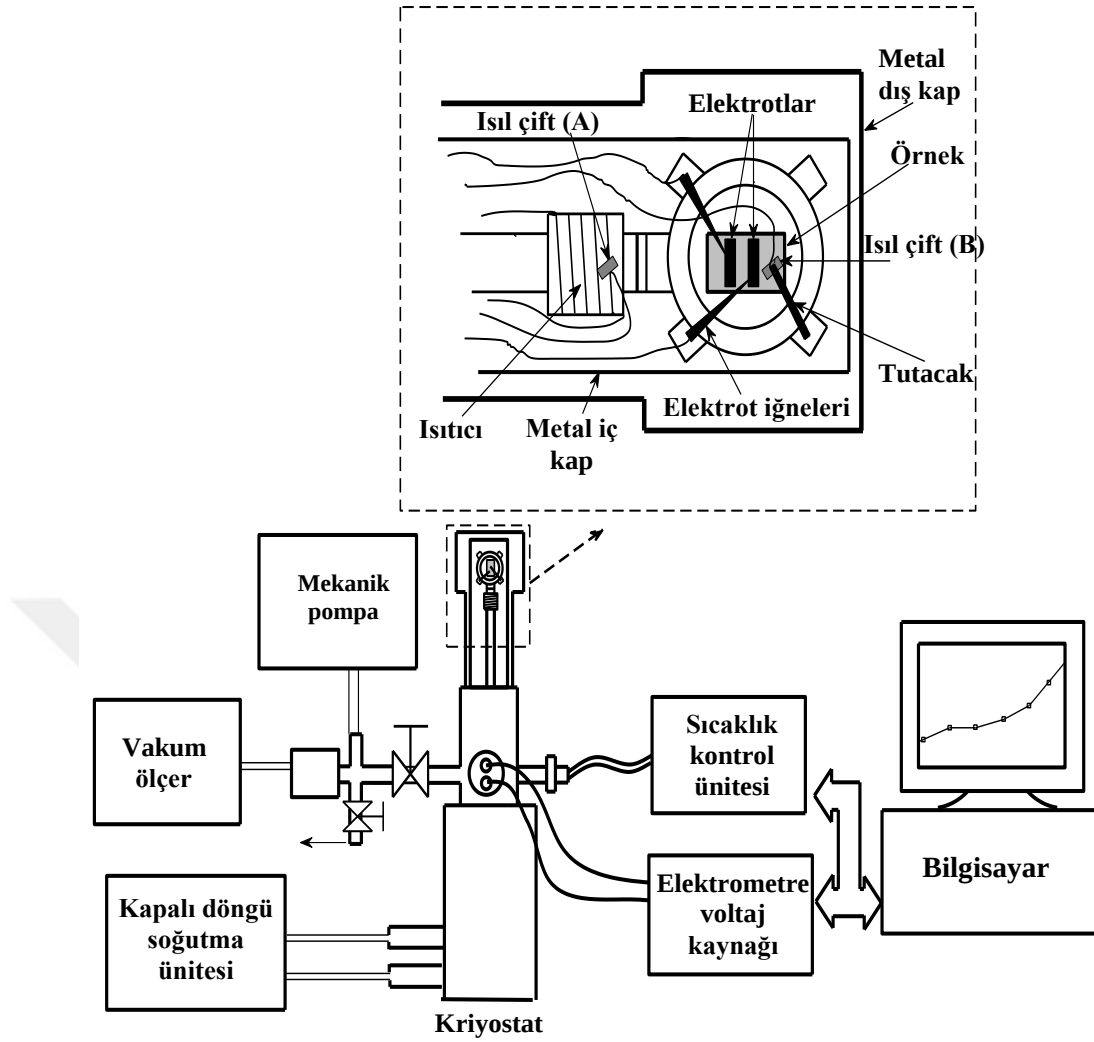
Şekil 3.6. Elektrotların şematik gösterimi

3.5.2. Sıcaklık Bağımlı Akım-Voltaj Ölçüm Sistemi

Sıcaklık bağımlı akım-voltaj ölçüm sistemi Şekil 3.7’de sunulmuştur. Akım-voltaj ölçümleri için Labview programı ile bilgisayar kontrollü olarak ölçüm yapan KEITHLEY 6517 elektrometre kullanılmıştır. Örneklerin sıcaklığı kapalı devre sıvı He ile çalışan S204 ARS model kriyostat ile 10 K’ne kadar düşürülebilmektedir. Kriyostatın örnek kompartmanı karacisim ısımasını minimuma indirebilmek ve ayrıca dış etkilerden izole edilmek üzere iç içe geçen iki silindirik metal radyasyon kalkanı ile kapatılmıştır. Örneklerin örnek tutucuya yerleştirilmesi sonrasında mekanik vakum pompasıyla ve vakum ölçerlerden vakum seviyesi kontrol edilerek örnek kompartmanı vakumlanır ve böylece ısı izolasyonu sağlanmış olur. Örnek tutucu kriyostat tarafından soğutulan metal bir çubuğun uç kısmındadır. Ayrıca kompartmanın içerisinde bulunan havadaki su buharı da sıcaklık 0°C’nin altına düşürülmeden vakumlandığı için daha düşük sıcaklıklarda örneklerin yüzeyinde buzlanma ve buna bağlı olarak elektrotlar arasında kısa devrelerin

oluşması engellenmiş olur. Vakumlamanın tamamlanmasından sonra kriyostat ile soğutmaya başlatılır. Sıcaklık LakeShore 331 model sıcaklık kontrol ünitesi ile 10-450 K aralığında ayarlanabilmekte ve istenilen sıcaklıkta sabit tutulabilmektedir. Sıcaklık kontrol ünitesinin ısıtma rezistansları örnek tutucunun yanında bulunmaktadır. Bu rezistans hedef sıcaklığına erişmek üzere otomatik olarak akım kontrolü yapılarak ısıtılır ve böylece kriyostat tarafından soğutulan örneklerin sıcaklığı hedef sıcaklığa en kısa sürede ayarlanır ve bu sıcaklıkta sabit tutulur. Sıcaklığın ölçülmesinde iki adet ısı çifti kullanılmaktadır. Bu ısı çiftlerinden biri (Isıl çift A) örnek tutucunun yüzeyine, diğeri (Isıl çift B) ise örneğin yüzeyine yerleştirilir ve hedef sıcaklığın otomatik olarak ayarlanması işleminde sıcaklık kontrol ünitesine sürekli olarak ölçümleri yaparak resistansın akımının dinamik olarak ayarlanmasını sağlar.

Örneğin bir kısmı ısıtma ya da soğutma kaynağına daha yakın olduğu için sıcaklığının değişimi sırasında örnek üzerinde sıcaklık gradyeni oluşur. Dolayısıyla, yüzeydeki elektrotlar arasındaki bölgede sıcaklık gradyenine bağlı olarak çok düşük mertebelerde de olsa elektrik akımı oluşmaktadır. Örneğin sıcaklığının hedef sıcaklığa ulaşması sonrasında her bir sıcaklıktaki ölçüm öncesinde elektrometreden voltaj uygulanmadan örnekten geçen akım takip edilerek, örneğin tümünün istenilen sıcaklığa erişmesi sonrasında sıcaklığın dengeye gelmesi ve bu akımın minimuma düşmesi için uygun süre beklenmiştir.



Şekil 3.7. Sıcaklık bağımlı akım-voltaj ölçüm sistemi (Sel, 2007)

Akım-voltaj ölçümleri örnekler karanlıkta tutularak, bilgisayar kontrolünde 0.01 V'tan başlamak üzere her bir 10'luk basamak için 10'ar ölçüm alınarak 200 V'a kadar toplam 50 basamakta ölçülmüştür. Her bir basamakta önce akım değerinin minimuma düşmesi beklenmiş ve sonrasında uygulanan voltaj sabit tutularak 10 akım ölçümü yapılmış ve ortalaması alınarak kaydedildikten sonra bir üst voltaj için aynı işlemler tekrarlanmak üzere ölçümler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca her bir sıcaklıktaki akım-voltaj ölçümleri en az üç defa tekrarlanarak ayrı ayrı kaydedilmiştir ve böylece ölçümlerin birbirleri ile uyumlu olup olmadıkları kontrol edilerek sağlamaları yapılmıştır.

3.5.3. İletim Mekanizmaları

Amorf malzemelerin enerji bant yapılarında, kristal malzemelerden farklı olarak iletim ve valans bant kenarından yasak enerji aralığına doğru lokalize bant uzantı durumları bulunmaktadır. Amorf yarı iletken malzemelerde elektriksel iletim mekanizmalarına yaygın durumların yanı sıra lokalize bant uzantı durumları da katkı yapabilmektedir. Dolayısıyla amorf yarı iletken malzemelerde standart iletim mekanizması ve sıçrama iletim mekanizması (Hopping conduction mechanism) gibi iletim mekanizmaları da oluşabilmektedir.

3.5.3.1. Standart İletim Mekanizması

Standart iletim mekanizmasında lokalize durumlardaki yük taşıyıcıların ilettime katkı yapmadığı varsayılır ve iletim, iletim bandında elektronlar ve valans bandındadeşikler tarafından gerçekleştirilir. Dolayısıyla yaygın durumlardaki iletim öncelikle yük taşıyıcıların yoğunluğuna bağlıdır. İletim bandının mobilite kenarının üstünde bulunan enerjilerdeki mobil elektronların yoğunluğu,

$$n_i = \int_{E_i}^{\infty} g(E) f(E, E_F, T) dE \quad (3.20)$$

$$f(E, E_F, T) = \left[1 + \exp \left(\frac{E - E_F}{kT} \right) \right]^{-1} \quad (3.21)$$

eşitlikleri ile ifade edilir. Bu eşitlikte $g(E)$ durum yoğunluğu, ' f ' Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu, ' E_F ' fermi enerjisi, ' k ' Boltzmann sabiti ve ' T ' sıcaklıktır. Valans bandındaki mobildeşiklerin yoğunluğu;

$$n_v = \int_{-\infty}^{E_v} g(E) [1 - f(E, E_F, T)] dE \quad (3.22)$$

eşitliği ile ifade edilir. Genellikle Fermi enerjisi mobilite kenarından kT 'ın birkaç katı kadar fazla olması sebebi ile Fermi dağılım fonksiyonu yerine Boltzmann dağılım fonksiyonu da kullanılabilir.

$$f_e(E, E_F, T) = \left[\exp \left(-\frac{E_i - E_F}{kT} \right) \right] , \text{elektronlar için} \quad (3.23)$$

$$f_d(E, E_f, T) = \left[\exp \left(-\frac{E_f - E_v}{kT} \right) \right], \text{ deşikler için} \quad (3.24)$$

Yaygın durumlardaki yük taşıyıcılara elektrik alan (F) uygulandığında yük taşıyıcıların birim elektrik alan altındaki hızlarına mobilite (μ) denir.

$$\mu = |v|/|F| \quad (3.25)$$

Sonuç olarak elektronlar ve deşikler için yaygın durumlardaki iletkenlik sırasıyla,

$$\sigma_e(T) = \sigma_{0e} \exp \left(-\frac{E_i - E_f}{kT} \right), \quad (3.26)$$

$$\sigma_{0e} = \mu_e e N_C, \quad (3.27)$$

$$\sigma_d(T) = \sigma_{0d} \exp \left(-\frac{E_f - E_v}{kT} \right), \quad (3.28)$$

$$\sigma_{0d} = \mu_d e N_V, \quad (3.29)$$

eşitlikleri ile ifade edilir. Exponansiyellerdeki enerji farkları ($E_i - E_f$) elektriksel aktivasyon enerjisidir (E_a) (Street, 1991; Overhof ve ark., 1989).

3.5.3.2. Sıçrama İletim Mekanizması

Sıçrama iletim mekanizması (Hopping conduction mechanism) amorf malzemelerde yapısal düzensizliğin fazla olduğu durumlarda lokalize durumlardaki taşıyıcıların ilettime katkısıyla oluşmaktadır. $T=0$ K'de lokalize durumların iletkenliğe bir katkısı olmamakla beraber sıcaklığın yüksek değerlerinde taşıyıcıların bulunduğu enerji seviyesindeki durumdan diğer bir enerji seviyesindeki duruma geçebilmelerine yetecek enerjiye sahip olan bir fonon bulabilme olasılıklarına, bu durumlar arasındaki göreceli enerji farkına ve durumların birbirlerinden uzaklıklarına bağlı olarak ilettime katkı yapabilmektedirler.

Sıcaklığın yaklaşık olarak 200 K'den daha düşük olduğu durumlarda fononların enerjisi göreceli olarak daha azdır. Bu durumda taşıyıcılar göreceli olarak daha yüksek enerjili durumlara kıyasla daha uzakta bulunabilen ve enerjisi kendi durumunun enerjisine yakın olan durumlara sıçrama yapabilirler. Bu mekanizma değişken menzilli sıçrama

mekanizması (Variable range hopping) (DMS mekanizması) olarak adlandırılır (Mott, 1979) (Eşitlik 3.30).

$$\sigma = e^2 \cdot R_m^2 \cdot N(E) \cdot \frac{\omega_p}{6} \cdot e^{-\left(\frac{A}{T^{1/4}}\right)} = \sigma_0(T) \cdot e^{-\left(\frac{A}{T^{1/4}}\right)} \quad (3.30)$$

$$A = 2 \left[\frac{\alpha^3}{k \cdot N(E_F)} \right]^{1/4} \quad (3.31)$$

$$\alpha = \left[\frac{\hbar^2}{2m(E-E_i)} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (3.32)$$

$$P = \omega_p e^{-\left(\frac{A}{T^{1/4}}\right)} \quad (3.33)$$

burada ‘ R_m ’ sıçrama yapılan durumlar arasındaki mesafe, ‘ $N(E)$ ’ durum yoğunluğu, ‘ ω_p ’ durumdan duruma kaçış eşik frekansı, ‘ P ’ dolu bir durumdan boş bir duruma geçme olasılığıdır.

Sıcaklığın yaklaşık olarak 200 K’den yüksek olduğu durumlarda taşıyıcılar fononların enerjisinin göreceli olarak artmasıyla ve desteğiyle beraber göreceli olarak daha yüksek enerjili ve daha yakındaki durumlara geçiş yapabilirler. Bu sıçrama mekanizması ise en yakın komşuya sıçrama (Nearest neighbor hopping) (EYKS) mekanizması olarak adlandırılır (Mott, 1979).

EYKS mekanizmasında bant uzantı durumlarında lokalize olarak bulunan bir taşıyıcının göreceli olarak yakınındaki boş bir duruma sıçramasının incelenebilmesi için öncelikle lokalize bant uzantı durumları göreceli olarak büyük enerjili potansiyel kuyularından oluşan derin durumlar ve göreceli olarak derin durumlarla mobilite kenarının arasındaki enerjilerde bulunan durumlardan oluşan orta düzey durumlar olmak üzere iki bölgede incelenir ve durum yoğunluğu dağılımı modellenir (John, 1986; Economou, 1987; Bacalis, 1988; O’Leary, 1995; O’Leary, 1997; Tanaka, 1999; Sel, 2007, 2011).

EYKS mekanizmasında sıçrama mesafesi (R) en yakın komşu durumlarının birbirine uzaklığı kadardır ve boş durum yoğunluğu dağılımının tersinin küp köküne eşit olarak alınmıştır. Differansiyel akım yoğunluğu (dj),

$$dj = q \cdot R \cdot N(E) \cdot f(E) \cdot \delta P \cdot dE \quad (3.34)$$

olarak ifade edilir. ‘ δP ’ durumlar arası differansiyel geçiş olasılığıdır. Differansiyel akım (dI),

$$dI = dj \cdot ds = \frac{d\sigma}{dt} \quad (3.35)$$

eşitliği ile ifade edilir. ‘ ds ’ diferansiyel kesit alan ve ‘ $d\sigma$ ’ diferansiyel iletkenliktir. Bu eşitlikler birleştirilerek diferansiyel iletkenlik,

$$d\sigma = q^2 R(E)^2 N(E) \cdot F(E) \cdot P \cdot \ln\left(\frac{\omega_p}{P}\right) \left(B + \frac{1}{2E}\right) dE \quad (3.36)$$

eşitliği ile ifade edilmiştir. Bu eşitlikte ‘ B ’ bir sabittir (Sel, 2007; Sel, 2011).

3.6. Öziletkenlik ve Aktivasyon Enerjilerinin İncelenmesi

Akım-voltaj ölçümleri 100-450 K aralığında çeşitli sıcaklıklarda ölçülmüş ve her bir ölçümün akım-voltaj grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerin omik bölgeleri belirlenmiş ve Eşitlik 3.37 bu bölgedeki verilere fit edilerek ince filmlerin dirençleri (R) hesaplanmıştır.

$$R = \frac{V}{I}, \quad (3.37)$$

Öziletkenlikler (σ) Eşitlik 3.38 kullanılarak belirlenmiştir.

$$\sigma = \frac{l}{R \cdot A} \quad (3.38)$$

Burada ‘ l ’ elektrotlar arasındaki uzaklık, ‘ A ’ akımın geçtiği kesit alanıdır. Kesit alan, UV-Vis spektroskopi analizlerinden belirlenen film kalınlıkları kullanılarak hesaplanmıştır.

Aktivasyon enerjileri (E_A), öziletkenliklerin Arrhenius grafiklerinin eğiminden Eşitlik (3.26) kullanılarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak Arrhenius grafiklerine Eşitlik (3.26) ve Eşitlik (3.36) eşitlikleri fit edilerek standart iletim ve EYKS mekanizmaları gözönünde bulundurularak biriktirilen n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin akım mekanizmaları analiz edilmiştir.

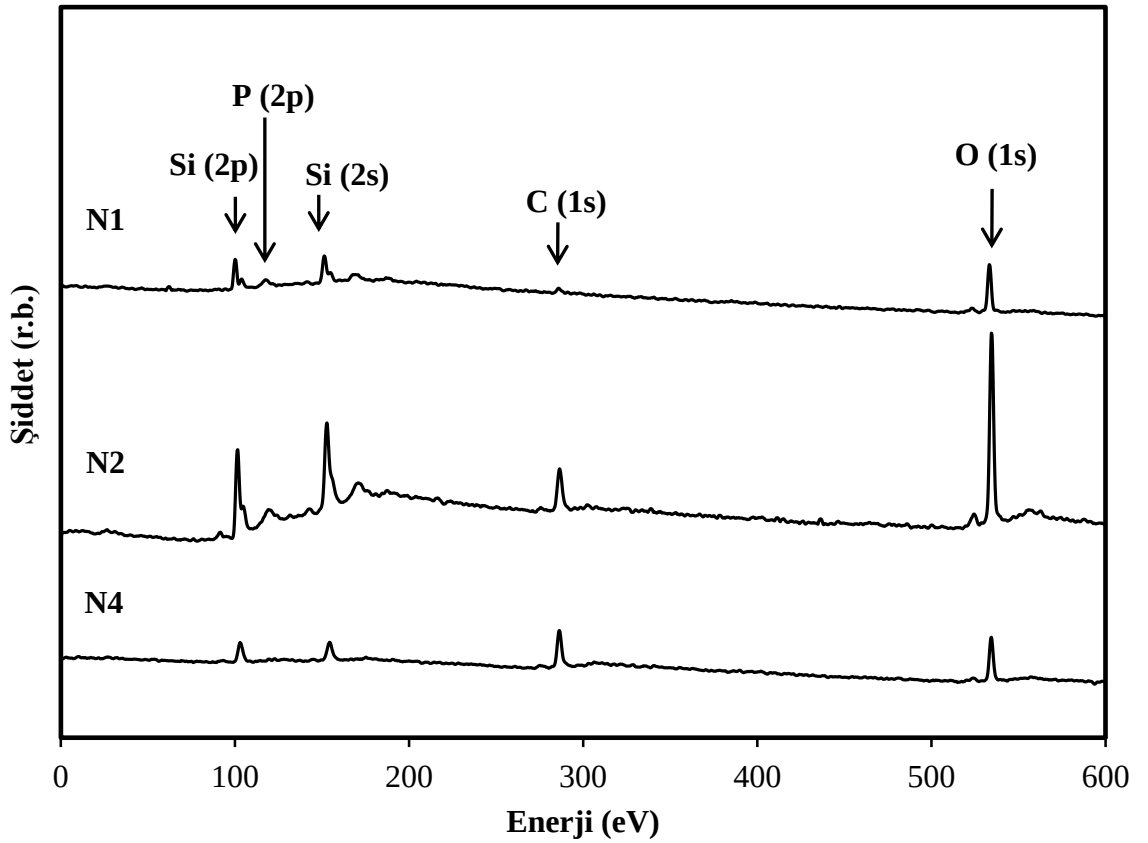
BÖLÜM 4

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. X-Işını Foto-Elektron Spektroskopisi Ölçüm ve Analizleri

Fosfor katkılanmış n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin genel tarama sonucunda elde edilen XPS spektrumları Şekil 4.1’de sunulmuştur.

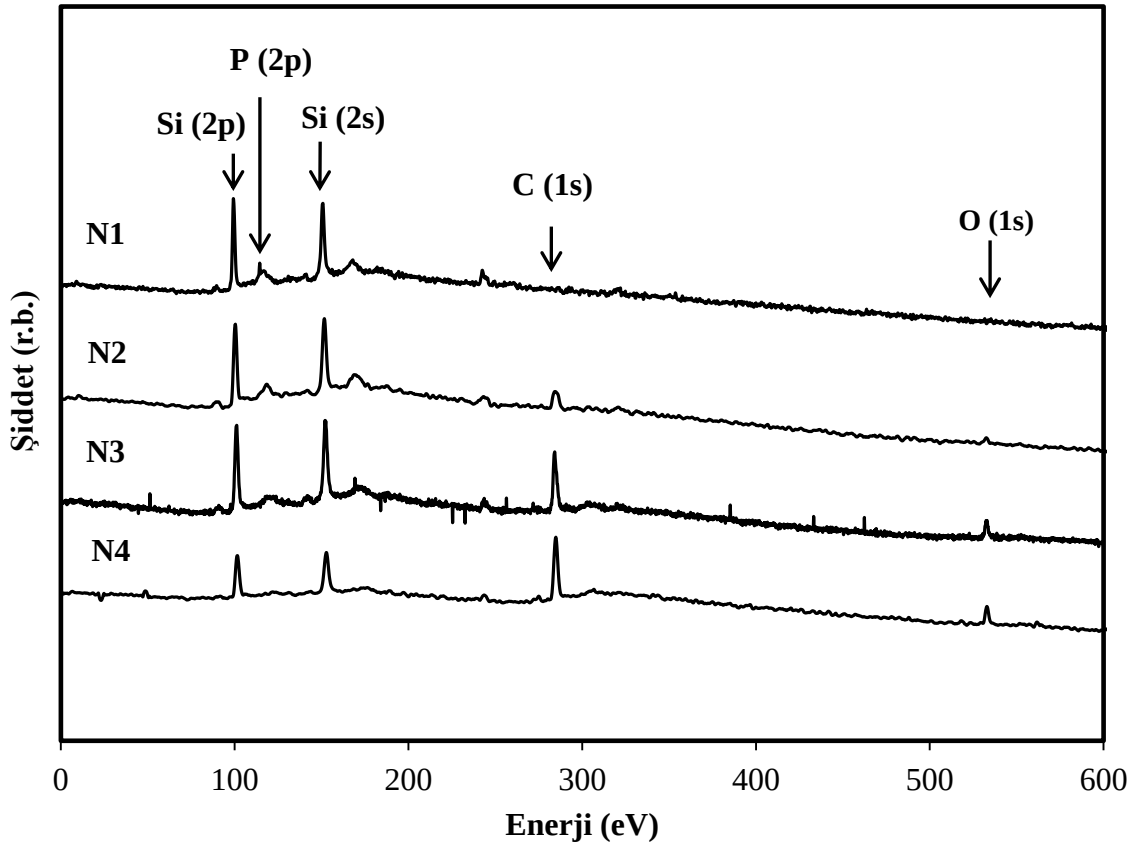
N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin XPS spektrumlarında beş farklı pik gözlemlenmiştir. Bu pikler sırasıyla 99 eV civarında Si 2p, 128.4 eV civarında P 2p, 151 eV civarında Si 2s, 284.5 eV civarında C 1s ve 531 eV civarında O 1s enerji seviyelerindedir (Handbook of XPS, 1979).



Şekil 4.1. N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin genel tarama XPS spektrumları

İnce filmler vakum ortamında ve oksijen kaynak gazı ya da oksijen içeren bir gaz kullanılmadan biriktirilmiş olduğu için filmlerin içeriğinde oksijenin bulunmaması gereklidir. XPS spektrumunda gözlemlenen oksijen piki filmlerin biriktirilmesinden sonra XPS spektrumları ölçülene kadar geçen zaman içerisinde filmlerin yüzeyinde oluşan

atmosferik etkilerden kaynaklanmıştır. Yüzeydeki bu etkinin giderilmesi için XPS sisteminde ölçülen genel taramadan sonra ince filmlerin yüzeyi, XPS sisteminde entegre olarak bulunan aşındırma sisteminde Ar iyonları ile aşındırılmıştır. Aşındırma sonrasında ölçülen XPS genel tarama sonuçları Şekil 4.2’de sunulmuştur. Oksijen pikinin aşındırma işlemi sonrasında spektrumlarda göreceli olarak minimuma indiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2. N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin Ar iyonu ile aşındırılma sonrasındaki genel tarama XPS spektrumları

N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin elemental kompozisyonları Si 2p, C 1s pikleri kullanılarak Eşitlik 3.2’den hesaplanmıştır ve karbon içerikleri (x) Çizelge 4.1’de sunulmuştur (Handbook of XPS, 1979). N1 ince filminin karbon içeriği x=0 iken, N2, N3 ve N4 ince filmlerinde gaz akı oranının (M) artmasına orantılı olarak karbon içeriği artmıştır. Sel ve arkadaşlarının rapor ettiği (Sel, 2007; Akaoglu, 2008; Sel, 2011) has a-SiC_x:H ince filmlerin karbon içerikleri de Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Bu sonuçlara göre has ve n-tipi katkılanmış ince filmlerin karbon içerikleri göreceli olarak birbirine çok yakındır. Dolayısıyla bu çalışmada incelenen n-tipi katkılanmış a-SiC_x:H ince filmlerin

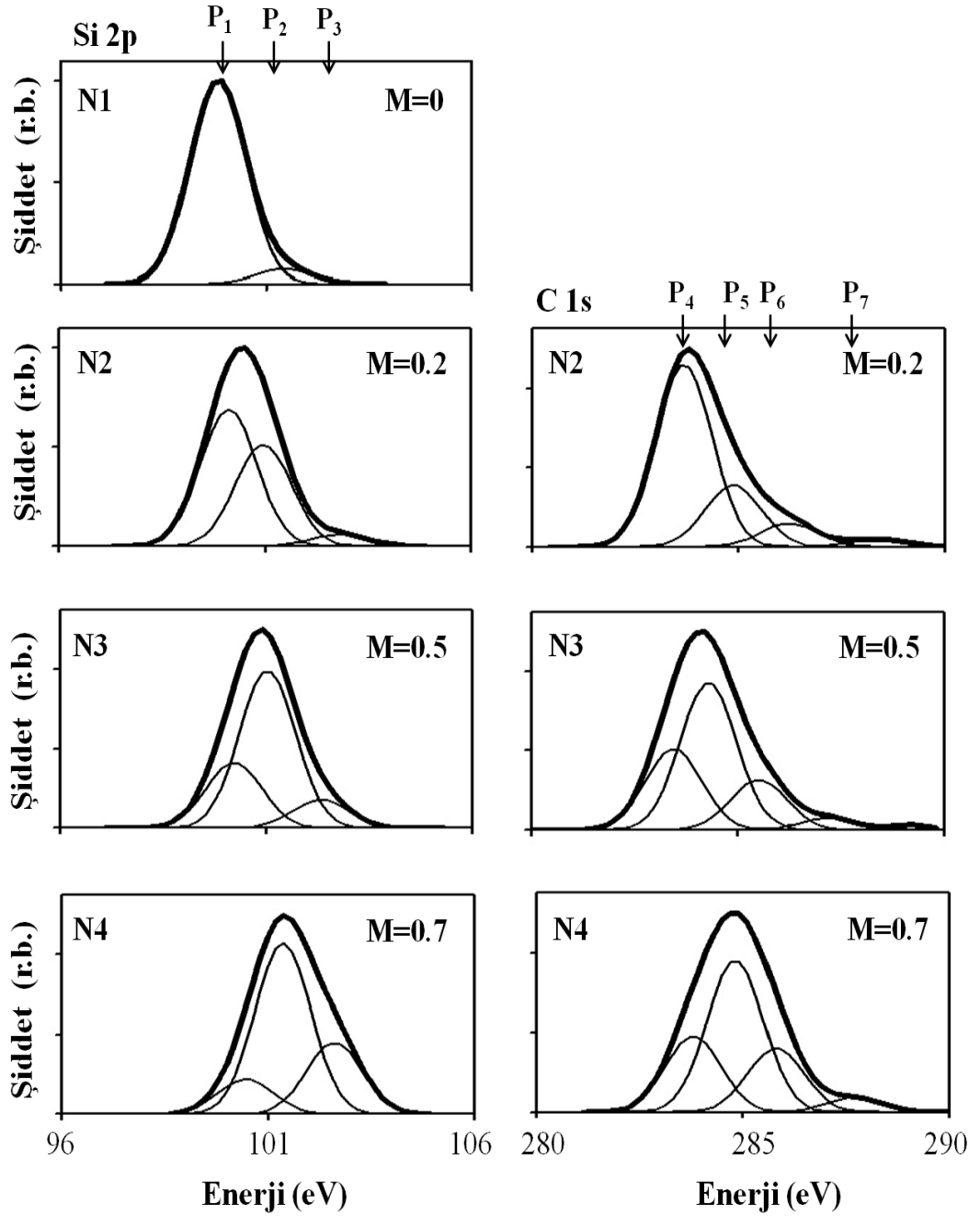
özelliklerinin incelenmesine ek olarak, bu ince filmlerin optik ve elektriksel özellikleri ile Sel ve arkadaşlarının rapor ettikleri has a-SiC_x:H ince filmlerin özellikleri de karşılaştırılarak fosfor katkılamanın a-SiC_x:H ince filmlerin özelliklerine etkileri çok daha detaylı incelenebilecektir.

Çizelge 4.1. N-tipi ve has a-SiC_x:H ince filmlerin karbon içerikleri (*Sel, 2007; Akaoglu, 2008; Sel, 2011)

N-tipi a-SiC_x:H ince film	M (C₂H₄)/(C₂H₄+SiH₄)	N- tipi a-SiC_x:H karbon içeriği (x)	Has a-SiC_x:H karbon içeriği (x)*
N1	0	0	0
N2	0.2	0.19	0.21
N3	0.5	0.46	0.42
N4	0.7	0.62	0.59

XPS spektrumlarında 128.4 eV civarında fosfora ait olan P 2p piki gözlemlenmiştir. Diğer piklere kıyasla göreceli olarak çok küçük şiddete sahip olan bu pik fosfor atomlarının a-SiC_x:H ince filmlerin yapısında bulunduğunu ve katkılama işleminin başarılı olarak gerçekleştiğini ifade etmektedir (Kovalev ve ark., 2004; Beshkov ve ark., 2008; Perego ve ark., 2010; Song ve ark., 2010; Sugimoto ve ark., 2013; Wu ve ark., 2013; Gutsch, 2014; Han ve ark., 2015; Peng Lu ve ark., 2016). Fosfor atomları için P 2p piki kullanılarak ince filmlerdeki fosfor içeriğinin yaklaşık %2-2.5 olduğu hesaplanmıştır.

Genel tarama spektrumlarından sonra her bir pik detaylı XPS taramasından geçirilmiştir. Elde edilen Si 2p ve C 1s pikleri genel olarak Si-Si/Si-H, Si-C, O-Si-C/Si-O, C-C/C-H, C-O-H ve C=O bağlarının piklerinin birleşiminden oluşmaktadır. Si 2p ve C 1s piklerine karşılık gelen bağ tipleri ve enerji seviyeleri bir önceki bölümde Çizelge 3.2’de sunulmuştu. İnce filmlerdeki bu bağ tiplerinin kompozisyonlarının belirlenmesi için detaylı tarama sonucunda elde edilen pikler tam genişlik yarı maksimumları 1.60 eV’a ayarlanarak Gauss fonksiyonları ile çözümlenmiştir. Spektrumda çözümlenen pikler ve normlanmış grafikleri Şekil 4.3’te sunulmuştur.



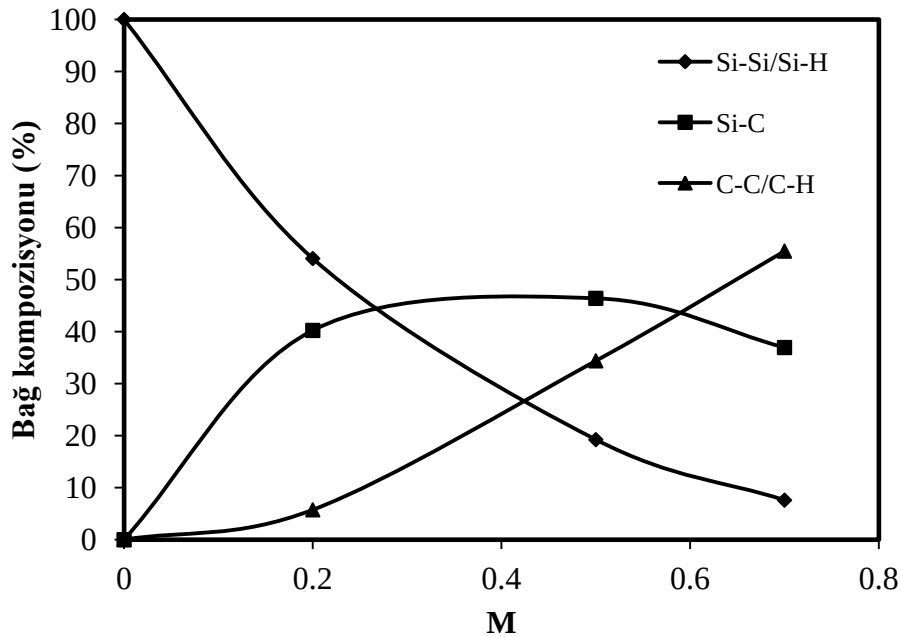
Şekil 4.3. N-tipi $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ince filmlerin Si 2p ve C 1s piklerinin normlanmış çözümlmeleri

N1 ince filmi karbon içermediği için n-tipi katkılanmış $a\text{-Si:H}$ özelliği gösterdiğinden bağ kompozisyonu analizinde sadece Si-Si/Si-H bağları bulunmaktadır. Bunun yanında diğer ince filmlerde, karbon içeriğinin artmasıyla Si-Si ve Si-H bağlarının kompozisyonunun azaldığı ve göreceli olarak Si-C, C-H ve C-C bağlarının

kompozisyonlarının arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.4'te de görüldüğü gibi Si-Si/Si-H bağlarının kompozisyonu yapıda artan karbon içeriğine bağlı olarak azalmıştır. Bunun yanında Si-C bağlarının kompozisyonu yaklaşık olarak $M=0.4$ değerine kadar artış göstermiş ve Si-Si bağlarının yerini Si-C bağları almıştır. $M=0.4$ 'ten büyük gaz akı oranlarında ise karbon atomları silisyumun yanısıra kendi aralarında da bağ yapmaya başlamışlar ve Si-C bağları göreceli olarak artış trendine son vererek hafif bir azalma gösterirken C-C ve aynı zamanda C-H bağlarının kompozisyonu göreceli olarak artmıştır. Yaklaşık olarak $M=0.6$ 'dan büyük değerlerde C-C/C-H bağlarının kompozisyonu baskın olmaya başlamıştır. Karbon içeriğine bağlı bağ kompozisyon yüzdeleri Çizelge 4.2'de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. N-tipi $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ince filmlerin bağ kompozisyon yüzdeleri

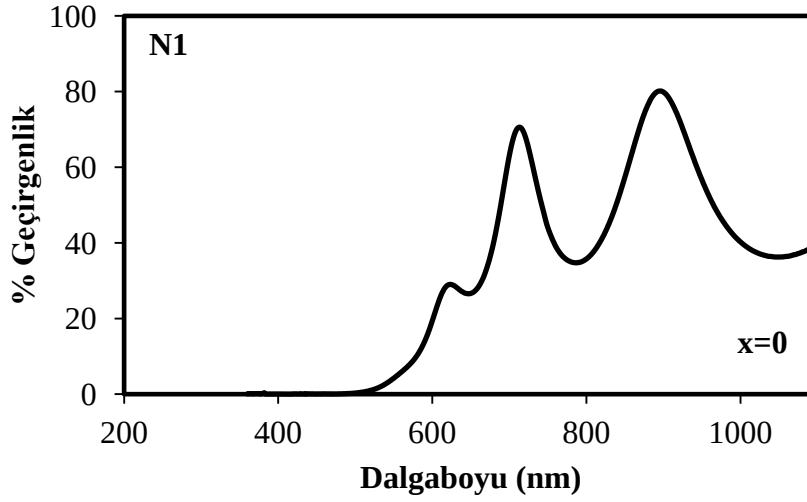
N-tipi $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ince film	M (C_2H_4)/($\text{C}_2\text{H}_4+\text{SiH}_4$)	Karbon içeriği (x)	Si-Si/Si-H %	Si-C %	C-C/C-H %
N1	0	0	100	0	0
N2	0.2	0.19	54.1	40.2	5.7
N3	0.5	0.46	19.2	46.4	34.4
N4	0.7	0.62	7.6	36.9	55.5



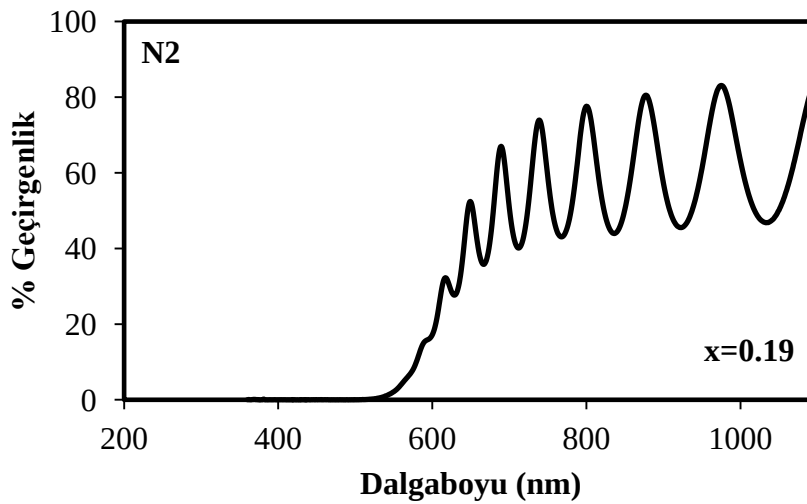
Şekil 4.4. N-tipi $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ince filmlerin bağ kompozisyonlarının gaz akı oranının fonksiyonu olarak grafiği

4.2. Morötesi-Görünür Bölge Geçirgenlik Spektroskopisi Ölçüm ve Analizleri

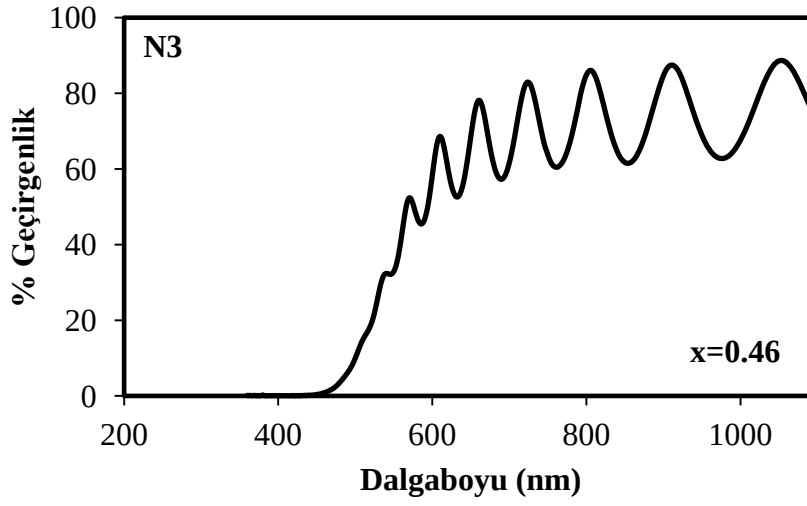
Fosfor katkılı n-tipi $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ince filmlerin UV-Vis spektrumları Şekil 4.5, 4.6, 4.7 ve 4.8’de sunulmuştur. Spektrumlarda farklı sayılarda girişim saçaklarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Girişim saçaklarının sayısının artması filmlerin kalınlıklarının da arttığının bir göstergesidir. Soğurma bölgesinin karbon içeriğine bağlı olarak daha küçük dalga boylarına, morötesi bölgeye doğru kaydığı gözlemlenmiştir. Geçirgen bölgede ise ince filmlerin yaklaşık olarak %80 geçirgenliğe sahip oldukları belirlenmiştir.



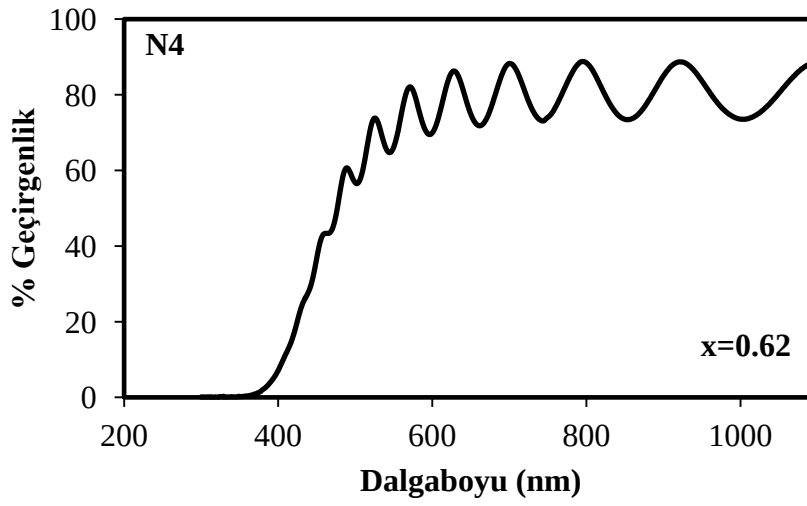
Şekil 4.5. N-tipi $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ince film N1 örneğinin UV-Vis spektrumu



Şekil 4.6. N-tipi $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ince film N2 örneğinin UV-Vis spektrumu



Şekil 4.7. N-tipi $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ince film N3 örneğinin UV-Vis spektrumu



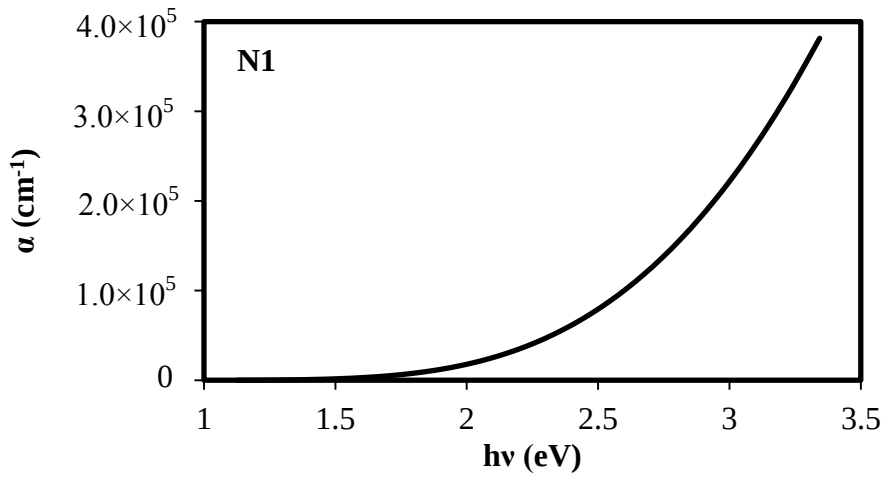
Şekil 4.8. N-tipi $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ince film N4 örneğinin UV-Vis spektrumu

İnce filmlerin kalınlıkları Eşitlik 3.13 kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 4.3'te sunulmuştur (Kılıç, 2006).

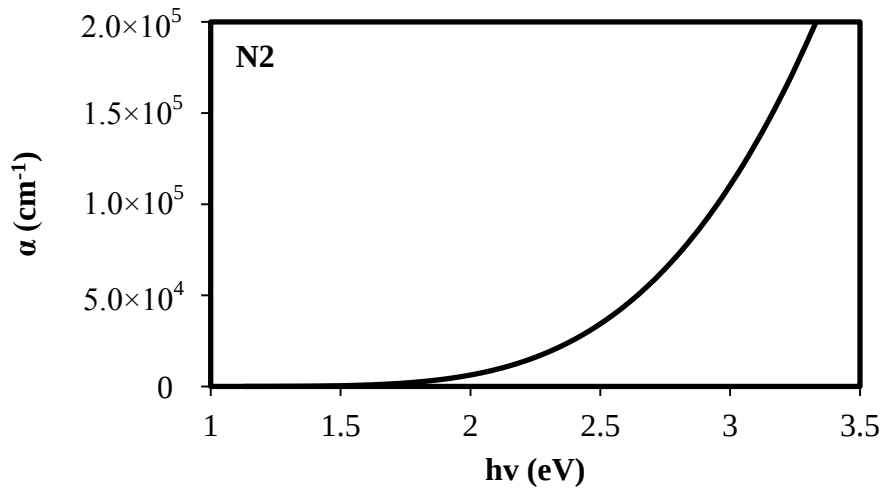
Çizelge 4.3. N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin kalınlıkları (Kılıç, 2006)

N-tipi a-SiC _x :H ince film	Karbon içeriği (x)	Kalınlık d(nm)
N1	0	272
N2	0.19	987
N3	0.46	931
N4	0.62	1297

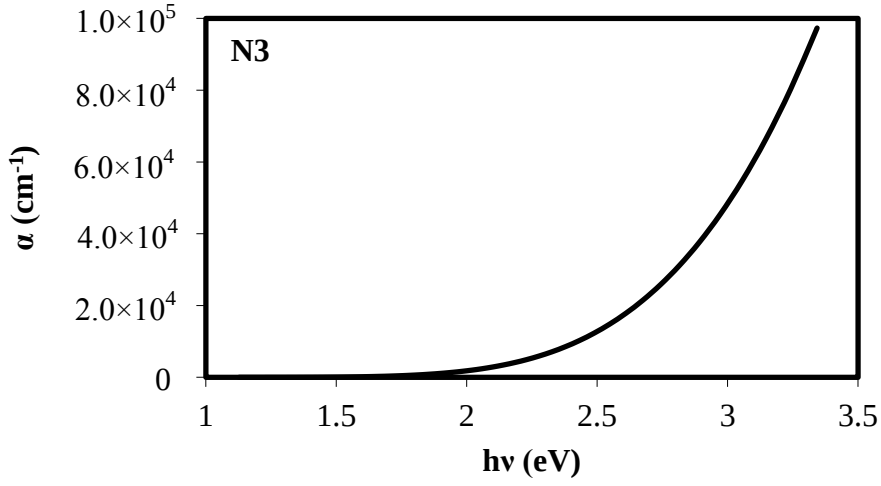
Swanepoel metodu ve ayrıca Optichar yazılımı kullanılarak soğurma katsayıları hesaplanmıştır. E₀₄ enerjisi, soğurma katsayısının 10⁴ cm⁻¹ değerine karşılık gelen enerjiden hesaplanmıştır. E₀₄ enerjisinin grafikleri Şekil 4.9, 4.10, 4.11 ve 4.12’de sunulmuştur.



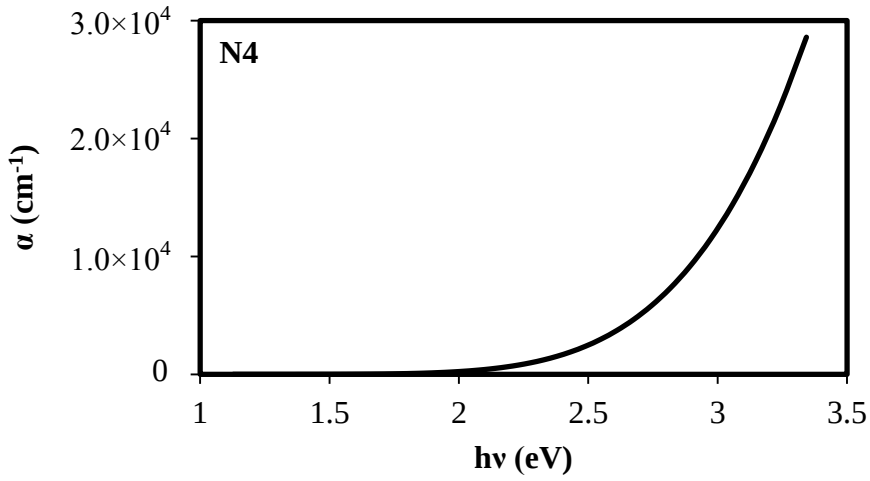
Şekil 4.9. N-tipi a-SiC_x:H ince film N1 örneğinin soğurma katsayısı dik enerji grafiği



Şekil 4.10. N-tipi a-SiC_x:H ince film N2 örneğinin soğurma katsayısı dik enerji grafiği

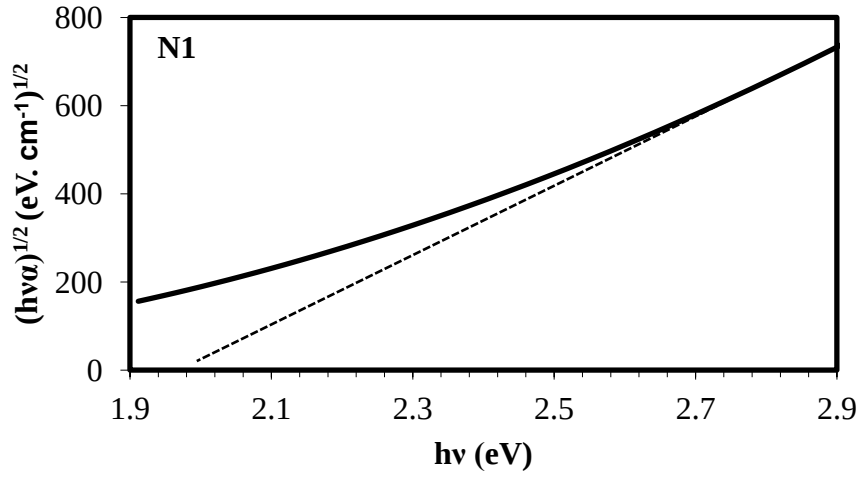


Şekil 4.11. N-tipi a-SiC_x:H ince film N3 örneğinin soğurma katsayısı dik enerji grafiği

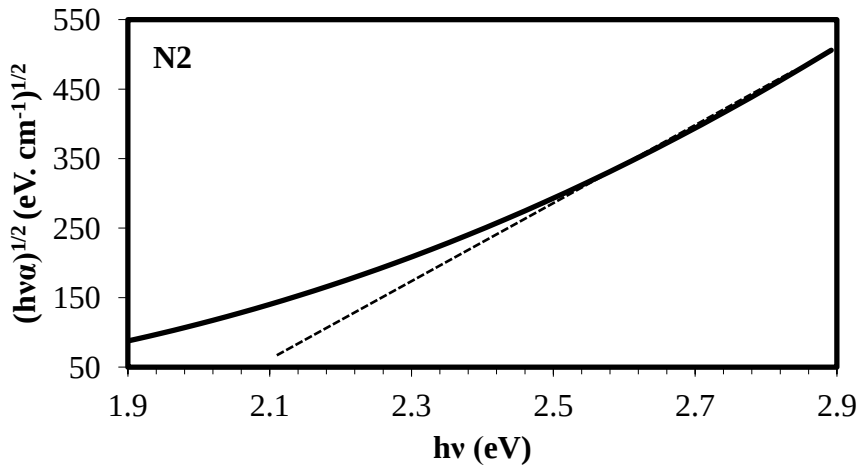


Şekil 4.12. N-tipi a-SiC_x:H ince film N4 örneğinin soğurma katsayısı dik enerji grafiği

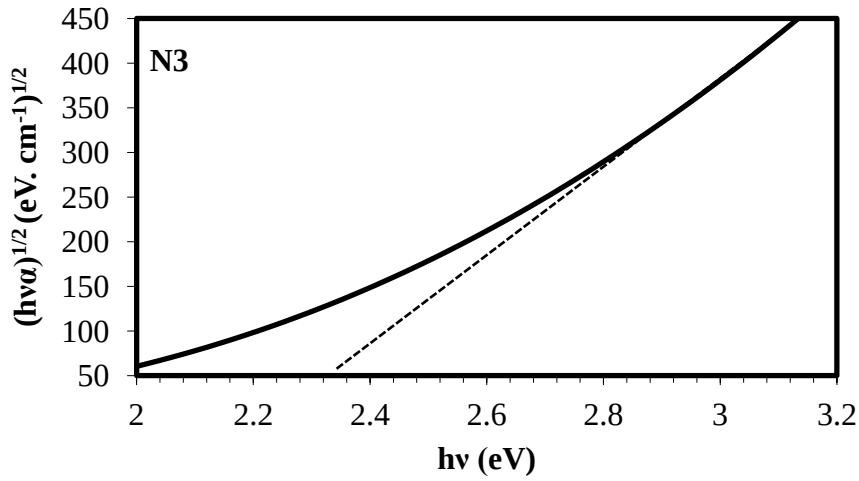
Optik enerjileri hakkında bilgi edinmek için fosfor katkılanmış n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin Tauc enerjileri analiz edilmiştir. İzinli indirekt bant geçişleri için E_{Tauc} enerjisi, $(h\nu\alpha)^{1/2}$ dik $(h\nu)$ grafiği çizilerek Eşitlik 3.17'den hesaplanmıştır (Şekil 4.13, 4.14, 4.15 ve 4.16).



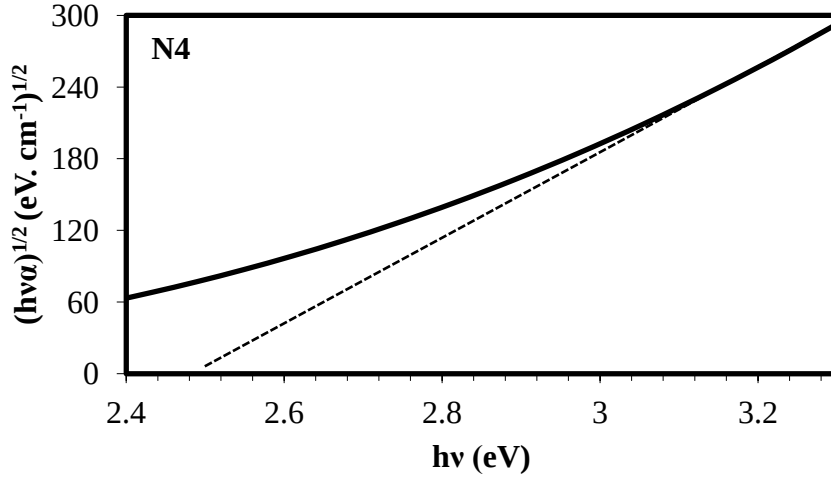
Şekil 4.13. N-tipi a-SiC_x:H ince film N1 örneğinin $(h\nu\alpha)^{1/2}$ dik $h\nu$ grafiği



Şekil 4.14. N-tipi a-SiC_x:H ince film N2 örneğinin $(h\nu\alpha)^{1/2}$ dik $h\nu$ grafiği

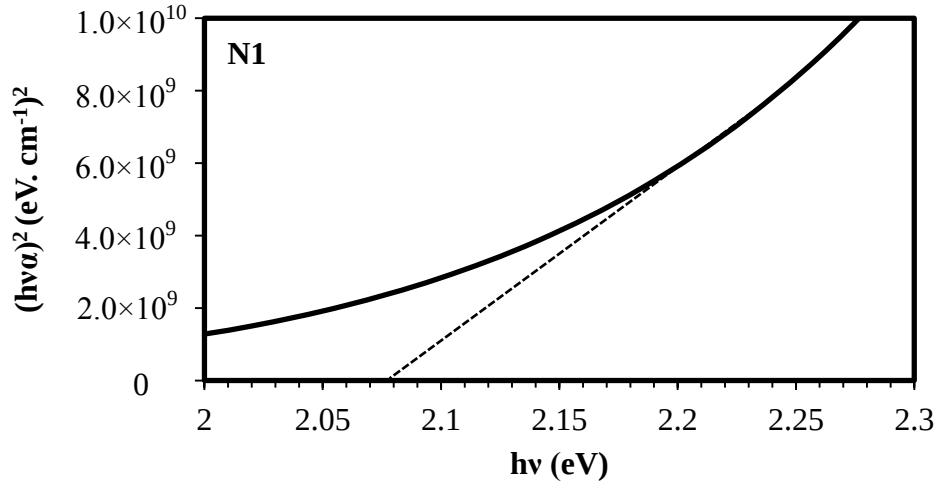


Şekil 4.15. N-tipi a-SiC_x:H ince film N3 örneğinin $(h\nu\alpha)^{1/2}$ dik $h\nu$ grafiği

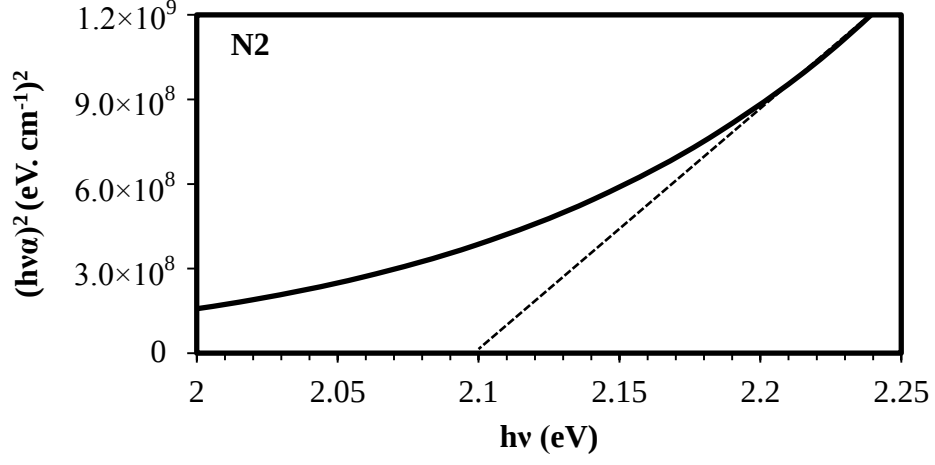


Şekil 4.16. N-tipi a-SiC_x:H ince film N4 örneğinin $(h\nu\alpha)^{1/2}$ dik $h\nu$ grafiği

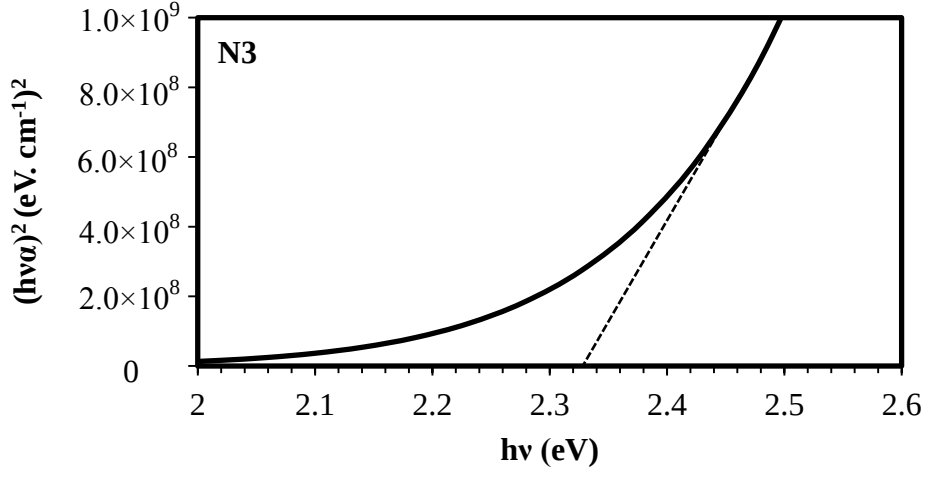
İzinli direk bant geçişleri için E_{Tauc}^* enerjisi $(h\nu\alpha)^2$ dik $(h\nu)$ grafiği çizilerek Eşitlik 3.18'den hesaplanmıştır (Şekil 4.17, 4.18, 4.19 ve 4.20). Tauc enerjilerinin izinli endirekt ve direk geçişler için değerleri Çizelge 4.4'te sunulmuştur.



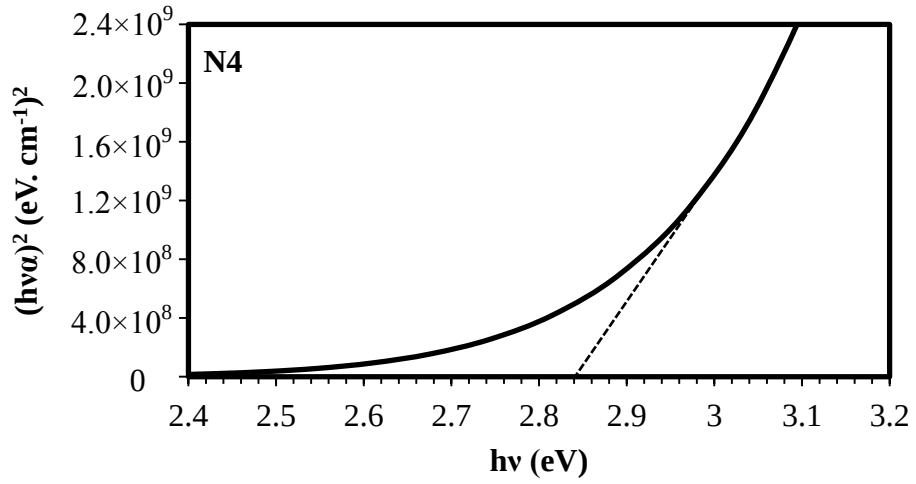
Şekil 4.17. N-tipi a-SiC_x:H ince film N1 örneğinin $(h\nu\alpha)^2$ dik $h\nu$ grafiği



Şekil 4.18. N-tipi a-SiC_x:H ince film N2 örneğinin $(h\nu\alpha)^2$ dik $h\nu$ grafiği

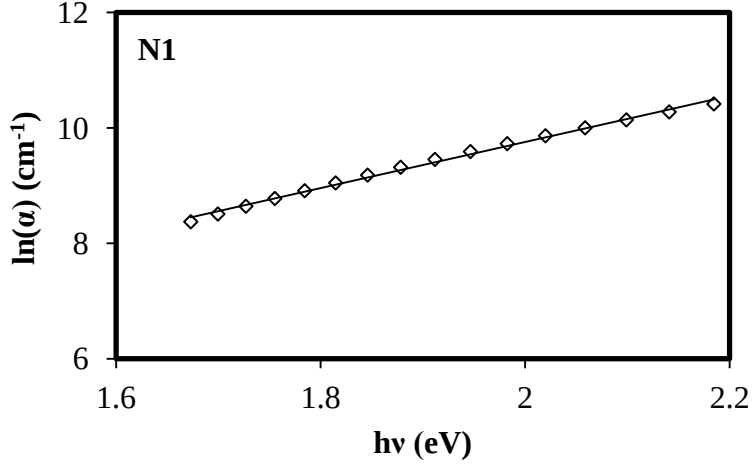


Şekil 4.19. N-tipi a-SiC_x:H ince film N3 örneğinin $(h\nu\alpha)^2$ dik $h\nu$ grafiği

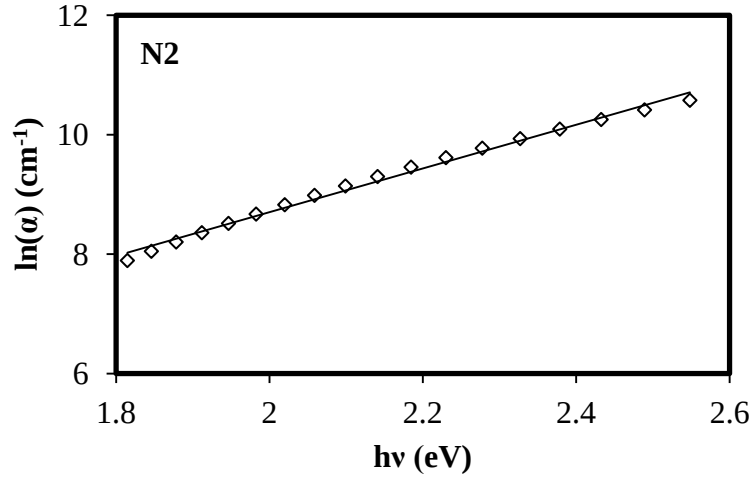


Şekil 4.20. N-tipi a-SiC_x:H ince film N4 örneğinin $(h\nu\alpha)^2$ dik $h\nu$ grafiği

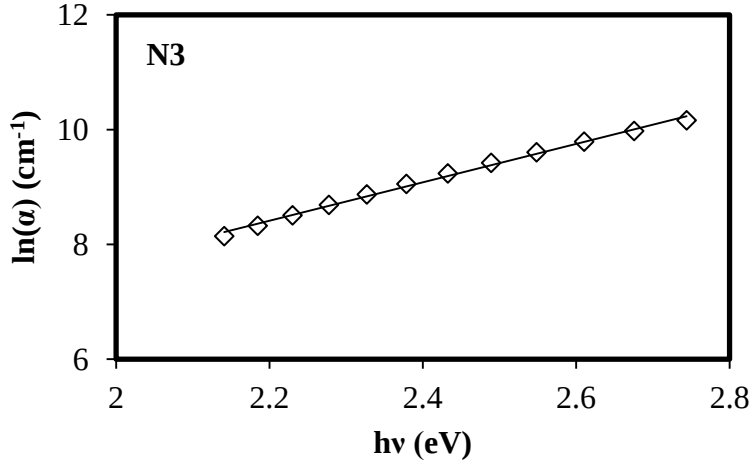
İnce filmlerin E_U enerjileri $\ln\alpha$ dik $h\nu$ grafiği çizilerek Eşitlik 3.19'dan hesaplanmıştır ve Çizelge 4.4'te sunulmuştur (Şekil 4.21, 4.22, 4.23 ve 4.24).



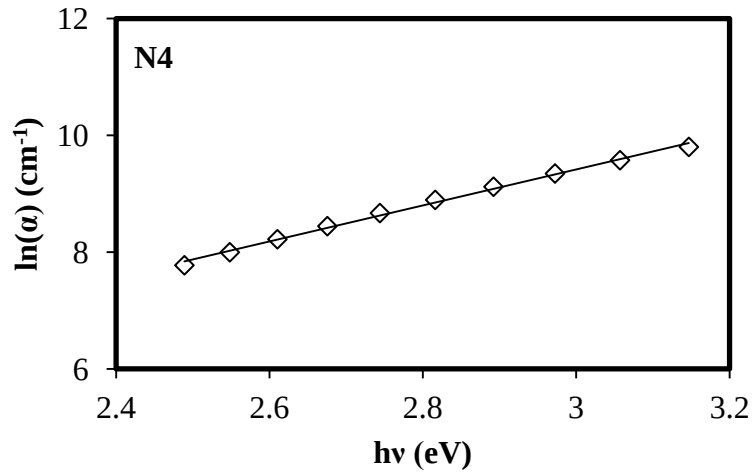
Şekil 4.21. N-tipi a-SiC_x:H ince film N1 örneğinin $\ln\alpha$ dik $h\nu$ grafiği



Şekil 4.22. N-tipi a-SiC_x:H ince film N2 örneğinin $\ln\alpha$ dik $h\nu$ grafiği



Şekil 4.23. N-tipi a-SiC_x:H ince film N3 örneğinin lnα dik hv grafiği



Şekil 4.24. N-tipi a-SiC_x:H ince film N4 örneğinin lnα dik hv grafiği

Çizelge 4.4. N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin E_{Tauc}, E_{Tauc}^{*}, E₀₄ ve E_U enerjileri

N-tipi a-SiC _x :H ince film	Karbon içeriği (x)	E _{Tauc} (eV)	E _{Tauc} [*] (eV)	E ₀₄ (eV)	E _U (meV)
N1	0	1.98	2.08	1.85	250
N2	0.19	2.12	2.10	2.12	273
N3	0.46	2.31	2.33	2.42	299
N4	0.62	2.50	2.84	2.92	325

Çizelge 4.5. Has a-SiC_x:H ince filmlerin E_{Tauc}, E₀₄ ve E_U enerjileri (Akaoglu, 2008; Sel, 2007)

Has a-SiC _x :H ince film	Karbon içeriği (x)	E _{Tauc} (eV)	E ₀₄ (eV)	E _U (meV)
H1	0	1.89	1.96	69
H2	0.21	2.03	2.18	81
H3	0.42	2.28	2.48	170
H4	0.59	2.71	2.91	265

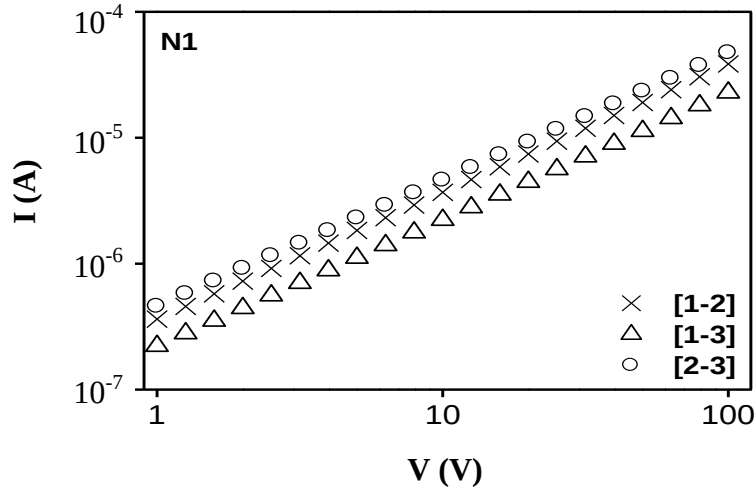
Karbon içeriğinin artmasıyla E₀₄'nin 1.85 eV'tan 2.92 eV'a ve E_{Tauc}'nin 1.98 eV'tan 2.50 eV'ta arttığı gözlemlenmiştir. Bu artış, yaklaşık x<0.5 değerleri için karbon içeriğinin artmasıyla Si-Si kovalent bağlarının yerini σ türü daha güçlü Si-C kovalent bağlarının oluşmasına ve karbon zengin bölgede (x>0.5) yapıda Si-C bağlarının yanı sıra C-C bağlarının sp³, sp² konfigürasyonlarının da oluşmasına bağlıdır (Robertson, 1986, 1987, 1991, 1992 a,b; Giorgis, 2001). Akaoglu ve arkadaşlarının rapor ettiği (Akaoglu, 2004, 2008; Sel, 2007, 2011) Çizelge 4.5'de sunulan has a-SiC_x:H ince filmlerin optik enerjileriyle Çizelge 4.4'te sunulan n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin optik enerjileri karşılaştırıldıklarında yaklaşık sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Literatürde rapor edilen çalışmalarda da fosfor katkılanmış a-SiC_x:H ince filmlerin optik enerjileri ile has a-SiC_x:H ince filmlerin optik enerjilerinin karşılaştırılması sonucunda optik enerjilerin değerlerinin hemen hemen aynı kaldığı belirtilmiştir (Demichelis ve ark., 1992; Yoon, 1997; Yoon ve ark., 1997; Ji ve ark., 1997).

Urbach enerjileri ise karbon içeriğinin artmasıyla 250 meV'tan 325 meV'a yükselmiştir. Giorgis ve arkadaşlarının rapor ettiği çalışmada da E_U enerjisinin karbon içeriğine bağlı olarak arttığı ve karbon zengin ince filmlerin E_U enerjisinin 300 meV civarında hesaplandığı belirtilmiştir (Giorgis ve ark., 2001). Bunun yanında, n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin E_U enerjilerinin, özellikle silisyum zengin has a-SiC_x:H ince filmlerin E_U enerjilerinden göreceli olarak çok daha fazla olduğu dolayısıyla fosfor katkılanmanın a-SiC_x:H ince filmlerin yapısındaki düzensizliği arttırdığı gözlemlenmiştir. Bunun fosfor katkılanmanın kusur yoğunluklarını arttırmasına bağlı olduğu düşünülmektedir (Teresa ve ark., 2003).

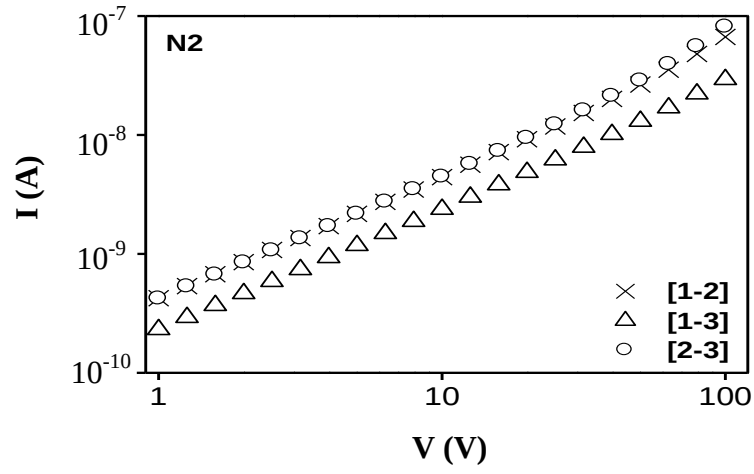
4.3. N-tipi a-SiC_x:H İnce Filmlerin Elektriksel Özelliklerinin Ölçüm ve Analizi

Fosfor katkılanmış n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin elektriksel özellikleri 100-450 K aralığında çeşitli sıcaklıklarda gerçekleştirilen akım-voltaj ölçümleri ile araştırılmıştır. Ölçümlerin akım-voltaj grafikleri çizilmiş ve omik bölgelerine Eşitlik 3.37 fit edilerek dirençleri (R) ve sonrasında da Eşitlik 3.38 kullanılarak öziletkenlikleri (σ) hesaplanmıştır.

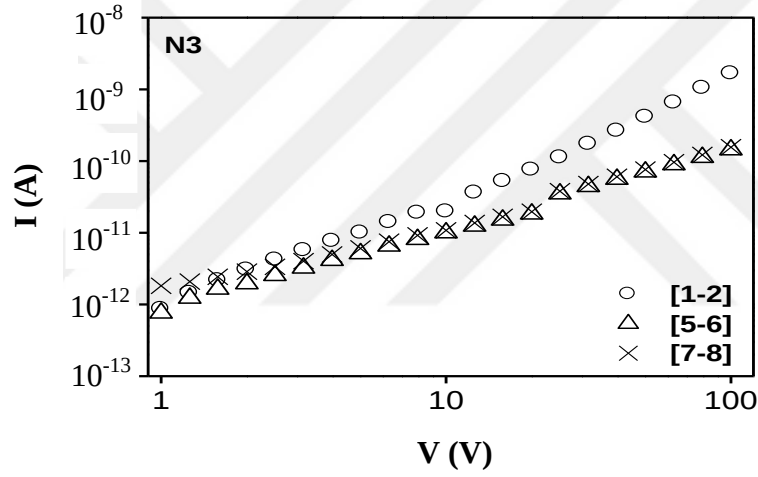
Tüm örnekler, kriyostatta sıcaklık bağımlı akım-voltajları ölçülmeden önce oda sıcaklığında farklı elektrotlardan ölçümler yapılarak önceden incelenmiştir. Şekil 4.25, 4.26, 4.27 ve 4.28’de sırasıyla N1, N2, N3 ve N4 için farklı elektrotlardan ölçülmüş akım-voltaj grafikleri sunulmuştur. İnce filmlerin yüzeyindeki elektrotlar soldan ilki birinci ve sırasıyla 2., 3., 4.... şeklinde numaralandırılmıştır ve karşılık gelen ölçümler elektrot numarasını belirtmek üzere ‘[1-2]’ şeklinde grafiklerde etiketlenmiştir. Sonuçların göreceli olarak aynı çıkması filmlerin elektriksel özellikleri bakımından homojen olduğunu göstermiştir. Her bir ölçüm için karşılık gelen elektrotların arasındaki uzaklık ayrı olarak hesaplamalarda kullanılarak elde edilen öziletkenlikler her bir film için yaklaşık olarak aynı sonuçları vermiştir. Bu sonuç ince filmlerin elektriksel özelliklerinin ince filmin farklı bölgelerinde aynı olduğunu ve dolayısıyla her bir ince filmin homojen yapıda olduğunu göstermektedir.



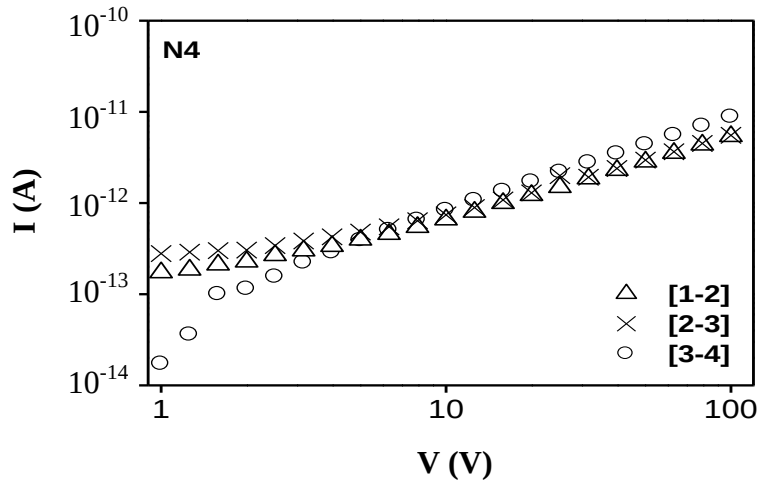
Şekil 4.25. N-tipi a-SiC_x:H ince film N1 örneğinin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafikleri



Şekil 4.26. N-tipi a-SiC_x:H ince film N2 örneğinin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafikleri

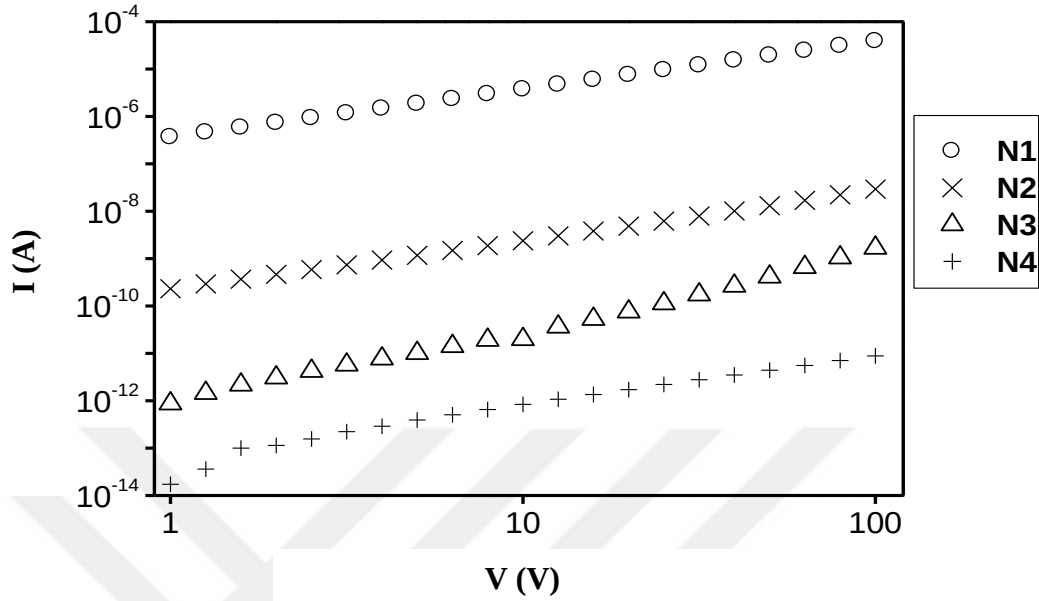


Şekil 4.27. N-tipi a-SiC_x:H ince film N3 örneğinin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafikleri



Şekil 4.28. N-tipi a-SiC_x:H ince film N4 örneğinin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafikleri

N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafikleri Şekil 4.29’da ve öziletkenlikleri Çizelge 4.6’da sunulmuştur.



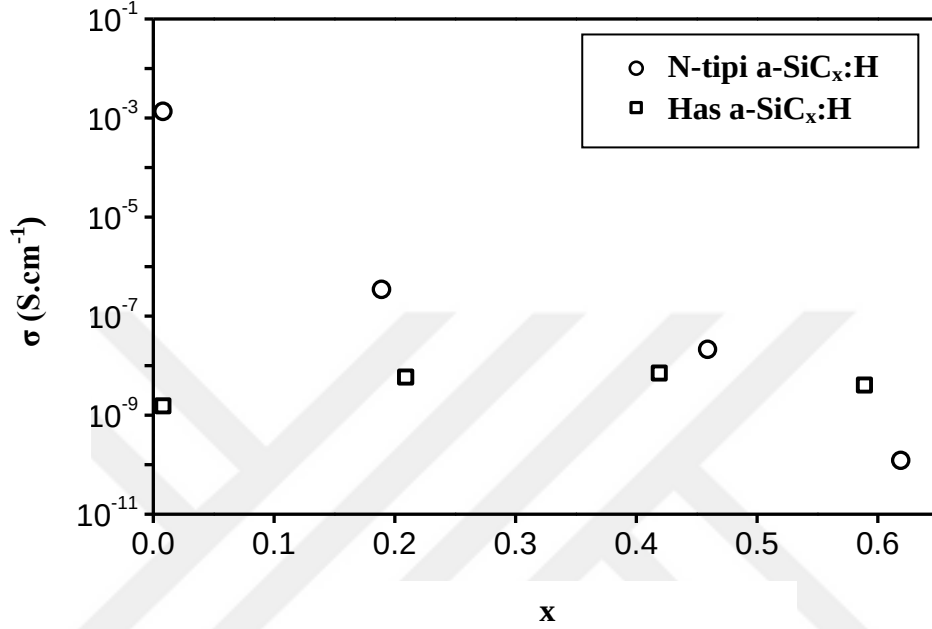
Şekil 4.29. N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin oda sıcaklığındaki akım-voltaj grafikleri

Çizelge 4.6. N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin oda sıcaklığındaki öziletkenlikleri

N-tipi a-SiC _x :H ince film	Karbon içeriği (x)	Oda sıcaklığındaki öziletkenlikler σ (S.cm ⁻¹)
N1	0	$1.3 \times 10^{-3} \pm 1.2 \times 10^{-4}$
N2	0.19	$3.2 \times 10^{-7} \pm 5 \times 10^{-8}$
N3	0.46	$2.0 \times 10^{-8} \pm 7 \times 10^{-9}$
N4	0.62	$1.2 \times 10^{-10} \pm 1 \times 10^{-11}$

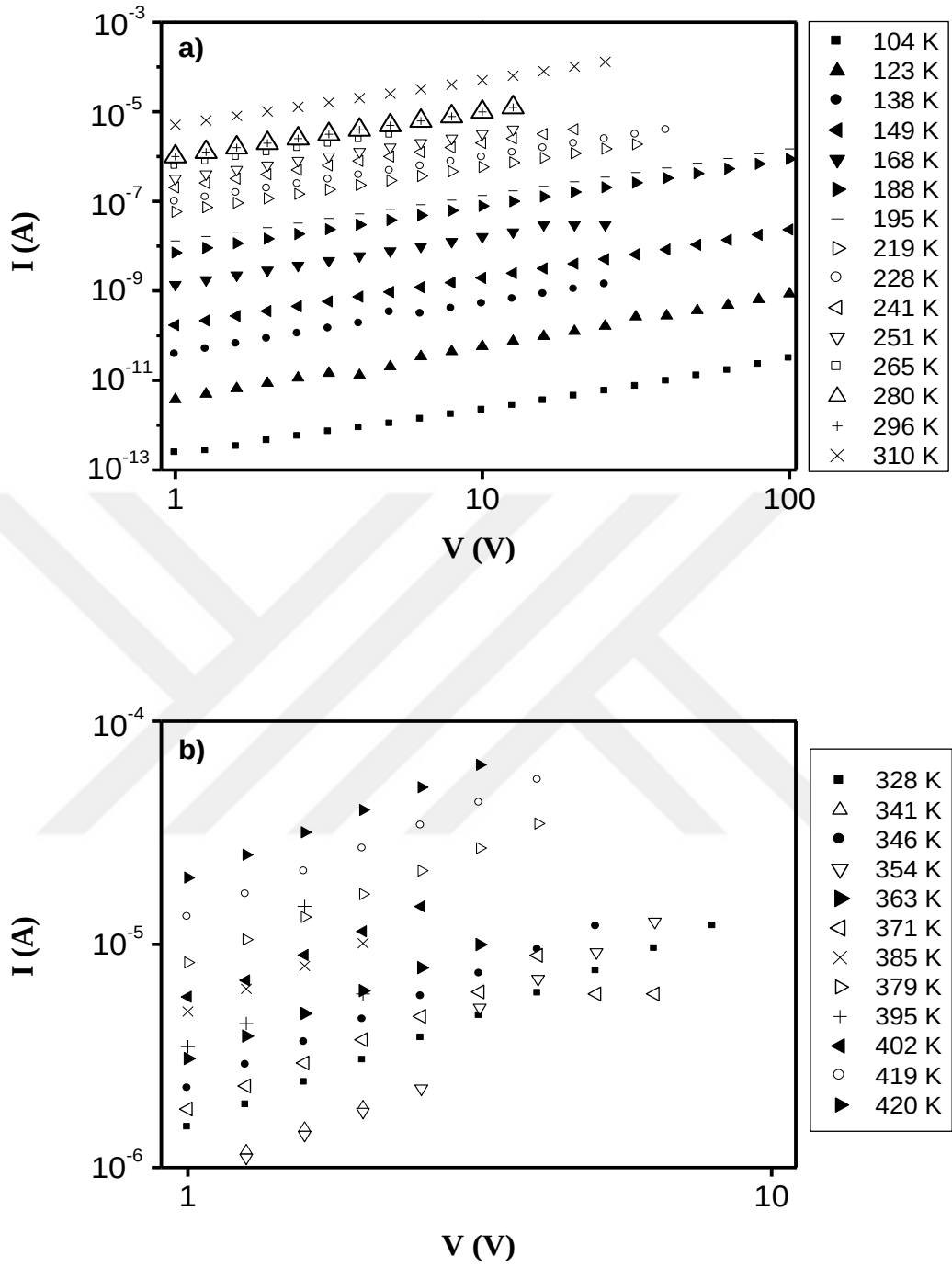
Şekil 4.30’da n-tipi a-SiC_x:H ve has a-SiC_x:H ince filmlerin oda sıcaklığındaki öziletkenliklerinin karbon içeriğine göre değişimleri sunulmuştur (Sel, 2007, 2011). Karbon içeriğinin x=0 olduğu silisyum zengin N1 ince filmi için bulunan öziletkenlik diğer ince filmlerinkine kıyasla en yüksek değerde olup karbon içeriğinin x=0.62 olduğu karbon zengin N4 ince filmin öziletkenliğinden yaklaşık olarak 10⁷ kat ve x=0 karbon içeriğine sahip has a-SiC_x:H ince filminin öziletkenliğinden 10⁶ kat daha büyüktür. Yapıda karbon içeriğinin artması ile ince filmlerin öziletkenliklerinde göreceli olarak azalma gözlemlenmiştir. N1 ince filminin öziletkenliği yaklaşık olarak N2 ince filminin öziletkenliğinden 10⁴ kat, N3 ince filminin öziletkenliğinden 10⁵ kat ve N3 filminin öziletkenliğinden ise 10⁷ kat daha büyüktür. Karbon içeriği arttıkça n-tipi a-SiC_x:H ince

filmlerin öziletkenlikleri göreceli olarak has $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ince filmlerin  ziletkenliklerine yaklaşmış ve $x=0.6$ civarında göreceli olarak daha k    k değerlere düşmüştür. Bu azalma katkılama mekanizmasında fosforun karbon içeriğinin artmasıyla katkılayıcı olarak yapıya dahil olmasına kıyasla yapıda hidrojenin etkisine benzer bir etki yaptığını göstermektedir.

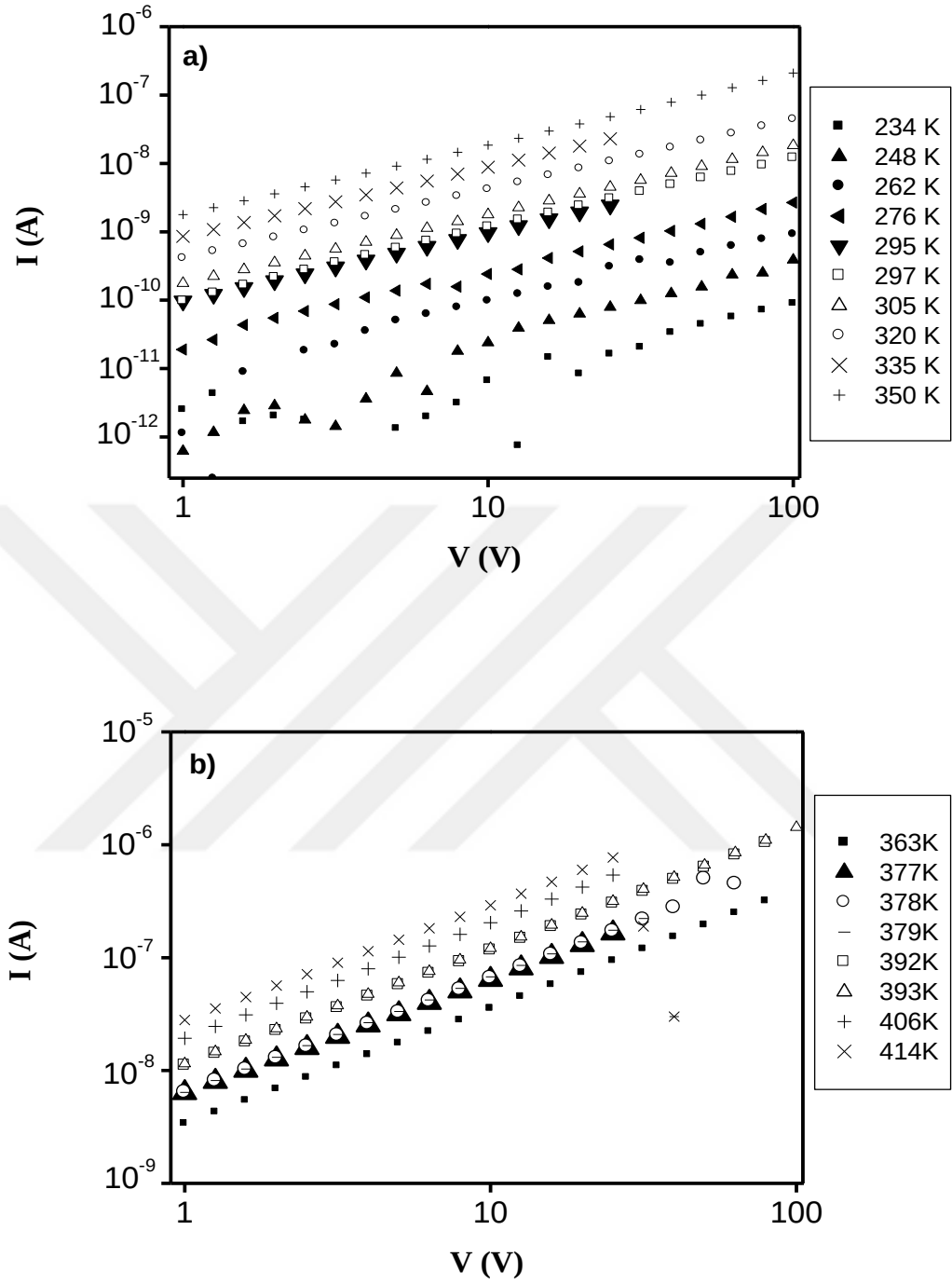


şekil 4.30. Karbon içeriğinin bir fonksiyonu olarak oda sıcaklığında n-tipi $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ve has $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ince filmlerin öziletkenlikleri

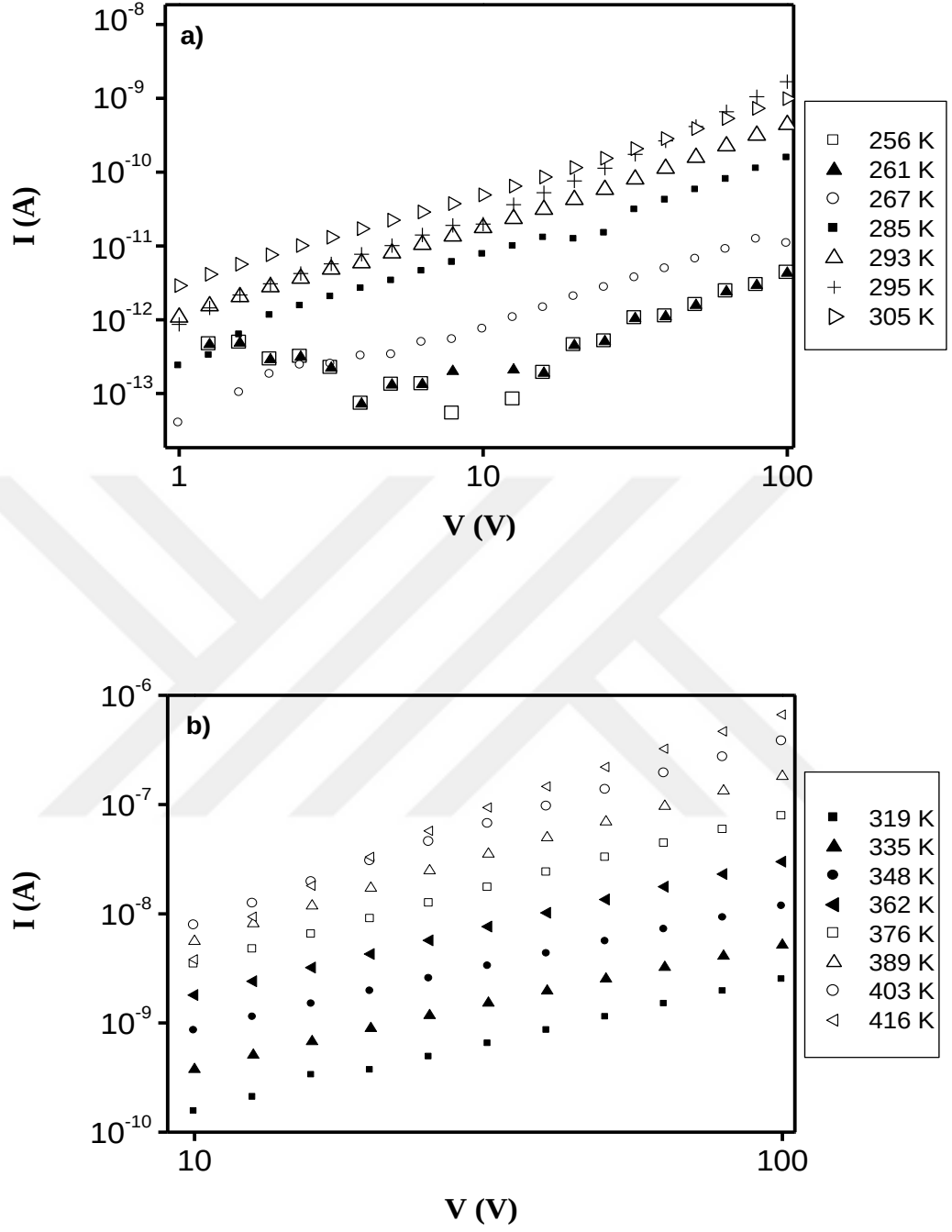
N-tipi $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ince filmlerin sıcaklığa bağlı akım-voltaj ölçümleri sırasıyla şekil 4.31, 4.32, 4.33 ve 4.34'te sunulmuştur. Sıcaklığın artmasıyla N1, N2, N3 ve N4 ince filmlerde iletkenliğin göreceli olarak artış gösterdiği gözlemlenmiştir.



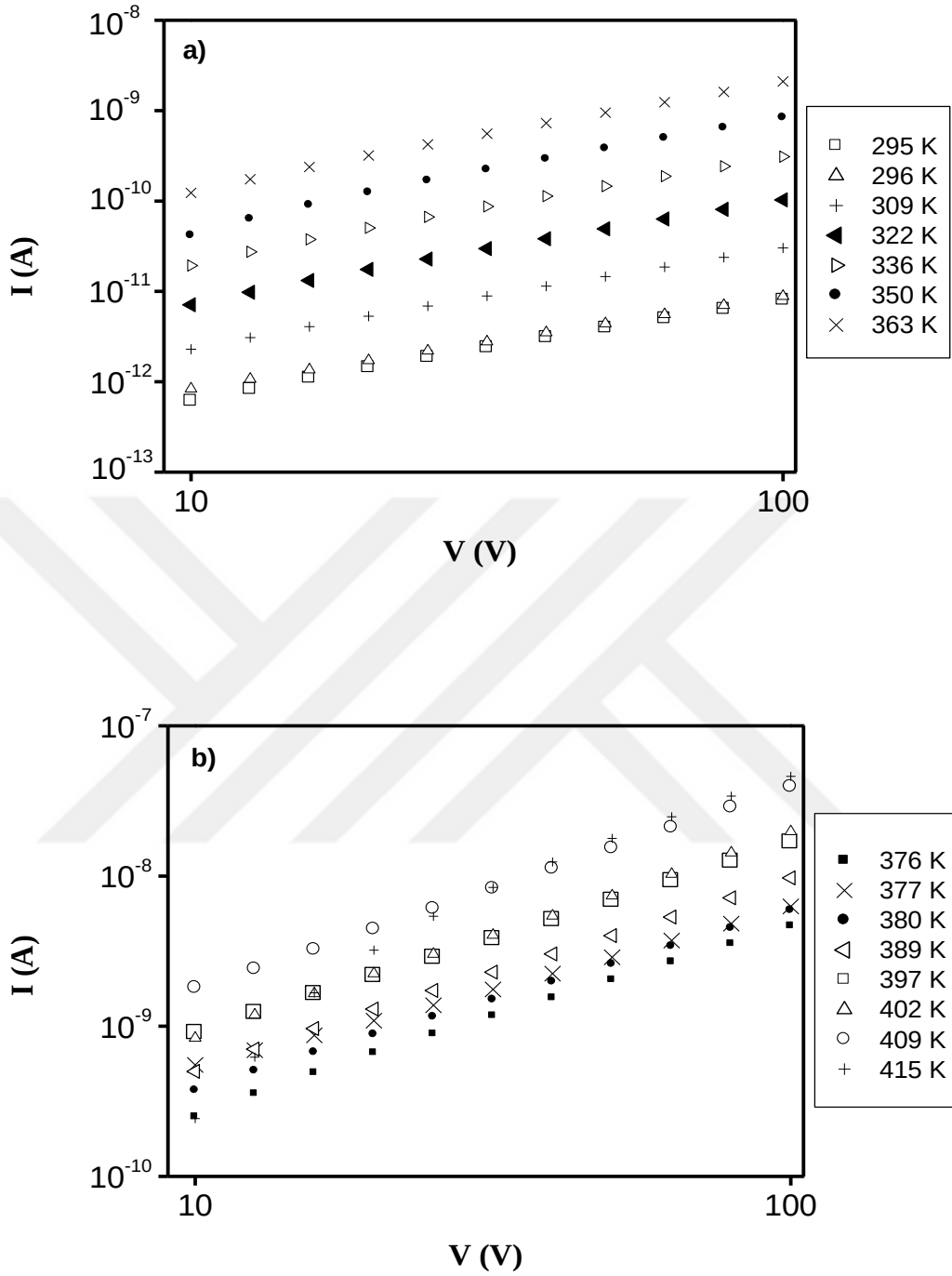
Şekil 4.31. N-tipi a-SiC_x:H ince film N1 örneğinin a) 104-310 K, b) 328-420 K sıcaklık aralığındaki akım-voltaj grafikleri



Şekil 4.32. N-tipi a-SiC_x:H ince film N2 örneğinin a) 234-350 K, b) 363-414 K sıcaklık aralığındaki akım-voltaj grafikleri



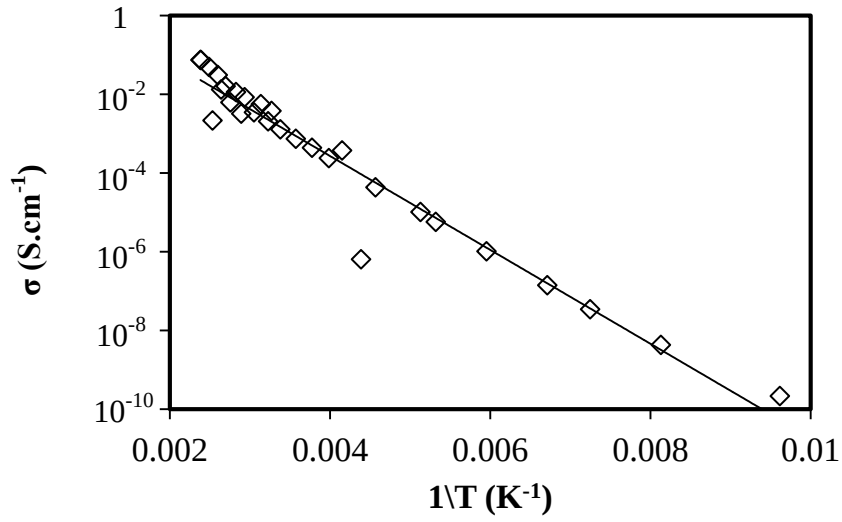
Şekil 4.33. N-tipi a-SiC_x:H ince film N3 örneğinin a) 256-305 K, b) 319-416 K sıcaklık aralığındaki akım-voltaj grafikleri



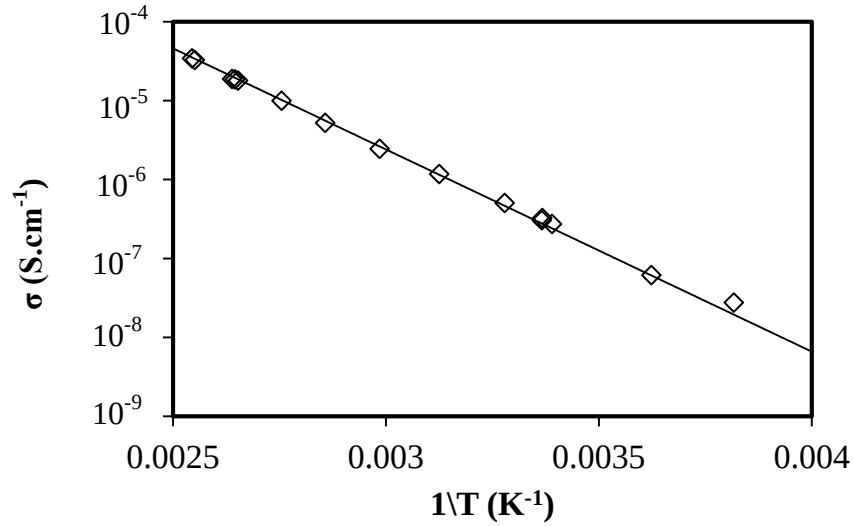
Şekil 4.34. N-tipi a-SiC_x:H ince film N4 örneğinin a) 295-363 K, b) 376-415 K sıcaklık aralığındaki akım-voltaj grafikleri

N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerinin Arrhenius grafikleri Şekil 4.35, 4.36, 4.37 ve 4.38’de sunulmuştur. Arrhenius grafiklerinde standart iletim mekanizması dikkate alınarak

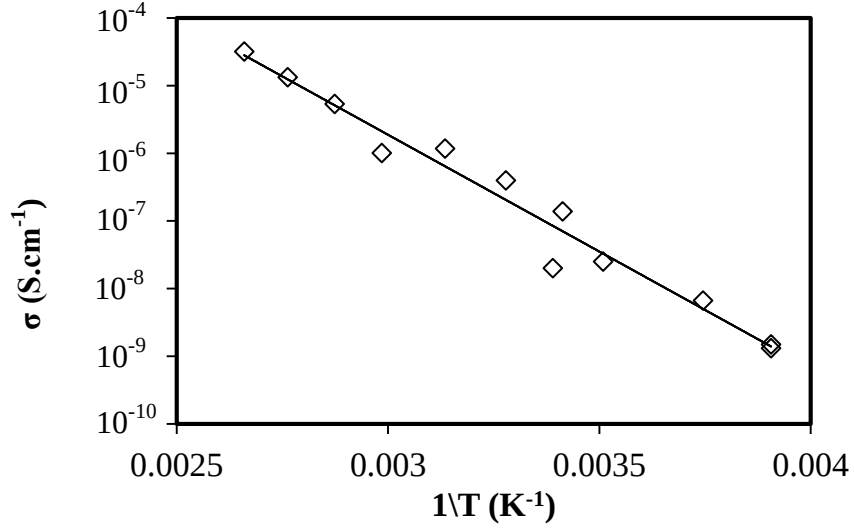
grafiklere Eşitlik 3.26'nın fit edilmesi ile aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır. Hesaplanan aktivasyon enerjileri Çizelge 4.7'de sunulmuştur.



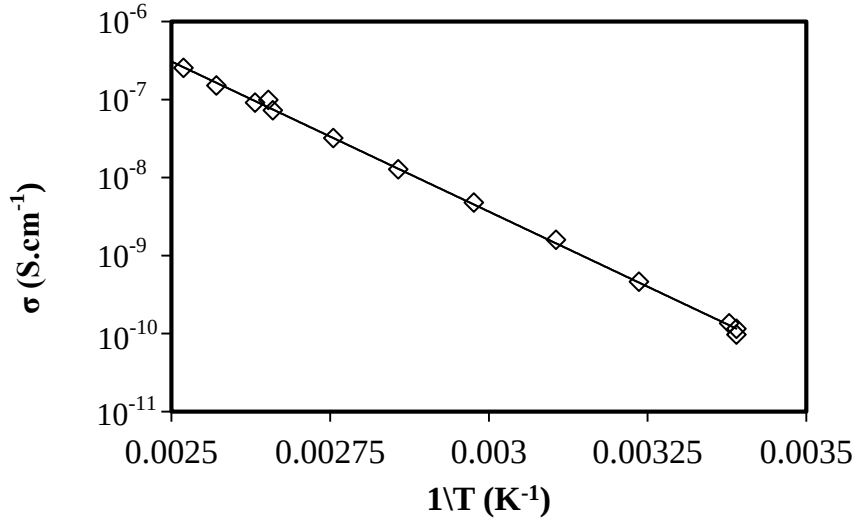
Şekil 4.35. N-tipi a-SiC_x:H ince film N1 örneğinin Arrhenius grafiği



Şekil 4.36. N-tipi a-SiC_x:H ince film N2 örneğinin Arrhenius grafiği



Şekil 4.37. N-tipi a-SiC_x:H ince film N3 örneğinin Arrhenius grafiği



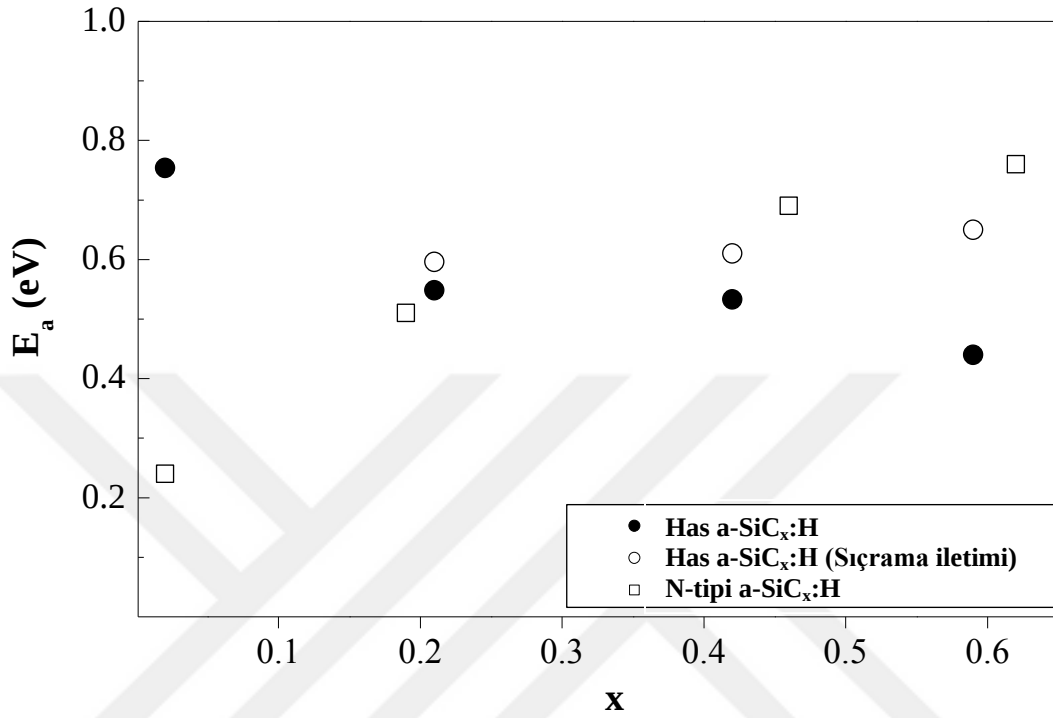
Şekil 4.38. N-tipi a-SiC_x:H ince film N4 örneğinin Arrhenius grafiği

Çizelge 4.7. N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin aktivasyon enerjileri

N-tipi a-SiC _x :H ince film	Karbon içeriği (x)	E _a (eV)
N1	0	0.24
N2	0.19	0.51
N3	0.46	0.69
N4	0.62	0.76

N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin karbon içeriğinin artması ile aktivasyon enerjilerinin arttığı görülmüştür ve bu artış E_{tauc} ve E₀₄ enerjilerindeki artış ile uyumludur. Diğer bir anlatımla karbon içeriğinin artmasıyla beraber XPS analizlerinde de incelendiği gibi Si-Si

bağlarının yerini göreceli olarak daha büyük enerjili Si-C ve C-C bağlarının almasıyla ilişkili olarak yasak enerji aralığı göreceli olarak artmıştır ve bu artışa bağlı olarak aktivasyon enerjilerinde de bir artış belirlenmiştir.



Şekil 4.39. N-tipi a-SiC_x:H ve has a-SiC_x:H ince filmlerin standart iletim mekanizması ve EYKS mekanizması dikkate alınarak hesaplanan aktivasyon enerjilerinin karbon içeriğine bağlı grafiği

N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin ve has a-SiC_x:H ince filmlerin aktivasyon enerjilerinin karbon içeriğine göre değişimi Şekil 4.39’da sunulmuştur (Sel, 2007, Sel 2011). x=0 için n-tipi a-SiC_x:H ince filmin aktivasyon enerjisi 0.24 eV, aynı karbon içeriğindeki has a-SiC_x:H ince filmin ise 0.75 eV bulunmuştur. Bu filmlerde standart iletim mekanizmasının baskın olduğu gözlemlenmiştir. Aktivasyon enerjisindeki azalma, katkılamanın sonucunda Fermi enerji seviyesinin iletim bandına yaklaşması ile ilişkilendirilmiştir (Aida, 1997). E_U’si 250 meV olarak hesaplanan n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerden N1 örneğinin bant uzantı durumlarının, E_U’si 69 meV olarak rapor edilmiş olan aynı karbon içerikli has a-SiC_x:H ince filmlerin bant uzantı durumlarından daha yaygın olduğu göz önünde bulundurulduğunda aktivasyon enerjisinin azalması daha iyi açıklanabilmektedir. N-tipi a-SiC_x:H filmlerden N1 örneği için aktivasyon enerjisinin 0.24 eV değerinde olması ve has a-SiC_x:H filmlere göre aktivasyon enerjisinin göreceli olarak küçük olması fosfor

atomlarının yapıda P_4^+ koordinasyonunda bulunması ile açıklanmaktadır (Street, 1982; Demichelis ve ark., 1991).

Silisyum zengin ince filmlerde yaklaşık $x=0.2$ için n-tipi a-SiC_x:H ince filmin aktivasyon enerjisi 0.51 eV, has a-SiC_x:H ince filminki ise 0.54 eV hesaplanmıştır ve yaklaşık olarak aynı değerlerdedir. $x=0.5$ civarında ise has a-SiC_x:H ince filmin aktivasyon enerjisi hemen hemen sabit kalarak 0.53 eV olurken n-tipi a-SiC_x:H ince filminki artarak 0.69 eV'ta yükselmiştir. Karbon zengin filmlerde, has a-SiC_x:H ince filmin aktivasyon enerjisi göreceli olarak 0.44 eV'a düşerken, n-tipi a-SiC_x:H ince filminki göreceli olarak 0.76 eV'a yükselmiştir. Buna ek olarak karbon içeriğinin yapıda artması ile beraber fosfor atomlarının P_3^0 koordinasyonunda bağlar oluşturarak hidrojenin etkisine benzer şekilde yapıda bulunması sonucunda aktivasyon enerjisinde artış gözlemlenmiştir. 8-N kuralına göre fosfor 3-katlı koordinasyona (P_3^0) sahip şekilde bulunabilmektedir (Mott, 1969). Bu optimum enerjili durumda 3-katlı koordinasyona sahip olan P_3^0 atomları yapıya elektriksel olarak herhangi bir katkı sağlamayıp, a-SiC_x:H ağ yapılarında elektriksel olarak inaktif şekilde bulunmaktadır. Ayrıca a-SiC_x:H yapısında katkılama verimliliğinin 4-katlı koordinasyona (P_4^0) sahip fosfor atomların yoğunluğuna bağlı olduğundan Giriş Bölümünde bahsedilmişti (Street, 1991; Poortmans ve ark., 2006). Dolayısıyla fosfor atomları a-SiC_x:H yapısında nötral donör (P_4^0) olarak da bulunabilmektedir (Adler, 1978). Ancak bu 4-katlı konfigürasyon için en düşük enerjili P_3^0 konfigürasyonuna göre göreceli olarak daha fazla enerji gereklidir ve buna bağlı olarak kararsız ağ yapıları oluşabilir. Bu durumda çoğu fosfor atomu a-SiC_x:H yapısında P_4^0 konfigürasyonu yerine üzerinde ek bir yük bulundurarak P_4^+ konfigürasyonu şeklinde bulunabilir (Adler, 1978; Street, 1982, 1991). P_4^0 konfigürasyonunun ağ yapısında mevcut olabilmesi için, Fermi enerji seviyesi civarında negatif yüklü sarkık bağların (dangling bonds Si_3^-) yapıda bulunması gerekir. Karbon içeriğinin artmasıyla özellikle $x=0.4-0.6$ aralığında Fermi enerji seviyesinin üstünde Si_3^- ve altında C_3^+ derin kusur durumlarının (sarkık bağlar (Dangling bonds)) olduğu literatürde Robertson tarafından rapor edilmiştir (Robertson, 1992). $P_4^+-Si_3^-$ çiftine katkılایıcı değerlik dönüşüm çifti (dopant-valence-alternation pair) adı verilir (Robertson, 1984).

Sonuç olarak, silisyum zengin n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerde fosfor atomu P_4^+ konfigürasyonunda katkılایıcı atom olarak yer alabilmektedir. Yapıda karbon oranının artmasına bağlı olarak fosfor atomları n-tipi a-SiC_x:H ağ yapısında göreceli olarak en düşük enerjili P_3^0 koordinasyonunda ve buna ek olarak P_4^0 koordinasyonunda bulunarak

katkılayıcı etki yerine yapıda hidrojene benzer bir etki oluşturduğu belirlenmiştir (Street, 1982; Demichelis ve ark., 1991). Bu durumda fosfor yapıda tıpkı hidrojen atomlarının yaptığı gibi Fermi enerji seviyesi civarındaki sarkık ve bant uzantı durumlarındaki zayıf bağları doyurma işlevi görmektedir (Demichelis ve ark., 1991, 1992; Essick ve ark., 1991; Ji ve ark., 1997). Dolayısıyla silisyum zengin n-tipi a-SiC_x:H filmlerde aktivasyon enerjisi has a-SiC_x:H'üne kıyasla daha az iken karbon içeriği göreceli olarak daha fazla olan filmlerde tam tersi durum gözlemlenmiştir.

Sıcaklık bağımlı iletkenlikler ölçüldükten sonra standart iletim mekanizması ve EYKS iletim mekanizması modellenerek n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerdeki iletim mekanizmaları analiz edilmiştir. EYKS iletim mekanizmasının analizi için Eşitlik 3.36'da sunulan differansiyel iletkenliğin integrali (Eşitlik 4.1) alınarak bilgisayar ortamında iletkenliklerin Arrhenius grafiklerine fit edilmiştir.

$$\sigma_H = \int_{E_F}^0 d\sigma \quad (4.1)$$

Lokale durumlar 6 Å genişliğinde potansiyel kuyuları olarak modellenmiştir. Lokale durumların yaygın durumların kenarındaki yoğunluk değerleri 10²² cm⁻³eV⁻¹, ω_p=10¹² s⁻¹ olarak alınmıştır. Bu modele göre has a-SiC_x:H ince filmlerde silisyum zengin durum için standart iletim mekanizmasının baskın olduğu fakat karbon içeriğinin göreceli olarak artması sonucunda yaklaşık olarak x=0.2-0.5 aralığında EYKS iletim mekanizmasının da iletme katkıda bulunduğu ve karbon zengin durumda (x>0.5) EYKS mekanizmasının standart iletim mekanizmasından göreceli olarak daha baskın mekanizma olduğu literatürde rapor edilmiştir (Sel 2007, 2011). Bu durum ışığında karbon zengin has a-SiC_x:H ince filmlerin standart iletim mekanizması ile hesaplanan aktivasyon enerjilerinin EYKS iletkenliği dikkate alındığında optik enerjilerle uyumlu ve göreceli olarak daha fazla olduğu da belirtilmiştir (Şekil 4.39). N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerde ise aktivasyon enerjilerinin özellikle karbon zengin has a-SiC_x:H ince filmlerin EYKS iletkenliği dikkate alındığında hesaplanan aktivasyon enerjilerinden daha büyük olduğu ve bu filmlerde standart iletim mekanizmasının baskın olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla fosfor ile katkılanmış n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerde EYKS iletim mekanizmasına kıyasla baskın iletim mekanizmasının tüm karbon içerikleri için standart iletim mekanizması olduğu belirlenmiştir.

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında PDKBB yöntemi ile çeşitli karbon içeriklerinde biriktirilmiş fosfor katkılanmış n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin elektriksel özellikleri, yapısal ve optik özellikleri ile desteklenerek analiz edilmiştir.

N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin özelliklerine karbon içeriğinin önemli etkileri olması sebebiyle öncelikle XPS analizleri sonucunda ince filmlerin karbon içerikleri belirlenmiştir ve ayrıca ince filmlerin fosfor içeriklerinin yaklaşık olarak %2 civarında olduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak, karbon içeriğinin artması ile silisyum zengin durumda yoğun olarak yapıda bulunan Si-Si ve Si-H bağlarının yerini göreceli olarak Si-C, C-C ve C-H bağlarının aldığı gözlemlenmiştir.

N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin kalınlıkları ve optik enerjileri UV-Vis spektroskopisi ile analiz edilmiştir. İnce filmlerin E_{04} , E_{Tauc} , E_{Tauc}^* ve E_U değerlerinin tümü karbon içeriğinin artması ile artmıştır. Karbon içeriğinin artmasına bağlı olarak Si-Si/Si-H bağlarının yanında göreceli olarak artan oranda Si-C/C-C ve C-H bağlarının oluşması ile optik enerjilerin artışı ince filmlerin yasak enerji aralığının genişlediğini göstermiştir. Yaklaşık olarak 1.85 eV ile 2.92 eV arasında hesaplanan optik enerjiler elektromanyetik spektrumun görünür bölgesini kapsamaktadır. Dolayısıyla bu tez çalışması kapsamında incelenen n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin optik ve opto-elektronik uygulamalarda kullanılma potansiyeli olduğu belirlenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda fosfor katkılama sonucunda a-SiC_x:H ince filmlerin optik özelliklerinin has a-SiC_x:H ince filmlerinkine kıyasla yaklaşık olarak aynı kaldığı rapor edilmiştir (Yoon ve ark., 1997; Ji ve ark., 1997; Sel, 2007; Akaoglu, 2008). Bu tez çalışmasında incelenen n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin optik enerjilerinin has a-SiC_x:H ince filmlerinkilerle karşılaştırılması sonucunda yaklaşık olarak aynı değerlerin bulunması literatür ile uyumludur. E_U değerlerinin yaklaşık olarak 300 meV civarında bulunması ise iletim ve valans bant uzantı durumlarının göreceli olarak yaygın olduğunu ve amorf yapının düzensizliğini göstermektedir (Sel, 2007, Sel 2011). Has a-SiC_x:H ince filmlerin E_U 'lerinin karbon içeriğinin artması ile yaklaşık olarak 4 kat artmasının yanında n-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin E_U 'lerinin yaklaşık olarak 1/4 oranında artması fosforun özellikle karbon zengin durumda göreceli olarak yapının düzensizliğinin artmasını önlediği, silisyum zengin durumda ise düzensizliği arttırdığı şeklinde açıklanabilir.

N-tipi $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ince filmlerin elektriksel özelliklerinin analizinde öncelikle oda sıcaklığındaki iletkenlikler belirlenmiştir. Silisyum zengin n-tipi $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ince filmlerin oda sıcaklığındaki iletkenliğinin $1.3 \times 10^{-3} \text{ S.cm}^{-1}$ ve karbon zengin ince filmin ise $1.2 \times 10^{-10} \text{ S.cm}^{-1}$ olduğu, karbon içeriğine bağlı olarak iletkenliğin yaklaşık olarak 10^7 kat azaldığı gözlemlenmiştir. Aynı karbon içeriğindeki n-tipi katkılanmış $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ filmlerin en yüksek iletkenlik değeri has $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ince filmlerinkinden yaklaşık 10^6 kat daha büyük olduğu belirlenmiştir. Karbon içeriğinin artmasıyla bu farkın göreceli olarak azaldığı ve karbon içeriğinin en fazla olduğu ince filmde ise n-tipi ince filmin iletkenliğinin has ince filminkinden daha az olduğu rapor edilmiştir. Dolayısıyla silisyum zengin n-tipi $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ince filmlerde fosforun katkılayıcı etki gösterdiği, diğer yanda karbon zengin ince filmlerde ise yapıda elektriksel olarak nötr durumda yasak enerji aralığındaki kusur durumlarına bağlanarak hidrojenin etkisine benzer etki gösterdiği belirlenmiştir.

Sıcaklığa bağlı elektriksel ölçümler ile hesaplanan aktivasyon enerjileri 0.24 eV ile 0.76 eV aralığındadır. Aktivasyon enerjileri optik enerjilerle karşılaştırıldığında oda sıcaklığındaki iletkenliklerin analizinin sonucuna da uygun olarak fosfor katkılanmanın etkisiyle silisyum zengin ince filmlerin Fermi enerji seviyesinin iletim bandına yaklaştığı ve dolayısıyla fosforun elektriksel olarak katkılayıcı etki gösterdiği belirlenmiştir. Karbon zengin filmlerde ise aktivasyon enerjilerinin artması ve hatta has ince filmlerinkilerden göreceli olarak daha büyük değerlere ulaşması, yasak enerji aralığının artmasıyla uyumludur ve fosforun katkılayıcı etki göstermek yerine hidrojen benzeri bir etki yaptığı yorumunu desteklemektedir.

N-tipi $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ince filmlerin elektriksel iletim mekanizmaları, standart iletim mekanizması ve EYKS mekanizması modellenerek analiz edilmiştir ve baskın iletim mekanizmasının standart iletim mekanizması olduğu belirlenmiştir. Silisyum zengin n-tipi $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ince filmlerde fosforun katkılayıcı etkisi sonucunda yoğunluğu artan iletim bandındaki yaygın durumlarda bulunan elektronların standart iletim mekanizmasına uygun iletimi gerçekleştirdiği; karbon zengin durumda ise EYKS mekanizmasının gerçekleştiği bant uzantı durumlarındaki yük geçişlerinin yerine yaygın durumlardaki iletimin baskın olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Günümüz elektronik teknolojisinde pn eklemi tabanlı ve diğer devre elemanlarının oluşturulmasında birçok çeşit yarı iletkenin kullanılma imkanına karşın silisyum hala büyük öneme sahiptir. $a\text{-SiC}_x\text{:H}$ ise optik ve elektriksel özellikleri bakımından yüksek enerjili radyasyon ve göreceli olarak yüksek sıcaklık ortamındaki uygulamalara ek olarak

özellikle optik özellikleri dikkate alındığında ışıyan diyotlarda (LED) kullanılmaya uygun özelliklere sahiptir. Bu tez çalışması sonucunda karbon içeriğine bağlı olarak a-SiC_x:H ince filmlerin elektriksel özelliklerine fosforun etkileri rapor edilmiştir. N-tipi a-SiC_x:H ince filmlerin optik özelliklerinin has a-SiC_x:H ince filmlerin özellikleriyle benzer olmasının yanında silisyum zengin ince filmlerin iletkenliklerinin göreceli olarak artması pn eklemi uygulamaları için verimli özellikleri sağlamaktadır. Karbon zengin filmlerde ise optik enerjinin artmasının yanında aktivasyon enerjisinin de artması ışıyan diyot uygulamaları için verimli olan iletim bandından valans bandına ışımalı geçişlerin olasılığının artabileceği koşulların göreceli olarak sağlandığını göstermektedir.



KAYNAKLAR

- Aida M.S., Ghrieb M., 1997. Electrical and Optical Properties of Phosphorus-Doped a-SiC:H Thin Films. *Materials Chemistry and Physics* 47: 97-100.
- Akaoglu B., Sel K., Atilgan I., Katircioglu B., 2008. Carbon Content Influence on the Optical Constants of Hydrogenated Amorphous Silicon Carbon Alloys. *Optical Materials* 30: 1257-1267.
- Akaoglu B., 2004. Optical Properties of Silicon Based Amorphous Thin Films (Doktora Tezi). Orta Dogu Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Avilla A., Montero I., Galan L., Ripalda J.M., Levy R., 2001. Behavior of Oxygen Doped SiC Thin Films: An X-ray Photoelectron Spectroscopy Study. *Journal of Applied Physics* 89: 212.
- Bacalis N., Economou E.N., Cohen M.H., 1988. Simple Derivation of Exponential Tails in the Density of States. *Physical Review B* 37: 2714-2717.
- Beshkov G., Krastev V., Gogova D., Talik E., Adamies M., 2008. Comparative X-ray Photoelectron Spectroscopy Study of Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition and Micro Pressure Chemical Vapor Deposition of Phosphorus Silicate Glass Layers after Rapid Thermal Annealing. *Bulgarian Journal of Physics* 35: 58-67.
- Briggs D., M.P Seah., 1990. Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy. *Practical Surface Analysis* (2nd ed., Vol. 1). John Wiley and Sons, Chichester, UK.
- Carreno M.N.P., Pereyra I., Peres H.E.M., 1998. N-Type Doping in PECVD a-Si_{1-x}C_x:H Obtained Under ‘Starving Plasma’ Condition. *Journal of Non-Crystalline Solids* 227-230: 483-487.
- Choi W.K., Ong T.L., Tan L.S., Loh F.C., Tan K.L., 1998. Infrared and X-ray Photoelectron Spectroscopy Studies of As-prepared and Furnace-Annealed Radio-Frequency Sputtered Amorphous Silicon Carbide Films. *Journal Applied Physics*, 83: 4968.
- Demichelis F., Pirri C.F., Tresso E., Mea D.G., Rigato V., Rava P., 1991. Physical Properties of Undoped and Doped Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide. *Semiconductor Science and Technology* 6: 1141-1146.

- Demichelis F., Pirri C.F., Tresso E., 1992. Influence of Doping on the Structural and Optoelectronic Properties of Amorphous and Microcrystalline Silicon Carbide. *Journal Applied Physics* 72: 1327.
- Economou E.N., Soukoulis C.M., Cohen M.H., John S., 1987. *Disordered Semiconductors*. Plenum Press.
- Essick J.M., Pool F.S., Siting Y.H., Holboke M.J., 1991. Characterization of Electron Cyclotron Resonance Plasma-Deposited Hydrogenated Amorphous Silicon and Related Alloy Films. *Materials Research Society Symposium* 219: 679.
- Giorgis F., Ambrosone G., Coscia U., Ferrero S., Mandracci P., Pirri C.F., 2001. Structural and Optical Properties of $a\text{-Si}_{1-x}\text{C}_x\text{:H}$ Grown by Plasma Enhanced CVD. *Applied Surface Science* 184: 204-208.
- Gutsch S., 2014. *Electronic Transport in Ordered Silicon Nanocrystal Networks*. (Thesis) Albert Ludwigs University Freiburg, Germany.
- Güneş I., 2012. *Plazma ile Büyütülmüş Hidrojenlenmiş Amorf Silisyum Karbür İnce Filmlerin Fotolüminesans Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi) Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Türkiye.
- Halac E.B., Huck H., Oviedo C., Reinoso M.E., Benyacar M.A.R., 1999. Growth of Amorphous $\text{Si}_x\text{C}_{1-x}$ Thin Films Using a Methane-Silane High Energy Ion Beam. *Surface and Coatings technology* 122: 51-55.
- Han A., Chen H., Sun Z., Xu J., Du P., 2015. High Catalytic Activity for Water Oxidation Based on Nanostructured Nickel Phosphide Precursors. *Chemical Communications* 51: 11626-11629.
- Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy, 1979. Perkin Elmer Corporation, Physical Electronics Division.
- Ji R., Yoon S.F., Ahn J., Milne W.I., 1997. Some Effects of Phosphorus Doping in SiC:H Films Prepared Using ECR-CVD. *Materials Science and Engineering B* 48: 215-220.
- John S., Soukoulis C., Cohen M.H., Economou E.N., 1986. Theory of Electron Band Tails and the Urbach Optical-Absorption Edge. *Physical Review Letters* 57: 1777-1780.

- Kadas K., Ferenczy G. G., Kugler S., 1998. Theory of Dopant Pairs in Four-fold Coordinated Amorphous Semiconductors. *Journal of Non-Crystalline Solids* 227-230: 367-331.
- Kılıç I., 2006. Optical Characterization of Silicon Based Hydrogenated Amorphous Thin Films by UV-Visible and Infrared Measurements. (Yüksek Lisans Tezi) Orta Dogu Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Kovalev A.L., Wainstein D.L., Tetelbaum D.I., Hornig W., Kucherehko Y.N., 2004. Investigation of the Electronic Structure of the Phosphorus-Doped Si and SiO₂:Si Quantum Dots by XPS and HREELS Methods. *Surface and Interface Analysis* 36: 959-962.
- Leidich D., Linhart E., Niemann E., Grueninger H.W., Fischer R., Zeyfang R.R., 1983. The Incorporation of Phosphorus in Amorphous Silicon. *Journal of Non-Crystalline Solids* 59: 613-616.
- Manifacier J.C., Gasiot J., Fillard J.P., 1976. A Simple Method for the Determination of the Optical Constants n , k and the Thickness of a Weakly Absorbing Thin Film. *Journal of Physics E* 9.
- Mott N.F., 1969. Conduction in Non-Crystalline Materials. III. Localized States in a Pseudogap and Near Extremities of Conduction and Valence Bands. *Philosophical Magazine* 19: 835-852.
- Mott N.F., Davis E.A., 1979. *Electronic Processes in Non-Crystalline Materials* (2nd ed.). Oxford University Press. 32-36.
- O'Leary S.K., Zukotynski S., Perz J.M., 1995. Semiclassical Density-of-States and Optical-Absorption Analysis of Amorphous Semiconductors. *Physical Review B* 51: 4143-4149.
- O'Leary S.K. , Lim P.K., 1997. On Determining the Optical Gap Associated with an Amorphous Semiconductor: A Generalization of the Tauc Model. *Solid State Communications* 104: 17-21.
- Overhof H., Thomas P., 1989. *Electronic Transport in Hydrogenated Amorphous Semiconductors*.

- Peng L., Mu W., Xu J., Zhang X., Zhang W., Li W., Xu L., Chen K., 2016. Phosphorus Doping in Si Nanocrystals/SiO₂ Multilayers and Light Emission with Wavelength Compatible for Optical Telecommunication. *Scientific Report* 9; 6: 22888.
- Perego M., Bonafos C., Fanciulli M., 2010. Phosphorus Doping of Ultra-Small Silicon Nanocrystal. *Nanotechnology* 2: 6pp.
- Poortmans J., Arkhipov V., 2006. Thin Film Solar Cells Fabrication Characterization and Applications. John Wiley & Sons Ltd, England. 195-200.
- Robertson J., 1984. Doping and Gap States in Amorphous Silicon. *Journal of Physics C: Solid State Physics* 17: L349-L354.
- Robertson J., 1986. Amorphous Carbon. *Advances in Physics* 35: 317-374.
- Robertson J., O'Reilly E.P., 1987. Electronic and Atomic Structure of Amorphous Carbon. *Physical Review B* 35: 2946-2957.
- Robertson J., 1991. Preparation and Properties of Amorphous Carbon. *Non-Crystal Solids* 137&138: 825-830.
- Robertson J., 1992. The Electronic and Atomic Structure of Hydrogenated Amorphous Si-C Alloys. *Philosophical Magazine B* 66: 615-638.
- Robertson J., 1992. Properties of Diamond-Like Carbon. *Surface and Coating Technology* 50: 185-203.
- Sel K., 2007. The Effects of Carbon Content on the Properties of Plasma Deposited Amorphous Silicon Carbide Thin Films (Doktora Tezi). Orta Dogu Teknik Üniversitesi, Türkiye.
- Sel K., Akaoğlu B., Atilgan I., Katircioglu B., 2011. Effects of Tail States on the Conduction Mechanisms in Silicon Carbide Thin Films with High Carbon Content. *Solid-State Electronics* 57: 1-8.
- Sel K., Güneş. İ., 2012. Room Temperature Photoluminescence Spectrum Modeling of Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide Thin Films by a Joint Density of Tail States Approach and Its Application to Plasma Deposited Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide Thin Films. *Thin Solid Films* 520: 7062-7065.

- Sha Z.D., Wu X.M., Zhuge L.J., 2005. Structure and Photoluminescence Properties of SiC Films Synthesized by the RF-Magnetron Sputtering Technique. *Vacuum* 79: 250-254.
- Song C., Xu J., Chen G., Sun H., Liu Y., Li W., Xu L., Ma Z., Chen K., 2010. High-Conductive Nanocrystalline Silicon with Phosphorous and Boron Doping. *Applied Surface Science* 257: 1337-1341.
- Street R.A., 1982. Doping and the Fermi Energy in Amorphous Silicon. *American Physical Society* 49: 16.
- Street R.A., 1991. *Hydrogenated Amorphous Silicon*. Cambridge University Press, Cambridge 224-230.
- Sugimoto H., Fujii M., Imakita K., Hayashi S., Akamatsu K., 2013. Phosphorus and Boron Codoped Colloidal Silicon Nanocrystals with Inorganic Atomic Ligands. *The Journal of Physical Chemistry C* 117: 6807-6813.
- Swanepoel R., 1983. Determination of the Thickness and Optical Constants of Amorphous Silicon. *Journal of Physics E* 16: 12.
- Swanepoel R., 1984. Determination of Surface Roughness and Optical Constants of Inhomogeneous Amorphous Silicon Films. *Journal of Physics E* 17: 10.
- Tanaka K., Maruyama E., Shimada T., Okamoto H., 1999. *Amorphous Silicon*. John Wiley & Sons, New York.
- Teresa R., Albert M., Bartha J.W., Roessler T., Abramov A.S., Kosarev A.I., Kuduyarova V.K., Vinogradov., 2003. Alternative Phosphorus-Doped Amorphous Silicon Using Trimethylphosphine Diluted in Hydrogen. *Thin Solid Films* 427: 270-273.
- Tikhonravov A.V. ve Trubetskov M.K., 2002. Optichar Software.
<http://www.optilayer.com>, Version 4.13.
- Toneva A., Marinova T., Krastev V., 1999. XPS Investigation of a-Si:H Thin Films After Light Soaking. *Journal of Luminescence*, 80; 455.
- Vetter M., Voz C., Ferre R., Martin I., Orpella A., Puigdollers J., Andreu J., Alcubilla R., 2006. Electronic Properties of Intrinsic and Doped Amorphous Silicon Carbide Films. *Thin Solid Films* 511-512: 290-294.

- Wang Y.H., Lin J., Huan C.H.A., 2002. Multiphase Structure of Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide Thin Films. *Material Science and Engineering B95*: 43-50.
- Wu P.J., Wang Y.C., Chen I.C., 2013. Influence of Phosphorous Doping on Silicon Nanocrystal Formation in Silicon-Rich Silicon Nitride Films. *Journal Applied Physics D 46*: 6pp.
- Yoon S.F., 1997. Structural, Electrical and Optical Characterization of N- and P-Type SiC:H Films Deposited Using ECR-CVD. *Optical Materials 8*: 269-277.
- Yoon S.F., Ji R., Ahn J., 1997. Preparation of N-Type SiC:H Using ECR-CVD: Some Effects of Microcrystallite Silicon Formation Induced by Phosphorus Doping and Microwave Power.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Burak ALÇINKAYA

Doğum Yeri : Beyoğlu/İstanbul

Doğum Tarihi : 02/07/1989

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi/ Fizik Bölümü

Yüksek Lisans Öğrenimi : Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi/ Fizik Bölümü- Devam ediyor.

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce/orta seviye

BİLİMSEL FAALİYETLERİ

Bildiriler -Uluslararası -Ulusal

1. Sel K., Burak A., (2016). The Electrical Characterization of Plasma Deposited Phosphorus Doped N-Type Hydrogenated Amorphous Silicon Carbide Thin Films. International Organic Electronic Material Technologies Conference 17-19 May. Çanakkale/TURKEY

İLETİŞİM

E-posta Adresi : brkalc24@gmail.com