

**NANOSANIYE ATIMLI 1064 NM FİBER LAZER İLE
POLİKRİSTAL SİLİSYUM İNCE FİMLERİN ÜRETİLMESİ
VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**PRODUCTION OF POLYCRYSTALLINE SILICON THIN
FILMS BY NANOSECOND PULSED 1064 NM FIBER
LASER AND INVESTIGATING THEIR PROPERTIES**

HAYDAR SARPER SALMAN

DOÇ. DR. AKIN BACIOĞLU
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırlanmıştır

2016

HAYDAR SARPER SALMAN' in hazırladığı "**Nanosaniye Atımlı 1064 nm Fiber Lazer ile Polikristal Silisyum İnce Filmlerin Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi**" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **NANOTEKNOLOJİ VE NANTOTIP ANABİLİM DALI'** nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Recai ELLİALTIOĞLU

Başkan

.....

Doç. Dr. Akın BACIOĞLU

Danışman

.....

Doç. Dr. Alpan BEK

Üye

.....

Yrd. Doç. Dr. Bora KALKAN

Üye

.....

Yrd. Doç. Dr. Emre TAŞCI

Üye

.....

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Salih Bülent ALTEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

12/05/2016

HAYDAR SARPER SALMAN

ÖZET

NANOSANİYE ATIMLI 1064 NM FİBER LAZER İLE POLİKRİSTAL SİLİSYUM İNCE FİMLERİN ÜRETİLMESİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Haydar Sarper SALMAN

Yüksek Lisans, Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Akın BACIOĞLU

Mayıs 2016, 78 sayfa

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) tek katman ince film örnekler, plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD) sisteminde SiH₄ gazının 13,56 MHz RF plazması kullanılarak üretilmiştir. RF gücü 15 W, reaktöre SiH₄ akış hızı 10 sccm, vakum kazan basıncı 200 mTorr ve alttaban sıcaklığı 300 °C değerlerinde olmak üzere deney boyunca sabit tutulmuştur. Tüm örnekler cam ve kristal silisyum alttabanlar üzerine, eş zamanlı olarak, büyütülmüştür. Lazer ile işleme gerçekleştirilmeden önce, a-Si:H ince film örneklerin kalınlıkları, iki farklı teknikle; optik geçirgenlik kullanılarak ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile belirlenmiştir.

PECVD sisteminde üretilen örnekler, 1064 nm tepe dalgaboyunda çalışan nanosaniye atımlı, iterbiyum katkılı fiber lazer etkileşimli kristalizasyon işlemi ile işlenmiştir. Lazer ortalama optik gücü, lazer tekrar frekansı, lazer tarama hızı, lazer atımlarının üste üste binme oranı ve odaklanmış lazer nokta çapı gibi parametreler değiştirilerek örnekler işlenmiştir. İşlenen örneklerin yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenerek, lazer etkileşimli kristalizasyon

uygulanacak yeni örnekler için işleme parametrelerinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

Lazer etkileşimli kristalize edilen örneklerin yüzeyde oluşabilecek oksit katmanının varlığının belirlenebilmesi amacıyla Fourier dönüşümlü kızılaltı spektroskopisi (FTIR) kullanılmıştır. FTIR deneylerinden elde edilen soğurma katsayısı spektrumundan, örneklerin lazer ile işlenmesinden sonra içerdiği atomik oksijen konsantrasyonu (%[O] at.) hesaplanmıştır. Oksijen konsantrasyonunun yaklaşık at. % 2 – 4 aralığında değiştiği gözlenmiştir.

Raman saçılması deneyi ile lazer etkileşimli kristalize edilen örneklerin kristalizasyon oranları hesaplanmıştır. Bulunan kristalizasyon oranlarının, lazer ortalama optik gücü, lazer tekrar frekansı, lazer tarama hızı ve lazer atımlarının üst üste binme oranı ile nasıl değiştiği irdelenmiştir. Yapılan analizde değişen parametrelere göre kristalizasyon oranının $X_c = \% 16 - 99$ arasında değiştiği ve Raman kayması tepe noktalarının, bu değişime bağlı olarak, sırasıyla, $\sim 510 - 520 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayıları arasında kaydığı saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Lazer etkileşimli kristalizasyon, nanosaniye atımlı lazer, 1064 nm atımlı lazer, iterbium katkılı fiber lazer, hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H), lazer – malzeme etkileşimi.

ABSTRACT

PRODUCTION OF POLYCRISTALLINE SILICON THIN FILMS BY NANOSECOND PULSED 1064 NM FIBER LASER AND INVESTIGATING THEIR PROPERTIES

Haydar Sarper SALMAN

**Master of Science, Department of Nanotechnology and
Nanomedicine**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Akın BACIOĞLU

May 2016, 78 pages

Hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) samples were grown in a plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) system, by using 13.56 MHz RF plasma of SiH₄ gas. The deposition parameters were kept constant as RF power of 15 W, SiH₄ flow rate of 10 sccm, total chamber pressure of 200 mTorr and substrate temperature of 300 °C. All samples were produced on glass and monocrystalline silicon substrates at the same deposition. Before laser induced crystallization, the thicknesses of the samples were determined by two techniques: optical transmittance and atomic force microscopy (AFM).

The samples produced in PECVD system were processed by nanosecond pulsed, ytterbium doped fiber laser operating at a peak wavelength of 1064 nm. Laser crystallized samples were prepared at different laser parameters such as, average power, laser repetition rate, laser scanning speed, pulse overlap and focused laser spot size. The surfaces of the processed samples were monitored by

scanning electron microscopy (SEM). The images were used as feedback to choose optimum laser parameters in processing new samples.

To evaluate the presence of oxide layer created by ambient oxygen during laser processing, fourier transformed infrared spectroscopy (FTIR) were used. The atomic oxygen concentration ([O]% at.) was calculated by using the IR absorption spectra as ranging from 2 to 4 at. %.

The crystal phase ratios of the laser-processed samples were calculated by Raman Scattering spectra. The dependence of the crystal ratio on the laser parameters, such as average laser power, laser repetition rate, laser scanning speed and amount of pulse overlaps, was examined. The crystal ratios were calculated to be between $X_c = 16$ and 99 %, depending on the laser parameters. Also the peak positions of Raman shifts of the scattering from crystal phase were observed to shift from 510 to 520 cm^{-1} , respectively.

Keywords: Laser induced crystallization, nanosecond pulsed laser, 1064 nm pulsed laser, ytterbium doped fiber laser, hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H), laser – material interaction.

TEŞEKKÜR

Çıktığım bu uzun yolculuğun her anında güven duyduğum, sadece yüksek lisans tezinde değil, bana hayatımın akışında da yol gösteren, beni geliştiren, motive eden ve bir çok konuda aydınlatan sayın hocam Doç. Dr. Akın Bacıoğluna teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması nedeniyle aksayan işlerimde bana destek olan tüm FiberLAST çalışanlarına minnettarım.

Tez kapsamında, yapılan deneyler için kullandığım fiber lazer laboratuvar desteğinden ve harcadığım zamandan dolayı yarım kalan işlerimde bana her zaman yardımcı olan ayrıca tecrübelerinden her alanda yararlandığım FiberLAST A.Ş. genel müdürü sayın Koray Eken' e teşekkür ederim.

Her problemde yanına koştüğüm, tez çalışmamda bana olağanüstü katkıları olan, çok şey borçlu olduğum üstadım, arkadaşım, abim Mahmut Emre Yağcı'ya teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ayrıca SEM görüntülerinin alınmasındaki yardımlarından dolayı Parviz Elahi' ye ve Raman saçılması deneylerindeki yardımlarından dolayı Makbule Terlemezoğlu' na teşekkür ederim.

Bana her zaman yanımda olduklarını hissettiren, sıkıntılarımı birlikte göğüslediğim, beni başarıya ulaştıran yolda büyük katkıları olan canımdan çok sevdiğim annem Gülseren Salman'a, babam Sinan Salman'a, kardeşim Sinem Salman'a ve sevgili kız arkadaşım Veronika Ciernikova'ya çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. TEMEL BİLGİLER	7
2.1. Tarihsel Altyapı	7
2.2. Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyumun Özellikleri	8
2.2.1. Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyumun Yapısı	8
2.2.2. Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyumun Durum Yoğunluğu	10
2.2.3. Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyumun Optik Özellikleri	11
2.2.4. Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyumun Isıl Özellikleri	12
2.3. Kristalizasyon İşlemi	12
2.4. Yüzey pürüzlülüğü	14
2.5. PECVD (Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme)	16
2.5.1. PECVD Avantajları	16
2.5.2. PECVD Tekniğinin Kısıtlamaları	17
3. LAZER MALZEME ETKİLEŞİMİ	18
3.1. Lazer – malzeme etkileşimi	18
3.1.1. Fiziksel İşleyiş	18
3.1.2. Isı Aktarımı	22

3.1.3. Erime.....	24
3.1.4. Buharlaşma.....	25
3.1.5. Plazma Oluşumu.....	26
3.1.6. Ablasyon	27
3.2. Önemli Lazer Parametreleri	29
4. DENEYSEL TEKNİKLER ve ÖLÇÜM DÜZENEKLERİ	31
4.1. Radyo Frekansı Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi (RF – PECVD).....	31
4.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	33
4.3. Optik Geçirgenlik.....	35
4.4. Fourier Dönüşümlü Kızılaltı (FTIR) Spektroskopisi	37
4.5. Raman Spektroskopisi	39
4.6. Lazer ile Kristalizasyon	42
5. DENEYSEL VERİLER VE TARTIşMA.....	48
5.1. PECVD - Örnek Büyütme.....	48
5.2. Optik Geçirgenlik.....	48
5.3. Lazer Kristalizasyon	50
5.4. Raman Saçılması.....	53
5.5. FTIR	58
5.6. Taramalı Elektron Mikroskobu	60
6. SONUÇLAR	65
KAYNAKLAR.....	68
ÖZGEÇMİş	74
EKLER	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2-1 Amorf ve kristal silisyum ağ yapıları	9
Şekil 2-2 Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum için standart durum yoğunluğu	10
Şekil 2-3 Lazer akısına karşılık tanecik büyüklüğü	13
Şekil 2-4 Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun farklı lazer şiddetlerine karşı tepkisi	13
Şekil 2-5 Lazer kristalizasyon sonucu tepecik oluşumu.....	15
Şekil 3-1 Lazerin malzeme üzerinde yaratabileceği etkiler	19
Şekil 3-2 Lazerin malzeme üzerindeki etkisi a)Isı aktarımı, b)Erime, c)Buharlaşma, d)Plazma Oluşumu, e)Ablasyon	21
Şekil 3-3 Lazerin farklı zaman skalalarında malzeme ile etkileşimi a) Başlangıç durumu sıcaklık homojen, T_0 , b) Lazer enerji aktarımı, yüzey sıcaklığı T_s başlangıç sıcaklığı T_0 'dan daha büyük c) Lazer kapandıktan sonra malzemenin soğuması.($t_p \geq t$ lazer malzeme etkileşiminin olduğunu, $t > t_p$ lazer malzeme etkileşiminin olmadığını belirtir.)	22
Şekil 3-4 Atımlı lazer uygulamaları için eriyik derinliği a) Sabit atım uzunlukları, b) Sabit lazer akısı [79]	25
Şekil 3-5 Lazer temelli iyonizasyon işlemi, a) Çığ (avalanche) iyonizasyon, b) Çoklu foton soğurma iyonizasyon.....	27
Şekil 3-6 Atımların çakışma durumu.....	30
Şekil 4-1 Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme cihaz şematiği	32
Şekil 4-2 Taramalı elektron mikroskobu şematik gösterimi	34
Şekil 4-3 a-Si:H ince film için dalgaboyuna karşılık optik geçirgenlik spektrumu [81]	35
Şekil 4-4 Optik geçirgenlik deney düzeneği.....	37
Şekil 4-5 Fourier dönüşümlü kızılaltı soğurma deney düzeneği	39

Şekil 4-6 Raman saçılması deneyi için farklı titreşim frekanslarında seviye durumları	40
Şekil 4-7 Raman saçılması deneyinde kullanılan sistemin şematik gösterimi	41
Şekil 4-8 Lazer ile kristalizasyon deney düzeneği	42
Şekil 4-9 Nanomark 20 lazer modülünün şematik gösterimi.....	43
Şekil 4-10 163 mm' lik odak uzunluğuna sahip mercek ile, farklı tarama hızı değerleri için tekrar frekansına bağlı, atımların üst üste binme oranı	44
Şekil 4-11 100 kHz tekrar frekansı ve 163 mm' lik objektif kullanılarak alınmış atımlar arası stabilizasyon a) 3800 mm/s b) 2200 mm/s [88]	45
Şekil 4-12 Lazer Spektrumu (ışık şiddeti normalize edilmiştir.)	46
Şekil 4-13 Şekil Işın kalitesi profili a) M^2 ölçümü $\sim 1,1$ b) Işın profili [88]	47
Şekil 5-1 PECVD sistemi ile büyütülen örneğin optik geçirgenlik spektrumu.....	49
Şekil 5-2 Tauc optik aralığı (Kırmızı çizgi, $(h\nu)$ 'ye karşılık $(\alpha h\nu)^{1/2}$ için çizdirilen eğri ve siyah kesikli çizgi ise doğrusal uyumlama için çizdirilen egridir.)	50
Şekil 5-3 Lazer ortalama optik çıkış gücü optimizasyonu için kullanılan lazer düzeneğinin şematik gösterimi	51
Şekil 5-4 Farklı objektif ve tekrar frekansları için lazer ortalama gücüne karşı lazer güç yoğunluğu grafiği	53
Şekil 5-5 Farklı lazer parametreleri altında işlem görmüş ince filmlerin Raman saçılma grafiği (sinyal şiddetleri normalize haldedir)(Ok izleme kolaylığı ve kayma yönünü belirtmek için koyulmuştur.)	54
Şekil 5-6 Tez çalışması sırasında üretilen ince filmin 56 parametre nolu lazer parametresi ile işlenmesinden sonra elde edilen raman saçılma spektrumu. Şekilde çoklu gauss fonksyonu atama yöntemi kullanılmıştır. Siyah çizgiler spektrumdan gelen veri, yeşil çizgiler çoklu gauss fonksyonuna ait eğrileri ve kırmızı çizgiler bu eğrilerin kesişimini belirtir (çoklu gauss fonksyonu için tepe noktaları 300, 400, 489, 529 ve 640 cm^{-1} olacak şekilde 5 bant seçilmiştir).....	55
Şekil 5-7 Lazer gücünün değişimine bağlı olarak raman tepe noktalarının değişimi. (Kırmızı eğri izleme kolaylığı için ve kristal boyutlarının küçük olduğu örneklere ait kaymalar, siyah kesikli çizgi ile işaretlenmiştir.).....	56

Şekil 5-8 Kristal boyutlarına bağlı olarak raman kayma miktarı [77]	56
Şekil 5-9 PN 44 lazer parametresi için Raman kayması grafiği	58
Şekil 5-10 PN 10-12-22-50 lazer parametreleri ile işlenen örneklerin kızılaltı soğurma spektrumu. 1050 – 1150 cm^{-1} dalgasayıları arası Si – O – Si gerilme kipleri. (Verilen küçük grafik, ana grafikten alınan PN 50 parametresinin yumuşatılmamış halidir.)	60
Şekil 5-11 Lazer ile işlenmiş örnek (PN56) (Görüntü, Raman spektrum ölçümü sırasında, cihazın bünyesinde bulunan optik mikroskop ile alınmıştır.)	61
Şekil 5-12 Lazer ile işlenmiş örnek (PN 44)(100 x optik mikroskop ile alınmıştır). 61	
Şekil 5-13 Lazer ile işlenmiş örnek (PN 57) (SEM ile alınmıştır)(SLG, süper yanal büyümedir.)	62
Şekil 5-14 Lazer ile işlenmiş örnek (PN 58 - atımların hızları optimize değil) (SEM ile alınmıştır).....	62
Şekil 5-15 Lazer ile işlenmiş örnek (PN 56 - atımlar arası stabilite) (SEM ile alınmıştır)	63
Şekil 5-16 Lazer ile işlenmiş örnek (kristalizasyon görüntüsü, PN 56 parametresi ile 0.05 mm aralıklar olacak şekilde dikdörtgen şekil taranmıştır) (SEM ile alınmıştır)	63

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1 Kristalizasyon için optimum olarak belirlenen lazer parametreleri (163 mm' lik mercek kullanılmıştır)	52
Çizelge 5.2 Farklı lazer parametrelerine göre kristalinite oranı.....	57
Çizelge 5.3 a-Si:H ve a-SiOx:H örneklerde görülen bazı bağların titreşim modları.	59



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E_u	Urbach Enerjisi
Δk	Dalga Sayısındaki Belirsizlik
Δx	Saçılma Uzunluğu
N	Durum Yoğunluğu
k	Dalga Sayısı
F	Lorentz Kuvveti
c	Işık Hızı
E	Elektrik Alan
H	Manyetik Alan
e	Elektronun Yüğü
μ	Soğurma Katsayısı
I_0	Giricilik Derinliği
A	Soğurma
R	Yansıtma
n	Kırma İndisi
T	Sıcaklık
t	Zaman
T_0	Başlangıç Sıcaklığı
T_s	Yüzey Sıcaklığı
E_{abs}	Malzeme Tarafından Soğurulan Enerji
H_f	Füzyon Sıcaklığı
P	Malzeme Yoğunluğu
V	Malzeme Hacmi

C_p	Özgöl Isı
T_m	Erime Sıcaklığı
L_v	Buharlaşıma İç Sıcaklığı
T_b	Buharlaşıma Sıcaklığı
E_i	İyonizasyon Enerjisi
g_i	İyonlar için Seviye Dejenerasyonu
g_a	Atom ve Moleküller için Seviye Dejenerasyonu
a	Termal Yayınlılık
P_{avg}	Lazer Ortalama Gücü
f_r	Lazer Tekrar Frekansı
E_p	Lazer Atım Enerjisi
λ	Dalgaboyu
ν	Foton Frekansı
M^2	Işın Kalitesi
E_g^{Tauc}	Tauc Band Aralıkları
X_c	Kristalizasyon Oranı

Kısaltmalar

Si	Silisyum
LCD	Liquid Crystal Display
a-Si:H	Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyum
CdSe	Kadmiyum Selenit
TFT	İnce Film Transistör
c-Si	Mono Kristal Silisyum
poly-Si	Polikristal Silisyum

a-Si	Amorf Silisyum
CRN	Continous Random Network
ac	Alternatif Akım
dc	Doğru Akım
RF	Radyo Frekansı
MOPA	Master Oscillator Power Amplifier
SiH ₄	Silan
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
InGaAs	İndiyum Galyum Arsenit
SiO ₂	Silisyum Dioksit
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılaltı
PN	Parametre Numarası
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu

1. GİRİŞ

Silisyum, oksijenden sonra dünya üzerinde bulunan en yaygın elementtir [1]. Bugünün elektronik teknolojisindeki yaygın kullanım alanlarının dışında, silisyum ve türevi malzemeler günlük yaşamımızda camdan pencereye, betondan sentetik malzemelere kadar kendilerine geniş bir rol bulmaktadırlar.

Elektronik sektöründe özellikle mikroelektronik, optoelektronik ve fotovoltaiik uygulamalarında silisyum önemli rol oynamaktadır. Keşfedilmesinden günümüze silisyum üzerine yapılan çalışmalar büyüyükerek artmaktadır. Bunun nedeni de uygulama alanlarının genişliği, üzerine yakın zamanda artarak süren silisyum oksit yapısının varlığı ve silisyum teknolojisinin bizzat kendisinden kaynaklanmaktadır [2].

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H), silisyum allotroplarına oranla daha kolay üretilebilir olanıdır. Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (plazma enhanced chemical vapor deposition – PECVD) sistemi ile 300 °C sıcaklıkların altındaki sıcaklıklarda, a-Si:H ince filmler üretilebilmektedir. Bu da hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun esneyebilir uygulama alanlarında kullanılan, esneyebilir ekranlar ya da esneyebilir güneş pilleri gibi, plastik alttabanlar üzerine büyütülebilmesini mümkün kılar [3].

Yarıiletkenlerin performansını etkileyen en önemli faktörlerin başında katkılama işlemi gelmektedir. İlk katkılama işlemi 1950 yılında J.R.Woodyard tarafından rapor edilmiştir [4]. Katkılama işlemi basitçe grup 4 elementlerine (örneğin Si için) üç değerli ya da beş değerli elementlerin safsızlık düzeyinde eklenmesidir. Bu işlem yarıiletkenin p-tipi mi yoksa n-tipi mi olacağına karar verir. P tipi yarıiletkenler üç değerlikli elementler ile katkılama sonucu oluşup çoğunluk taşıyıcılar hollerdir. N tipi yarıiletkenler ise beş değerlikli elementler ile katkılama sonucu oluşurlar ve çoğunluk taşıyıcılar elektronlardır.

Amorf silisyum (a-Si), hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun (a-Si:H) üretiminden önce, fiziksel buhar biriktirme ile büyütüldüğünden, oldukça fazla kopuk bağ konsantrasyonuna sahiptir. Bu nedenle katkılama ile Fermi enerjisinin konumunu değiştirmek neredeyse olanaksızdır. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun ilk katkılama işlemi, 1976 yılında Dundee Üniversitesi'nde çalışan Spear ve

LeComber tarafından, SiH_4 gazının radyo frekansında uyarılmasıyla elde edilen plazmasını bir alttaban üzerine biriktirmesi ile başarılmıştır [5]. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum, SiH_4 gazına ek olarak ya diboran (B_2H_6) ya da fosfin (PH_3) gazlarının reaktöre akıtılmasıyla, sırasıyla, p-tipi ve n-tipi katkılanabilir. Bu buluştan sonra hidrojenlendirilmiş amorf silisyum ince film transistörler (thin film transistors-TFT) ve fotovoltaiik göze teknolojisine girmişlerdir [6]. Bu teknoloji ucuz ve basit üretilebilen yapıları sayesinde pazardaki bu alanı kapatmıştır [7].

1988 yılında Eric Mazur yönetimindeki Harvard'lı bir grup silisyum malzemenin içerisinde hekzaflorid gazı bulunan kazanlarda ultrahızlı lazerler ile ışınlanması sonucunda çok basit bir yolla siyah silisyum (black silicon) elde etmişlerdir [8]. Bu uygulamadan önce siyah silisyum (black silicon) reaktif bir işlem olan iyon aşındırması yoluyla elde edilmekteydi ve bu işlem sonucu siyah silisyum yapısı, yüzey üzerinde iğne biçimlerinde oluşmaktaydı. Fakat E. Mazur' un grubu ultrahızlı lazerler ile yapıyı konik biçimlerde elde etmişlerdir. Bu çalışma sayesinde siyah silisyum, parlatılmış yüzeyli silisyuma göre ışığı daha geniş spektrumda soğurmaktadır [9]. Bu çalışma ışığında gelişen teknolojiler görüntü sensörleri, termal görüntüleme, güneş hücreleri ve terahertz teknolojisi olarak sıralanabilir[10-12].

Polikristal silisyumu (poly-Si) düşük işlem sıcaklıklarında üretebilmek için belirli kristalizasyon yöntemlerinin uygulanması gerekmektedir. Polikristal üretimi için başlangıç malzemesi olarak a-Si ve a-Si:H seçilebilir. Bunun nedeni örneklerin düşük sıcaklıklarda plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD), düşük-basınçlı kimyasal buhar biriktirme (LPCVD) ve sıçratma (sputtering) gibi bir çok farklı teknikle üretilebilmeleridir [13-15]. Amorf silisyumun kristalizasyonu için uzun zamandır kullanılan alışlagelmiş yöntemlerin başında katı faz kristalizasyonu (solid phase crystallization – SPC) [16, 17] ve metal etkileşimli kristalizasyon (metal induced crystallization – MIC) gelir [18]. SPC yöntemi, a-Si' nin 600 °C sıcaklık değerlerinde izotermal tavlınması mantığına dayanmaktadır. MIC yöntemi ise amorf silisyumun belirli metaller ile etkileşimleri sonucu, metal-silisyum bileşiklerinin ötektik sıcaklıklarının altındaki sıcaklıklarda amorf fazdan, kristal faza geçmesi temeline dayanır [19]. SPC ve MIC yöntemleri farklı bir çok alttaban üzerine poli-Si ince film büyütülmesi için kullanılabilir [17, 20, 21]. Buna rağmen SPC yönteminin uzun süren işlem zamanları ve büyük tanecik dislokasyon

yoğunlukları gibi kısıtlamaları vardır [22, 23]. Öte yandan, MIC tekniğinde ise aygıt üretimi sırasında büyük sorunlar vardır.

Geleneksel kristalizasyon işlemlerinin üst paragrafta anlatılan kısıtlarından dolayı, lazer ile kristalizasyon işlemi son zamanlarda ön plana çıkmıştır [24]. Özellikle fiber lazerlerin kompakt yapısı, yüksek demet kalitesi, elektro-optik verimliliklerinin yüksek olması, bakım gerektirmemesi gibi özellikleri sayesinde endüstriyel ve akademik çalışmalarda kendisine büyük yer bulmaktadır. Fiber teknolojisinin gelişimi telekomünikasyon alanındaki gelişmelerle başlamıştır. Telegrafın 1837'de Samuel Morse tarafından icadı ve telefonun 1878'de Alexander Graham Bell tarafından icadı iletişim alanındaki gelişmelerin hızla artmasına önayak olmuştur. 1878 yılında James C. Maxwell ve 1888 yılında Heinrich Hertz'in radyo dalgaları alanındaki çalışmaları sayesinde 1895 yılında radyo Guglielmo Marconi tarafından icat edilmiştir. İlk radyolar için band genişliği 15 kHz seviyelerinde iken günümüzde bu değer birkaç yüz MHz seviyelerine ulaşmıştır. Bu seviyelerin belli değerlere limitlenmiş olmasının nedeni, sinyallerin boşlukta yayılmaları iletişim için güvenilir ve hızlı bağlantılar sağlayamamalarındandır. Buna çözüm olarak ışığın (ya da herhangi bir bilginin) bir dalga kılavuzu aracılığıyla taşınımı ortaya atılmış fakat bu çözümün geliştirilmesi uzun yıllar almıştır. Işığın bir dalga kılavuzunda taşınımı toplam iç yansıma prensibine dayanmaktadır. İlk optik fiberler 1920'li yıllarda üretilmeye başlanmıştır [25-27]. Fakat bu fiberlerin kılıfsız olması, ışığın iletilmesinde zorluklar ortaya çıkarmıştır. Silika kılıflı fiberlerin 1950' li yıllardan sonra üretilmeye başlanmasından sonra [28, 29] ışığın fiberler ile iletimi geliştiğinden fiber lazer teknolojisi ivmelenmiştir. Kılıflı fiberlerin üretimi fiber performansını kayda değer bir biçimde arttırmış ve bilim insanlarının fiber optik teknolojisine kaymasına neden olmuştur. İlk fiber lazer kavitesi 1961 yılında neodim 3+ katkılı fiberler ile kurulmuştur [30]. Sonrasında, 1960'lı yıllar, sinyal ve pompa küçük çaplı fiber çekirdeğinden geçirilerek lazerler ve yükselteçleri için gereken pompa değerinin azaltılabileceği ispat edilmiştir [31, 32]. Fakat dönemin bilim insanları fiberler için pompa olarak lamba kaynağı kullandıklarından, lazer diyot pompaların gelişmesi onlarca yıllar almıştır. 1962 yılında geliştirilen ilk iterbiyum fiber lazer [33] dönüşüm verimi ve o yıllarda göreceli olarak yüksek güçlerde sorun çıkartmasından dolayı neodime göre daha az ilgi çekici hale gelmiştir. 1970'li yıllarda geliştirilen ve kayıp değerleri 20 dB/km' den az olan

fiberler telekomünikasyon uygulamalarının fiberler ile ilerlemesi yönüne kaymasını sağlamıştır [34]. Ayrıca oda sıcaklığında çalışabilir 1970'li yıllarda geliştirilen Nd-katkılı ilk fiber lazerler ve yükselteçleri için umut verici olmuştur [35]. Geliştirilen ve yapılan bu kadar araştırmaya rağmen o yıllarda fiberler düşük dönüşüm verimleriyle çalışmaktaydılar. Fiber kılıf teknolojisi üzerine yapılan araştırmalar ve farklı katkı malzemelerinin kullanılması sayesinde bu verim seviyeleri yukarılara çekilmiştir. Lazer diyot pompaların geliştirilmesi ve düşük kayıplı nadir-toprak elementlerinin 1970'li yılların sonunda, 1550 nm dalgaboyunda çalışan lazerlerin kullanılmasıyla, ilk erbiyum katkılı fiber yükselteçler (Erbium doped fiber amplifiers - EDFA) geliştirilmiştir [36, 37].

Master-oscillator-power-amplifier (ana osilatör yükselteçleri) dizaynı ile kurulan lazer sistemleri 1980'li yıllarda oluşturulmaya başlanmıştır. Bu sistemlerde yüksek güce çıkılmasındaki ana sorun katı hal diyotların parlaklık (brightness) limiti ile alakalıdır şöyle ki o yıllarda sinyal gücünü yükseltmek için fiber çekirdeğine aktarılabilen pompa gücü miktarı 1 W'lar seviyesindeydi. Bu sorunu çözmek için çift kaplamalı fiber dizaynı [38] yapılmıştır. Çift kaplamalı fiber dizaynı sayesinde sinyal çekirdekten ilerlerken yüksek güçlü pompa kaplama boyunca hareketi ile sinyali yükseltebilmiştir. Günümüzde fiber lazerler tepe gücü olarak 10 kW değerinin üstüne çıkmayı başarmış ve her sene $\sim 1,7$ kat [39] ile bu değeri arttırmaktadır. Demet kalitesi, sağlam yapı ve optik verimlilik fiber lazerlerin markette dominant olmasını sağlayan faktörlerdir.

Lazer bilimi, tepe gücü, ortalama güç, atım enerjisi ve dalga boyu karakterizasyonu gibi önemli özelliklerini, fiber optik elemanların günbegün gelişmesiyle arttırmakta ve fiber lazerler günümüzdeki en ileri lazer teknolojisi olarak kabul edilmektedir. En son gelişmelere göre kaynaşık silisyum fiberler için kayıp, 1550 nm dalga boyunda 0,15 dB/km seviyelerine kadar indirilebilmiştir. Değişik fiber tipleri, farklı katkı konsantrasyonları, farklı fiber geometrileri ve yüksek güçlü diyot fiberlerin yanı sıra yeni ışın birleştirme teknikleri ile 35 fs atım uzunluğuna sahip lazer sistemleri geliştirilebilmektedir [40]. Tarihinin başlarında sadece belli laboratuvarlarda kullanılabilen fiber lazerler, yüksek verimlilik, yüksek demet kalitesi, yüksek parlaklık, düşük gürültü, yüksek güç, düşük maliyet, düşük tamir gereksinimi, yüksek kullanım süresi ve kompakt yapısı sayesinde endüstri tarafından da büyük rağbet görmektedir. Fiber lazer sistemleri çok yönlü kullanım

alanları sayesinde hemen her sektörde kendine yer bulabilmektedir. Fiber lazerler büyük bir metal bloğun kesilmesi ya da askeri operasyonlarda işaretleyici olarak kullanılabilmesinin yanı sıra göz ameliyatları ya da güneş panellerinin üretimi için kullanılabilir. Yeni optik elemanların geliştirilmesi ve teknolojinin gelişmesi ile fiber lazerler kendilerine sektörde daha fazla yer edineceklerdir. Uygulama alanına göre birden çok farklı fiber lazer mimarisi olsa da fiber lazer yükselteçleri başat olarak MOPA mimarisine dayanmaktadır.

Lazer işlemi için teorik arkaplanı oluşturan çalışmalar ilk defa Einstein tarafından 1917’ de yapılmıştır [41]. Optik rejimde uyarılmış (stimulated) yayılım (emission) işlemi üzerine çok çalışma yapılmış olsa da ilk lazer 1960 yılında Huges Araştırma Merkezinde Theodore Maiman tarafından üretilmiştir [42]. Bu lazer, bir lamba ile uyarılan yakut lazerdir. Aynı yılın aralık ayında ilk sürekli dalga lazerler (continuous wave) Bell Telefon Laboratuvarında He-Ne gaz karışımının elektriksel boşalımı sayesinde elde edilmiştir [43].

İlerleyen yıllarda Animisow [44] lazer ile etkileşen malzemelerin sıcaklık profillerini çıkartmış ve sonrasında malzeme işleme üzerine olan çalışmalar hız kazanmıştır [45, 46]. Lazer ile etkileşimden ortaya çıkan malzeme üzerindeki ısınma ve soğuma değişimleri Anthony ve Cline tarafından çalışılmıştır [47]. Silisyum üzerine lazer ile çalışmalar ilk defa 1980’lerin ortalarında Sony Araştırma Merkezi’nde Usui’ nin grubu tarafından yürütülmüştür. Yapılan çalışmalarda incefilm ve alttaban arasındaki ısı transferi, yüzey morfolojisi üzerindeki değişimler, poli-silisyumun amorf hale getirilmesi, yeniden kristalizasyon ve en önemlisi düşük sıcaklık altında düşük dirençli poli-silisyumun üretilebileceğinin gösterilmesidir [48, 49]. Lazer ile yapılan çalışmaların çoğunda silisyum üzerindeki etkilerinden dolayı uyarılmış dimer (excimer) lazer kullanılmıştır.

Asal gaz karışımlarının, uyarılmış düzeyden temel düzeye geçişleri sırasında yaptıkları lüminesans spektrumunda ışınimleri N.G. Basov tarafından 1970 yılında rapor edilmiştir [50]. Buna rağmen asal gaz karışımlarından ilk defa lazer etkisinin alınması bundan 5 yıl sonra 1975 yılında olacaktır [51]. 1977 yılında ilk endüstriyel uyarılmış dimer lazerler Lambda Physik tarafından üretilmiş ve halen çok geniş alanlarda kullanımları sürmektedir.

Uyarılmış dimer lazerleri asal gaz halojenleri barındırır. Bu karışım elektriksel boşalım ile uyarılırsa, karışım içerisinde sözde (pseudo) bir molekül oluşur. Bu moleküllerin uyarılmış düzeydeki miktarı, temel düzeydeki miktardan fazla hale gelirse nüfus terslenmesi (population inversion) olayı meydana gelir ve moleküller uyarılmış düzeyden temel enerji düzeylerine geçişleri sırasında uyarılmış yayınım yaparlar. Bu yayınım Uyarılmış dimer lazerlerde morötesi bölgede gerçekleşir.

Bu tez kapsamında, PECVD yöntemi ile p-tipi tek-kristal silisyum ve cam üzerine, a-Si:H ince film örnekler büyütülmüştür. Örnek üretimi için standart tarife kullanılmıştır: 10 sccm silan (SiH_4) akışı, 15 W RF gücü, 200 mTorr reaktör basıncı ve 300 °C alttaban sıcaklığı deney sonuna kadar sabit tutulmuştur. Optik geçirgenlik deneyleri yapılarak, üretilen ince filmlerin kalınlık, dalgaboyuna bağlı kırma indisi ve Tauc optik bant aralığı hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplanan kalınlıkların karşılaştırılması için, aynı zamanda AFM (atomic force microscope) ile de kalınlık ölçümü de yapılmıştır.

a-Si:H örneğin üretimi sonrasında, örnekler odaklanmış nano saniye atımlı 1064 nm fiber lazer demeti ile işlenmiştir. Üretilen örnekler, standart a-Si:H ince filmlerin mobilite aralığı ($\sim 1,7$ eV), 1064 nm'lik ($\sim 1,17$ eV) lazer ışınımını soğurmak için çok geniştir. Bu tez kapsamında, literatürden erişebildiğimiz kadarıyla, ilk kez 1064 nm dalgaboyunda lazer işlemesi ile, a-Si:H kristalizasyonu yapılmıştır. Uygun parametrelerin seçilebilmesi için ön deneyler yapılmıştır. Bu amaçla, lazer ortalama optik gücü, lazer atım enerjisi, lazer tekrar frekansı ve lazer atımlarının üst üste binme oranları gibi parametreler geniş bir aralıkta taranarak, örneklerin eşik değerleri belirlenmiştir. Örneklerin eşik değerlerinin belirlenebilmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM - scanning electron microscope) ile görüntüler alınmıştır. Bu görüntüler kullanılarak uygun parametreler belirlenmiş ve bu parametreler ile örnekler yeniden işlenmiştir. İşlenen örnekler üzerinde, oluşabilecek SiO_2 katmanlarının belirlenmesi için FTIR (Fourier dönüşümlü kızılaltı) soğurma spektroskopisi ve kristalinite oranlarının hesaplanması için Raman saçılması deneyleri yapılmıştır.

2. TEMEL BİLGİLER

Bu bölümde hidrojenlendirilmiş amorf silisyum ve özellikleri, ince film büyütme teknikleri ve lazer ile kristalleştirme özellikleri incelenecektir. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun yapısal özelliklerinden önce kısa geçmişi, durum yoğunluğu, elektronik ve optik karakteristikleri verilecektir. Sonrasında kullanılacak olan Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme yöntemi anlatılacaktır. Son kısımda ise lazer ile kristalleştirme yöntemlerinden söz edilecektir. Bu bölüm tarihsel altyapı, sonrasında lazer sistemi ve özellikleri en son olarak da örnek eldesi ve işlemlerini kapsamaktadır.

2.1. Tarihsel Altyapı

1824 yılında, amorf yapıdaki saf silisyum malzeme Berzelius tarafından hazırlanmıştır [52]. Deville' in malzemeyi kristal hale getirmesi 30 yılını almıştır, hidrojenlendirilmiş amorf silisyum yapı 1854 yılında kristalleştirilmiştir [53]. Sonraki izleyen 100 yıl boyunca bilim adamları kristal silisyum malzemenin özelliklerini incelemişlerdir. 1950 ve 1960'lı yıllarda amorf yarıiletken konusu popüler hale gelmiştir. Fakat araştırılan konular kalkojenitler ve içerisinde kükürt, selenyum ve tellür bulunan malzemeler üzerine yoğunlaştırılmıştır. Silan gazı kullanılarak büyütülen ilk hidrojenlendirilmiş amorf silisyum film Sterling [54] tarafından gerçekleştirilmiştir. 1969' da Chittick ve STL grubu ışıltılı boşalma (glow discharge) yöntemini ilk defa kullanarak hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) filmi biriktirmiş ve malzemenin elektriksel özelliklerini araştırmışlardır. Bu, hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun elektronik bir malzeme olarak düşünüldüğü ilk zamanlardır.

Bu özelliklerin keşfedilmesine rağmen, kopuk bağ konsantrasyonunun katkılamayla fermi enerjisinin konumunu değiştiremeyecek kadar büyük olmasından, ümit verici değildi ve bu nedenle laboratuvar ortamında araştırmaları yavaşlamıştır. Sonrasında Dundee Üniversitesinden W. E. Spear ve P. G. LeComber hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun yapıtaşını kabul edilen bir dizi çalışmaya imzalarını atarak malzemenin elektriksel ve elektro-optik özelliklerini incelemişlerdir [55, 56].

Diğer bir önemli çalışma, vakum kazanına, silana (SiH_4) ek olarak diboran (B_2H_6) ve fosfin (BH_3) eklenmesi sonucu büyütülen filmlerin p-tipi ya da n-tipi gibi değişebileceğinin öne sürülmesidir [5]. Bu çok önemli çalışma Fermi seviyesinin, katkılama prosesi ile kontrol edilebileceğini göstermiştir. Bu çalışmadan önce hidrojenlendirilmiş amorf silisyum malzemenin katkılanabileceği bilinmemektedir. Katkılanmış hidrojenlendirilmiş amorf silisyum malzemeler, 1975 ve 1985 yılları arasında ilk defa güneş pili uygulamaları için kullanılmıştır [57].

Çalışan ilk ince film transistör (TFT) 1961 yılında rapor edilmiştir. Yapısında Kadmiyum Selenit (CdSe) kullanılmış ve yapı cam üzerine kaplanmıştır [58]. İşlemin laboratuvar ortamından endüstriye geçmesi yaklaşık 20 yıl almış fakat yapılan çalışmalar sonrası LCD'lerin (liquid crystal display) önü açılmıştır [4]. Yapılan bu eşsiz çalışmalar sonucu hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun TFT teknolojisi için en iyi malzeme olduğu ortaya konulmuştur [57].

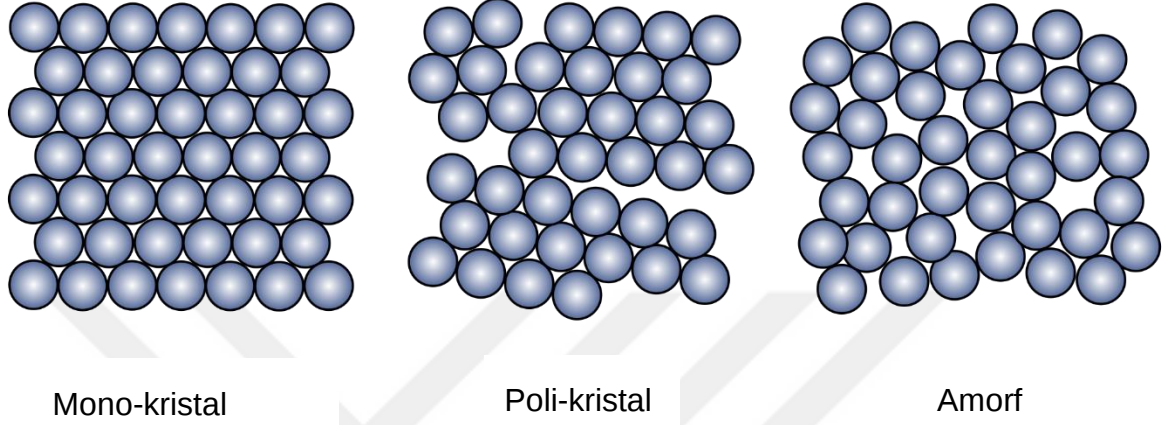
2.2. Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyumun Özellikleri

2.2.1. Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyumun Yapısı

Silisyum, kristal silisyum (c-Si), polikristal silisyum (poly-Si) ve amorf silisyum (a-Si) olmak üzere üç allotropa sahiptir. Bu üç allotrop arasındaki temel farklılık atomik yapıları ile ilgilidir. Kristal silisyumda atomlar, periyodik bir şekilde uzun erimli düzende tetrahedral yapıda sıralanmışlardır. Fakat hidrojenlendirilmiş amorf silisyum bu özellikten yoksundur şöyle ki yapı uzun erimli düzende değildir bu da silisyum atomların ideal tek kristal yapıda bulunmalarından kaynaklanmaktadır. Kısa erimde en yakın komşu kristal silisyuma göre çok küçük değişimler göstermektedir bu da bağlanma uzaklıklarından ve silisyum atomlarının açılarından öne gelmektedir. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumda atomlar kendi aralarında düzensizdirler fakat gelişigüzel bir sürekli ağ (continuous random network – CRN) sergilemektedirler. Bu terim ilk defa camın atomik yapısını açıklamak için kullanılmaktadır [58].

Kusurlu olan kristal yapısından öte, hidrojenlendirilmiş amorf silisyumdaki diğer bir kusur dağılımı kopuk bağlardır (dangling bonds). Bu izole koordinasyonlardan ileri gelen bir kusurdur ve ağ yapısının bütün bağları doyuramadığı durumda meydana çıkar. Kusur biriktirme işlemi sırasında oluşmaya başlar ve silisyumun tümünde

kırık ya da zayıf bağlar varsa gözükmeğe başlar. Bu olay hidrojen ile etkileşmeyle birlikte, malzeme ışığa maruz kaldığı anda arakrarlılık durumu yaratır. Şekil 2.1’de iki boyutlu kristal silisyum ve hidrojenlendirilmiş amorf silisyum ağ yapısını kopuk bağlarla birlikte göstermektedir.



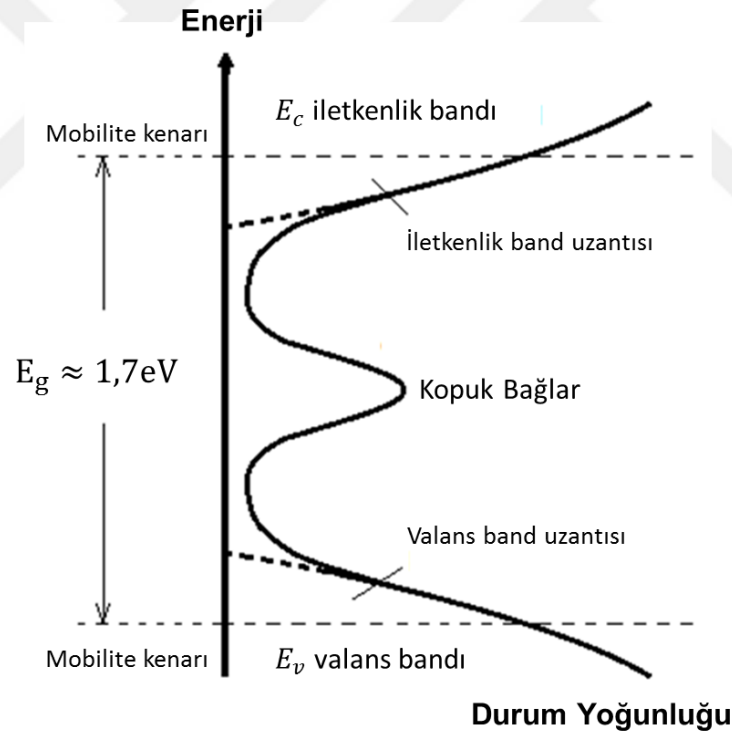
Şekil 2-1 Amorf ve kristal silisyum ağ yapıları

Hidrojen bu kopuk bağları doyurmak için ve bu sayede kusur yoğunluğunu azaltmak için kullanılır. Hidrojen ağ yapıya genellikle Si-H formunda bağlanır ve yapının elektronik özelliklerini geliştirirler. Hidrojen içeriği yaklaşık olarak %10-%20 seviyelerindedir. Sayının oldukça fazla olmasına rağmen doymamış bağların konsantrasyonu iyi büyütülmüş bir a-Si:H filmde bile 10^{15}cm^{-3} kadar büyük olabilir [57].

2.2.2. Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyumun Durum Yoğunluğu

Enerji seviyelerinin enerji dağılımı hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun elektronik özelliklerini açıklamak için çok önemlidir. Kristal silisyumun değerlik ve iletkenlik bandını ayıran sabit bir enerji seviyesi vardır. Fakat hidrojenlendirilmiş amorf silisyumda bu durum farklıdır. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumda ağ yapıdaki tutarsızlık nedeniyle değerlik ve iletkenlik bandı arasında geniş bir enerji dağılımı söz konusudur.

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun standart durum yoğunluğu Şekil 2.2'de gösterilmektedir [59]. Grafikte dikkat çeken üç önemli bölüm vardır. Bunlardan ilki değerlik ve iletkenlik bantları kristal silisyumdaki gibi benzer şekilde geniştir. İkinci olarak, kısa erimli düzen nedeniyle bant uzantıları oluşur. Son olarak kusur yoğunluğu, yasak aralıkta yer almaktadır.



Şekil 2-2 Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum için standart durum yoğunluğu

Kristal silisyumdaki ani bant değişimlerinin aksine, hidrojenlendirilmiş amorf silisyumda durumların genişleyen kuyruğu yasak bant aralığına ulaşmaktadır. Bu

durumun nedeni hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun ağ yapısındaki bağ uzunluklarının ve açılarının çeşitli olmasıdır. İki bant arasında, değerlik ve iletkenlik bandı, değerlik bandı iletkenlik bandına göre daha çok deformasyona uğrar. Bu deformasyon değerlik ve iletkenlik bantlarının Urbach enerjisinde, E_u farklılıklarına yol açar. Urbach enerjisine, optik soğurmanın eksponansiyel enerji bağıllığı karar verir. İyi kalitede, katkılanmamış a-Si:H ince filmin band uzantıları iletkenlik bandı için 25 - 35 meV ve değerlik bandı için 45 - 55 meV civarlarındadır [60].

Elektronik iletkenlik bant kenarlarında meydana gelir ve hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun elektronik özelliklerinin anlaşılması için üzerinde durulması gereken bir kısımdır. Yasak bant aralığındaki elektronik durumların varlığı ideal bağ yapısından uzaklaştıkça ortaya çıkar ve bunların nedeni genelde koordinasyon kusurları ve doyurulmamış bağlar kaynaklıdır. Mobilite kenarı, değerlik ve iletkenlik bandındaki lokalize olmuş durumlar ve genişlemiş durumların enerjilerinin oranıdır ve mobilite aralığı olarak adlandırılabilir. Kristal silisyumun bant aralığı 1,1 eV seviyesindedir ve değerlik ve iletkenlik bantları sabit bir yasak bant aralığı tarafından ayrılmaktadırlar. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum için mobilite aralığı değerlik ve iletkenlik bandı arası boşluğu tanımlamak için kullanılır. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum için bu değer tipik olarak 1,6 – 1,7 eV seviyesindedir ve hidrojen konfigürasyonuna bağlı olarak değişebilir [61] ve bu aralık optik aralık ile hemen hemen aynıdır [62].

2.2.3. Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyumun Optik Özellikleri

Kristal silisyumun yasak enerji aralığı dolaylı olsa da, hidrojenlendirilmiş amorf silisyum doğrudan yasak enerji aralığı varmış gibi davranır. Doğrudan ve dolaylı yasak enerji aralığı arasındaki ayırım amorf yarıiletkenlerde belirsizdir. Çünkü kristal yapıdaki momentum korunumu nedeniyle optik geçişler imkansızken, amorf yapıda oluşabilir. Fotoiletkenlik, taşıyıcılar gelen fotonun enerjisini soğurup değerlik bandından iletkenlik bandına geçebildiğinde gerçekleşir. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum ışığa maruz bırakıldığında elektronlar ve holler bant kenarlarına uyarılırlar ve elektronlar pozitif terminale, delikler negatif terminale doğru yönelirler. Kristal yarıiletkenlerde elektronların değerlik bandından iletkenlik bandına geçişleri fotoiletkenlikten daha baskındır. Kristal silisyumlarda

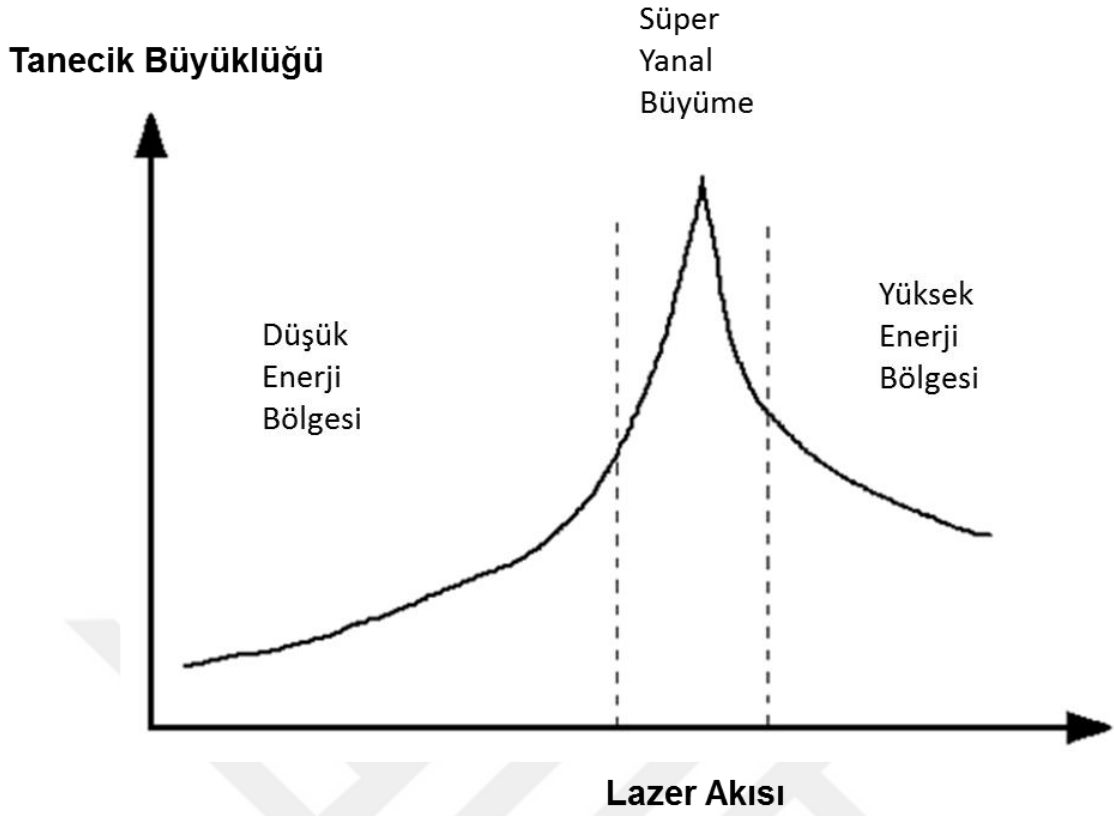
direkt geçiş, momentum korunumuna ters düştüğünden gerçekleşmez. Bunun nedeni elektronların değerklik bandından iletkenlik bandına geçerken farklı momentum k , değerklerine sahip olmaları gerekliliğindendir. Foton, ışığın kuantumlu hali, sadece çok küçük bir momentum değerkine sahiptir. Bunun yanı sıra fononların ayrıca bir kritik momentimleri vardır. Fonon, fotonların karşı maddesi olarak adlandırılabilir ve titreşimlerin kuantumlu halleridir. Bu yüzden bu tip geçişler fonon yardımcı geçiş olarak adlandırılır ve kristal silisyumlar direkt olmayan yarıiletkenler olarak adlandırılır.

2.2.4. Hidrojenlendirilmiş Amorf Silisyumun Isıl Özellikleri

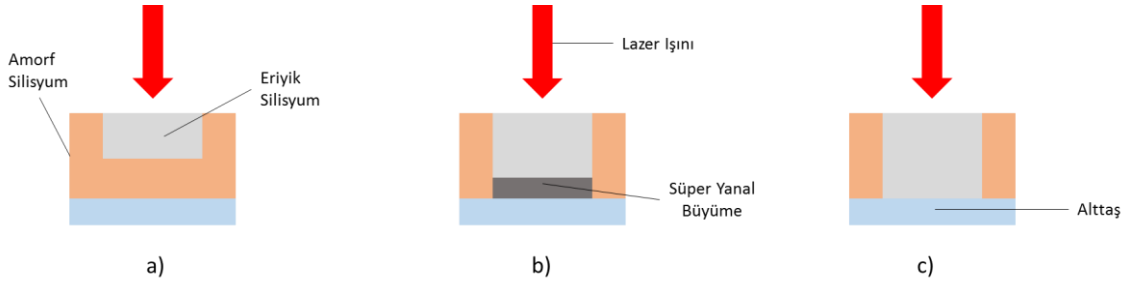
Bu bölüm hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun ısı özelliklerini ve lazer ile işlem yapılmasından sonra bu özelliklerin nasıl değıştiğini kapsamaktadır. İlk olarak kristalizasyon süreci ve yüzey modifikasyonu aktarılacaktır. Bunun sonrasındaki kısmı deneysel teknikler izleyecektir.

2.3. Kristalizasyon İşlemi

Atımlı lazer ile yapılan işlem sonucu meydana gelen kristalizasyon prosesi iki ana başlık altında toplanabilir. Bunlar, kristalizasyon sonucu oluşan tanecik (grain) büyüklüğü ve uygulanan lazer şiddetinin fonksyonu olarak malzemenin erime süresidir [57, 63]. Bu iki başlık arasında çok dar bir geçiş bölümü bulunmaktadır ki bu bölümde iri tancikli polikristal yapı elde edilebilir. Bu geçişe süper yanıl büyüme (super lateral growth – SLG) adı verilir [57, 64, 65]. Şekil 2.3’de rejimlerin lazer şiddetine karşı tanecik büyüklüğü grafiğindeki değışimi ve şekil 2.4’de a’dan c’ye farklı lazer şiddetleri karşısında hidrojenlendirilmiş amorf silisyum yapının tepkisini göstermektedir.



Şekil 2-3 Lazer akısına karşılık tanecik büyüklüğü



Şekil 2-4 Hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun farklı lazer şiddetlerine karşı tepkisi

Düşük enerji bölgesi, lazerin enerjisi hidrojenlendirilmiş amorf silisyum malzemenin yüzeyini eritecek kadar yüksek, fakat bütün film kalınlığını eritecek kadar yüksek olmayan bölgeye verilen addır. Lazer şiddetinin arttırılmasıyla malzeme üzerindeki kristalizasyon prosesi de kademeli olarak artmaktadır. Bu işlem, tanecik büyüklüğü filmin kalınlığına eşitlenene kadar devam etmektedir [66, 67].

Kristalizasyon işlemi sonrası filmin yüzeyi daha büyük taneciklere sahip olurken, film/alttaban kenarlarına gelindiğinde tanecik büyüklükleri azalmaya başlar. Lazer işlemi sonucunda film boyunca erimiş yapıda bulunan silisyumun çok hızlı erime/soğuma davranışı ve sonucunda kristalizasyon meydana gelmesi işlemine patlayıcı kristalizasyon (explosive crystallization) adı verilir [68, 69]. İşlemde lazerin şiddeti artırıldığında, daha fazla film eriyecek ve kristalizasyon işlemine katkıda bulunacaktır.

Süper yanal büyüme, sadece neredeyse erimiş olan silisyum malzemenin rastlantısal bir şekilde kristalize hale gelmesiyle, iki ana rejimin arasında meydana gelir. Bu iki rejim arasında ortalama tanecik büyüklüğü için keskin bir tepe gözlenebilir. Tanecik uzunluğu, malzemenin soğuma hızıyla alakalıdır ki bu da alttaban ile film arasındaki termal iletkenlikle bağlantılıdır.

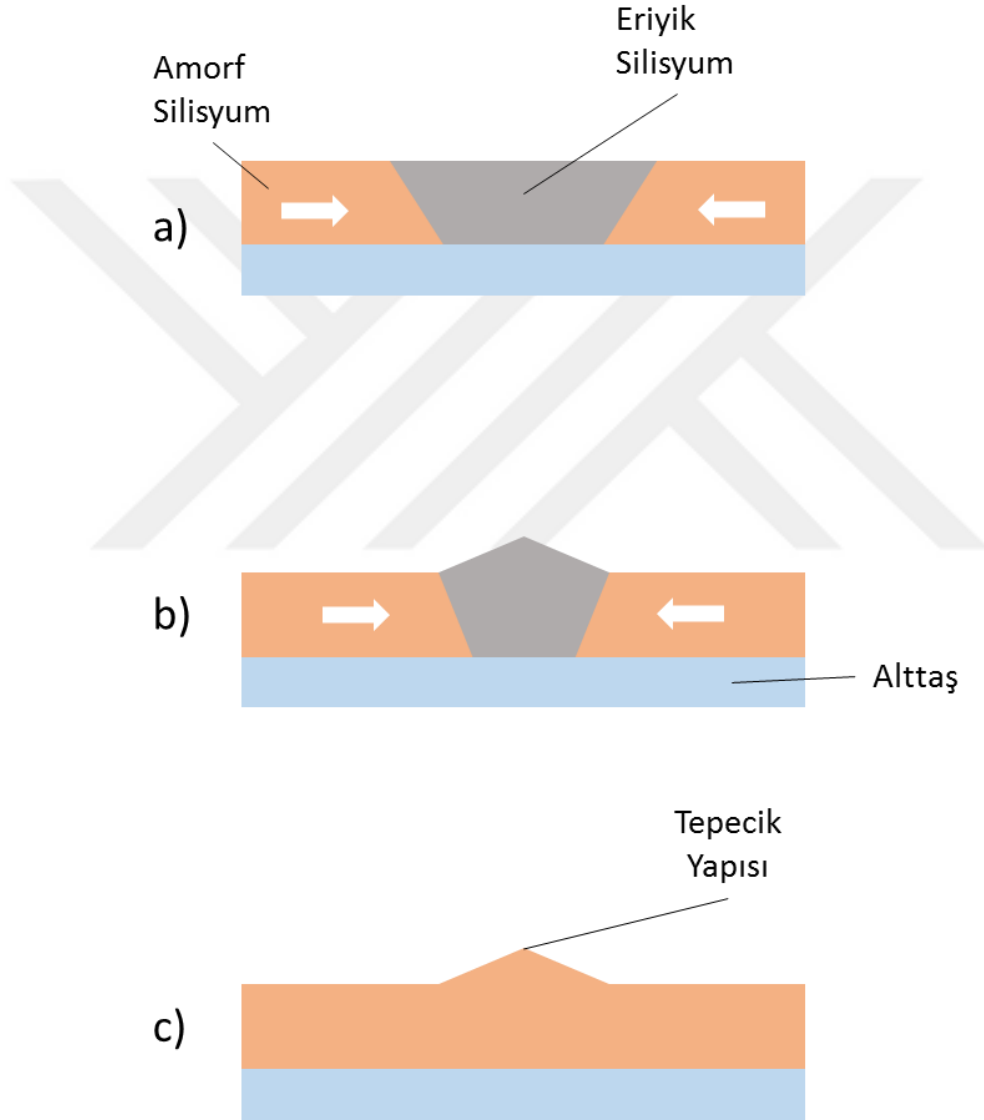
Uygulanan lazer şiddetinin belirli bir değerin üzerine çıkması malzeme üzerindeki etkisi açısından bize uygun sonuçlar vermez [64]. Bu eşik değerinin geçilmesi malzemenin tamamen erimesine, kristalizasyon işleminin başarısız olmasına ve malzeme üzerinde safsızlıkların oluşmasına neden olabilir.

2.4. Yüzey pürüzlülüğü

Lazer işlemi sonrası oluşan kristalizasyon mekanizması bilimadamları tarafından üzerinde birçok araştırma yapılmış ve anlaşılmıştır. Fakat yüzey pürüzlülüğündeki artış iyi açıklanamayan konulardandır. Lazer ile işlenmiş film pürüzlüdür ve üzerinde tepcikler oluşabilir. Yüzey pürüzlülüğünün oluşmasını etkileyen koşullar şunlardır,

- Lazer işlemi sırasındaki çevre koşulları,
- Polisilisyum ve hidrojenlendirilmiş amorf silisyum arasındaki termal iletkenlik ve gizli sıcaklık değişimleri,
- Erimiş film yapısında meydana gelen kılcak dalgalar ve yeniden katılaşma,
- Atım tekrar sıklığı,
- Film içerisindeki hidrojen konsantrasyonu.

Önceki çalışmaların ışığında, başlangıç çevre koşulları lazer kristalizasyon sonrası oluşacak olan yüzey pürüzlülüğünü değiştirebilir [70, 71]. Bu olayda aktif rol üstlenen madde oksijendir. Daha önce de kanıtlandığı gibi ortamdaki oksijen oranının yüksek olması, yüzey pürüzlülüğünün de artmasına yol açmaktadır. Bunların bilinmesine rağmen oksijenin yüzey pürüzlülüğündeki aktif rolü hakkında kesin bir bilgi yoktur. Şekil 2.5' de tepecik yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2-5 Lazer kristalizasyon sonucu tepecik oluşumu

Yüzey pürüzlülüğündeki artışın bir diğer nedeni olarak da erimiş film yapısının içerisinde bulunan ve lazer işlemi sonrası aktive olan kapiler dalgaların donması

gösterilmektedir [71, 72]. Erime sonrası katılaştan silisyumun hacminin artması, geride kalan ve halen donmakta olan erimiş silisyumu tanecik sınırlarına doğru itmektedir. Bu erimekte olan film tanecik sınırları etrafında donarak tepecik (hillhock) yapısını oluşturmaktadır. Bu etki Şekil 2.6'da gösterilmiştir.

Lazer tekrar frekansının, lazer işlemi sonucunda yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisi, daha önce yapılan bir çalışmada gausiyen ışın çalışması olarak rapor edilmiştir [70]. Aynı lazer şiddeti için, a-Si:H ve a-Si filmler üzerine yavaş tarama hızıyla yapılan çalışmada yüzey pürüzlülüğünün birbirinden ayırt edilebildiği gözlemlenmiştir. Buna rağmen yüksek tarama hızları için sadece hidrojenlendirilmiş örnekler için güçlü bir yüzey pürüzlülüğü artışından bahsedilebilir.

2.5. PECVD (Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme)

Plazma CVD ya da plazma destekli CVD, plazma reaksiyonunun, radyo frekansında (RF) çalışan bir güç kaynağı ile elde edildiği bir prosestir. Plazma elde edilmesi işlemi gaz fazında bulunan reaktantlardan yüksek derecede reaktif kimyasallar oluşturmasıyla silisyum substrat yüzeyinde ince film oluşmasını sağlar [73]. Plazma destekli CVD yöntemi ilk defa 1960' larda yarı-iletken uygulamalarında silisyum dioksit metal koruma yüzeylerinin silisyum nitrat ile değiştirilmesi amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Bu nitrat katmanları termal olarak aktive olan CVD sistemlerinde yaklaşık olarak 660 °C'lık bir sıcaklığa ihtiyaç duymaktaydı ve bu yüksek sıcaklık değerleri alt alüminyum tabanları için bir stabilite sorunu yaratmaktaydı [74]. Plazma destekli CVD sistemleri bu zamana kadar büyük gelişmeler göstermiş ve birçok uygulamada kullanılmaya başlanmıştır.

2.5.1. PECVD Avantajları

Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme yönteminin birincil avantajı normalde çok yüksek sıcaklık seviyeleri gerektiren buhar biriktirme işleminin yüksek sıcaklıklara çıkılmadan yapılabilmesidir [74]. Yukarıdaki paragraflarda da anlatıldığı gibi izotermal olmayan plazma yönteminin doğası gereği reaktif kimyasalların üretimi diğer yöntemlere göre çok daha düşük sıcaklıklarda

yapılmaktadır. Ayrıca kullanılan alttabanların bir çoğu sıcaklık ile doğrudan etkileşimli olduklarında yüksek sıcaklıklar alttabanları bozabilir. Örnek vermek gerekirse çoğu metal ve metal alaşımı veya organik polimerler yüksek sıcaklık altında yapısal bozulmaya uğrayabilir ya da erime fazına geçebilirler. Ayrıca yarı-iletkenler için kullanılan katkı malzemeler 800°C sıcaklık seviyelerinde kaplanmış olan film arasında difüze olarak yarı-iletken malzemenin özelliklerini bozabilirler [75]. Düşük basınç kullanılan sistemlerde kaplanan filmler daha yüksek homojenliğe sahiptir ayrıca bu sistemler amorf yapıdaki malzemelerin ve polikristal filmlerin kaplanmasına daha elverişlidir.

2.5.2. PECVD Tekniğinin Kısıtlamaları

Bu yöntemde saf malzemelerin kaplanması genellikle daha zordur. Yöntemde düşük basınç kullanıldığı için özellikle hidrojen dışarı atılması zorluğundan ve kalıntılarından kaynaklı termal problemlere yol açabilir. Ayrıca plazma düşük basınç nedeniyle yüzey ile daha iyi etkileşeceğinden birçok kaplama özelliği ve kaplama hızı plazmanın baskın olduğu durumlara yol açacak ve plazmada oluşabilecek olan stabilite sorunları baskın hale gelmeye başlayacaktır.

3. LAZER MALZEME ETKİLEŞİMİ

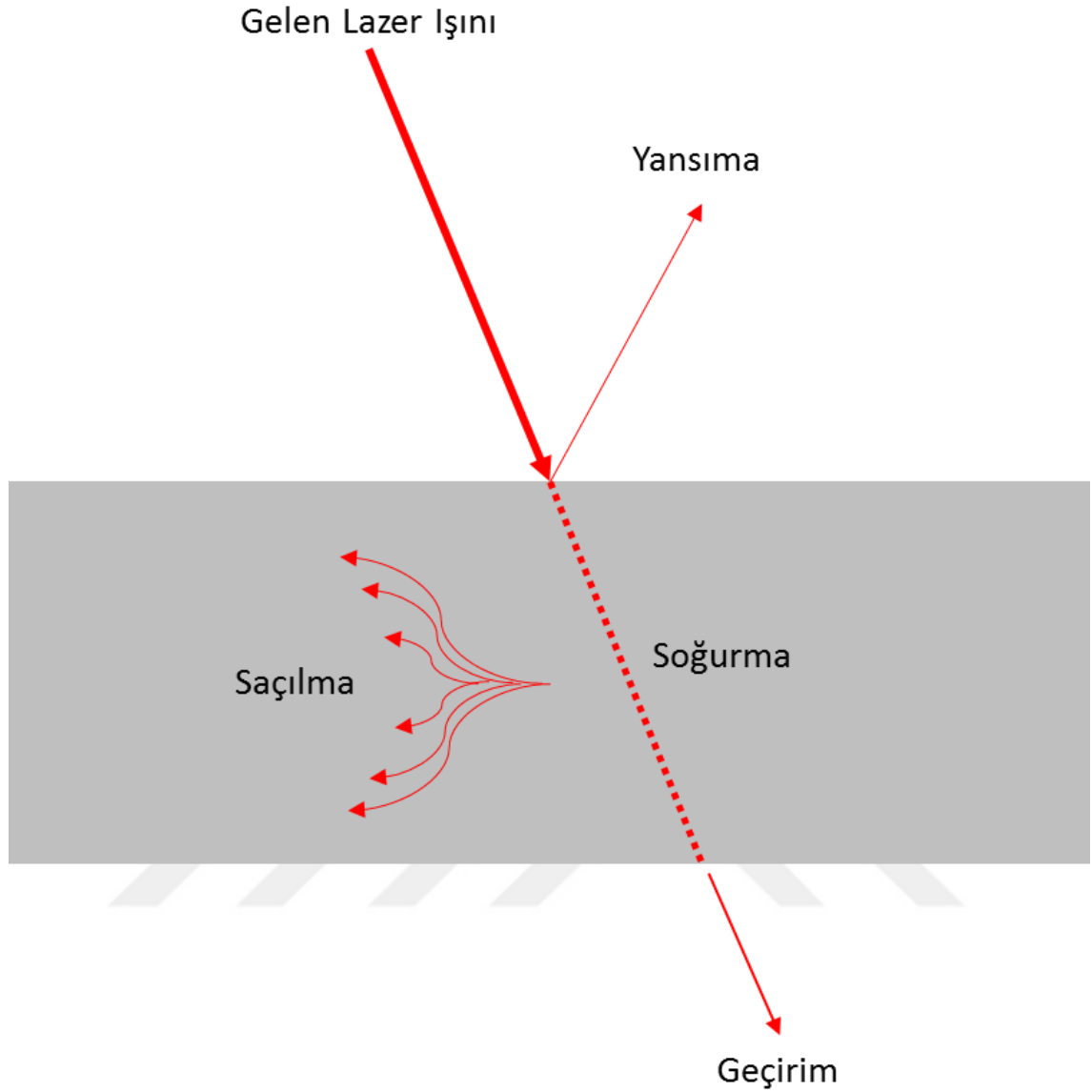
Bu bölümde lazer – malzeme etkileşiminden bahsedilecektir. Lazer malzeme ile etkileşime girdiğinde, malzeme üzerinde ne gibi değişiklikler olduğu, lazer parametrelerinin değişmesi ile bu değişikliklerin nasıl etkilendiği, lazer ile malzeme işlenirken hangi parametrelerin başat olduğu bu bölümde incelenecektir.

3.1. Lazer – malzeme etkileşimi

Atımlı lazerler ile malzeme işleme birçok farklı uygulama alanı için tipik bir işlemdir. Literatüre baktığımızda markalama, derin markalama, kazıma, kesme, delme gibi işlemler için lazer – malzeme etkileşim mekanikleri için birçok farklı lazer tipi görmemiz mümkündür. Lazer – malzeme etkileşimi için atımlı lazer olarak genellikle Q – anahtarlama konfigürasyonu kullanılmaktadır. Bu konfigürasyonda enerjiyi depolamak ve sonrasında salmak için bir kristal kullanılır fakat bu tip lazerler Q – anahtarlama teknolojisi ile limitlidir. Bu limitasyon atım enerjisi, atım uzunluğu ve tekrar frekansı gibi parametrelerin esnekliğini ortadan kaldırmaktadır. Bu tez kapsamında nanosaniye atımlı fiber lazer için kullanılan konfigürasyon MOPA mimarisinde olmakla birlikte bağımsız olarak ayarlanabilen atım uzunluğu ve tekrar frekansı, kırınım limitine çok yakın ışın kalitesi, yüksek tepe gücü ve ortalama güç, tümleşik fiber yapısı ve atımlar arasındaki yüksek stabilite gibi özellikleri beraberinde getirmektedir.

3.1.1. Fiziksel İşleyiş

Hedeflenen malzeme ile lazer arasındaki ilişkiler; soğurma, yansıma, saçılma ve geçirim olarak sıralanabilir. Şekil 3.1’de lazerin malzeme ile etkileşimi açıklanmıştır.



Şekil 3-1 Lazerin malzeme üzerinde yaratabileceği etkiler

Lazer ile malzeme arasındaki ilk etkileşim yansımadır. Yansıma etkileşiminden sonra soğurmanın etkisiyle gelen lazer ışınının enerjisinin bir kısmı malzemeye geçer. Soğurma etkileşimi, elektromanyetik dalga ile malzemenin bağlı ya da serbest olan elektronlarının etkileşimi olarak anlatılabilir. Elektromanyetik dalga ve malzeme etkileşimi genelde malzemenin elektronlarından kaynaklanır. Çünkü malzemenin çekirdeği, yüksek frekanslı elektromanyetik dalga ile etkileşmek için çok ağır kalır. Malzemede, soğurma sonrasında bir çok farklı etki meydana gelir. Bunlar ısınma (ısı transferi), buharlaşma, plazma oluşumu ve erime olarak sıralanabilir. Elektromanyetik dalga malzemenin elektronları ile etkileşime girdikten

sonra, elektronlar üzerine elektrik alana sahip olmasından kaynaklı bir güç uygular. Aktarılan bu kuvvet ki bu Lorentz kuvvetidir, [76]

$$\vec{F} = e\vec{E} + e\left(\frac{\vec{v}}{c} \times \vec{H}\right) \quad (3.1)$$

olarak verilebilir. Eşitlik 3.1’de $\vec{v}$, elektronun hızı, c ise ışık hızı, e , elektronun yükü, $\vec{E}$, elektrik alan ve $\vec{H}$, manyetik alanı temsil eder. Eğer elektrik alan ve manyetik alan enerjilerinin aynı olduğu kabul edilirse manyetik alanın aktaracağı enerji, elektrik alanın aktaracağı enerjiden (v/c) oranında daha az olacaktır ve bu durumda eşitlikde bulunan $e\vec{E}$ ifadesi baskın hale gelecektir. Malzeme tarafından soğurulan enerji, yüklü parçacıklara aktarılır. Bu aktarılan enerji, serbest elektronlara kinetik enerji olarak ya da bağlı elektronlara uyarılma enerjisi olarak aktarılır. Bu duruma bağlı olarak uyarılma enerjisindeki değişime bağlı olarak ısı artışı meydana gelir. Lazer – malzeme etkileşimindeki soğurma eşitliği

$$I(z) = I_0 e^{-\mu z} \quad (3.2)$$

olarak verilir. Bu eşitlik Beer – Lambert yasası olarak bilinir. Eşitlik 3.2’de $I(z)$, radyasyon yoğunluğu, z , giricilik derinliği, I_0 , gelen radyasyon yoğunluğu μ ise soğurma katsayısını belirtir. Eşitlikten de anlaşılabileceği gibi soğurma işlemi sırasında lazer ışınının enerjisi azalmaktadır. Lazer ışınının malzeme içerisinden soğurularak gidebileceği maksimum uzaklık L ’dir ve $L = 1 / \mu$ ile verilir. Bu uzunluk kritik uzunluk olarak adlandırılır ve radyasyon yoğunluğunun $1/e$ değerine düştüğü uzunluktur. Yüksek soğurma özelliğine sahip bir malzemenin (dalga boyuna bağlı olarak) soğurma katsayısı yaklaşık 10^5 cm^{-1} civarındadır ve L değeri de 10^{-5} cm^{-1} civarında olur [77].

Malzemenin ve lazerin soğurma ve yansıtma yetisi lazer-malzeme etkileşiminde önemli olan diğer parametrelerden biridir. Malzemenin soğurma miktarı gelen ışığın normal geliş açısındaki soğurulma miktarı olarak söylenebilir. Soğurma ve yansıtma özellikleri birbirleriyle bağıntılıdır ve opak malzemeler için

$$A = 1 - R \quad (3.3)$$

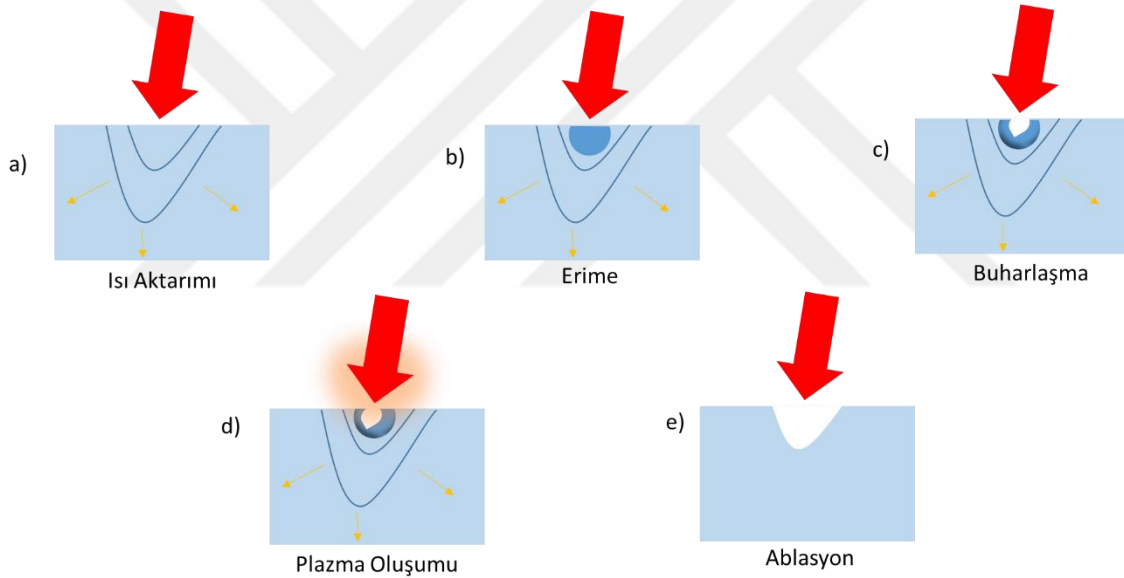
eşitliği ile verilir. Eşitlik 3.3’de A , soğurmaya, R , yansıtma temsil eder. Soğurma ve yansıtma hesaplamaları, soğurma katsayısı ve kırılma indisine bağlı olan kompleks kırma indisi ile yapılabilir. Kırma indisi ve soğurma katsayısı değerleri

gelen lazer ışınının dalga boyuna ve malzeme sıcaklığına bağlıdır yani malzemenin yansıtıcılığı bu iki parametreye bağlıdır ve

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (3.4)$$

olarak verilebilir. Eşitlik 3.4'te R malzemenin yansıtıcılığını, n, kırma indisini ve k ise soğurma katsayısını belirtir.

Lazer ile etkileşime giren malzemeler, gelen lazer ışınının enerjisini soğurur ve soğurulan enerji ısıya dönüşür ve temel enerji seviyesi ve yükseltgenme enerji seviyelerini aşağıya çeker. Malzeme işleme sırasında sıcaklığın yükselmesi ve buhar fazın, iyonlaşması malzemede ısınma, buharlaşma, plazma oluşumu ve ablasyon olarak ortaya çıkar. Şekil 3.2'de lazerin malzeme üzerine etkisi anlatılmıştır.



Şekil 3-2 Lazerin malzeme üzerindeki etkisi a)Isı aktarımı, b)Erime, c)Buharlaşma, d)Plazma Oluşumu, e)Ablasyon

Lazer ile malzeme etkileşimi sonucu oluşan fiziksel etkiler, termal etkiler, plazma oluşumu ve ablasyon olarak üç gruba ayrılabilir.

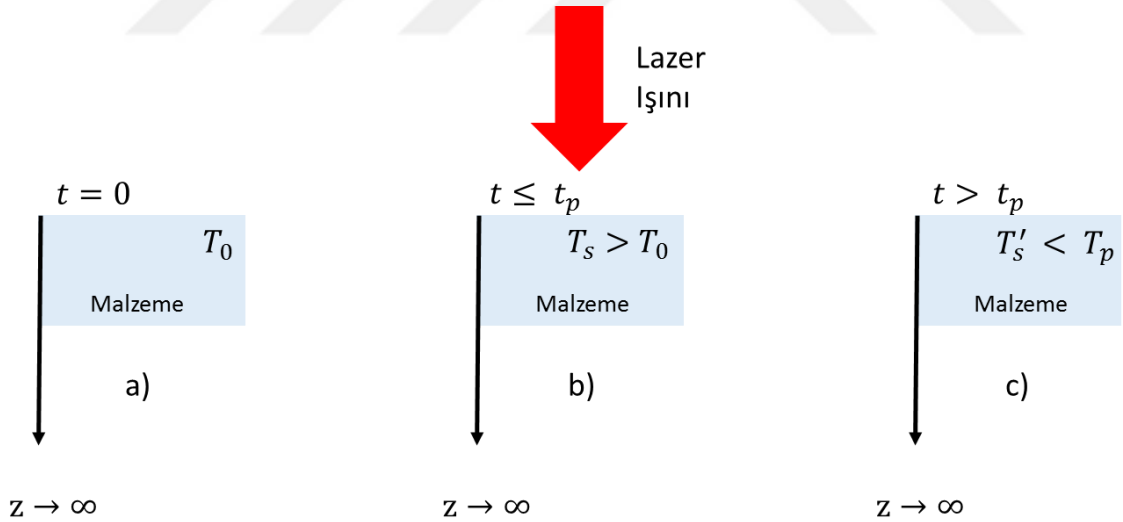
3.1.2. Isı Aktarımı

Isınma işlemi, ısı dağılımı fenomenini çözerek anlaşılabilir. Malzemedeki termal davranışın analizi, Jager ve Carslaw tarafından çözümlendirilen (1959) [78] bir-boyutlu ısı dağılımı eşitlikü kullanılarak yapılabilir. Yapılan termal analizde, malzeme homojen, başlangıçta malzeme sıcaklığı sabit, lazer-malzeme etkileşiminde aktarılan ısı homojen ve etkileşimde oluşabilecek olan kayıplar sıfır kabul edilir. Eğer sıcaklığı T , ısı aktarılan bölgeyi z ve geçen zamanı t olarak alırsak, ısı transfer eşitliği,

$$\frac{\partial T(z,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T(z,t)}{\partial z^2} \quad (3.5)$$

gibi verilir. Eşitlik 3.5'de a termal yayınlılığı ifade eder. Şekil 3.3'de başlangıç, ısınma ve soğuma zamanları için lazer radyasyonunun şeması vardır.

$$\frac{2E_{\text{abs}}a^{1/2}}{k} \left(t^{1/2} \text{ierfc} \left(\frac{z}{(4at)^{1/2}} \right) - (t - t_p)^{1/2} \text{ierfc} \left(\frac{z}{(4a(t-t_p))^{1/2}} \right) \right) \quad (3.6)$$



Şekil 3-3 Lazerin farklı zaman skalalarında malzeme ile etkileşimi a) Başlangıç durumu sıcaklık homojen, T_0 , b) Lazer enerji aktarımı, yüzey sıcaklığı T_s başlangıç sıcaklığı T_0 'dan daha büyük c) Lazer kapandıktan sonra malzemenin soğuması. ($t_p \geq t$ lazer malzeme etkileşiminin olduğunu, $t > t_p$ lazer malzeme etkileşiminin olmadığını belirtir.)

Sıcaklığın $t = 0$ anındaki eşitlikü $z \geq 0$ durumu için

$$T(z, 0) = T_0 \quad (3.7)$$

olarak verilebilir.

Eğer malzeme yüzeyi tarafından soğurulan enerjiyi, lazer ışınının malzemeye aktardığı enerji olarak kabul edersek yüzeydeki sınır koşulları,

$$\delta E_{abs} = -k \frac{\partial T(0,t)}{\partial z} \quad (3.8)$$

olarak verilebilir. Eşitlik 3.8'de E_{abs} malzeme tarafından soğurulan enerjiyi, k ise malzemenin termal iletkenliğini sembolize eder. Ayrıca ısınma ve soğuma sırasındaki durumlar da eşitlikize edilebilir. Eğer lazer – malzeme etkileşimi varsa $t_p \geq t$, eğer lazer – malzeme etkileşimi yok ise $t > t_p$ olarak söylenebilir. Lazer – malzeme etkileşimi için $\Delta T(z, t)_{t < t_p}$ ifadesi,

$$\frac{E_{abs}}{k} (4at)^{\frac{1}{2}} \text{ierfc}\left(\frac{z}{(4at)^{\frac{1}{2}}}\right) \quad (3.9)$$

olarak ifade edilir.

Eşitlik 3.9'da yer alan $\text{ierfc}(x)$, ierfc hata fonskoyunun tümleyici integralidir,

$$\text{ierfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left[\exp(-x^2) - x \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi \right) \right] \quad (3.10)$$

şeklinde verilebilir.

$z = 0$ sınır değerinde eşitlikler 3.9 ve 3.10 için malzemenin ısınması ve soğuması için ifadeler

$$\Delta T(0, t)_{t < t_p} = \frac{E_{abs}}{k} \left(\frac{4at}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.11)$$

$$\Delta(0, t)_{t > t_p} = \frac{E_{abs}}{k} \left[\left(\frac{4at}{\pi} \right)^{1/2} - \left(\frac{4a(t-t_p)}{\pi} \right)^{1/2} \right] \quad (3.12)$$

şekline dönüşür.

3.1.3. Erime

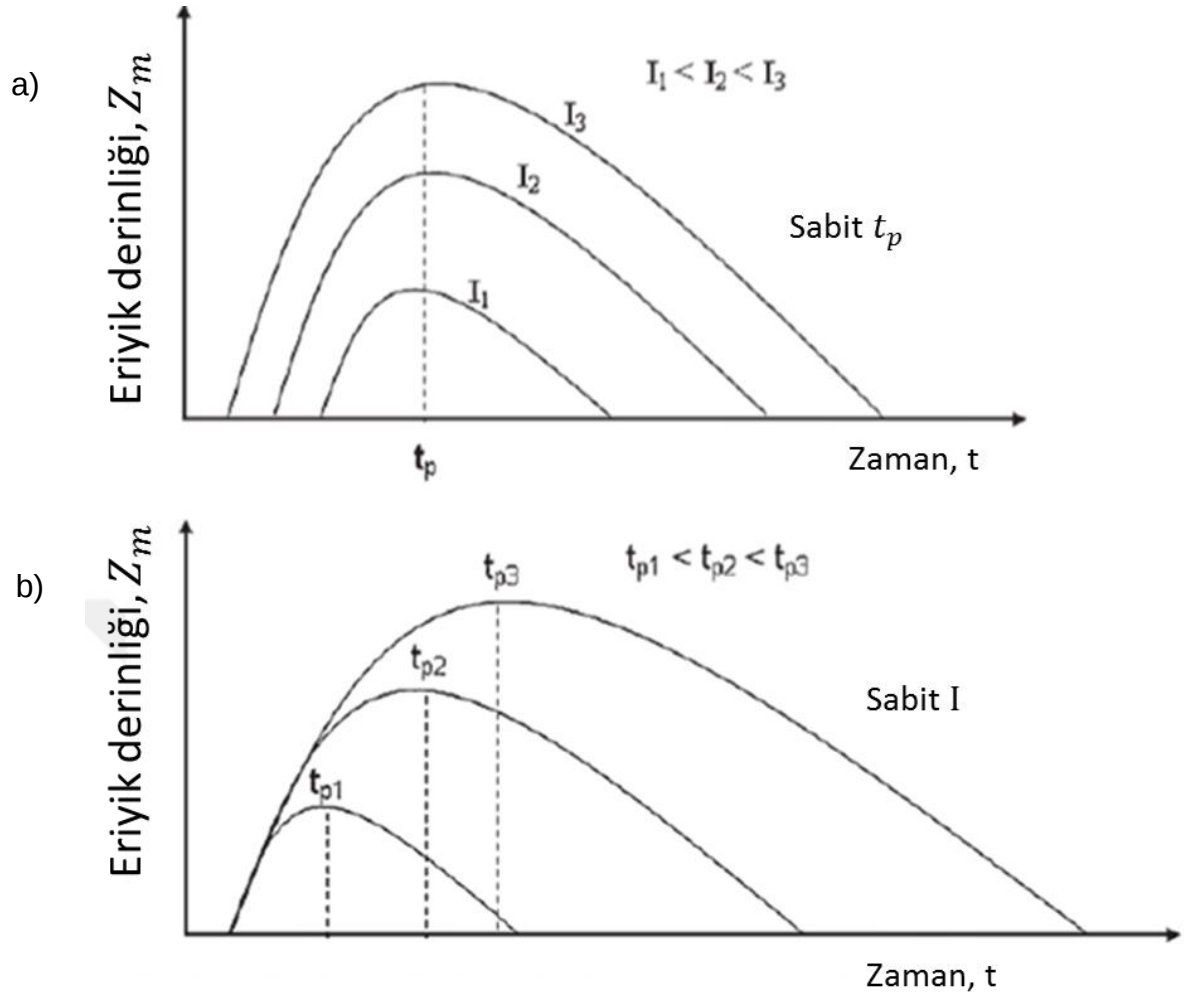
İşlem gören malzemeye göre malzemenin lazer ile etkileşiminden sonra malzemenin yüzey sıcaklığı erime veya kaynama sıcaklığına ulaşabilir. Malzeme yüksek güçlü lazer ile işlenirken, malzemenin erime ve kaynama sıcaklıkları kritik öneme sahiptir. Malzemenin erime sıcaklığına ulaşılmasından sonra, malzemenin sıcaklığının yükselişi durur ve aktarılan enerji büyük hacimleri (V_{melt}) eritmeye başlar ve aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$E_{melt} = H_f \rho V_{melt} \quad (3.13)$$

Eşitlik 3.13'te H_f füzyon sıcaklığı, ρ malzeme yoğunluğudur. Bunların dışında başlangıç sıcaklığı T_i için V hacmindeki malzemeyi eritmek için gereken enerji,

$$E = E_{melt} + (T_m - T_i) C_p \rho V \quad (3.14)$$

olarak verilir. Eşitlik 3.14' te C_p özgül ısı ve T_m malzemenin erime sıcaklığını belirtir. Erime işlemi için maksimum erime uzunluğu, sabit atımlı lazer ışınları için güç yoğunluğu arttıkça artar (Şekil 3.4). Eğer sabit güç yoğunluğunda bir lazer kullanılıyorsa maksimum erime uzunluğu atım uzunluğunun artışına bağlı olarak artar. Şekil 3.4'te atımlı lazer uygulamaları için eriyik malzeme derinliği verilmiştir.



Şekil 3-4 Atımlı lazer uygulamaları için eriyik derinliği a) Sabit atım uzunlukları, b) Sabit lazer akısı [79]

3.1.4. Buharlaşma

Malzeme üzerinde ulaşılabilir olan maksimum erime uzunluğu maksimum yüzey sıcaklığı ile sınırlıdır ve lazer güç yoğunluğu artırılarak bu değerin sonsuza kadar artırılması mümkün değildir. Erime uzunluğunun maksimum değeri olan Z_{max} sadece malzemenin sıcaklığı, malzeme kaynama sıcaklığına ulaşıldığı zaman sağlanır. Z_{max} , malzeme sıcaklığı, erime sıcaklığı olan T_m 'ye ulaşıldığı durum için hesaplanabilir.

$$T_m = \frac{E_{abs}}{k} (4at)^{1/2} \text{ierfc} \left(\frac{Z_{max}}{(4at)^{1/2}} \right) \quad (3.15)$$

Eşitlik 3.15'deki E_{abs} soğurulan enerji, k termal iletkenlik, a termal yayınlılık ve t geçen zamanı belirtir.

Eğer sıcaklık, malzemenin kaynama sıcaklığı olan T_b 'ye ulaşırsa ifade,

$$T_b = \frac{E_{abs}}{k} \left(\frac{4at}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.16)$$

şekline dönüşür.

Malzeme lazer ile işlendikten ve sıcaklık kaynama sıcaklığına ulaştıktan sonra, malzeme yüzeyinde sıvı-gaz yapısı oluşur. Sonrasında yüzeyde bulunan sıvı-gaz formundaki malzeme yüzey üzerinden malzemeyi terketmeye başlar. Yüzeyden ayrılan malzeme derinliği, sıvı-gaz formun malzeme üzerinden ayrılma hızına bağlı olarak hesaplanabilir.

$$V_s = \frac{E_{abs}}{\rho(cT_b + L_v)} \quad (3.17)$$

Eşitlik 3.17'de L_v buharlaşma iç sıcaklığı, T_b buharlaşma sıcaklığı, E_{abs} soğurulan enerji, ρ malzeme yoğunluğudur. Birim zaman için malzeme üzerinden ayrılan materyal kütlesi (m) $V_s \rho$ 'ya eşittir. Buharlaşma uzunluğu (d) ise $V_s t_p$ 'ye eşittir. Bu durumda,

$$d = \frac{E_{abs} t_p}{\rho(cT_b + L_v)} \quad (3.18)$$

eşitliği ile verilebilir.

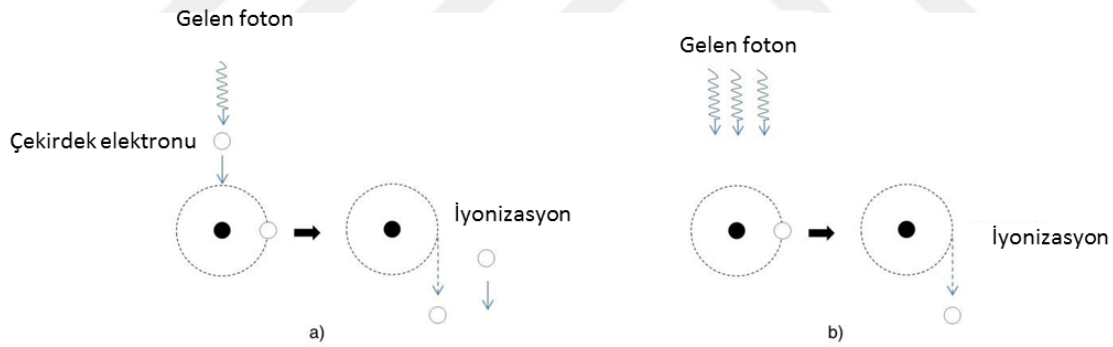
3.1.5. Plazma Oluşumu

Lazerin malzeme ile etkileşimi sonrası buharlaşma işlemi gerçekleştikten sonra malzeme yüzeyinden evaporasyon oluşur. Buharlaşma işleminden sonra oluşan buhar ve malzeme üzerindeki lazer ışınının etkileri, lazer – malzeme etkileşimin kapsamıca anlaşılması için çok büyük önem taşımaktadır. Lazerin etkisi ile, malzeme üzerinde bulunan buhar iyonlaşabilir. Gaz faz için "Saha" eşitliği [80], iyonizasyon derecesinin belirlenmesi için kullanılabilir.

$$\frac{z}{1-z} = \frac{2g_i}{g_a N_g} \left(\frac{2\pi m k_B T}{h^2} \right)^{3/2} e^{\left(\frac{-E_i}{k_b T} \right)} \quad (3.19)$$

Eşitlik 3.19'da E_i iyonizasyon enerjisi, g_i iyonlar için seviye dejenerasyonu ve g_a ise atom ve moleküller için seviye dejenerasyonunu ifade eder. Atom veya moleküller ve elektronlar için toplam durum yoğunluğu N_g ile ifade edilir. Toplam elektronların, toplam elektron durum yoğunluğuna oranı N_g 'yi verir.

İyonizasyon durumu parçalı ya da tümünden olabilir. Bu bağlamda iyonizasyon çığ (avalanche) ve çoklu foton soğurması olarak ikiye ayrılabilir. Eğer lazer bremsstrahlung soğurması ile çekirdek elektronları tarafından soğurulursa, serbest elektronların enerjileri, moleküllerin iyonizasyon enerjilerine aktarılırlar ve iyonizasyon işlemi moleküllerin çarpışmaları ile başlar. Şekil 3.5'te lazer iyonizasyon işlemi gösterilmiştir. İyonizasyon ile yeni elektronlar oluşur ve foton enerjileri bu elektronlar tarafından soğurulurlar. Sonrasında bozulma işlemi (avalanche breakdown) başlar. Plazma oluşumu çekirdek elektronları, parçacıklar ile etkileşim ve çarpışma olayları olmadan da görülebilir. Bu durumda her elektron bağımsız olarak iyonlaşacaktır. Bu fenomene çoklu foton soğurma adı verilir.



Şekil 3-5 Lazer temelli iyonizasyon işlemi, a) Çığ (avalanche) iyonizasyon, b) Çoklu foton soğurma iyonizasyon

3.1.6. Ablasyon

Malzeme yüzeyinden foto-kimyasal ve foto-termal etkileşimler ile materyal kaldırma işlemi ablasyon olarak adlandırılabilir. Malzemenin soğurduğu lazer enerjisi malzeme içinde ısıya dönüşür. Eğer lazerin enerjisi çok yüksek ve lazerin malzeme ile etkileştiği bölge kaynama sıcaklığını geçebiliyorsa buharlaşma ve

termal stres olayı oluşur. Oluşan bu buharlaşma ve termal stres malzeme üzerinden materyal kaldırmaya neden olur ve bu işlem termal ablasyon olarak adlandırılır.

Organik malzemelerde ablasyon işlemi, malzeme içerisinde bulunan moleküler bağların kırılması ile meydana gelir. Eğer gelen foton enerjisi malzemenin ablasyonu için yeterli ise organik malzemenin moleküler düzeni bozulabilir. Bu olay foto-kimyasal ablasyon olarak bilinir. Ablasyon olayı sadece bağ bozulma enerjisinin geçişi ile meydana gelmez aynı zamanda bağ bozulma eşik enerjisinin aşağı seviyelere çekilmesi ile de gerçekleşebilir. Bu durumdaki işlem çoklu foton soğurulması işlemidir [79]. Çoklu foton soğurma işleminde uzun dalgaboylu yani daha az enerjiye sahip fotonlar aynı anda iki ya da daha fazla sayıda soğurulabilir ve böylece bağ yapılarının bozulması işlemi gerçekleşmiş olur. Her bir fotonun enerjisi bağ enerjisini geçemediği halde, birden fazla fotonun soğurulması ile eşik enerjisi geçilebilmektedir.

Lazer – malzeme etkileşimindeki ablasyon işlemini anlamak için foto-termal ve foto-kimyasal olaylar birlikte incelenmelidir. Termal işlemin gevşeme zamanı (relaxation time, τ), ki gevşeme zamanı ısı dağılımı ile ilgilidir, uzun ya da kısa atımların anlaşılması için önemlidir. Bu değer,

$$\tau = \frac{d^2}{4a} \quad (3.20)$$

ifadesi ile verilebilir. Eşitlik 3.20’de bulunan d soğurma derinliği ve a termal yayınlılığı betimler. Termal gevşeme zamanı iyi bir ablasyon işlemi için seçilecek olan atım uzunluğu parametresi açısından en kritik parametredir. Eğer lazer atım uzunluğu τ değerinden daha büyük ise lazer enerjisi malzeme içerisinde harcanır. Bu durum sonucunda malzeme termal olarak zarar görür. Kısa atımlar malzemenin termal olarak zarar görmesi riskini azaltır.

Diğer bir yandan malzeme ablasyonu için bir diğer önemli parametre lazerin tekrar frekansıdır. Eğer atımlar arasında geçen zaman çok kısa ise malzeme ablasyon eşik değeri etrafında kalır. Bu bağlamda verimli bir ablasyon işlemi için yüksek tekrar frekansı gereklidir. Işın kalitesi de ablasyon işlemi için önemli bir parametredir. Işın kalitesi de malzeme ablasyonu verimliliğini belirleyen parametrelerdendir. Efektif bir ablasyon işlemi için lazer enerjisinin aktarıldığı bölge, ışın kalitesi ve ışın çapı ile kontrol edilmelidir.

3.2. Önemli Lazer Parametreleri

Malzeme atımlı lazer ile işlenirken, işlemi etkileyen atım enerjisi, atım uzunluğu, tepe gücü ve güç yoğunluğu gibi önemli lazer parametreleri vardır. Lazer atım enerjisi E_p artarken, işlenen alanın derinliği artmaktadır. Lazer atım enerjisi, lazer ortalama gücü P_{avg} ve lazer tekrar frekansına f_r bağlıdır ve P_{avg}/f_r ile hesaplanır. Lazer tepe gücü ortalama güç, atım enerjisi ve atım uzunluğuna bağlıdır ve malzemenin eşik değerlerinin belirlenmesi açısından büyük öneme sahiptir, E_p/t_p ile hesaplanır. Lazer güç yoğunluğu lazer ortalama güç ve etkin odak nokta boyutuna (cm^2) bağlıdır. Güç yoğunluğu hesabı,

$$\frac{P_{avg}(W)}{\text{Etkin odak nokta alanı (cm}^2\text{)}} \quad (3.21)$$

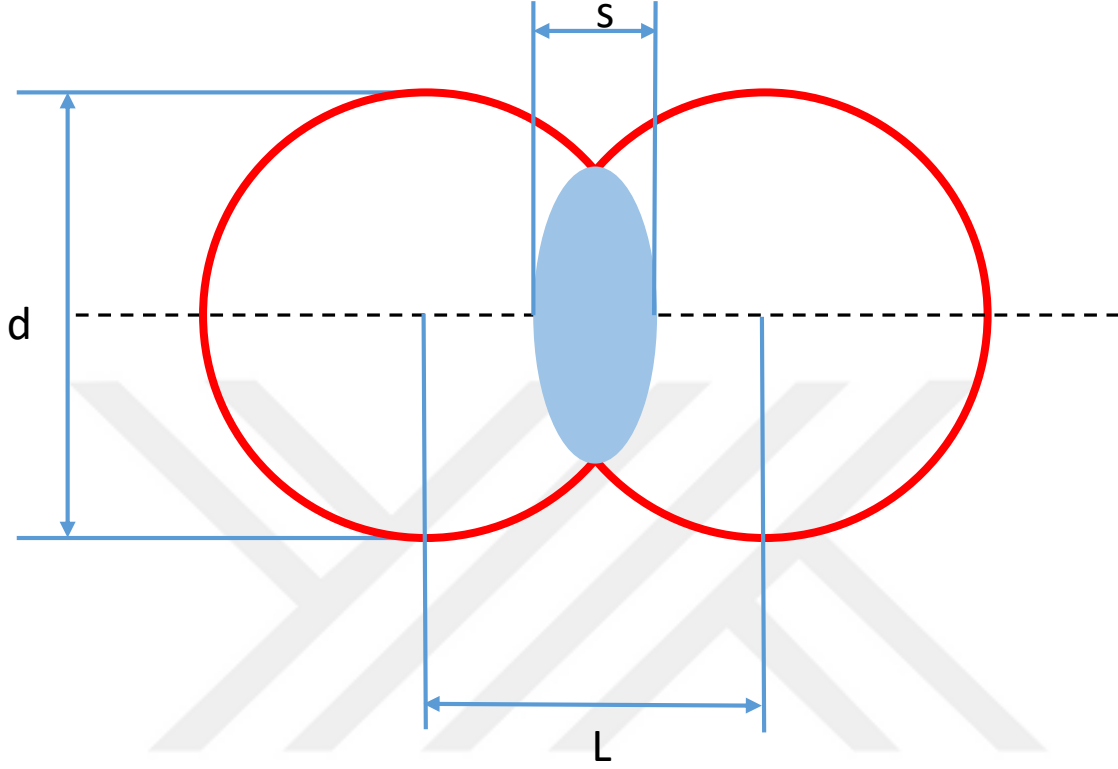
ile yapılır. Ayrıca lazer akısı, lazer atım enerjisinin, etkin odak nokta boyutuna oranı ile hesaplanabilir.

$$\frac{E_p(J)}{\text{Etkin odak nokta alanı (cm}^2\text{)}} \quad (3.22)$$

Lazer güç yoğunluğu sadece yukarıda verilen parametrelere değil ayrıca optik konfigürasyona da bağlıdır. Konfigürasyon parametreleri lazer odak uzunluğu ve ışın kalitesi olarak söylenebilir ve bu parametreler lazer – malzeme etkileşiminde daha dominanttır.

Malzeme işleme için birçok farklı konfigürasyon kullanılmasına rağmen, hepsi temelde Şekil 3.6'da gösterilen konfigürasyona paraleldir. Birçok farklı konfigürasyon kullanılmasına rağmen malzeme işlemeyi etkileyen ortalama güç, atım enerjisi, tekrar frekansı, atım süresi, kullanılan objektifin odak uzaklığı ve tarama kafasının tarama hızı gibi temel parametreler istenilen kristalizasyona göre karakterize edilmiştir. Bununla beraber bütün bu söylenen parametreler kristalizasyon işleminde değişik etkilere sahiptir. Kristalizasyon işleminde lazerin özelliklerinden olan atım enerjisi, atım uzunluğu ve tepe gibi parametrelerin değiştirilmesi halinde malzeme üzerine etki direkt olarak gözükmemekte ve daha iyi sonuç yakalamak için değiştirilmesi gereken parametre belirlenebilmektedir. Ayrıca malzemeyi işlerken atımlı lazer kullanıldığı taktirde, atımların isteğe göre üst üste gelmesini ya da gelmemesini ayarlayabilmek için lazerin atım frekansı, tarama kafasının tarama hızı ve ışın çapı için çok iyi

ayarlama yapılması gerekmektedir. Atımların çakışma durumu Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3-6 Atımların çakışma durumu

Şekildeki mavi alan atımların çakıştıkları bölgeyi ve L ise iki atımın merkezlerinden olan uzaklıklarını belirtmektedir. L değeri tarama hızının, lazerin tekrar frekansına oranı, lazerin ışın çapı ve lazer ışınlarının üst üste bindikleri alan ile hesaplanabilir. Lazer ışınlarının çakışma yüzdesi ,

$$\zeta_{\%} = \frac{S}{d} = \left(1 - \frac{L}{d}\right) \times 100 \quad (3.23)$$

şeklinde verilebilir.

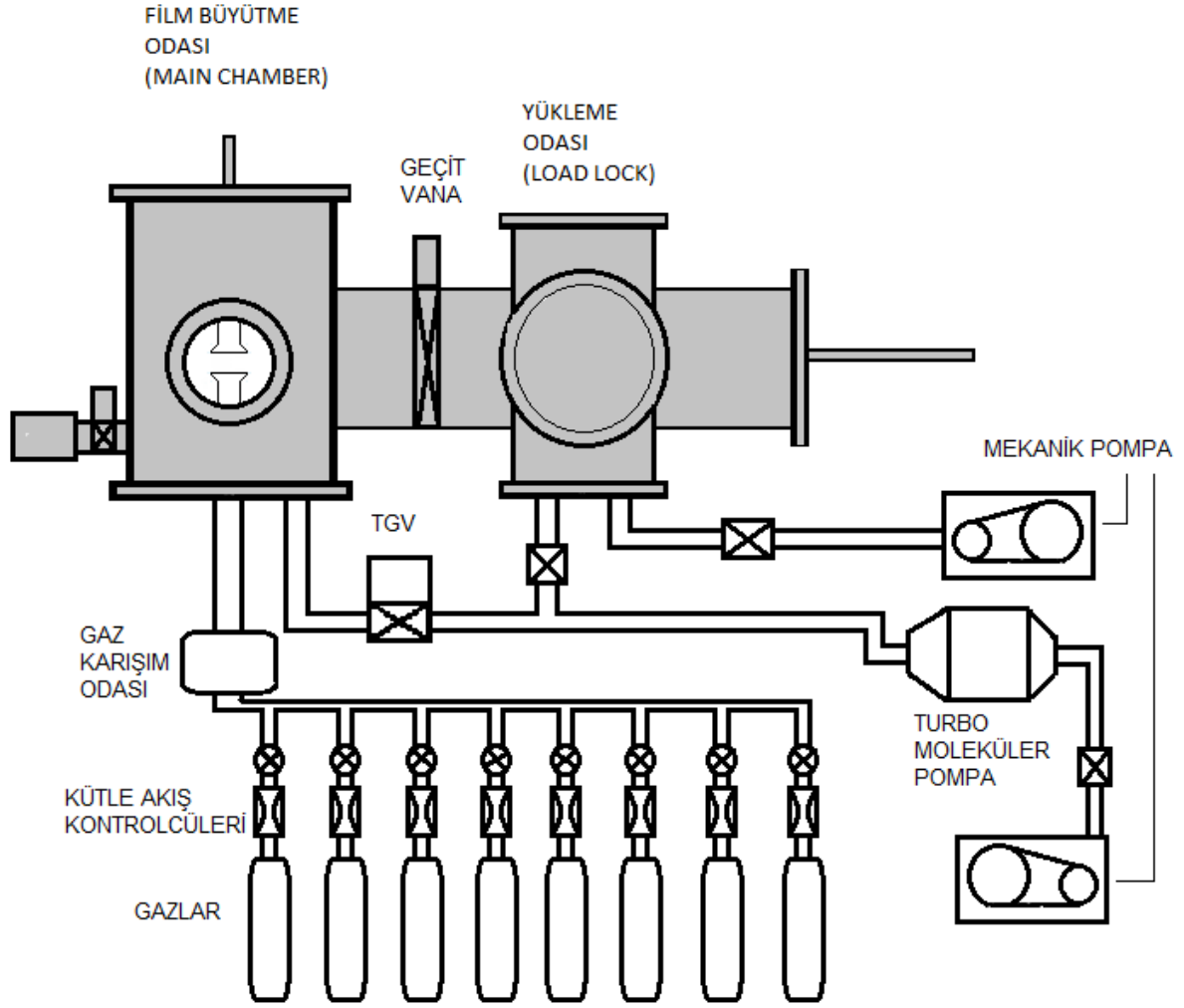
4. DENEYSEL TEKNİKLER ve ÖLÇÜM DÜZENEKLERİ

Bu bölümde hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) örnek üretimi, örneklerin elektriksel, optik, yapısal ve kristalizasyonu kısmında kullanılan deneysel yöntemler ve bu yöntemlerin çalışma prensiplerinden bahsedilecektir.

4.1. Radyo Frekansı Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi (RF – PECVD)

Üçüncü bölümde tartışıldığı üzere radyo frekanslı plazma destekli kimyasal buhar biriktirme yöntemi ince film kaplamaların üretimi için üstün yeteneklere sahip bir yöntemdir. Yöntemin kontrol edilebilirliği ve üretilen filmlerin homojenitesi açısından oldukça tercih edilen bir tekniktir.

Tez sırasında kullanılmak için üretilmiş olan hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) örnekler Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü Amorf Yarıiletkenler Laboratuvarında bulunan RF – PECVD sistemi kullanılarak büyütülmüştür. Sistemin genel şeması Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Kullanılan sistemde, diğer sistemlerden farklı olarak biri filmin büyütülmesi, diğeri de yükleme kazanı olarak kullanılan 2 adet vakum kazanından meydana gelmesidir. Bu durum kullanıcıya, örnek yüklenildiği sırada film büyütülen ortamın atmosfere açılmaması ve böylece plazmaya ve filme istenmeyen etkilerin oluşmamasını (basınç değerinin artması, beklenmeyen partiküllerin kazana sızması gibi) sağlamaktadır. RF – PECVD sistemi temel olarak; vakum kazanı, yükleme kazanı, gaz akış kontrolcüler, vakum sensörleri, vakum pompaları, kimyasal gaz yolları ve radyo frekans güç kaynağı olacak şekilde söylenebilir.



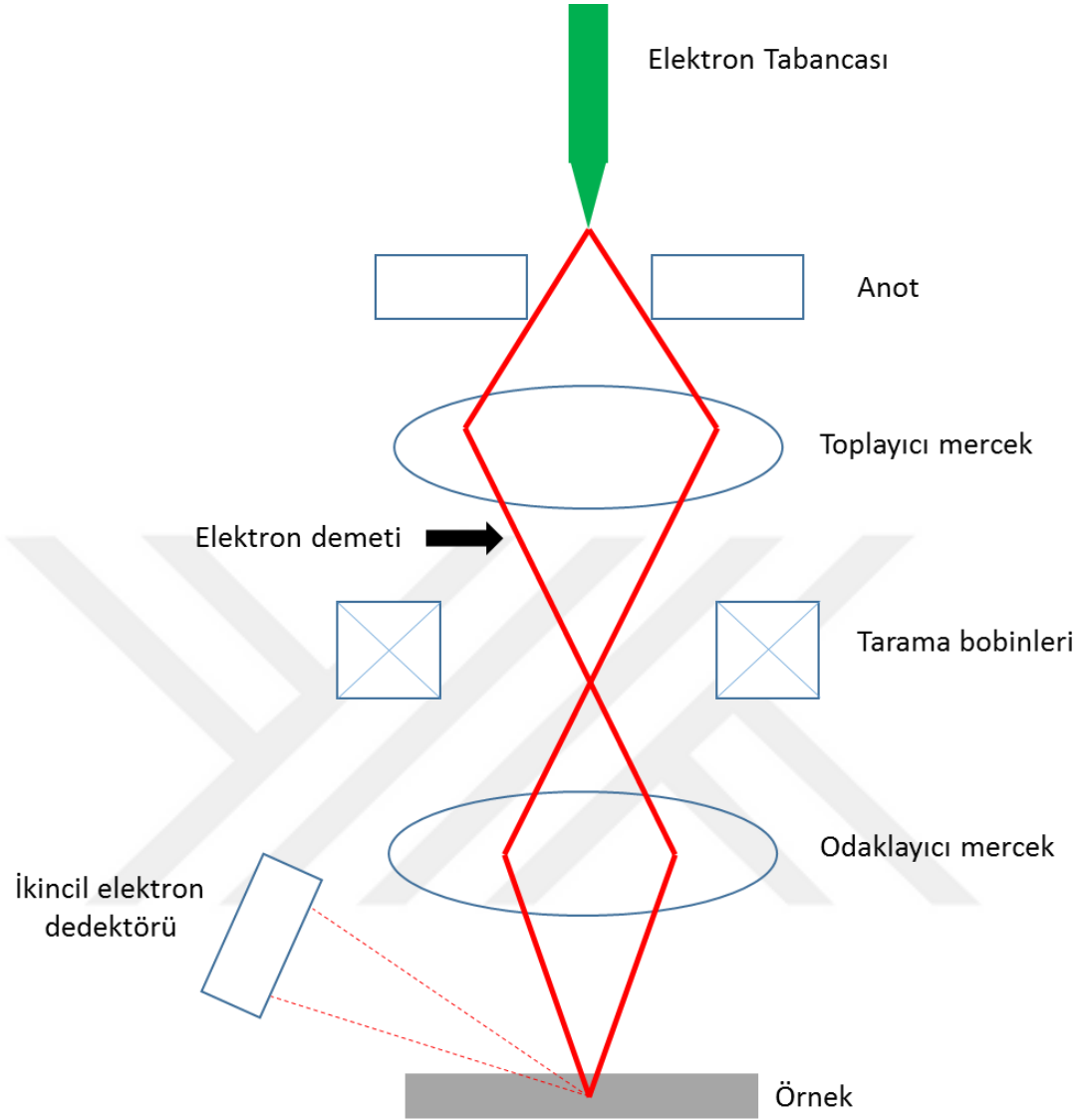
Şekil 4-1 Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme cihaz şematiği

Film büyütme kazanı yatay şekilde konumlandırılmış iki adet elektrot içermektedir. Uygulanan elektriksel sinyal ile elektrotlar kapasitör gibi davranmaktadır. Yukarı tarafta konumlanmış olan elektrot topraklanmıştır ve film büyütülecek olan alttaban topraklanmış olan elektroda tutturulmaktadır. Örnekler p-tipi silisyum alttabanları üzerine büyütülmüştür. Vakum sistemi öncelikle mekanik pompa ile belli basınç seviyesine kadar pompalanmış sonrasında turbo moleküler pompa ile pompalanarak istenilen basınç seviyelerine inilmiştir. a-Si:H büyütebilmek için vakum kazanına silan gazı (SiH_4) akıtılır. Film büyütme işlemi sırasında alttaban sıcaklığının belli bir seviyeye gelmesi gerekliliğinden, ki bu sıcaklık değeri yaptığımız deneyler için 300 °C'tır, ısıtıcı ünitesine akım sürülmektedir. Vakum kazanına pompalanan gazlar ve sıcaklık artışından sonra vakum kazanının basıncı sabitlenerek elektrotlara 13,56 MHz'de çalışan RF gücü uygulanır. RF

gücü uygulandığında, ortamdaki silan molekülleri, farklı reaksiyonlar sonucunda, film üretiminde önemli rol oynayan SiH_3 , SiH_2 ve SiH radikalleri ile bir çok iyon oluşturur. Plazma oluşumundan hemen sonra film büyütme işlemi başlar. Film büyütme işlemi sırasında film kalınlığı temel olarak alttabanın plazma ortamında ne kadar kaldığı ile orantılıdır (hesaplanan film kalınlığı 450 ± 40 nm'dir). Yapılan deneyde film yaklaşık olarak bir saat kadar plazma ortamında kalmıştır.

4.2. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope – SEM) malzeme yüzey topografisi için önemli yöntemlerden biridir. SEM'in temel çalışma prensibi halihazırda kullanılan optik mikroskoplara benzerdir. Yalnız optik mikroskopların aksine aydınlatma için görünür ışık yerine elektronlar kullanılır. Elektronların ortamda bulunan gaz molekülleri tarafından soğurulmasının önlenmesi için işlem vakum ortamında yapılır. Şekil 4.2'de SEM'in şematik gösterimi verilmiştir. SEM'in çalışma mekanizması elektron kaynağı olarak kullanılan elektron tabancası ile başlar. Bu elektronlar ana kazanda, bir dizi elektrostatik ve elektromagnetik lensler yardımıyla anottan katoda doğru hızlandırılır. Bu lensler elektron ışınını istenilen noktaya odaklar. Daha sonrasında elektronlar bir çift sarılı bobin içerisinde geçirilerek, elektronlara kare bir alanda x-y düzleminde hareket kazandırılır. Elektronlar, malzeme ile buluştuktan sonra geri yansıyıp saçılırlar ve sonrasında malzemeden geri saçılan elektronlar, ikincil elektronlar ve X-ışınları elde edilir.

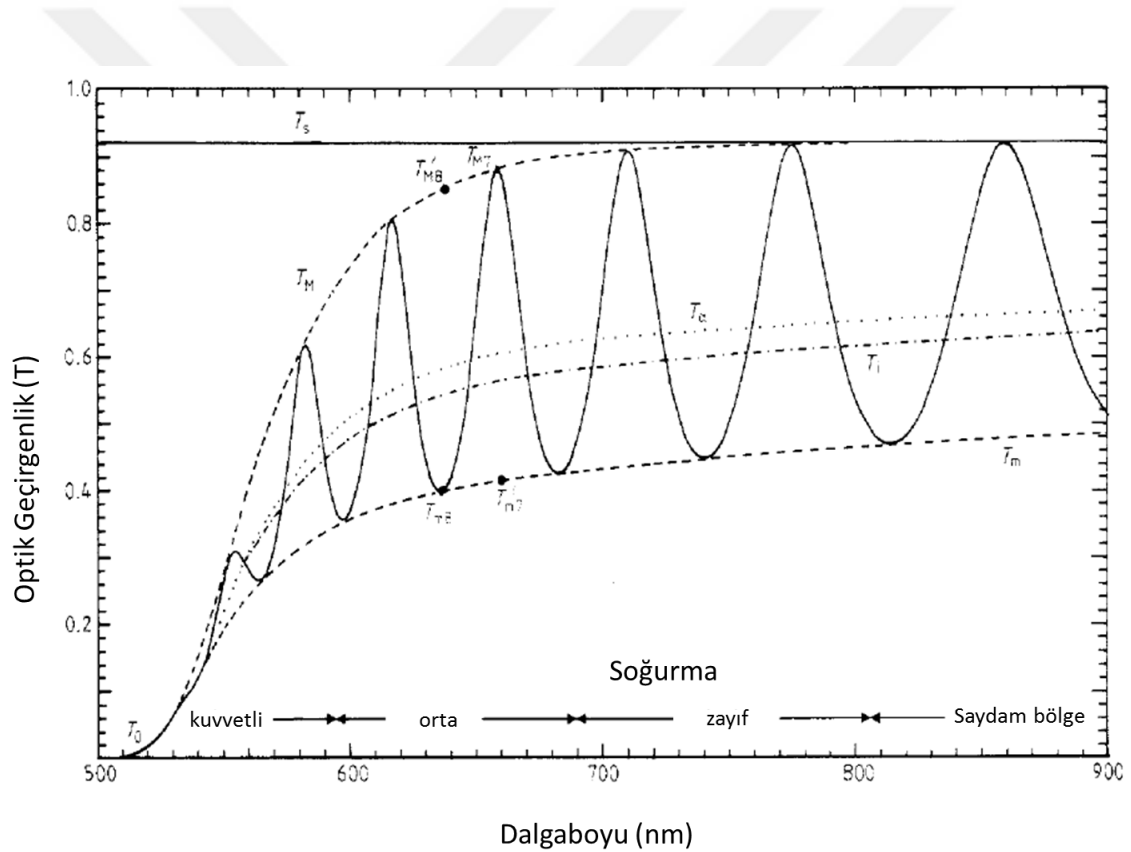


Şekil 4-2 Taramalı elektron mikroskobu şematik gösterimi

Sistem içerisinde bulunan dedektörler geri saçılan bu ışınları elektromanyetik sinyallere dönüştürürler ve bilgisayara iletilirler. SEM ile işlem yapılması istenen malzemenin elektriksel iletken olması şarttır. Görüntü alma işleminden önce, görüntülenmek istenilen malzeme 10 nm civarında bir kalınlıkta altın ya da paladyum alaşımları ile kaplanır.

4.3. Optik Geçirgenlik

Optik geçirgenlik, ince film karakterizasyonunda en sık başvuru alan deneysel tekniklerden birisidir. Bu teknik 6rnekten ge7en işığın, spektral dağılıma gelen işığa g6re normalize edilmesine dayanır. Uygun bir model uygulandığında, 6retilen ince filmin, kalınlık, kırma indisi, soğurma katsayısı, vb. Temel optik 6zellikleri belirlenebilir. Bu tezde Swanepoel' in 1983 [81] yılında 6nerdiği model kullanılmıştır. İnce filmin 6n ve arka y6zeylerinden ger7ekleşen yapıcı/yıkıcı girişim nedeniyle ge7irgenlik spektrumunda sa7aklar oluşur. Bu girişim sa7akları kullanılarak hesaplamalar yapılır. şekil 4.3'te cam alttaban 6zerine b6y6t6lm6ř standart a-Si:H ince filmin optik ge7irgenlik spektrumu verilmiştir.



şekil 4-3 a-Si:H ince film i7in dalgaboyuna karşılık optik ge7irgenlik spektrumu [81]

Optik ge7irgenlik – dalgaboyu grafiğinde zarf eğrilerinin birbirine yaklaşmasının film kalınlığının, y6zey p6r6zl6l6đ6 veya asimetrik b6y6me nedeniyle oluştuğu bilinmektedir, buna rağmen sa7akların genel şekli korunmaktadır [81]. Bu girişim deseninin sa7aklarının tepe ve 7ukur noktaları belirlenerek, her u7 noktanın sanal (T_m'' , T_m'') ve ger7ek (T_m , T_m) teğet noktaları belirlenir. Ardından bu desenin ka7ıncı

dereceden bir girişim deseni olduğu saptanır. Sonrasında teğet noktalarının verilerinden kalınlık bilgisi (d) hesaplanır. Kalınlık bilgisi ışığında dalga boyuna bağlı kırma indisi verilerine de ulaşılabilir. Dalgaboyuna bağlı kırma indisi değişimi, $n(\lambda)$,

$$n(\lambda) = a \frac{1}{\lambda^2} + n_{KA} \quad (4.1)$$

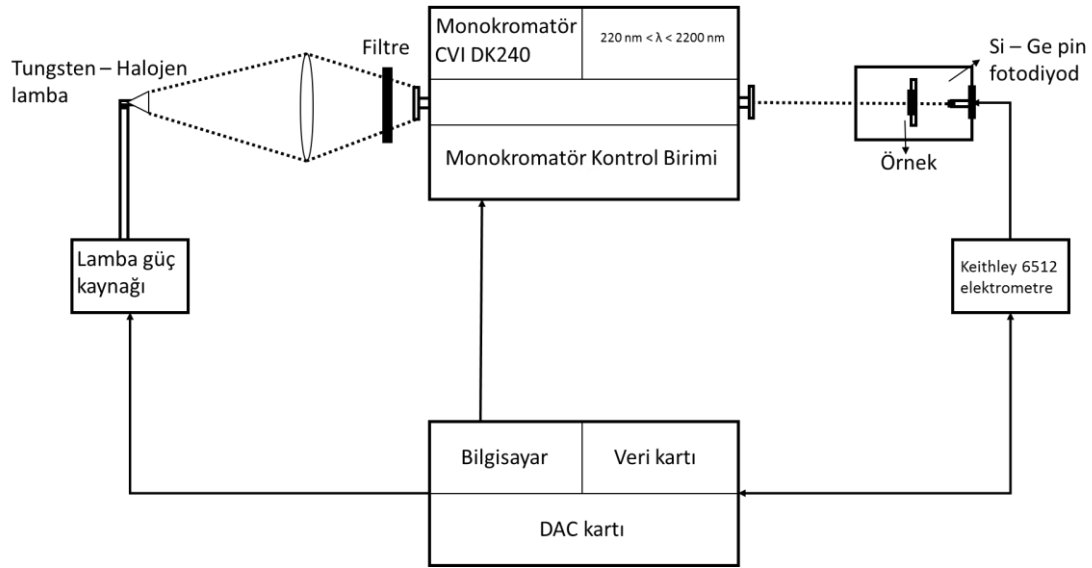
ile verilir. Eşitlik 4.1'deki n_{KA} , uzun dalgaboyları için kırma indisinin değerlerini ve a ise herhangi bir katsayıyı belirtir. Uzun dalgaboyları için kırma indislerinin değerlerine ulaşıldıktan sonra soğurma spektrumu belirlenebilir.

Optik yasak enerji aralığının belirlenmesi amacıyla $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ grafiği optik soğurma spektrumunun belirlenmesi ile çizdirilebilir. Optik yasak enerji aralığının belirlenmesi için çizdirilen grafikte soğurmanın yüksek olduğu bölgeden yararlanılmalıdır. Optik soğurma katsayısının enerjiye bağımlılığı,

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = A (h\nu - E_g^{Tauc}) \quad (4.2)$$

ile verilir. Eşitlik 4.2'de A, sabit bir sayıyı ifade eder [81]. Yöntem Tauc tarafından 1966 yılında önerilmiştir. Yapılan çalışmada a – Si:H filmlerin optik bant aralığının, film kalınlığı arttıkça azaldığı sonucuna varılmıştır [82].

Tez dahilinde Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü Amorf Yarıiletkenler Laboratuvarında kullanılan optik geçirgenlik deney düzeneği Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Optik geçirgenlik deney düzeneğinde kullanılmış olan temel bileşenler, kuartz halojen lamba, monokromatör ve farklı dalgaboylarında ölçüm almak için kullanılan dedektörlerdir.



Şekil 4-4 Optik geçirgenlik deney düzeneği

Optik geçirgenlik deney düzeneğinde lambaya farklı optik güç çıkışlarının eldesi için bilgisayar kontrollü akım sürücüsü entegre edilmiştir. Lambadan çıkan ışığın dalgaboyunun ayarlanabilmesi için CVI Digikrom 240 marka ve modele sahip monokromatör kullanılmıştır. Deney dataları alınırken, arkaplandan gelen gürültüyü verilerden çıkartmak için deney her aşamada örnek varken ve yokken tekrarlanmıştır. Deneyde, 400 – 1120 nm aralığını kapsayan Si dedektör ve 500 – 2600 nm aralığını kapsayan uzun dalgaboyu tipi InGaAs dedektörler kullanılmıştır. Büyük skalada dalgaboyunun kapsanabilmesi sayesinde saçak sayılarının artışı sağlanmış ve daha yüksek kesinlikte bir kalınlık hesaplaması yapılmıştır.

4.4. Fourier Dönüşümlü Kızılaltı (FTIR) Spektroskopisi

Fourier dönüşümlü kızılaltı spektroskopisi malzemeyi oluşturan atom ve moleküllerin bağ yapısının ve hangi yoğunlukta olduğunu incelenmesi için kullanılan temel bir yöntemdir. Bu yöntemin tez dahilinde kullanılmasının asıl amacı, malzeme – lazer etkileşimi sonucu yüzeyde oluşabilecek olan atomik oksijen konsantrasyonunun (%[O] at.) belirlenmesidir. Bu teknik kullanılarak hidrojenlendirilmiş amorf silisyum ya da hidrojenlendirilmiş amorf silisyum altoksit gibi malzemeleri örnek vermek gerekirse, Si – O ve Si – H bağları aracılığıyla yapıda ne kadar oksijen ve hidrojen olduğu saptanabilir [83].

$\equiv \text{Si} - \text{H}$ bağında, bağ gerilmesine bağlı soğurma spektrum piki yaklaşık 2000 cm^{-1} dalga sayısı civarlarında çıkmaktadır. $\text{Si} - \text{H}$ yapısındaki Si atomlarının bağlı olduğu diğer yapıların soğurma spektrum pikleri yüksek dalga sayılarına doğru kayar. SiO_x yapısındaki oksijen atomu iki silisyum atomu ile bağ yapar, $\alpha\text{-SiO}_x\text{:H}$ için düşük oksijen konsantrasyonunda $\equiv \text{Si} - \text{O} - \text{Si} \equiv$ yapısındaki silisyum atomlarının üç tane silisyum atomu ile bağ yapma ihtimali çok fazladır. Oksijen konsantrasyonu arttıkça silisyum atomlarının oksijen atomları ile bağ yapma ihtimali artmaktadır. Bu durumda yapının tepe dalga sayısı 940 cm^{-1} 'den 1100 cm^{-1} değerlerine doğru kaymaktadır. Bu fenomene, arka oksijen bağlanma (back bonding oxygen) adı verilir. 1000 cm^{-1} bandının oksijen konsantrasyonuna bağlılığı kullanılarak SiO_x yoğunluğu hesaplanabilir [84].

$\alpha\text{-SiO}_x : \text{H}$ yapısındaki x bilinmeyenini ile kızılaltı soğurma spektrumunda 1000 cm^{-1} civarındaki $\text{Si} - \text{O}$ bağının soğurma pik noktasının dalga sayısı değeri ile doğrusal bir bağıntı vardır. Bu bağıntı,

$$\nu = 965(\text{cm}^{-1}) + 50(\text{cm}^{-1}) \times x \quad (4.3)$$

şeklindedir. Eşitlik 4.3'de ν soğurma pikinin konumudur. Oksijen konsantrasyonunun yüzde değerini hesaplamak için soğurma bandı altında kalan alan kullanılabilir. Eşitlik ,

$$[\text{O}](\% \text{at.}) = A_0 I (980 \text{ cm}^{-1}) , A_0 = 0,156 \% \text{at.}_{\text{ev.}} \text{cm}^{-1} \quad (4.4)$$

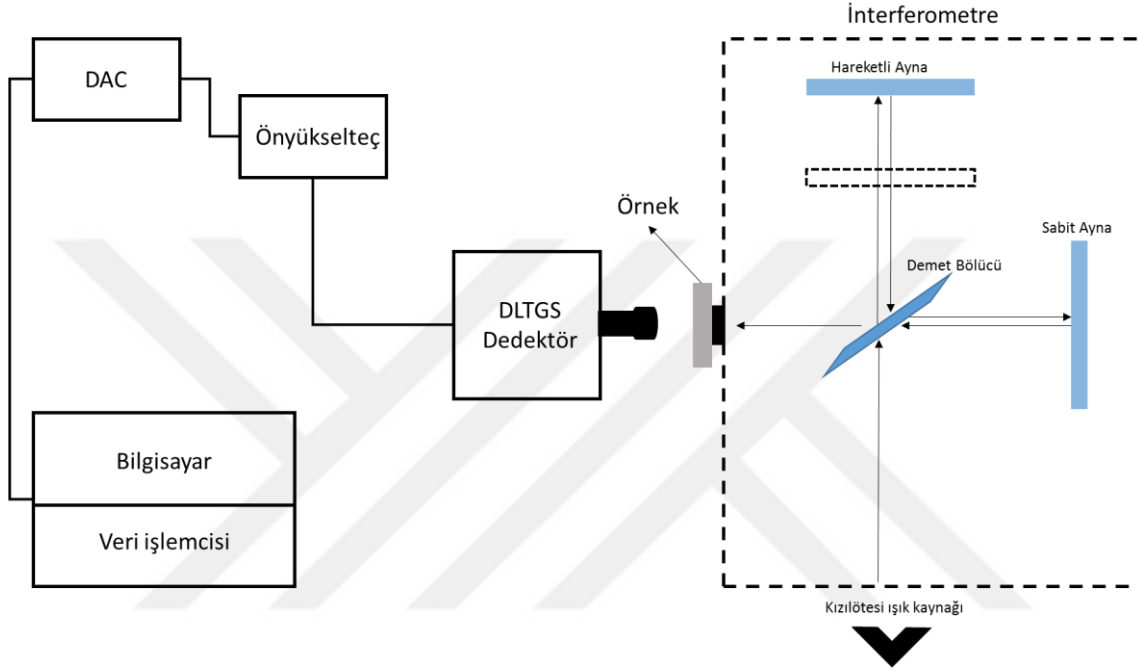
şeklinde verilir. Eşitlik 4.4'de $[\text{O}]$, oksijen konsantrasyonu, A_0 ise kalibrasyon katsayısı olarak verilebilir. $I (980 \text{ cm}^{-1})$ ise soğurma bandının altında kalan alanı anlatır. Alan,

$$I = \int_{1000 \text{ cm}^{-1}} \text{adE} \quad (4.5)$$

ile hesaplanır.

Tez çalışması dahilinde lazer ile işlenmiş örneklerin oksijen ve hidrojen konsantrasyonlarının belirlenmesinde Fourier dönüşüm kızılaltı spektroskopi yöntemi kullanılmıştır. Sistem olarak Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü Amorf Yarıiletkenler Laboratuvarı bünyesindeki Bruker-Optics Vertex 70 FTIR spektrometresi kullanılmıştır. Kullanılan sistemin şematik gösterimi, Şekil 4.5'te verilmiştir. FTIR deneyinde, tek kristal silisyum üzerine büyütülmüş hidrojenlendirilmiş amorf silisyumun lazer ile işlenmesinden sonraki durumu

incelenmek üzere örnek, örnek tutucuya yerleştirilmiş ve istenilen dalgalıboyları örnekte aranan soğurma ve geçirme dalgalıboylarına göre ayarlanarak ölçümler alınmıştır. Ölçümler alınırken dalgalıboyları dalgalısayısına çevirilmiş ve bilgisayar dalgalısayısı şeklinde girilmiştir. FTIR örneklere 2,56 cm^{-1} çözünürlük, 20 kHz tarama hızı parametreleri kullanılarak 200 tarama yapılmıştır.

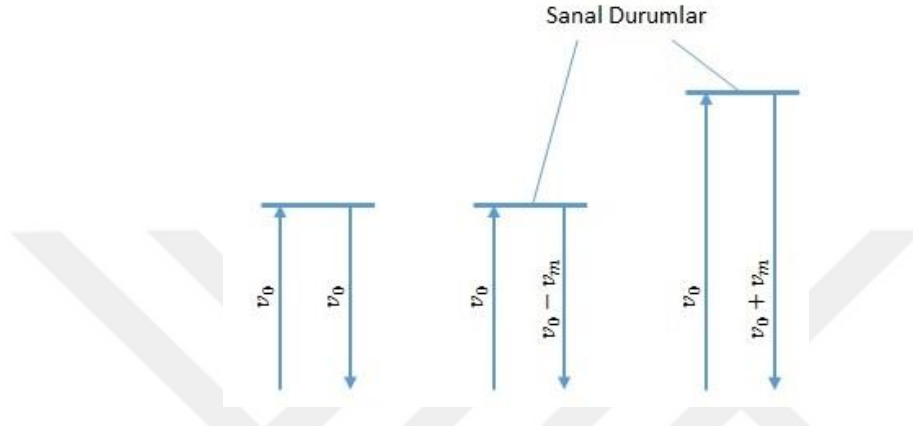


4.5. Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi genellikle lazer kaynağından gelen monokromatik ışığa bağlı olan inelastik saçılmaları baz alır. Lazer kaynağından gelen fotonlar malzeme tarafından soğurulur ve sonrasında malzeme üzerinden ışıma yaparlar. İnelastik saçılan fotonların frekansı, kaynaktan gelen ışığın frekansına oranla kayma (artış ya da azalış yönünde olabilir) gösterirler. Bu etkiye Raman etkisi adı verilir. Bu kayma malzeme içerisinde yer alan moleküllerin titreşim, dönme ve diğer düşük frekanslı geçişleri hakkında bilgi verir.

Raman spektroskopi cihazı temelde ışık kaynağı (lazer), örnek aydınlatma sistemi ve optikler, dalgalıboyu seçici, dedektör olacak şekilde dört elemandan oluşur. Raman etkisi elektrik alandaki moleküler kutuplanmaya (α) bağlı moleküler

deformasyonla ilişkilidir. Işının örnek ile etkileşiminden sonra örneğin üzerine $P = \alpha E$ olacak şekilde elektriksel dipol moment uygulanır ve molekül deformasyona uğrar. Periyodik olan bu deformasyon nedeniyle molekül karakteristik ν_m frekansı ile titreşmeye başlar. Şekil 4.6'da Raman saçılmasında, farklı titreşim frekansları için seviye durumları verilmiştir.



Şekil 4-6 Raman saçılması deneyi için farklı titreşim frekanslarında seviye durumları

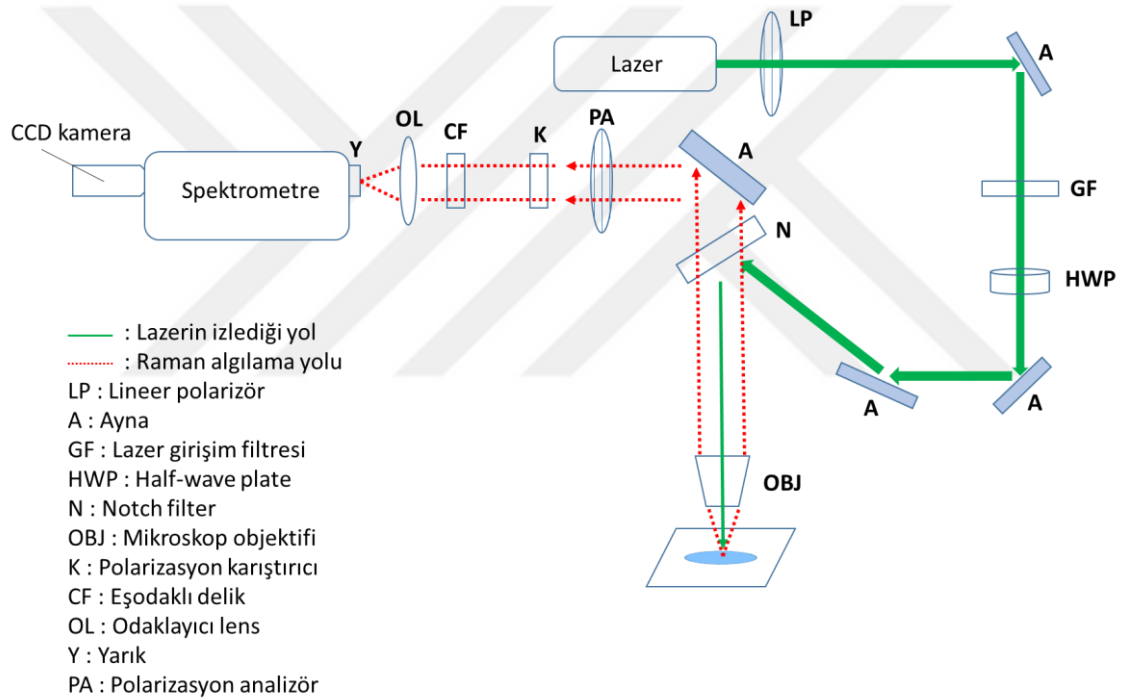
Titreşim genliği nükleer yerdeğiştirme olarak adlandırılır. Basitçe ν_0 frekansına sahip monokromatik lazer ışığı molekülleri uyarak onları salınan dipollere çevirirler.

Raman – aktif modları olmayan moleküller ν_0 frekanslı lazer ışığını soğurlarsa, belli bir süre sonra yeniden temel enerji düzeyine geri dönerler ve ν_0 frekanslı foton yayarlar. Bu tür etkileşim elastik olan Rayleigh saçılması olarak adlandırılır. Eğer ν_0 frekanslı fotonlar Raman-aktif moleküller tarafından soğurlurlarsa, foton enerjisinin bir kısmı raman – aktif mod olan ν_m tarafından soğurulur ve temel enerji düzeyine dönülürken $\nu_0 - \nu_m$ frekanslı bir foton yayımlanır. Bu tür etkileşimlere Stokes adı verilir. Eğer ν_0 frekanslı foton halihazırda uyarılmış bölgede bulunan Raman – aktif moleküller tarafında soğurulursa, temel enerji düzeyine dönerken $\nu_0 + \nu_m$ frekansına sahip bir foton yayımlanır. Bu tür etkileşime Anti – Stokes adı verilir.

Raman kaymasına bakılarak lazer ile işlenen nano/mikro c - $\text{SiO}_x\text{:H}$ örneklerin kristalleşme oranlarını belirlemek mümkündür [85]. Tek kristal silisyum için Raman spektrumundaki kayma enine optik fononlar için 520 cm^{-1} değerindedir. a - $\text{SiO}_x\text{:H}$

yapı içerisindeki nano-kristal bölgelerdeki kayma $517 - 519 \text{ cm}^{-1}$ civarlarında çıkacaktır [86]. Nano – kristal bölgelerin boyutları küçüldükçe kayma 510 cm^{-1} değerlerine doğru kayacaktır. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum için Raman sinyalinin şiddeti ve spektrumu amorf yapıda bulunan fonon miktarı ile ilintilidir ve merkezi 480 cm^{-1} olacak şekilde geniş bir banda sahiptir [87].

Lazer ile işlenen örneklerin kristalizasyon oranlarının ölçülmesi için Raman Saçılması deneyi ODTÜ’de yer alan GÜNAM laboratuvarlarında Horiba-Jobin Yvon i550 marka ve modele sahip Raman Spektroskopi cihazı ile yapılmıştır. Kullanılan cihazın şematik gösterimi Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



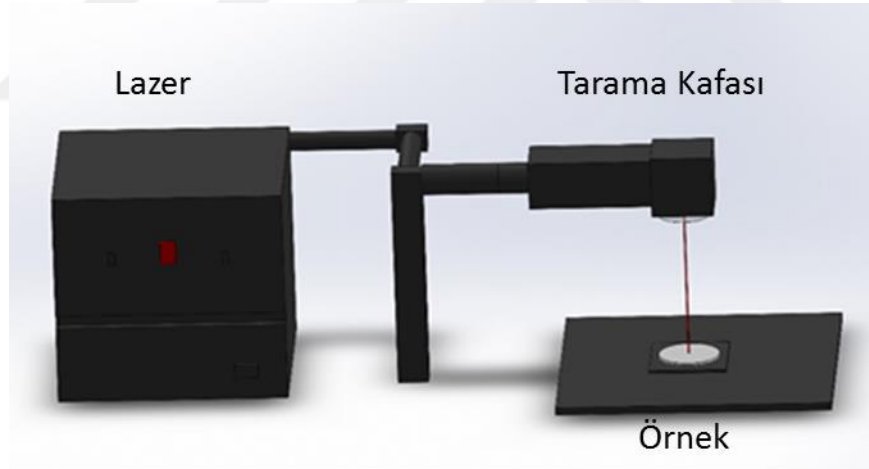
Şekil 4-7 Raman saçılması deneyinde kullanılan sistemin şematik gösterimi

Raman ölçümü için cam üzerine hazırlanmış ve lazer ile işlenmiş örnek Raman mikroskopunun altına yerleştirildikten sonra ölçümlerin etkilenmemesi için etrafı ışık almayacak şekilde kapatılmıştır. Ölçümlere ilk olarak arkaplan spektrumu alınarak başlanmıştır. Tartışma bölümünde de anlatılacağı gibi arkaplan bütün spektrumdan çıkartılmalıdır. Sonrasında merkez dalgaboyu seçilerek, bu dalgaboyunun ne kadarlık kısmında spektrum alınacağı kararlaştırılmıştır. Sonrasında ışığın örneğin üzerine odaklanması yapılmıştır. Örnekler lazer ile

işlendiğinden dolayı, raman ölçümünün lazer demetinin geçtiği noktalardan alınması önemlidir. Odaklama işleminden sonra Raman Spektrometresinin kullandığı 532 nm dalga boylu, yaklaşık 300 mW ortalama güce sahip lazerin kapak bölgesi açılarak spektrum dataları alınmaya başlanmıştır. Spektrum dataları istenilen dalgaboylarına odaklanarak işlem tekrarlanmış böylece daha kesin veriler alınmasının önü açılmıştır.

4.6. Lazer ile Kristalizasyon

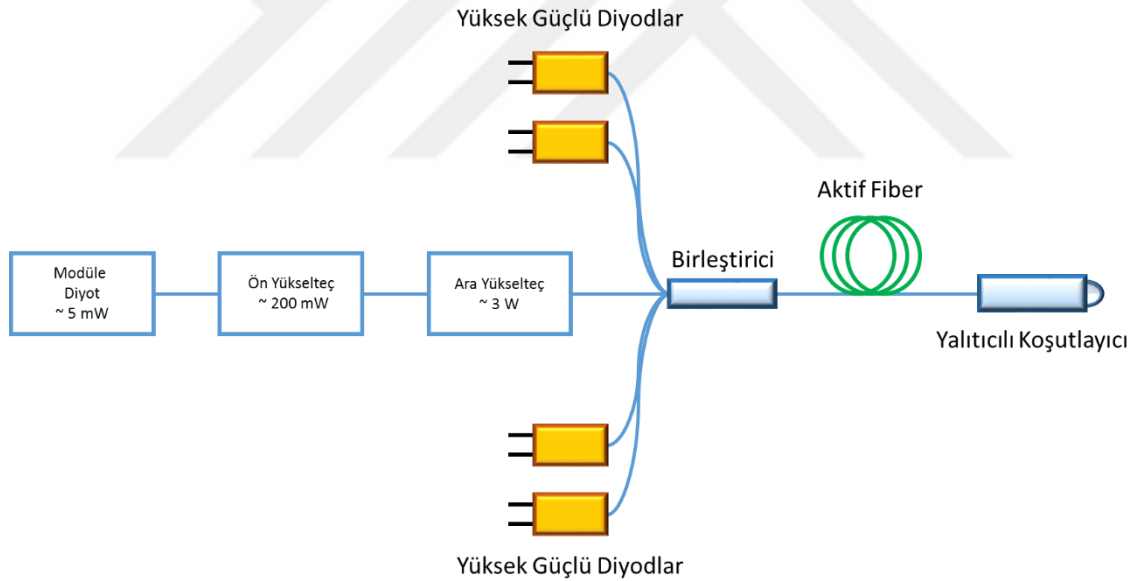
PECVD ile büyütülen örnekler, kalınlık ölçümlerinin yapılmasından sonra (hesaplanan kalınlık değeri $450\pm\text{nm}$ 'dir) kristalizasyon için lazer ile işlenmiştir. Deneyler, maksimum 20 W ortalama optik güç, maksimum 0,5 mJ atım enerjisi, tekrar frekansı 20 – 200 kHz arası değişebilen, 1064 nm merkez dalgaboylu FiberLAST NanoMARK 20 marka ve modele sahip fiber lazer ile yapılmıştır. Deney düzeneği şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4-8 Lazer ile kristalizasyon deney düzeneği

Kullanılan lazer Master Oscillator Power Amplifier (MOPA) mimarisine sahiptir. Başlangıçta kaynak olarak kullanılan ve modüle edilen 1064 merkez dalgaboylu bir lazer diyot kullanılmaktadır. Lazer diyodun optik çıkışı modüle olarak kullanıldığı zaman 5 mW düzeylerindedir. Ön yükselteç bölgesinde lazer diyottan gelen sinyal pompa diyodu ile birleştirildikten sonra aktif fibere gönderilir ve sinyal yükseltgenme işlemi gerçekleşir. Ön yükselteç kısmında, fiber bileşenleri geri

yansıma ve doğrusal olmayan etkilerden korumak için bir takım filtreler kullanılır. Ön yükselteç kısmında yükseltgenme sonrası elde edilen sinyal 200 mW civarındadır. Ön yükselteç kısmından alınan sinyal, ara yükselteç kısmına aktarılır. Ara yükselteç kısmına gelen sinyal, birleştirici içerisinde pompa diyodu ile birleştirilir. Birleştirici sayesinde aynı fiber içerisinde ilerleyen pompa ve sinyal fotonları aktif fiber içerisinde yükseltgenme işlemine tabi tutulur. Ara yükselteç kısmında elde edilen ortalama optik güç 3 W civarındadır. Elde edilen 3 W'lık sinyal son olarak ana yükselteç kısmına aktarılır. Ana yükselteç kısmında, aynen ara yükselteç kısmında olduğu gibi birleştirici ve pompa diyotları kullanılır. Bu kısımdaki yükseltgenme işlemi daha çok pompa diyodu kullanıldığı için daha fazladır. Elde edilen ortalama optik güç > 20 W olacaktır. Elde edilen sinyal aktif fiberden sonra direkt olarak yalıtıcı koştulayıcıya gönderilir. Koştulayıcıya gönderilen sinyal kolime hale geldikten sonra tarama kafasına gönderilir ve tarama işlemi yapılır. Şekil 4.9'da kullanılan fiber lazerin şematik gösterimi yer almaktadır.

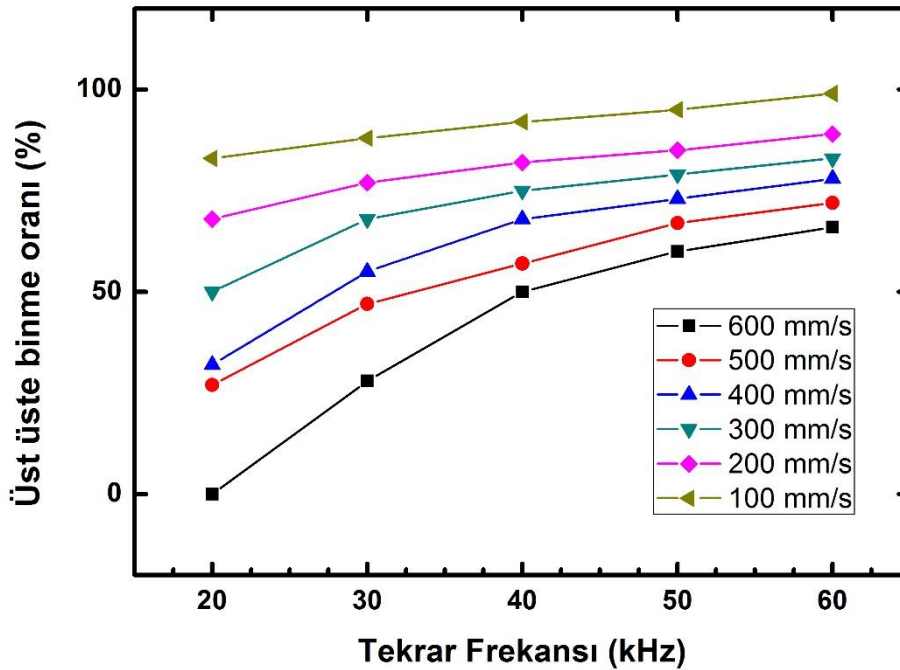


Şekil 4-9 Nanomark 20 lazer modülünün şematik gösterimi

Örnekler lazer ile işlenirken öncelikli olarak lazer ortalama optik çıkış gücü, lazer tarama hızı, lazer tekrar frekansı, lazer çıkış ışınının odak uzunluğu, odaklanma için kullanılacak olan merceğin çapı ve çapı belli olan odaklanmış lazer spotunun üst üste gelme veya gelmeme durumları optimize edilmiştir. İşlenen örnekler SEM

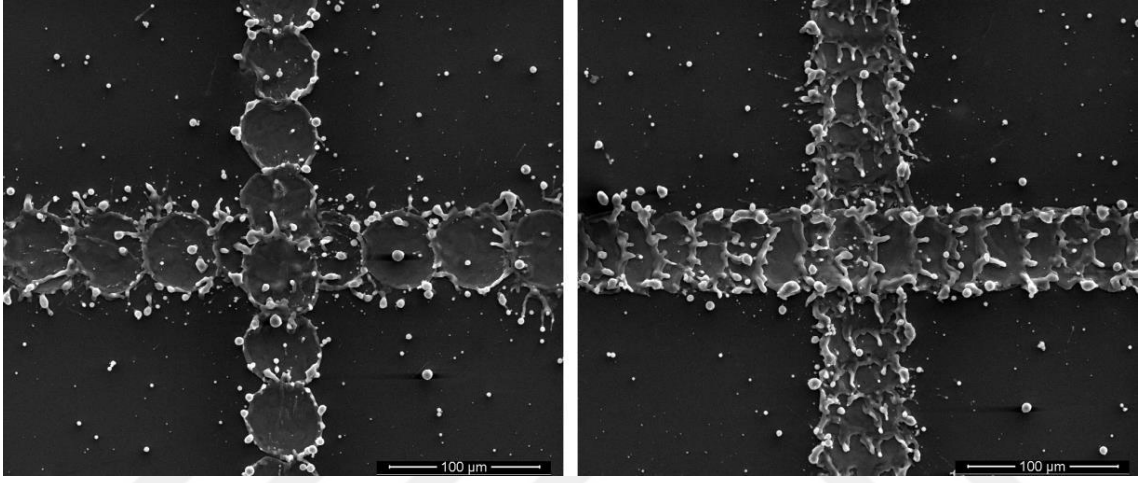
ile incelenmiş ve en uygun parametreler seçilip kristalizasyon deneyine geçilmiştir. Film büyütülen örneklerin lazer ile işlenebilmesi için farklı desenler de kullanılmıştır. Desenler 1 mm x 1 mm alanlık bir karenin içerisine taranarak kristalizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Çizilen her bir kare, farklı parametreler kullanılarak işlenmiş ve karakterize edilmiş böylece parametrelerin uygunluğu açısından bir veri seti oluşturulmuştur.

Tarama hızı ve tekrarlama frekansı kristalizasyon etkisine göre değiştirilmiştir. Bununla birlikte kristalizasyon miktarına göre lazer atımlarının üst üste binme durumuna da gözatılmıştır. Bu çalışmada odak uzunlukları 163 mm ve 255 mm olacak şekilde iki farklı objektif kullanılmıştır ve bu objektiflerden geçen lazer ışınının ışın çapları sırasıyla 30 μ m ve 46 μ m. Kullanılan her bir objektif, tarama hızı ve tekrar frekansı için lazer ışınlarının çakışma yüzdesi hesaplanmıştır. Şekil 4.10'da 163 mm'lik objektif için farklı frekans ve tarama hızı değerlerindeki atımların üst üste binme oranları verilmiştir.



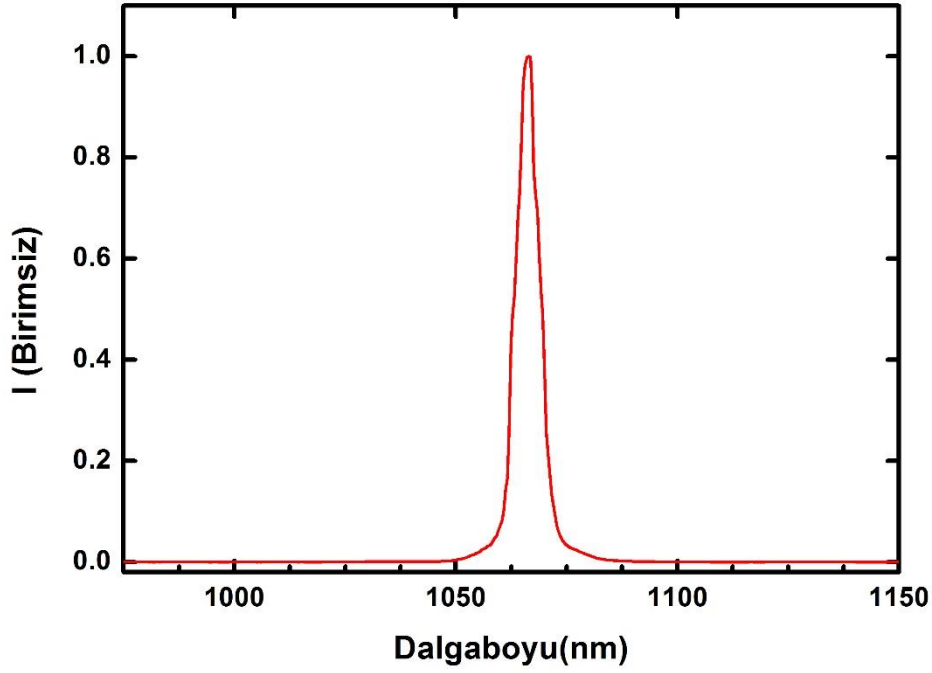
Şekil 4-10 163 mm' lik odak uzunluğuna sahip mercek ile, farklı tarama hızı değerleri için tekrar frekansına bağlı, atımların üst üste binme oranı

Atım stabilitesi kristalizasyon işleminde bir diğer önemli unsurdur ve Şekil 10'daki görüntü kullanılarak görsel olarak kontrol edilmiştir. Konfigürasyonda 163 mm'lik objektif kullanılarak balk yapısındaki silisyum farklı tekrar frekansları ve farklı hızlarda taranarak işlenmiştir. İşlem sonrası silisyum malzeme taramalı elektron mikroskopu altında incelenmiştir. Atımların farklı hız ve tekrar frekanslarındaki formasyonu Şekil 4.11'de gösterilmiştir. İşlenen malzeme olarak tek kristal silisyum plaka kullanılmıştır. Şekilden de anlaşılacağı gibi kullanılan tarama kafasının tarama hızı kristalizasyon işlemi için oldukça önemlidir.



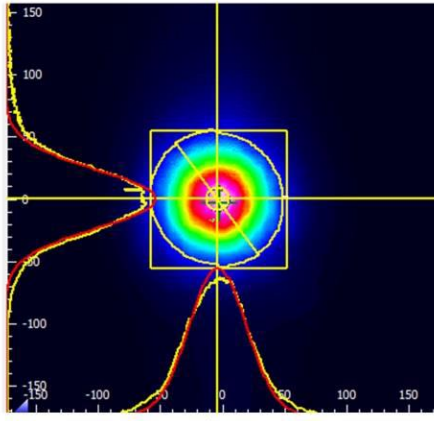
Şekil 4-11 100 kHz tekrar frekansı ve 163 mm' lik objektif kullanılarak alınmış atımlar arası stabilizasyon a) 3800 mm/s b) 2200 mm/s [88]

Kullanılan cihazın optik spektrum analizöründen alınan spektrum verisi Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

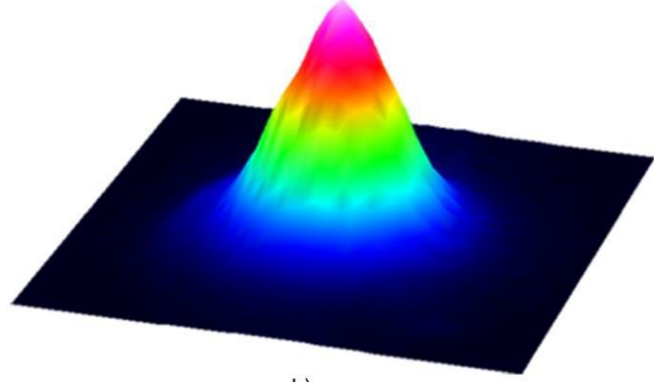


Şekil 4-12 Lazer Spektrumu (ışık şiddeti normalize edilmiştir.)

Önceki bölümlerde aktarıldığı üzere cihazın koşutlayıcı çıkışından tarama kafasına aktarılan ışın kalitesinin malzeme işleme üzerine büyük etkisi vardır. Lazer ışın kalitesi M^2 ile anlatılır. M^2 bilgisi, lazer ışınının ideal gausiyen ışıktan ne kadar ayrıldığını belirtir. Eğer lazer ışını ideal gausiyen tipinde ise M^2 değeri 1 olacaktır. M^2 ideal değere ne kadar yakınsa, lazer ışını o kadar iyi odaklanacak ve kolime hali uzak mesafelerde o kadar az ıraksayacaktır (diverge). Ayrıca M^2 değeri 1'e eşit ise fiber içerisinde ilerleyen mod sadece temel mod (fundamental mode) olan TEM_{00} modu olacaktır. Fiber içerisinde ilerleyen mod tek kipli moddan (single mode), çok kipli moda (multi mode) doğru artış gösteriyorsa, M^2 değeri de artış gösterir. M^2 değeri ne kadar büyükse, lazerin ışın kalitesi o kadar kötüdür denir. Şekil 4.13'te kullanılan lazer çıkışının ışın kalitesi profili verilmiştir. M^2 değeri ~1,1 olarak hesaplanmıştır.



a)



b)

Şekil 4-13 Şekil Işın kalitesi profili a) M^2 ölçümü $\sim 1,1$ b) Işın profili [88]

5. DENEYSEL VERİLER VE TARTIŞMA

Bu bölümde lazer ile işlenecek olan örneklerin üretimi, ön yapısal karakterizasyonları, lazer ile işlenmeleri ve kristalizasyonları, son olarak da optik karakterizasyon sonuçları ve sonuçlardan elde edilen veriler tartışılacaktır. Elde edilen sonuçlar üçüncü bölümde anlatılan deney düzeneklerinde ölçülmüştür. İnce film örnekler için kullanılan alttabanlar Corning 7059 cam ve p-tipi tek kristal silisyumdur. Lazer ile kristalizasyon işlemi sırasında lazer ortalama optik gücü, lazer tekrar frekansı, lazer tarama hızı, lazer demetlerinin örtüşme oranı, lazer ışınının odaklanma sertliği gibi birçok parametre değiştirilmiş ve karakterizasyonu yapılmıştır. Değişen parametrelerin kristalizasyon üzerine etkisi de bu bölümün kapsamı içerisinde.

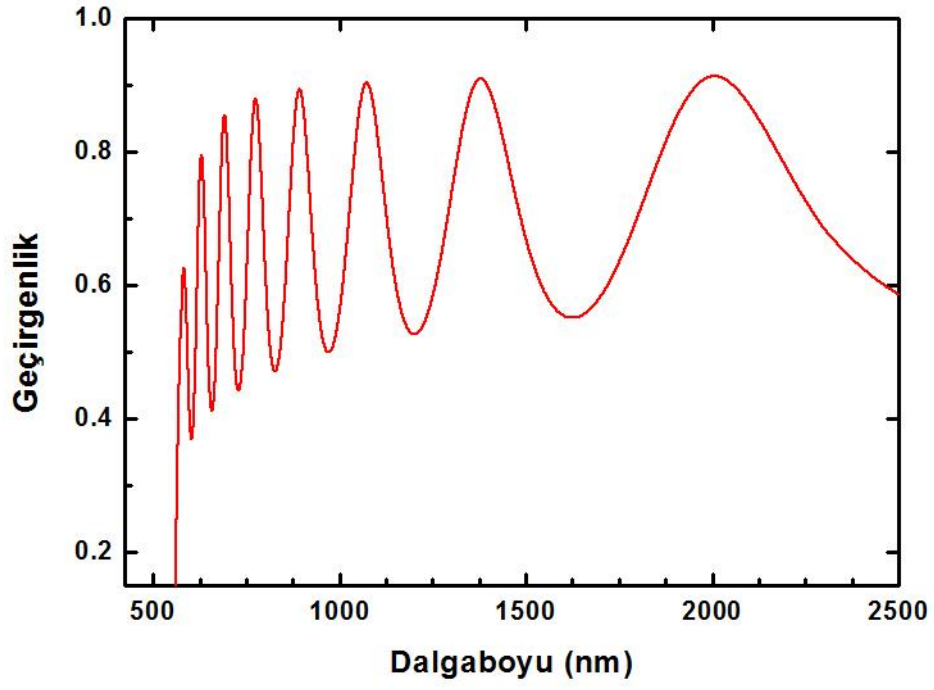
5.1. PECVD - Örnek Büyütme

Büyütülen örneklerin içsel özellikleri, kullanılan PECVD yöntemindeki alttaban sıcaklığı, kullanılan gazların akış hızı, kazan basıncı, RF frekansı ve gücü ile doğrudan ilişkilidir. Büyütülen örneklerde alttaban olarak p-tipi tek kristal silisyum ve cam kullanılmıştır. P-tipi tek kristal silisyum üzerine hidrojenlendirilmiş amorf silisyum tabakanın (a-Si:H) büyütülmesi için 10 sccm sabit akış hızlarında SiH_4 gazı kullanılmıştır. Örneğin üretilmesi sırasında alttaban sıcaklığı 300 °C' de sabit tutulmuştur. Elektrotlar üzerine 18W'lık RF gücü uygulanırken, 3W' lık kısmı geri yansımıştır. Vakum kazanı 200 mTorr sabit basıncında SiH_4 ile doldurulacak şekilde pompalama hızı kontrol edilmiştir. Kaplama süresi 60 dakika olarak belirlenmiştir. Deney sonunda vakum kazanı 0.1 mTorr'un altına kadar pompalanmıştır.

.

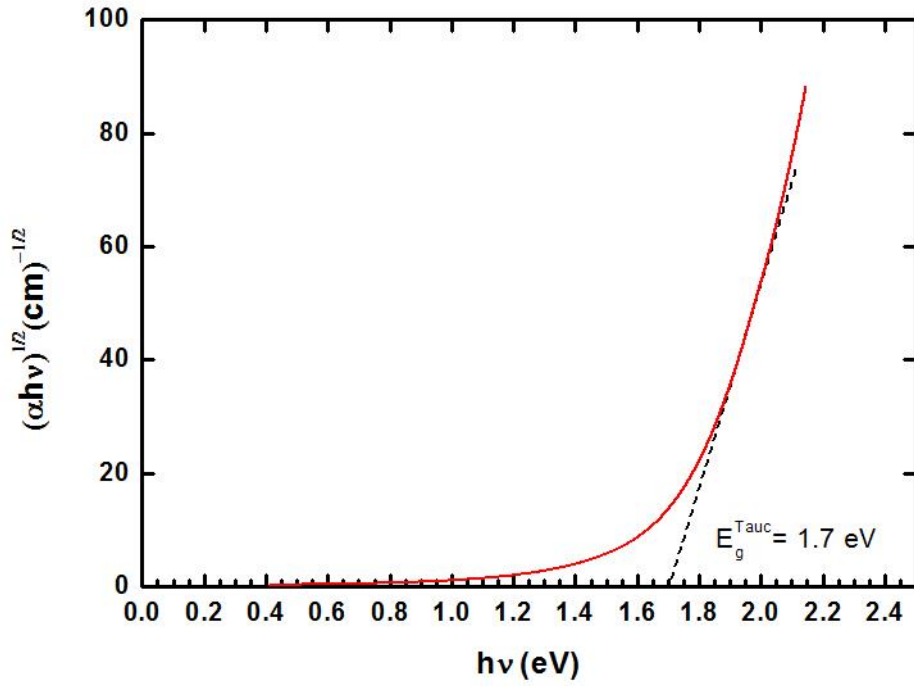
5.2. Optik Geçirgenlik

PECVD yöntemi kullanılarak corning 7059 cam üzerine büyütülmüş filmlerin optik geçirgenlik deneyleri yapılmıştır. Bu deney sonrasında dalgaboyuna bağlı olarak optik geçirgenlik ölçülerek kırma indisi ve kalınlık hesaplanmıştır. Şekil 5.1'de lazer ile işleme yapılmamış örneğin optik geçirgenlik spektrumu yer almaktadır.



Şekil 5-1 PECVD sistemi ile büyütülen örneğin optik geçirgenlik spektrumu.

Şekil 5.2’de Tauc optik aralığı grafiği verilmiştir.

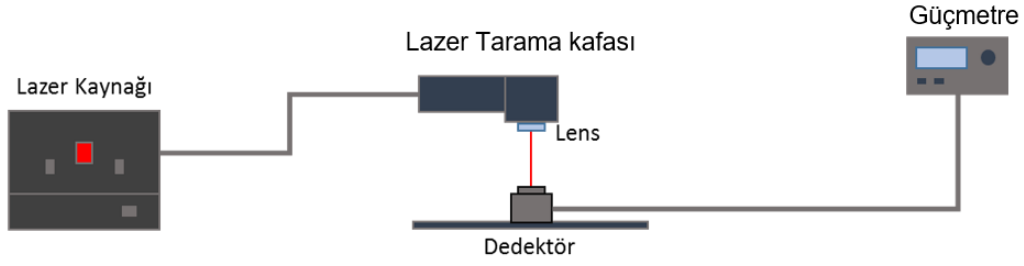


Şekil 5-2 Tauc optik aralığı (Kırmızı çizgi, $(\alpha h\nu)$ 'ye karşılık $(\alpha h\nu)^{1/2}$ için çizdirilen eğri ve siyah kesikli çizgi ise doğrusal uyumlama için çizdirilen eğridir.).

5.3. Lazer Kristalizasyon

PECVD ile büyütülen örneklerin kristalizasyonu için 20W ortalama güce, 20-200 kHz arası değişebilen tekrar frekansına, 0,5 mJ'e kadar atım enerjisine ve 1064 nm merkez dalgaboyuna sahip tümlşik fiber lazer kullanılmıştır. Lazer çıkışına takılı olan tarama kafasında bulunan 163 mm'lik ve 255 mm'lik odak uzunluğuna sahip merceklerdir ve bu mercekler yardımıyla 8 mm çapta gelen lazer ışınını sırasıyla $\sim 30 \mu\text{m}$ ve $\sim 40 \mu\text{m}$ çapa odaklamaktadır.

Kullanılan lazerin parametreleri özellikle örneğe göre optimize edilmiştir. Lazer ile kristalizasyon işleminde öne çıkan özellikler genelde termal olduğundan lazer ortalama güç, tekrar frekansı ve atım enerjisinin optimizasyonu büyük önem taşımaktadır. Kristalizasyon işlemi için kullanılan lazer şematiği Şekil 5.3'te gösterilmektedir.



Şekil 5-3 Lazer ortalama optik çıkış gücü optimizasyonu için kullanılan lazer düzeneğinin şematik gösterimi

Lazer ile kristalizasyon işlemine başlamadan önce lazer güç ölçümü yapılmıştır. Lazerin tarama kafasına girdiği bölgede lens üzerinden ve tarama kafası üzerinden olan kayıpların optimize edilmesi ve tez çalışmasında daha sağlıklı veriler alabilmek için kullanılan bütün lazer güçleri öncelikli olarak tarama kafasının çıkışından Thorlabs marka S314C model ısı dedektör ile karakterize edilmiştir.

Örneklerin işlenmesi iki kısma ayrılabilir. Bu kısımlar ilk grup için lazer parametrelerinin belirlenmesi, ikinci grup olarak belirlenen parametreler ile örneklerin işlenmesi olarak söylenebilir. İlk grup örnekler için değişik ortalama güç, lazer tekrar frekansı, lazer tarama hızı ve üst üste binme oranı gibi lazer parametreleri için geniş bir ölçekte tarama yapılmıştır. Hazırlanan tablo taranan lazer parametrelerin çokluğu dolayısıyla ek' e konulmuştur.

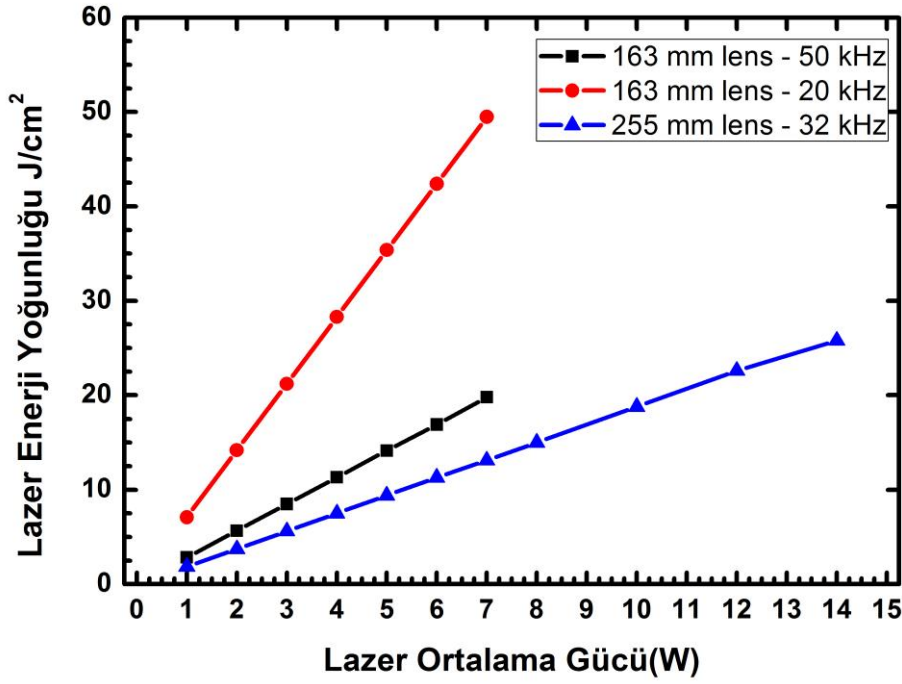
Değişik parametrelerin taranması sonrasında örneklerin SEM ve optik mikroskop görüntüleri alınmıştır. Bu görüntüler ışığında uygun parametreler seçilip yeniden örnek işleme yoluna gidilmiştir. Kristalizasyon işlemi için seçilen uygun parametreler Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1 Kristalizasyon için optimum olarak belirlenen (seçilen) lazer parametreleri (163 mm' lik mercek kullanılmıştır)

Parametre Numarası	Ortalama Güç (W)	Tekrar Frekansı (kHz)	Tarama hızı (mm/s)	Atımlar arası mesafe (μm)
44	7	20	1150	30
48	5	20	1150	30
52	3	20	1150	30
54	2	20	1150	30
55	1	20	900	15
56	1	20	1150	30

Seçilen parametreler optik karakterizasyon ve kristalinite oranlarının hesabı için hem silisyum hem de cam alttaban üzerine işlenmiştir.

Şekil 5.4'te farklı objektif ve tekrar frekansları için, lazer ortalama gücüne karşılık lazer enerji yoğunluğu grafiği verilmiştir.



Şekil 5-4 Farklı objektif ve tekrar frekansları için lazer ortalama gücüne karşı lazer güç yoğunluğu grafiği

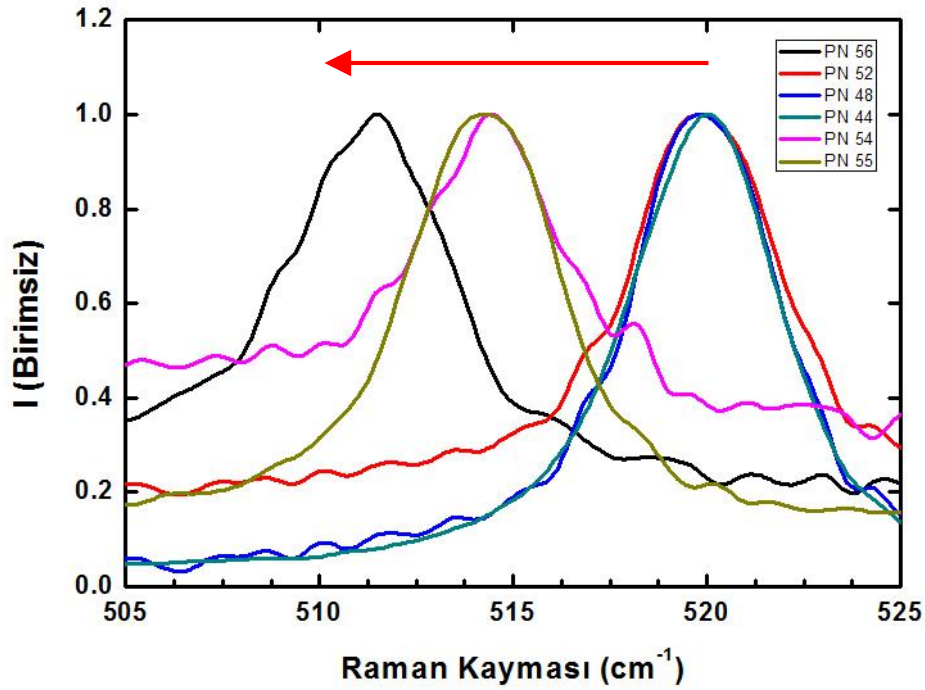
5.4. Raman Saçılması

PECVD yöntemi ile büyütüldükten sonra lazer ile işlenen örneklerin kristalinite seviyelerini belirlemek amacıyla ODTÜ GÜNAM'da bulunan Horiba-Jobin Yvon i550 marka ve modele sahip Raman saçılması spektrometresi kullanılmıştır. Ölçüm için sistemde halihazırda bulunan 532 nm ve demet çapı 1,5 μm olan lazer kullanılmıştır. Beklenen Raman kayması ile c-Si alttabandan gelebilecek Raman kayması sinyallerini ayırtetmek çok güç olacağından, ölçümler cam üzerine üretilmiş örneklerden yapılmıştır. Ölçümler 100 cm^{-1} ile 800 cm^{-1} arasında 1 cm^{-1} adımlarla kaydedilmiştir.

Kristalinite oranının hesaplanması için, verileri alınan ölçümlerin grafiklerinin çizdirilmesinden sonra daha sağlıklı hesaplama yapılabilmesi için grafiklere çoklu Gauss fonksiyonu uygulanmıştır. Sonrasında grafikte belirlenen tepe değerlerinin altlarında kalan alanların yardımıyla, Eşitlik 5.1'de belirtildiği gibi kristalinite oranları belirlenmiştir.

$$X_c = \frac{I_c + I_m}{I_c + I_m + I_a} \quad (5.1)$$

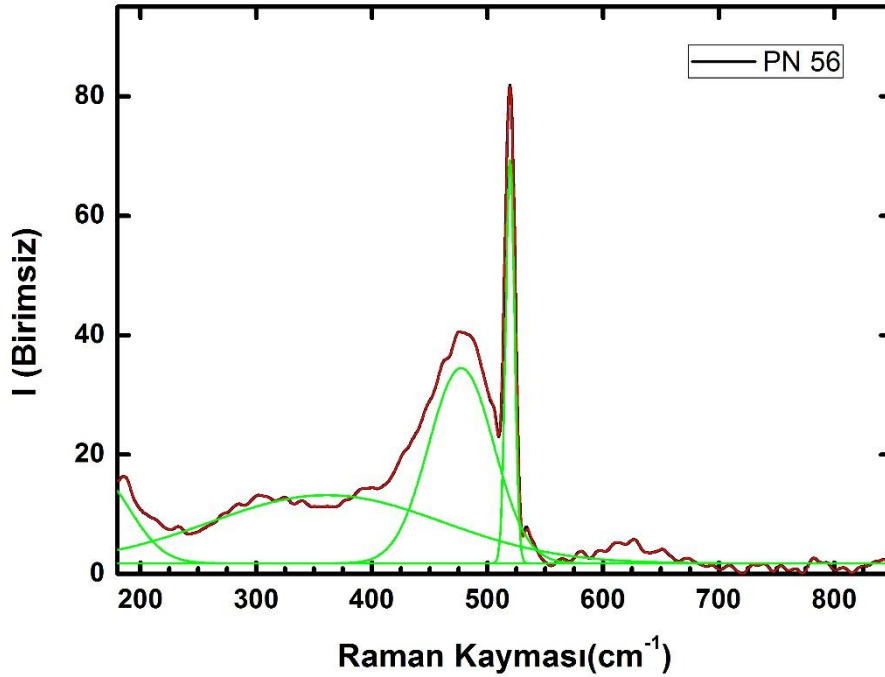
Eşitlik 5.1’ de I_c ve I_m Raman kayması grafiğinde kristalinite oranları hesaplanması istenilen piklerin altında kalan alanları ve I_a ise amorf faza karşılık gelen tepe noktaları altında kalan alanı belirtmektedir. Kristal silisyum üzerinden alınan Raman kayması verilerinden çizdirilen grafikten elde edilen raman ayması tepesi $k = 520 \text{ cm}^{-1}$ değerinde olacak şekilde keskin bir sinyal vermektedir. Kristal boyutları mikro boyutlardan nano boyutlara doğru azaldıkça, bu sinyalin tepe değeri $k = 520 \text{ cm}^{-1}$ değerinden $k = 500 \text{ cm}^{-1}$ değerine doğru kayma gösterir [87]. Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum için ise bu tepe değeri $k = 480 \text{ cm}^{-1}$ değerinde olup, kristal yapıdan farklı olarak yayvan bir sinyal vermektedir [83, 88, 89].



Şekil 5-5 Farklı lazer parametreleri altında işlem görmüş ince filmlerin Raman saçılma grafiği (sinyal şiddetleri normalize haldedir)(Ok izleme kolaylığı ve kayma yönünü belirtmek için koyulmuştur.)

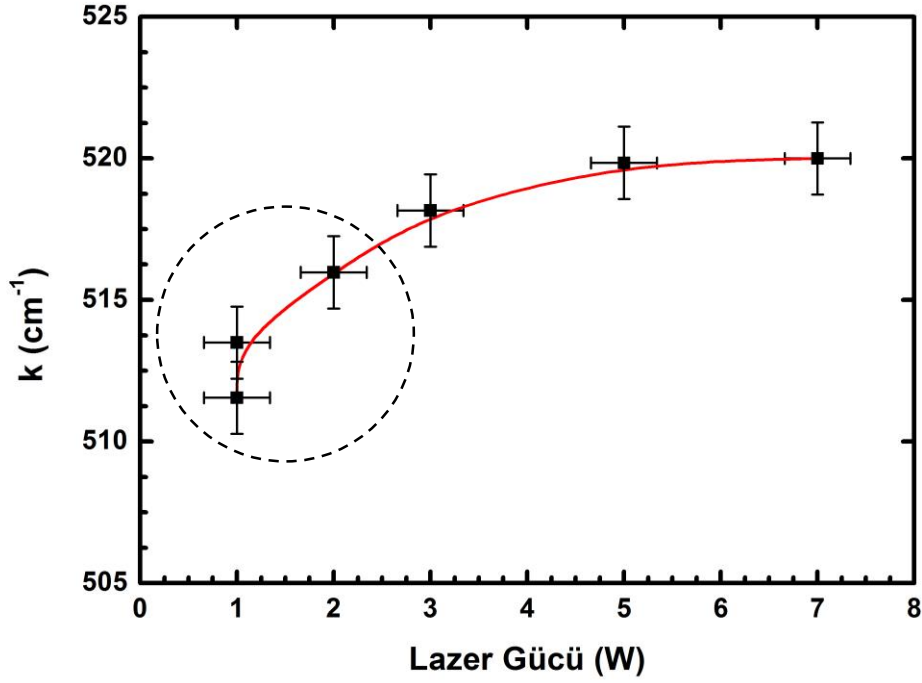
Farklı lazer parametrelerine göre değişen kristalizasyon oranlarına bağlı Raman kaymaları, farklı tepe noktaları için kristalizasyon miktarları ve lazer gücüne bağlı kristalizasyon miktarları Şekil 5.5 te verilmiştir.

Grafikten anlaşıldığı gibi büyütülen örneklerin lazer ile işlemlerinden sonra kristalizasyon işlemi gerçekleşmiştir. Lazer parametrelerinin değişimine bağlı olarak Raman kayma miktarları artmıştır. Ayrıca kristalite boyutları küçüldükçe raman sinyalinin tepe noktası 500 cm^{-1} değerine doğru yaklaşmaktadır [87, 89]. Şekil 5.6'da PN 56 lazer parametresi ile işlenen örneğin raman kayması grafiği verilmiştir. Şekil 5.5'te verilen grafik referans alınarak elde edilen kristal boyutları tahmin edilebilir.



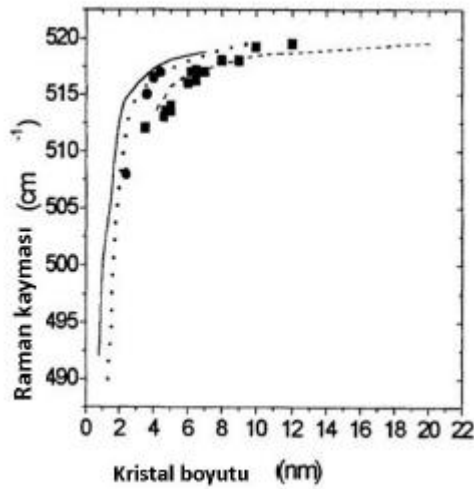
Şekil 5-6 Tez çalışması sırasında üretilen ince filmin 56 parametre nolu lazer parametresi ile işlenmesinden sonra elde edilen raman saçılma spektrumu. Şekilde çoklu gauss fonksyonu atama yöntemi kullanılmıştır. Siyah çizgiler spektrumdan gelen veri, yeşil çizgiler çoklu gauss fonksyonuna ait eğrileri ve kırmızı çizgiler bu eğrilerin kesişimini belirtir (çoklu gauss fonksyonu için tepe noktaları $300, 400, 489, 529$ ve 640 cm^{-1} olacak şekilde 5 bant seçilmiştir)

Şekil 5.7'da lazer gücüne bağlı olarak raman tepe noktalarının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 5-7 Lazer gücünün değişimine bağlı olarak raman tepe noktalarının değişimi. (Kırmızı eğri izleme kolaylığı için ve kristal boyutlarının küçük olduğu örneklere ait kaymalar, siyah kesikli çizgi ile işaretlenmiştir.)

Şekil 5.7’de gösterilen grafikte lazer gücünün değişimine karşılık Raman sinyalinin tepe noktalarının değişimi gösterilmiştir. Grafiğe göre lazer gücü azaldıkça Raman sinyali 520 cm^{-1} değerinden 510 cm^{-1} değerine doğru kaymıştır. Şekil 5.8’de kristal



Şekil 5-8 Kristal boyutlarına bağlı olarak raman kayma miktarı [77]

boyutuna bağı olarak raman tepe noktalarının kayma miktarı verilmiştir.

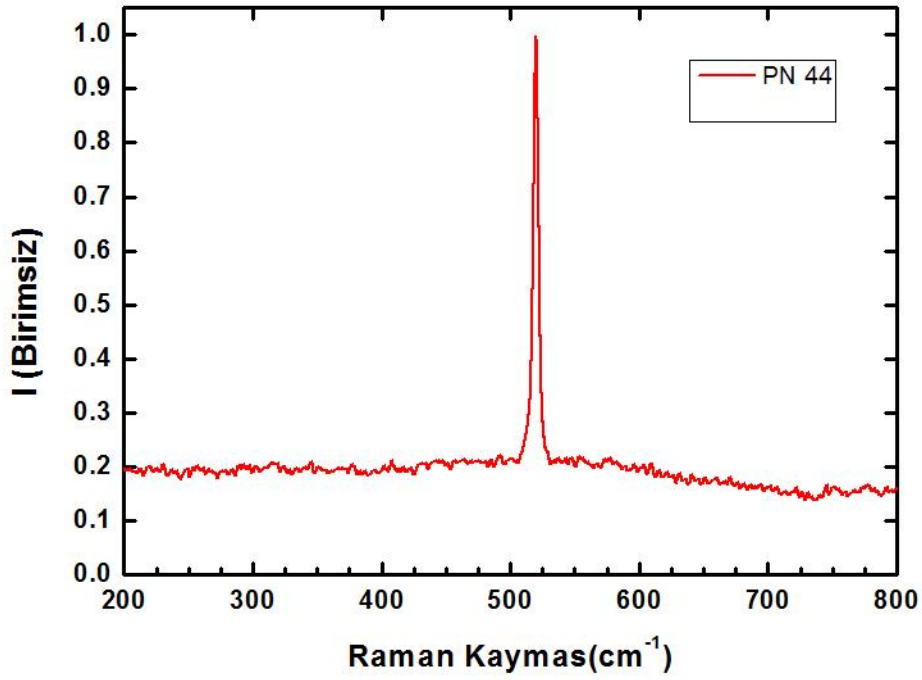
Daha önce de belirtildiği gibi büyütülen ince filmlerin lazer ile işlenmesi sonucu oluşan yapıdaki kristal boyutları raman kaymasına bağı olarak tahmin edilebilir. Yukarıdaki grafik referans alınarak kristal boyutları PN 21 lazer parametresine göre ~6 nm olarak söylenebilir. Kristaliz boyutları, lazer gücünün artışına göre nanometre skalasından mikrometre skalasına doğru geçiş yapmaktadır.

Çizelge 5.2’de, Şekil 5.5 referans alınarak hesaplanan farklı lazer parametrelerine bağı kristalinite oranları verilmiştir.

Çizelge 5.2 Farklı lazer parametrelerine göre kristalinite oranı

Parametre Numarası	Ortalama Güç (W)	Tekrar Frekansı (kHz)	Tarama Hızı (mm/s)	Atımlar Arası Mesafe (µm)	Kristalinite Oranı (%)
56	1	20	1150	30	16
55	1	20	900	15	21
54	2	20	1150	30	21
52	3	20	1150	30	60
48	5	20	1150	30	99
44	7	20	1150	30	99

Şekil 5.9’ da PN 44 lazer parametresi için Raman kayması grafiği verilmiştir.



Şekil 5-9 PN 44 lazer parametresi için Raman kayması grafiği

PN 44 lazer parametresi için grafiğin altında kalan alandan yapılan hesaba göre kristalizasyon oranı %99 civarındadır. Kristalizasyon oranı arttıkça lazer ile işlem sonrası yapıda oluşturulan kristallerin boyutları nano yapıdan mikro yapıya doğru büyüme gösterir. PN 44 lazer parametresi ile yapılan işlem sonrası oluşturulan kristal boyutları mikro boyutlardadır.

5.5. FTIR

Tez kapsamında üretilen örneklerin lazer ile işlendikten sonra Fourier dönüşümlü kızılaltı (FTIR) deneyinin yapılması büyük önem taşımaktadır. FTIR spektrum ölçeri ile moleküler titreşim soğurma modları kullanılarak yapı içerisindeki bağlanma yoğunlukları hakkında bilgi edilebilir. Lazer ile kristalizasyon işlemi açık havada yapılmıştır. Bu nedenle işlem sırasında ortaya çıkan ısı ile havadaki oksijenin tepkimeye girmesi mümkündür. Örneklerin yüzeyinde oluşabilecek Si – O – Si yapısı IR spektroskopisi ile belirlenebilir.

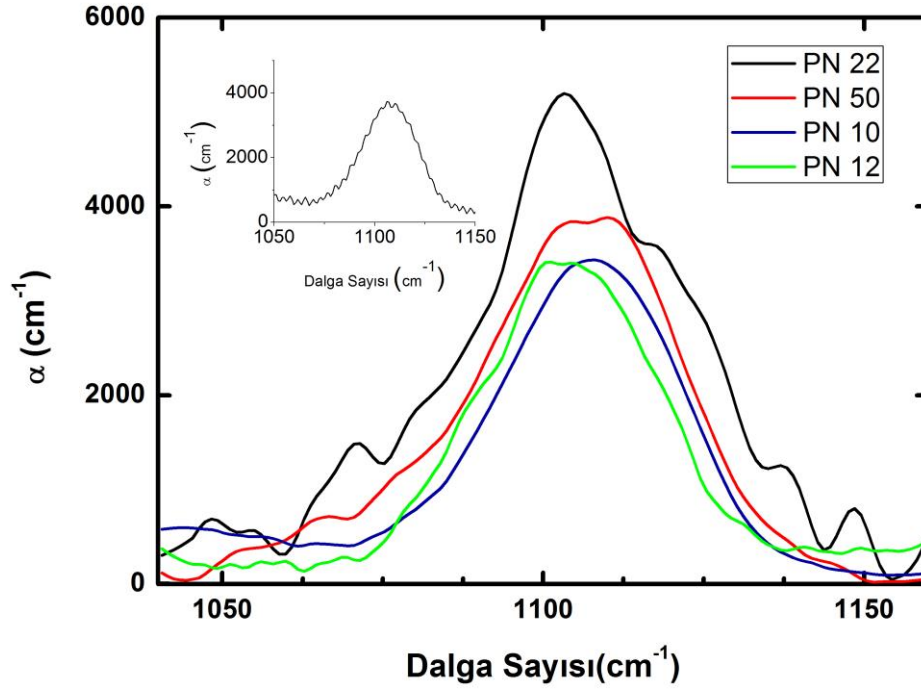
Çizelge 5.3 a-Si:H ve a-SiOx:H örneklerde görülen bazı bağların titreşim modları.

k_{tepe} (cm⁻¹)	Titreşim modu
1040-1160	Si – O – Si
2000	H – Si – (Si ₃)
2030	H – Si – (Si ₂ O)
2090	H – Si – (Si ₂ H)
2160	H – Si – (HSiO)
2250	H – Si – (O ₃)
3420-3580	O – H

Çizelge 5.3'te a-Si:H örneklerde görülen bazı bağların titreşim modlarının tepe dalga sayıları verilmiştir. Buna göre 1040 – 1160 cm⁻¹ IR soğurma spektrumunun altında kalan alan kullanılarak yapıdaki [O] miktarı hesaplanabilir. Lucovsky'nin 1983 yılında [83] yaptığı çalışmalara göre, Si – O – Si'a gruba ait kızılaltı soğurma spektrumunda yaklaşık 1000 cm⁻¹ dalgasayısına karşılık gelen büyük bir soğurma bandı vardır. Çizilen grafik üzerinden bu bant altında kalan alan, hesaplanan bir kalibrasyon katsayısı ile çarpılarak yapıda işlem sonrasında bulunan oksijen miktarı hesaplanabilir.

$$\%[O] \text{ at.} = A \int_{\sim 1000 \text{ cm}^{-1}} a(k) dk \quad (5.2)$$

Eşitlik 5.2'deki A katsayısının değeri teorik olarak 0,156 %/eV cm⁻¹ hesaplanmıştır [73].



Şekil 5-10 PN 10-12-22-50 lazer parametreleri ile işlenen örneklerin kızılaltı soğurma spektrumu. 1050 – 1150 cm^{-1} dalgasayıları arası Si – O – Si gerilme kipleri. (Verilen küçük grafik, ana grafikten alınan PN 50 parametresinin yumuşatılmış halidir.)

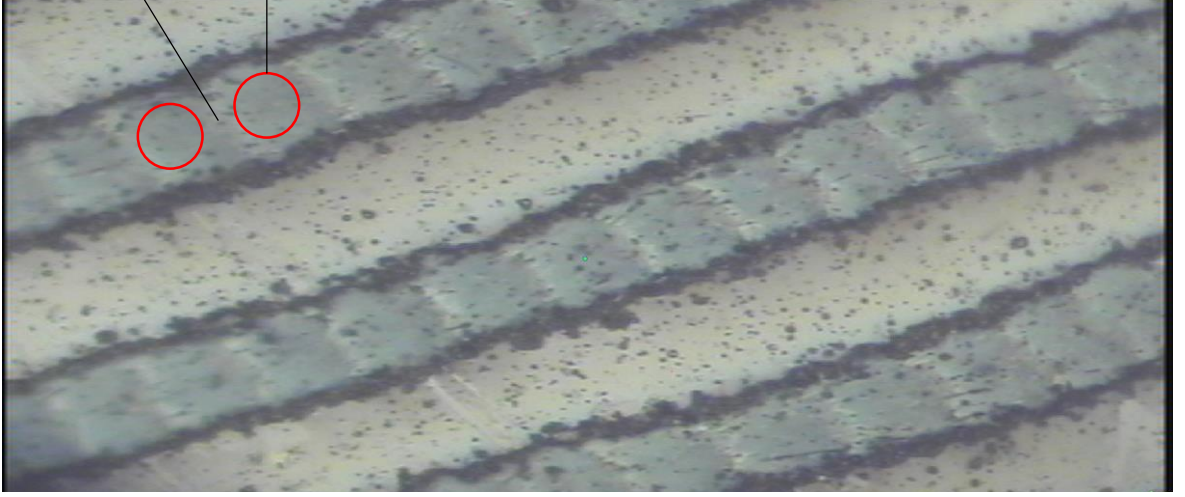
Şekil 5.10' da farklı parametreler ile işlenen örnekler üzerinden alınan FTIR datasının 1050 – 1150 cm^{-1} dalgasayıları arasında kalan parçası çizilmiştir. Şekil 5.9'da verilen soğurma spektrumları yumuşatılarak çizilmiştir. Çizilen grafikte neredeyse artalan (arkaplan) gürültüsünden ayırt edilemeyecek kadar küçük bir soğurma vardır. Grafik altında kalan alandan hesap yapıldığında ortalama olarak $\% 3 \pm 1$ gibi bir oksijen konsantrasyonu değerine ulaşılmıştır. Bu sonuç lazer ile kristalizasyon sonucunda, a-Si:H ince film örneklerin yüzeyinde oluşan oksit tabakasının beklenenden daha düşük olduğu sonucu çıkartılabilir.

5.6. Taramalı Elektron Mikroskobu

Kristalizasyon işleminde lazer parametrelerinin seçilmesi için yol gösterici rol oynaması amacıyla, PECVD yöntemi kullanılarak büyütülen filmlerin lazer ile işlenmesi sonucu ortaya çıkan yapının taramalı elektron mikroskobu ve optik mikroskop görüntüleri alınmıştır. Bu görüntülerin analizi, kristalizasyon işlemi için lazer parametrelerinin belirlenmesi sırasında yol gösterici özelliğinin yanısıra, lazer

performansının ve işlemin tekrar edilebilirliğinin kontrol edilmesinde de kullanılmıştır. Seçilen optik mikroskop ve SEM görüntüleri aşağıda yer almaktadır.

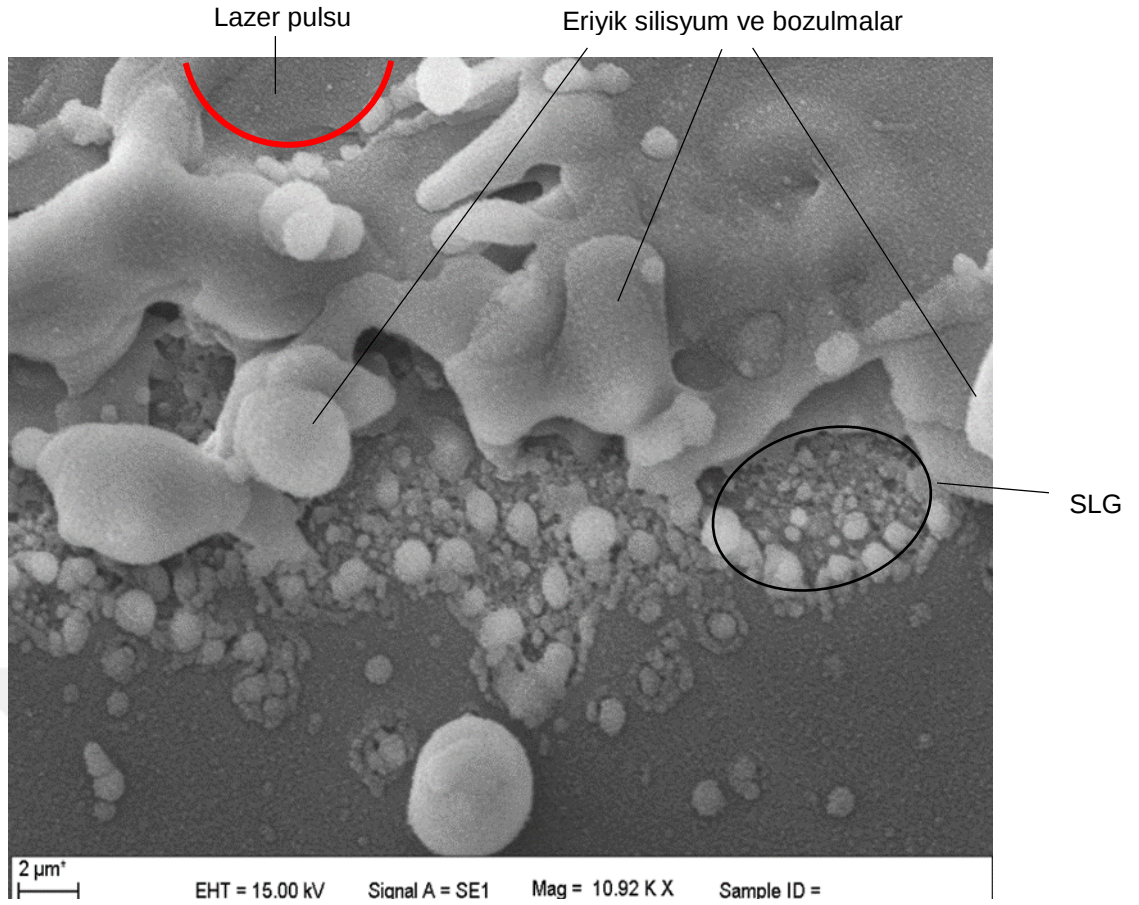
Atımlar arası mesafe Lazer Atımı



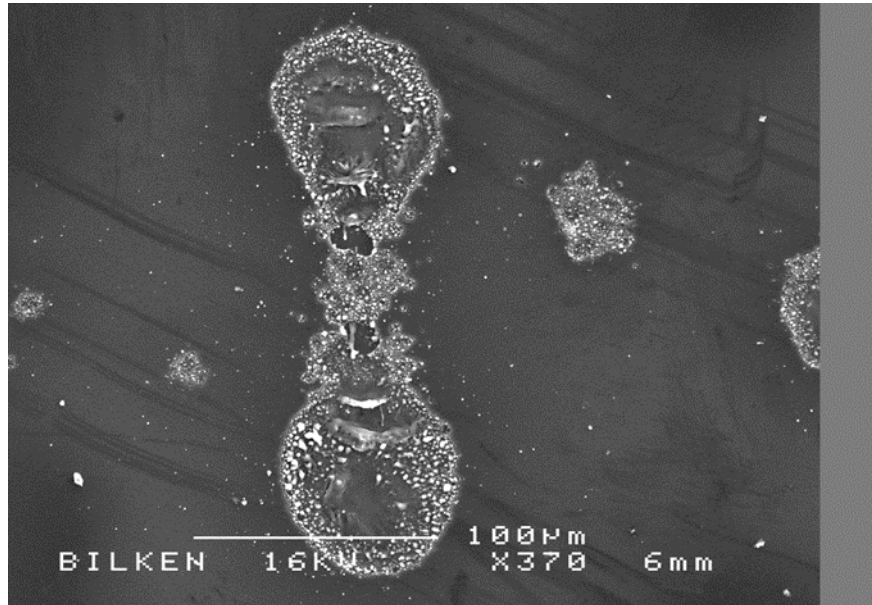
Şekil 5-11 Lazer ile işlenmiş örnek (PN56) (Görüntü, Raman spektrum ölçümü sırasında, cihazın bünyesinde bulunan optik mikroskop ile alınmıştır.)



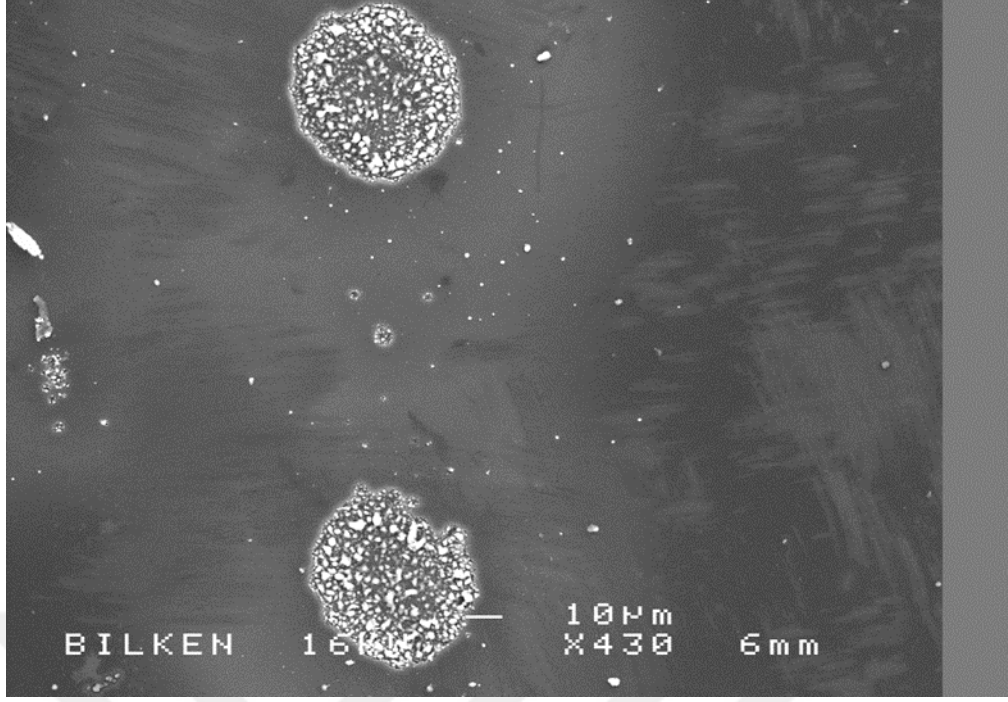
Şekil 5-12 Lazer ile işlenmiş örnek (PN 44)(100 x optik mikroskop ile alınmıştır)



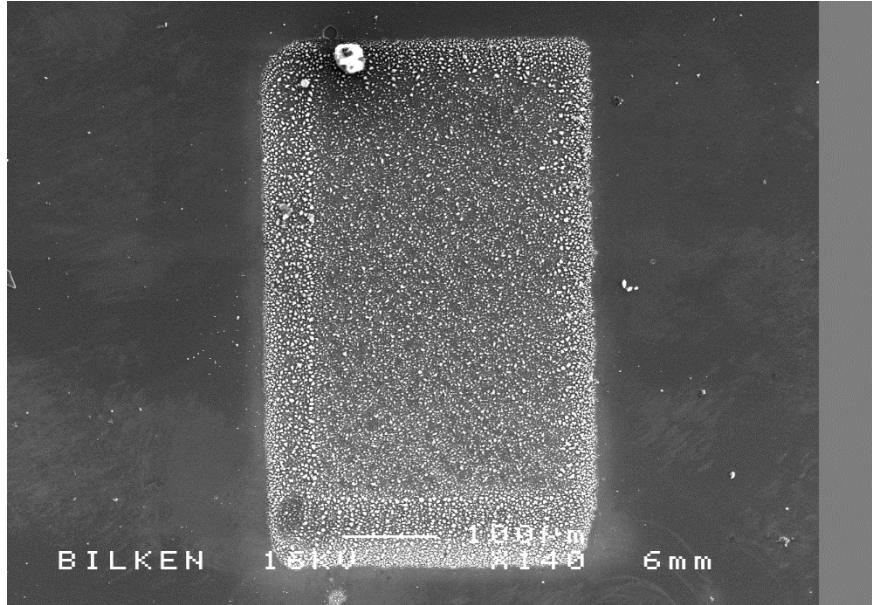
Şekil 5-13 Lazer ile işlenmiş örnek (PN 57) (SEM ile alınmıştır)(SLG, süper yanal büyümedir.)



Şekil 5-14 Lazer ile işlenmiş örnek (PN 58 - atımların hızları optimize değil) (SEM ile alınmıştır)



Şekil 5-15 Lazer ile işlenmiş örnek (PN 56 - atımlar arası stabilite) (SEM ile alınmıştır)



Şekil 5-16 Lazer ile işlenmiş örnek (kristalizasyon görüntüsü, PN 56 parametresi ile 0.05 mm aralıklar olacak şekilde dikdörtgen şekil taranmıştır) (SEM ile alınmıştır)

SEM ve mikroskop görüntülerinin amacı hem kullanılan lazer için teorik olarak hesaplanan ışın çapı, taranan bölgelerdeki çizgiler arası mesafe ve atımlar arası stabilite hem de lazer ile yapılan işlemde sonra kristalizasyon işleminin başarılı olup olmadığının gözlemlenmesidir. Ayrıca SEM görüntülerine bakılarak uygun lazer parametrelerinin seçilmesi sağlanmıştır. Şekil 5.13'de görüldüğü gibi yüksek gelen lazer güçleri malzeme üzerine kaplanan ince film tabakasını tamamen geçerek alttaban yapısını bozmaya başlamıştır (e. Bu görüntülere bakarak uygun güç değerleri belirlenmiştir. Bununla beraber lazer tarama hızları ve frekanslar optimize edilerek atımların üst üste binme durumu ve tarama hızı artırıldığında lazerin nasıl davrandığı analiz edilmiştir. Şekil 5.14'te görüldüğü gibi lazerin hızı belli bir değerin üzerine çıktığında, lazerin bünyesinde bulunan akım sürcüsünün, lazerin gücünü çok keskince kapatamadığından iki atım arası bölge de lazer gücüne maruz kalmıştır. Şekil 5.16'te verilen SEM görüntüsünde dikdörtgen şeklinde bir alanın işlendiği görülmektedir. Lazer işleme sonrasında nano – mikrometre mertebesinde yeni oluşumların varlığı açıkça görülmektedir. Odaklanmış lazer gücü düşünüldüğünde bu yapıların c-Si ya da havadaki oksijen varlığı nedeniyle oluşan SiO_2 adacıklar olması olasılığı vardır. Anca hem Raman saçılmasından gözlenen $510 - 520 \text{ cm}^{-1}$ kaymalarının varlığı hem de FTIR soğurma spektrumunda Si – O – Si'ye ilişkin 1000 cm^{-1} bandının gözlenmesi nedeniyle lazer işleme sonucunda nano – mikro kristalizasyon büyük oranda başarılmıştır yorumu yapılabilir.

6. SONUÇLAR

Hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) ince film örnekler, 13,56 MHz frekansında çalışan RF – PECVD sisteminde üretilmiştir. Deneyler boyunca, kazan basıncı 10^{-4} mTorr, alttaban sıcaklığı 300 °C ve RF gücü 15 W olacak şekilde ayarlanmıştır. Tüm örneklerin üretilmesinde reaktör içine akıtılan silan gazının (SiH_4) akış hızı 10 sccm'de sabit tutulmuştur. İnce film örneklerin üretimi deney süresi, RF plazmasının elde edilmesi ile RF gücünün kesilmesi ile belirlenmiştir. Tüm örnekler için kaplama 60 dakika ile sınırlandırılmıştır.

Üretilen örneklerin kalınlık, kırma indisi ve optik bant aralıklarının belirlenmesi amacıyla optik geçirgenlik deneyleri yapılmıştır. Tez için bunlardan en önemlisi kalınlık bilgisi denilebilir. Üretilen örneğin kalınlığı aynı zamanda lazer parametrelerinin belirlenmesinde de kullanıldığından, kalınlık bilgisi bu öneme sahiptir. Hesaplamalar sonucunda, lazer işleme öncesinde, a-Si:H ince film örneğin kalınlığı 450 ± 40 nm olarak hesaplanmıştır. Bulunan sonuç aynı zamanda örneğin AFM görüntülemesi ile teyit edilmiştir. AFM ile alınan ölçüm sonrası, örnek kalınlığının 430 ± 10 nm olduğu görülmüştür. Öte yandan, uzun dalga boyları için kırma indisinin değeri $n_{\text{IR}} = 2,6 \pm 0,5$ ve Tauc optik aralığı $E_g^{\text{Tauc}} = 1,70 \pm 0,05$ eV olarak belirlenmiştir.

Lazer kristalizasyon işlemi için 20 W ortalama optik güce sahip, 100 ns atım uzunluğunda, tekrar frekansı 20 – 200 kHz arası değiştirilebilen, 0,5 mJ'e kadar atım enerjisine sahip tümleşik fiber lazer kullanılmıştır. Kristalizasyon için gereken tarama işlemi lazer çıkışına bağlı tarama kafası ile yapılmıştır. Tarama kafasına takılı olan objektifler sayesinde demet çapı $\sim 30 - 40$ μm mikrometre seviyelerine indirilerek lazer enerji yoğunluğu artırılmıştır. Kristalizasyon işleminden önce farklı lazer parametreleri denenmiş, işlenecek olan hidrojenlendirilmiş amorf silisyum örneğin farklı lazer parametreleri için üst ve alt eşik sınır değerleri belirlenmiştir. Yapılan belirlemeden sonra optimum parametreler çıkartılmış ve bu parametreler ile işlem yapılmıştır.

Tez çalışmaları boyunca, lazer ile kristalizasyon uygulanan örneklerin, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleri alınmıştır. Bu

görüntüler, teorik olarak hesaplanan lazer demet çapı, demetlerin üst üste binme oranı ve diğer lazer parametrelerinin (tarama hızı, frekans vb.) optimize edilmesinde kullanılmıştır.

Fourier dönüşümlü kızılaltı spektroskopisi kullanılarak lazer ile kristalize edilmiş örneklerin içerdiği oksijen miktarları analiz edilmiştir. Farklı lazer parametreleri ile işlenen örnekler üzerinden yapılan analizde, atomik oksijen konsantrasyonu seviyesinin % 2,5 – 4,0 arasında kaldığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç tez açısından çok önemlidir. Lazer ile kristalizasyon işleminde, lazer örnek ile etkileşirken malzeme yüzeyinde, ortamdaki oksijen nedeniyle, SiO_2 oluşma olasılığı vardır. Eğer yapıda çok fazla SiO_2 saptanırsa yapılan analizler karmaşık hale gelecektir. Bu nedenle sadece SEM görüntüleri üzerinden yorumlanacak olursa, lazer ile kristalizasyonun gerçekleştirilmiş olduğu sonucu çıkartılabilir. Oysa, SEM görüntülerinde belirlenen, mikrometreden küçük yapıların, nano-mikro kristal silisyum adacıklardan ya da oksijen zengini SiO_x bölgelerden ibaret olduğu, bir diğer deneysel teknik ile desteklenmelidir. Gerçekleştirilen kızılaltı (FTIR) soğurma ve Raman saçılması deneylerinden lazer ile işleme sonucunda gözlenen bu yapıların, oksijence fakir ve kristal oranı yüksek oluşumlar olduğu sonucu çıkartılmıştır.

Raman saçılması, deneysel sonuçların sağlıklı yorumlanabilmesi için gerekli en önemli deneylerden biridir. Yapılan Raman saçılması deneyi ile amorf yapının hangi lazer parametresine nasıl tepki verdiği, ne oranda kristalize olduğu hatta oluşan kristal yapının hangi boyutlarda olduğu yorumlanabilmektedir. Yapılan Raman saçılması deneyine göre, 1 - 3 W kadar küçük lazer güçlerinde işlenen örneklerin kristal oranı % 21 kadar küçüktür. Buna paralel olarak, düşük güçlerde hazırlanan bu örneklerde, kristal faza ilişkin raman kaymasının tepe dalgasayısının 511 cm^{-1} civarlarında olduğu gözlemlenmiştir. Lazer gücünün 5 - 7 W'a kadar artması ile raman kaymasının tepe dalgasayısının, 511 cm^{-1} değerinden, tek kristal silisyumda da gözlenen Raman kayması, 520 cm^{-1} değerine doğru kaydığı görülmüştür. Aynı zamanda bu örnekler için kristal oranının ise %100 kadar yüksek olduğu gözlenmiştir. Örneklerdeki, kristal oranı hesabı, Raman saçılması spektrumunda, 480 ve 520 cm^{-1} dalgasayılarında gözlenen iki temel saçılma bandının, altlarında kalan alanlarından yapılmıştır. Ayrıca kristal faza ilişkin Raman saçılması tepe dalgasayısının 520 cm^{-1} den daha küçük değerlere kayması da,

oluşan kristal yapının boyutları ile ilişkilendirilebilir. Bu gözlem kullanılarak, düşük lazer güç yoğunluğu altında kristalize edilmiş hidrojenlendirilmiş amorf silisyum yapılar için kristal boyutunun nanometreler civarında kalırken, lazer güç yoğunluğu arttırıldığında kristal boyutunun mikrometre civarlarına doğru çıktığı sonucu çıkartılabilir. Ancak bu sonucun diğer deneyler ile desteklenmesi gerekmektedir. Öte yandan, lazer ile polikristal silisyum oluşumunda, lazer gücünün etkisine dayanarak çıkartılacak diğer bir sonuç da, 5 – 7 W gibi belli bir seviyenin üstünde, üretilen filmin deformasyona uğradığı ve yapının bozulduğudur. Bu nedenle, nanosaniye atımlı 1064 nm fiber lazer ile hidrojenlendirilmiş amorf silisyum (a-Si:H) ince filmlerden, nanometre mertebesinde silisyum oluşumunun mümkün olduğu belirlenmiştir. Öte yandan kullanılacak lazer gücünün ise 1 – 3 W kadar küçük olması gerektiği sonucu çıkartılmıştır.

Ayrıca, lazer ile işleme sonrasında, malzeme yüzeyinde oluşması beklenen tepecikler (hillhock) (Bkz. Bölüm 2.4), SEM görüntülerinde gözlemlenememiştir. Geleneksel kristalizasyon yöntemlerinin aksine lazer ile işlemede kristalizasyon, malzemenin çok hızlı bir şekilde ısınıp soğuması ile sağlanmaktadır. Tez kapsamında, lazerle işlenen a-Si:H örnekler, amorf yapılarından ötürü zaten daha az yoğundur [62]. Amorf fazdan kristal silisyum fazın üretiminin gerçekleşmesi sürecinde, malzemenin yoğunluğundaki azalmanın da tepecik oluşumuna yol açmadığı sonucu çıkartılabilir. Bu bağlamda, tepecik yapısı oluşumunun, lazer türüne (sürekli dalga, atımlı vb.) bağlı olduğu kadar, deney koşulları ve malzeme yapısına da dayalı olduğu yorumu yapılabilir.

Kuramsal olarak beklenen lazer-malzeme etkileşimi süreçleri, lazer ile kristalizasyon deneyleri sırasında büyük oranda gözlemlenmiştir. Isı aktarımı ve dolayısı ile oluşan erime olayı, SEM görüntülerinde net bir şekilde gözlemlenmiştir. Örneklerin lazer ile etkileşimi ile erime sıcaklıklarına ulaşmasından sonra, örnek yüzeyinden buharlaşmanın da gerçekleşebileceği düşünülmektedir. Fakat buharlaşmanın belirlenmesi ve miktarının ölçülmesi için hassas deneyler yapılmalıdır. Tez süresince bu amaçla yapısal karakterizasyon yapılmamıştır. Plazma oluşumu, örneklerin lazer ile işlenmesi sırasında açık bir şekilde gözlenmiştir. Ablasyon etkisi ise kullanılan lazerin özellikleri nedeniyle gözlenmemiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Anonim, Abundances of the Elements in the Earth's Crust, <http://hyperphysics.phy-str.gsu.edu/hbase/tables/elabund.html> (Nisan, **2016**).
- [2] Roger De Jaeger, Mario Gleria, Inorganic Polymers – *Silicones in Industrial Applications*, Nova Science Publishers, 61-161, **2007**.
- [3] Kenji Nomura, Hiromichi Ohta, Akihiro Takagi, Toshio Kamiya, Masahiro Hirano & Hideo Hosono, Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors, *Nature* 432, 488-492, **2004**.
- [4] Woodyard J. R., *Nonlinear Circuit Device Utilizing Germanium*, United States Patent, No. 2,530,110, **1950**.
- [5] Spear W.E., LeComber P.G., *Solid State Communications*, 88, 1015-1018, **1975**.
- [6] LeComber P. G., Spear W. E., Ghaith A., Amorphous-silicon field-effect device and possible application, *Electronics Letters*, 15, 179, **1979**.
- [7] Yue Kao, Thin film transistor technology – past, present, future, *The Electrochemical Society*, **2013**.
- [8] Her T., Finlay R. J., Wu C., Deliwala S., Mazur E., Microstructuring of silicon with femtosecond laser pulses, *Applied Physics Letters*, 73, 1673, **1998**.
- [9] Wu C., Crouch C. H., Zhao L., Carey J. E, R. Younkin, J. A. Levinson, E. Mazur, R. M. Farrell, P. Gothoskar, A. Karger, Near-unity below-band gap absorption by microstructured silicon, *Applied Physics Letters*, 78,1850, **2001**.
- [10] Helen Savin, Päivikki Repo, Guillaume von Gastrow, Pablo Ortega, Eric Calle , Moises Garín and Ramon Alcubilla, Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency, *Nature Nanotechnology*, **2015**.
- [11] Sarnet T., Derrien T. J. Y., R. Torres, Ph. Delaporte, F. Torregrosa, M.-J. Sher, Y.T. Lin, B. Franta, G. Deng, E. Mazur, Black silicon for photovoltaic cells: towards a high-efficiency silicone solar cell, *EUPVSec*, **2013**.
- [12] Joseph A. Carson, *Solar Cell Research Progress*, Nova Science Publishers, New York, 124-125, **2008**.

- [13] Street R. A., *Hydrogenated amorphous silicon*, Cambridge University Press, Cambridge, **1991**.
- [14] Joannopoulos J. D. and Lucovsky G., *Hydrogenated Amorphous Silicon I*, Springer, Berlin, **1984**.
- [15] Schropp R. E. I. and Zeman M., *Amorphous and Microcrystalline Silicon Solar Cells. Modeling, Materials and Device Technology*, Kluwer, Dordrecht, **1998**.
- [16] Yamauchi N. and Reif R., *Journal of Applied Physics*, 75, 3235, **1994**.
- [17] Bergmann R. B., Oswald G., M. Albrecht, and V. Gross, *Solar Energy Material Solar Cells* 46, 147, **1997**.
- [18] Herd S. R., Chaudhari P., and Brodsky M. H., *Journal of Non-Crystal Solids* 7, 309, **1972**.
- [19] Nast O., *Ph.D.-Thesis*, Marburg, Germany, **2000**.
- [20] Nast O. and Hartmann A. J., *Journal of Applied Physics* 88, 716, **2000**.
- [21] Nast O. and Wenham S. R., *Journal of Applied Physics* 88, 124, **2000**.
- [22] Bergmann R. B., *Journal of Applied Physics A* 69, 187, **1999**.
- [23] Brotherton S. D., *Semiconductor Science Technology* 10, 721, **1995**.
- [24] Yue Kuo, *Materials and Processes Volume 2: Polycrystalline Silicone Thin Films*, Kluwer Academic Publishers, 176-177, **2003**.
- [25] Baird J. L., Flexible oesophagoscope, British Patent 285,738, **1928**.
- [26] Hansell C. W., *Picture transmission*, U. S. Patent 1,751,584, **1930**.
- [27] Lamm H., *Biegsame optische gerate*, Z. Instrumenten. 50, 579, **1930**.
- [28] Hopkins H. H. and Kapany, A flexible fiberscope using static scanning., N. S. . 39, s.l. : Vol. 173, *Nature* , **1954**.
- [29] Heel, Van A. C. S., A new method of transporting optical images without aberrations.. 39, s.l. : Vol. 173 *Nature*, **1954**.
- [30] Snitzer E., Optical Maser Action in Nd³⁺ in a Barium crown Glass., E., s.l. : *Physical Review Letters*, Vol. 12, 444–446, **1961**.
- [31] Snitzer, Proposed fiber cavities for optical lasers., E.,, s.l. : Vol. 32 J., *Applied Physics*, 36-39, **1961**.

- [32] Koester C. J. and E, Snitzer Amplification in a fiber laser, s.l. : Vol. 3 *Applied Optics*, 1182–1186, **1964**.
- [33] Etzel , H. W, Gandy, H.W. and Ginther, R.J., Stimulated Emission of Infrared Radiation from Ytterbium Activated Silicate Glass, s.l. : Vol. 4, *Applied Optics*, 534-536, **1962**.
- [34] Hockham, G. A. and Kao, C. K., Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies, s.l. : Vol. 113 *Proc. IEE*, **1966**.
- [35] Stone, J. and Burrus, Neodymiumdoped silica lasers in endpumped fiber geometry., C.A. 7, s.l. : *Applied Physics Letters*, 388-389, **1973**.
- [36] Maurer, Robert and Schultz, Peter. Fused Silica Optical Waveguide. 3659915 **1972**.
- [37] Mears, R. J, Low noise Erbium Doped Fiber Amplifier Operating at 1.54 um, et al., s.l. : Vol. 19, *Electronics Letter* 23, 1026-1028, **1987**.
- [38] Snitzer E., Po H., Hakimi F., Tumminelli R., B. C. McCollum, Double clad offset core Nd fiber laser, *Optical Fiber Sensors Topical Meeting*, New Orleans, Louisiana/USA, paper PD 5, **1988**.
- [39] Worksheets, <http://www.ipgphotonics.com> (Nisan, **2016**).
- [40] Ilday, F.Ö., 25. Generation of 36-femtosecond pulses from a ytterbium fiber laser., et al. s.l. : Vol. 11 *Optics Express*, 3550-3554, **2003**.
- [41] Brush S. G. , Historical Studies in the Physical and Biological Sciences, 37, 205, **2007**.
- [42] Chapman, B. N. *Glow Discharge Processes*, John Wiley & Sons, New York, **1980**.
- [43] Melliard-Smith, C. M. and Mogab, C. J. *Thin Film Processes*, Vossen, J. L. And Kern, W., Eds. Academic Press, New York, **1978**.
- [44] Kern W., *In Microelectronic Material and Processes*, R. A. Levy Eds. Kluwer Academic: New Jersey, **1986**.
- [45] Paek U., Gagliano F.P., *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 8, 112, **1972**.
- [46] Wagner R. E., Laser drilling mechanics, *Journal of Applied Physics*, 45, 4631 **1974**.
- [47] Cline H. F., Anthony T. R., *Journal of Applied Physics*, 48, 5096, **1977**.

- [48] Hayafuji Y., Aoki Y., Usui S., Direct measurement of the melt depth of silicon during laser irradiation, *Applied Physics Letters*, 42, 720, **1983**.
- [49] T. Sameshima, S. Usui, Pulsed laser-induced amorphization of silicon films, *Journal of Applied Physics*, 70, 1281, **1991**.
- [50] Basov N.G., Balashov E.M., O.V. Bogdankevitch, V.A. Danilychev, G.N. Kashnikov, N.P. Lantzov, D.D. Khodkevitch, Luminescence of condensed Xe, Kr, Ar and their mixtures in vacuum region of spectrum under excitation by fast electrons, *Journal of Luminescence*, 1-2, 834, **1970**.
- [51] Basting D., Pippert K., Stamm U., History and future prospects of excimer laser technology, *2nd International Symposium on Laser Precision Microfabrication*, 14, **2002**.
- [52] Anonim, Silicon, <http://mysite.du.edu/~jcalvert/phys/silicon.htm> (Nisan, **2016**).
- [53] Voronkov M. G., $\text{N-C=O} \leftrightarrow \text{N=C-O}$ rearrangement in the heteroring of 4-methyl-1-phenyl-2-(trimethoxysilylmethyl)-3-pyrazolidone, *Russian Journal of Applied Chemistry*, 80, 2190, **2007**.
- [54] Sterling H.F. and Swann R.C.G., Chemical vapour deposition promoted by r.f. discharge, *Solid-State Electronics*, 8, 653-654, **1965**.
- [55] LeComber P.G., Spear W.E., Electronic Transport in Amorphous Silicon Films, *Physical Review Letters*, 25, 509, **1970**.
- [56] Madan A., Amorphous silicon – From doping to multi-billion dollar applications, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 881-886, **2005**.
- [57] Street R. A., Technology and Applications of Amorphous Silicon, Springer Verlag, **2000**.
- [58] Zachariasen W. H., The atomic arrangement in glass, *Journal of the American Chemical Society*, 54, 3841, **1932**.
- [59] Overhof H., Thomas P., Electronic Transport in Hydrogenated Amorphous Semiconductors, Springer-Verlag, **1989**.
- [60] Urbach F., The long-wavelength edge of photographic sensitivity and of the electronic absorption of solids, *Physical Review*, 92, 1324, **1953**.
- [61] Fortmann C. M., Random Phononic Structure and Indirect Optical Transitions: An Explanation for the Hydrogen Dependence of the Amorphous Silicon Band Gap?, *Physical Review Letters*, 81, 3683, **1998**.
- [62] Street R. A., *Hydrogenated Amorphous Silicon*, Cambridge University Press, **1991**.

- [63] Mott N. F., Metal-insulator transition, *Reviews of Modern Physics*, 40, 677, **1968**.
- [64] James, S. Im and H.J. Kim, Phase transformation mechanisms involved in excimer laser crystallization of amorphous silicon films, *Applied Physics Letters*, 63, 14, **1993**.
- [65] James S. Im, H.J. Kim, On the super lateral growth phenomenon observed in excimer laser-induced crystallization of thin Si films, *Applied Physics Letters*, 64, 17, **1994**.
- [66] Bacharach R. Z., Winer K., Boyce J. B., Ready S. E., Johnson R. I., Anderson G. B., Low temperature crystallization of amorphous silicon using an excimer laser, *Journal of Electronic Material*, 19, 241, **1990**.
- [67] Nickel N. H., Kim H. J., Thompson M.O., *Laser Crystallization of Silicon - Fundamentals to Devices*, Physical Review B, 56, 12065, **1997**.
- [68] Thompson M. O., Galvin G. J., Melting temperature and explosive crystallization of amorphous silicon during pulsed laser irradiation, *Physical Review Letters*, 52, 2360, **1984**.
- [69] Lowndes D. H., G.E. Jellison, Direct measurements of the velocity and thickness of “explosively” propagating buried molten layers in amorphous silicon, *Applied Physics Letters*, 48, 20, **1986**.
- [70] McCulloch D. J., Brotherton S. D., Poly-Si thin film transistors for displays, *Applied Physics Letters*, 66, 2060, **1995**.
- [71] Toet D. , P. M. Smith, T. W. Sigmon, T. Takehara, C. C. Tsai, W. R. Harshbarger, M. O. Thompson, Laser crystallization and structural characterization of hydrogenated amorphous silicon thin films, *Journal of Applied Physics*, 85, 7914, **1999**.
- [72] Fork D. K. , G.B. Anderson, J. B. Boyce, R. I. Johnson, P. Mei, Capillary waves in pulsed excimer laser crystallized amorphous silicon, *Applied Physics Letters*, 68, 2138, **1996**.
- [73] Chapman, B. N. *Glow Discharge Processes*, John Wiley & Sons, New York, **1980**.
- [74] Melliard-Smith, C. M. and Mogab, C. J. *Thin Film Processes*, Vossen, J. L. And Kern, W., Eds. Academic Press, New York, **1978**.
- [75] Kern, W., *In Microelectronic Material and Processes*, R. A. Levy Eds. Kluwer Academic: New Jersey, **1986**.
- [76] Marcel Dekker, Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers, , Inc. Chap. 7. 2nd ed. Agrawal, **2007**.

- [77] Desurvire E., *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications*. 1 ed.. s.l. : Wiley-Interscience, **1994**.
- [78] Duley, W.W., *Laser Processing and Analysis of Materials*, Plenum Press, New York. New York : Plenum Press, **1983**.
- [79] Carslaw , H.S. and Jaeger, J.C., *Conduction of Heat in Solids*, Oxford : Oxford University Press, **1959**.
- [80] Bäuerle D., *Laser Processing and Chemistry*, Berlin : Springer, **2000**.
- [81] Swanepoel R., Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 16 1214, **1983**.
- [82] Pankove J. I., *Optical Processes in Semiconductors*, Dover Publication, New York, 422, **1975**.
- [83] Tauc J., Grigorovici R., Vancu A., , Optical properties and electronic structure of amorphous germanium, *Physica Status Solidi*, B, 15(2), 627-637, **1966**.
- [84] Lucovsky, G., Yang, J., Chao S. S., Tyler, J. E., Czubytyj, W., Oxygen-bonding environments in glow-discharge-deposited amorphous silicon-hydrogen alloy films, *Physical Review B*, 28, 3225, **1983**.
- [85] Tsu, D. V., Lucovsky, G., Davidson, B. N., Effects of the nearest neighbors and the alloy matrix on SiH stretching vibrations in the amorphous SiO_x:H (0<x<2) Alloy System, *Physical Review B*, 40, 1795, **1989**.
- [86] Gordijn, A., *Microcrystalline Silicon for Thin-Film Solar Cells*, Doktora Tezi, Utrecht Universitesi, Hollanda, **2005**.
- [87] Emel'yanov, V. I., Seminogov, V. N., Effect of annealing temperature on the crystal phase fraction in silicon nanoclusters in a silicon oxide matrix, *Technical Physics Letters*, 32, 12, **2006**.
- [88] Aydin Y. O. , Development of a 60 W Pulsed Fiber Laser Amplifier for Materials Processing, June **2014**.
- [89] Ma, Z., Liao, X., Zheng, W., Yu, J., Chu, J., Raman scattering and infrared absorption of silicon nanocrystals in silicon oxide matrix, *Proc. SPIE 4086, Fourth International Conference on Thin Film Physics and Applications*, 258, **2000**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Haydar Sarper SALMAN
Doğum Yeri : Dinar
Medeni Hali : Bekar
E-posta : sarpersalman@gmail.com
Adresi : Bağlıca Mah., İş Turkuaz Cad., A36 C/Blok 6/26 Etimesgut -
ANKARA

Eğitim

Lise : Antalya Anadolu Lisesi
Lisans : Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği
Bölümü
Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Fen Fakültesi Nanoteknoloji ve Nanotıp
Anabilim Dalı

Yabancı Dil ve Düzeyi

- İngilizce (iyi)

İş Deneyimi

- FiberLAST A.Ş. 2013 -

Deneyim Alanları

-

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

EKLER

Tablo 1. Lazer Parametreleri küme 1

Paremetre Numarası	Ortalama Güç (W)	Tekrar Frekansı (kHz)	Tarama Hızı (mm/s)	Üst üste binme oranı (%)
1	7	50	750	50
2	7	50	1000	20
3	7	50	1500	0
4	6	50	750	50
5	6	50	1000	20
6	6	50	1500	0
7	5	50	750	50
8	5	50	1000	20
9	5	50	1500	0
10	4	50	750	50
11	4	50	1000	20
12	4	50	1500	0
13	3	50	750	50
14	3	50	1000	20
15	3	50	1500	0
16	2	50	750	50
17	2	50	1000	20
18	2	50	1500	0
19	1	50	750	50
20	1	50	1000	20
21	1	50	1500	0

Tablo 2. Lazer Parametreleri Küme 2

Parametre Numarası	Ortalama Güç (W)	Tekrar Frekansı (kHz)	Tarama Hızı (mm/s)	Üst üste binme oranı (%)
22	7	32	750	50
23	7	32	1000	20
24	7	32	1500	0
25	6	32	750	50
26	6	32	1000	20
27	6	32	1500	0
28	5	32	750	50
29	5	32	1000	20
30	5	32	1500	0
31	4	32	750	50
32	4	32	1000	20
33	4	32	1500	0
34	3	32	750	50
35	3	32	1000	20
36	3	32	1500	0
37	2	32	750	50
38	2	32	1000	20
39	2	32	1500	0
40	1	32	750	50
41	1	32	1000	20
42	1	32	1500	0

Tablo 3. Lazer Parametreleri Küme 3

Parametre Numarası	Ortalama Güç (W)	Tekrar Frekansı (kHz)	Tarama Hızı (mm/s)	Atımlar Arası Mesafe (μm)
43	7	20	900	15
44	7	20	1150	30
45	6	20	900	15
46	6	20	1150	30
47	5	20	900	15
48	5	20	1150	30
49	4	20	900	15
50	4	20	1150	30
51	3	20	900	15
52	3	20	1150	30
53	2	20	900	15
54	2	20	1150	30
55	1	20	900	15
56	1	20	1150	30

Tablo 4. Lazer Parametreleri Küme 4

Parametre Numarası	Ortalama Güç (W)	Tekrar Frekansı (kHz)	Tarama Hızı (mm/s)	Atımlar Arası Mesafe (μm)
57	14	32	1750	23
58	14	32	2250	46
59	12	32	1750	23
60	12	32	2250	46
61	10	32	1750	23
62	10	32	2250	46
63	8	32	1750	23
64	8	32	2250	46
65	6	32	1750	23
66	6	32	2250	46
67	4	32	1750	23
68	4	32	2250	46
69	2	32	1750	23
70	2	32	2250	46