

**NANO SANİYE ATIMLI 1064 NM FİBER LAZER İLE
YÜZEY DOKULANDIRMASININ TEK KRİSTAL
SİLİSYUMUN OPTİK YANSIMA VE SOĞURMASINA
ETKİSİ**

**EFFECT OF SURFACE TEXTURIZATION BY 1064 NM -
NANOSECOND PULSED FIBER LASER ON OPTICAL
REFLECTION AND ABSORPTION OF SINGLE CRYSTAL
SILICON**

Volkan Türker

DOÇ. DR. AKIN BACIOĞLU

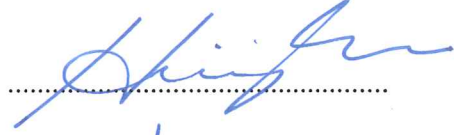
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Temiz Tükenmez Enerjiler Anabilim Dalı için Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırlanmıştır

2018

VOLKAN TÜRKER'in hazırladığı “NANO SANİYE ATIMLI 1064 NM FİBER LAZER İLE YÜZEY DOKULANDIRMASININ TEK KRİSTAL SİLİSYUMUN OPTİK YANSIMA VE SOĞURMASINA ETKİSİ” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **TEMİZ TÜKENMEZ ENERJİLER ANA BİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

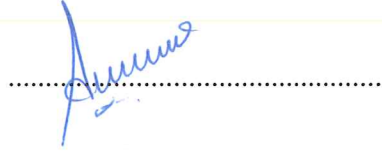
Prof. Dr. Hüseyin Sarı
Başkan



Doç. Dr. Akın Bacioğlu
Danışman



Prof. Dr. Aynur Eray
Üye



Prof. Dr. Abdullah Ceylan
Üye



Doç. Dr. Emre Taşcı
Üye



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

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezinin / raporunun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezinin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezinin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “ **Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi / H. Ü. Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- o Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezinin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir. ⁽¹⁾
- o Enstitü / Fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile tezinin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren Ay ertelenmiştir. ⁽²⁾
- o Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir. ⁽³⁾

28/09/2018

(İmza)

Öğrencinin Adı SOYADI

Volkan Törker

“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”

- (1) Madde 6. 1. Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir
- (2) Madde 6. 2. Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internetten paylaşılması durumunda 3. Şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü ve fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.
- (3) Madde 7. 1. Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir*. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.
Madde 7. 2. Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

* Tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu tarafından karar verilir.

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.

07/09/2018

VOLKAN TÜRKER

ÖZET

NANO SANİYE ATIMLI 1064 NM FİBER LAZER İLE YÜZEY DOKULANDIRMASININ TEK KRİSTAL SİLİSYUMUN OPTİK YANSIMA VE SOĞURMASINA ETKİSİ

Volkan Türker

Yüksek Lisans, Temiz Tükenmez Enerjiler Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Akın BACIOĞLU

Eylül 2018, 84 sayfa

Yükselteç ile güçlendirilmiş ana salıncı mimarisine (MOPA- master oscillator power amplifier architecture) sahip, atımlı bir şekilde modüle edilen, 1064 nm merkez dalgaboyunda çalışan bir fiber lazer ile n tipi, (100) kristal yönelimli tek kristal silisyum dilim yüzeyinde dokulandırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan dokulandırma işlemleri, 40 – 100 kHz lazer tekrar frekansı aralığında, 10, 15 ve 20 W lazer ortalama güçleri ve 50 – 2000 mm/s tarama hızı aralığında yapılmıştır. Odaklanmış lazer demet çapı ve lazer atım süresi sabit tutulmuştur.

Farklı lazer atım parametreleriyle üretilen örneklerin optik yansımaya değerleri Fourier dönüşümlü yansımaya ve geleneksel optik yansımaya deney teknikleriyle ölçülmüştür. Daha sonra, elektriksel ölçümler için, ısı buharlaştırma kaplama tekniğiyle, örneklerin yüzeylerine paralel geometriye sahip alüminyum kontaklar atılmış ve Fourier Dönüşümlü Fotoiletkenlik Spektroskopisi (Fourier Transform Photoconductivity Spectroscopy - FTSP) tekniği ile örneklerin dalga boyuna bağlı soğurma katsayıları ölçülmüştür.

Dokulandırılmış örnek yüzeylerinin morfolojileri, Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope- SEM) ile görüntüleri incelenmiştir. Deneyler sonucunda, lazer parametrelerine bağılı olarak, nanosaniye atımlı 1064 nm fiber lazer ile yüzey dokulandırmasının kristal silisyum yüzeyinden yansımanın önemli ölçüde azalttığı ve soğurma katsayılarını ise belirgin biçimde artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Deneysel sonuçlar, özellikle, odaklanmış lazer demetinin örtüşme oranları ve tarama hızı temelinde tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Dokulandırma, fiber lazer, Fourier dönüşümlü fotoiletkenlik spektroskopisi, FTPS, optik yansıma, lazerle işleme, soğurma katsayısı, fotoiletkenlik.



ABSTRACT

EFFECT OF SURFACE TEXTURIZATION BY 1064 NM - NANOSECOND PULSED FIBER LASER ON OPTICAL REFLECTION AND ABSORPTION OF SINGLE CRYSTAL SILICON

Volkan Türker

Master of Science, Department of Renewable Energy

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Akın BACIOĞLU

Sep 2018, 84 pages

Single crystal n-type silicon wafer with (100)-orientation was texturized by using nanosecond pulsed, Ytterbium doped fiber laser with the master oscillator power amplifier architecture (MOPA), operating at the peak wavelength of 1064 nm. All texturing processes were done with the repetition frequency range of 40 – 100 kHz, the scanning speed range of 50 – 2000 mm/s and at the average laser powers of 10, 15 and 20 W. In this study, focused spot size and laser pulse width were not changed.

The normal incidence reflectivity of the samples produced at different laser texturize parameters was measured by using Fourier transform reflection and conventional optical reflection methods. For the electrical measurements, coplanar aluminum contacts were evaporated on the texturized samples. The wavelength dependent absorption coefficient of the samples was measured in Fourier Transform Photoconductivity Spectroscopy (FTPS).

The surface morphologies of texturized samples were observed with scanning electron microscopy (SEM). By using the results, it's been concluded that, the reflectivity of the single crystal samples can be reduced significantly and the absorption coefficient is

increased reasonably by nano-second pulsed fiber laser operating at 1064 nm. The results were also discussed under, especially the concept of overlap of the focused laser beam and the scan speed.

Keywords: Texturize, fiber laser, Fourier Transform Photoconductivity Spectroscopy, FTPS, optical reflectivity, laser induced treatment, absorption coefficient, photoconductivity.



TEŞEKKÜR

Öncelikle, sadece tez kapsamında olmamakla birlikte, manevi olarak da her türlü sıkıntıda, büyük bir titizlik ve sabırla bana yol gösteren, her türlü sorun karşısında objektif bir şekilde çözüm üretiminde bana olağan üstü katkı sağlayan, sayın Doç. Dr. Akın Bacıoğlu'na, tez kapsamı dışındaki yardımlarından dolayı ömrüm boyunca sahip olacağım minnettarlığımı belirtmekten, büyük mutluluk duyuyorum.

Kesikli ve anlık zorlukları olan bu yolda, kendimi ifade etmekte zorlandığım her ana rağmen, gönlümde her an kaybetmekten korktuğum, doğaya ve bilime karşı sahip olduğum olağanüstü heyecan ve tutkuyu görebildikleri için sayın hocalarım, Prof. Dr. Aynur Eray, Doç. Dr. Akın Bacıoğlu ve arkadaşlarım Orçun Altındağ, Haydar Sarper Salman, Timuçin Erk, Kerem Karadağ ve Volkan Ağır'a teşekkür ederim.

Bu yolda önümdeki kapıları açıp ve ardından da açık tuttukları için, hocalarım Prof. Dr. Aynur Eray ve Doç. Dr. Akın Bacıoğlu'na, FiberLAST A.Ş. genel müdürü Sayın Koray Eken'e, arkadaşlarım Haydar Sarper Salman, Mahmut Emre Yağcı, Kemal Rüzgâr, Onur Alpay ve Gurur Salkım'a teşekkür ederim.

FiberLAST şirketi kapsamında, beni aralarında bulundurmaya layık gördükleri ve bilimsel alanda her türlü çalışma konusunda, açık görüşlükleriyle beraber gösterdikleri sınırsız teşvik ile birlikte, tez kapsamında yapılan deneyler için kullandığım fiber lazer laboratuvar desteğinden ve harcadığım zamandan dolayı yarım kalan işlerimde bana her zaman yardımcı olan, tecrübelerinden her alanda yararlandığım sayın Semih Koray Eken'e, Mahmut Emre Yağcı'ya, Haydar Sarper Salman'a, Yiğit Ozan Aydın'a ve diğer tüm Fiberlast çalışanlarına teşekkür ederim.

Bu serüvende yanımda büyük bir sabırla ve empati gücüyle bir çelik gibi eğrilmeden duran ve böylelikle beni ideallerimden saptıracak her türlü problemden uzaklaştıran çok sevdiğim ve pek değerli arkadaşlarım Orçun Altındağ ve Haydar Sarper Salman'a, bir üstat, bir abi olarak gördüğüm ve iyi niyeti ile olgun anlayışından asla şüphe duyamadığım Mahmut Emre Yağcı'ya çok teşekkür ederim.

Tez Kapsamında, SEM görüntülerinin alınmasındaki yardımlarından ötürü, sayın Doç. Dr. Alp Osman Kodolbaş'a teşekkür ederim.

Amorf Yarıiletkenler Laboratuvarı'nda yaptıkları çalışmalar ile tez kapsamında katkıları bulunan, Adnan Müslim Menevşe'ye teşekkür ederim.

Tez kapsamındaki yardımlarından ötürü, Kaan Ergün ve Uygur Tombuloğlu'na teşekkür etmeyi borç bilirim.

Hayatımdaki en büyük şansım olarak nitelendirdiğim, her türlü sıkıntıda yanımda olan, ileri görüşlülüğü, dürüstlüğü, bilime olan saygısı ve tüm idealist tutumları ile birlikte her zaman kendisine hayran kaldığım babam Hüseyin Türker'e, canımdan çok sevdiğim tertemiz kalpli biricik annem Sevinç Türker'e ve maddi manevi her anlamda destek olan halam Funda Türker'e çok teşekkür ederim.

Bu tez çerçevesinde, örneklerin optik soğurma katsayısının ve optik yansıma katsayılarının, *Fourier Dönüşümlü Fotoiletkenlik Spektroskopisi* ile belirlenmesi, **HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ KOORDİNASYON BİRİMİ** tarafından desteklenen, 013 A 602 007-381 numaralı "*Fourier Dönüşümlü fotoiletkenlik tayfölçümü (FTPS) tekniği ile aSi: H/cSi heteroeklem güneş pillerinin bantaltı soğurma bölgesinin incelenmesi.*" ve FBA-2015-5399 numaralı "*Hidrojenlendirilmiş nanokristal silisyum oksijen alaşımlarının (nc-SiOx:H; $x < 1$) bantaltı soğurma spektrumlarının, Fourier Dönüşümlü Fotoiletkenlik Spektroskopisi (FTPS) ile incelenmesi.*" kapsamında kurulan deney sistemleri ile olanak bulmuştur. Bu kapsamda teşekkürü bir borç bilirim.

İşte burada - başkalarında gördüğüm, acizane kültürel birikimimle gözlemlediğim etiksizlik dolu ve adaletsizlikle iç içe geçmiş, çıkar, yalan ve korku temelli davranışların kalbimin merkezine çökmesi durumunda, bir tepki olarak gösterdiğim her türlü direncin ezikliği ve eksikliği ile birlikte, ruhumun karanlığa gömüldüğü ve birikmiş cahilliğimle tanımlayamadığımı fark ettiğim kimliksizliğimin tüm benliğimi kemirdiği o yapayalnız kaldığım anlarda, beni umutlandıran ve ormandan yeni çıkmış ilkel bir tür olduğumuzu hatırlatan, hayatımda şu ana kadar yaptığım ve yanlışlanabilirliği ile onur duyabileceğim ilk bilimsel eseri, umut etmekten vazgeçmeyi beceremediğim samimi merakınıza sunmaktan, gerçekten de büyük bir mutluluk duyuyorum.

Volkan Türker

Otoriteyi, sürekli gerçek olarak kabul edenler için, gerçeği otorite olarak kabul etmek çok zor olmalı.

Gerald Massey

Samimi merak

A.M. Celal Şengör

Muhteşem bir şey, bir yerlerde keşfedilmeyi bekliyor.

Carl Sagan

Üzülme, korkma sakın, çünkü bu sadece bir yolculuk.

Bill Hicks

Eğer bir gün sözlerim bilim ile ters düşerse, bilimi seçin.

Mustafa Kemal ATATÜRK

İÇİNDEKİLER

Sayfalar

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	i
1. GİRİŞ.....	1
2. TEMEL BİLGİLER.....	4
2.1. Foton Enerji Yoğunluğu.....	4
2.2. Fotovoltaik.....	5
2.3. Dokulandırma.....	9
2.3.1. Dokulandırma Türleri.....	12
2.3.2. Kuru Gaz Aşındırma Yöntemi.....	13
2.3.3. Lazer Ablasyon Yöntemi.....	13
2.4. Lazer Malzeme Etkileşimi.....	13
2.4.1. Ablasyon.....	15
2.4.1.1. Atım Süresine Bağlı Lazer Malzeme Etkileşimi.....	17
2.5. Lazer.....	18
2.5.1. Atımlı MOPA Mimarili Fiber lazer.....	18
2.5.2. Lazer Parametreleri.....	19
2.6. Literatürde Yapılan Dokulandırma Çalışmaları.....	23
3. DENEYSEL ÖLÇÜM DÜZENEKLERİ VE İŞLEYİŞLERİ.....	27
3.1. Fourier Dönüşümlü Fotoakım Spektroskopisi (FTPS) Sistemi.....	27
3.1.1. İnterferogramların Fourier Transformasyonu.....	28

3.2. FT-Spektrometre Ölçüm Düzeneği.....	29
3.2.1. Yansım Ölçümü Kutusu.....	31
3.2.2. Soğurma Ölçüm Kutusu.....	33
3.3. Lazer Mimarisi ve Lazer Düzeneği.....	36
3.4. Maske Tasarımı.....	41
3.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	43
4. ÖRNEK HAZIRLANIŞI, VERİLER VE TARTIŞMA.....	45
4.1. Malzeme Hazırlanışı.....	45
4.1.1. Fiber lazer ile silisyum dilim dokulandırılması.....	45
4.2. Veriler ve Tartışma.....	52
4.2.1. FT-Spektrometre Ölçüm Düzeneği ile Elde Edilen Yansım Verileri.....	52
4.2.2. FT-Spektrometre Ölçüm Düzeneği ile Elde Edilen Soğurma Katsayısı Verileri...58	
4.2.3. Optik Yansım Deney Düzeneği ile Elde Edilen Yansım Verileri.....	62
4.2.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntülerinin Analizi.....	66
5. SONUÇ.....	71
KAYNAKLAR.....	74
ÖZGEÇMİŞ.....	83

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfalar

Şekil 2-1 Elektromanyetik tayf [30]	5
Şekil 2-2 Yarıiletkenin basitleştirilmiş bant diyagramı	6
Şekil 2-3 Güneş gözelerinin akım-gerilim grafiği	8
Şekil 2-4 Yansıtma kaplamanın kesiti	10
Şekil 2-5 Düzensiz bir şekilde kendini tekrar eden yüzey dokulandırılması	11
Şekil 2-6 Düzenli bir şekilde kendini tekrar eden terslenmiş piramitlerden oluşan yüzey dokulandırılması	12
Şekil 2-7 MOPA mimarili bir fiber lazer	19
Şekil 2-8 Lazer atım süresi, atım tekrar hızı, atım tepe gücü, atım enerjisi ve lazer ortalama güç hakkında bilgi veren, lazer atımının şematik gösterimi	21
Şekil 2-9 İki lazer atımının çakışması	23
Şekil 2-10a ve Şekil 2-10b Dalgaboyuna bağlı yansıma grafiği, a) tek doğrultuda paralel dokulandırılma yapılmış örneklere ait, b) birbirleriyle çakışan karşılıklı hatlar ile dokulandırılmış örneklere aittir [95].	24
Şekil 2-11 Gelişi güzel dokulandırılmış, düzgün dokulandırılmış, parlatılmış ve (111) kristal yönelimli dokulandırılmış silisyum dilimin, dalgaboyuna bağlı soğurma grafiği [69]	25
Şekil 2-12 (100) ve (111) kristal yönelimli dokulandırılmış silisyum dilimin, kapsüllenmiş ve kapsüllenmemiş, dalgaboyuna bağlı soğurma grafiği [69]	25
Şekil 2-13 0.8 μm aralık ile 40, 80 ve 160 s boyunca kuru plazma aşındırma tekniğiyle aşındırılmış örneğin optik yansıma tayfı [97]	26
Şekil 3-1 Michelson interferometresi	27
Şekil 3-2 Tek bir frekanstan oluşan bir interferogram	28
Şekil 3-3 Birden çok frekansın bileşkesi sonucu oluşan bir interferogram	29
Şekil 3-4 FT-Spektrometre ölçüm düzeneğinin şeması	30
Şekil 3-5 FT-Spektrometre'nin bir fotoğrafı	30

Şekil 3-6 Optik yansıma kutusu	32
Şekil 3-7 Soğurma ölçüm kutusu	33
Şekil 3-8 Optik yansıma deney düzeneğinin şeması	36
Şekil 3-9 Tez kapsamında kullanılan lazerin mimarisi	37
Şekil 3-10 40 -100kHz aralığındaki atım tekrar hızlarında, 20 W ortalama güç çıkışında lazerin bağlı şiddet tayfi	38
Şekil 3-11 Demet kalitesi ölçüm düzeneği	39
Şekil 3 12 Demet kalitesi grafiği.....	39
Şekil 3 13 Lazer işleme ünitesinin şeması.....	40
Şekil 3 14 Lazer işleme ünitesinin fotoğrafı [31]	40
Şekil 3-15a İlk maske tasarımı Şekil 3-15b İkinci maske tasarımı.....	41
Şekil 3 16 İki maskenin fotoğrafı.....	42
Şekil 3 17a) Maske sabitleyici ve b) Maske tutucu.....	42
Şekil 3 18 Taramalı elektron mikroskobunun şematik gösterimi.....	44
Şekil 4-1 İlk silisyum dilim üzerindeki tek doğrultuda yapılmış dokulandırmada kullanılan lazer işleme deseni.....	46
Şekil 4-2 İlk silisyum dilimde yapılan bir örneğin fotoğrafı	46
Şekil 4-3 İlk silisyum dilim üzerindeki tek yönlü dokulandırma deseni	47
Şekil 4-4 İkinci silisyum dilim üzerindeki tek ve çift yönlü dokulandırma desenleri.....	50
Şekil 4-5 İkinci silisyum dilim ile yapılan bir örneğin fotoğrafı	51
Şekil 4-6 Kristale dik (I) ve paralel yönelimde (—) aynı lazer parametreleriyle dokulandırmış, örneklerin yansıma tayfi	53
Şekil 4-7 PN23 numaralı örneğinin yansıma tayfi	54
Şekil 4-8 PN1, PN2, PN3 numaralı örneklerin yansıma tayfi	55
Şekil 4-9 PN6, PN8, PN11 numaralı örneklerin yansıma tayfi	56
Şekil 4-10 PN22, PN24, PN20 numaralı örnekleri yansıma tayfi	57
Şekil 4-11 PA1, PA3, PA5, PA7, PA10 numaralı örneklerin soğurma katsayısı tayfi	59

Şekil 4-12 PA2 ve PA4 numaralı örneklerin soğurma tayfı.....	60
Şekil 4-13 İkinci maskenin kullanılması ile üzerine alüminyum kontak atılmış PC4, PC1, PC5, PC9 örneklerinin soğurma katsayısı tayfı.....	62
Şekil 4-14 PA1, PA3, PA5, PA7, PA10 numaralı örneklerin yansıma tayfı.....	63
Şekil 4-15 PA2, PA4, PA6, PA9 numaralı örneklerin yansıma tayfı.....	64
Şekil 4-16 PA11, PA12, PA13, PA14, PA15 numaralı örneklerin yansıma tayfı.....	65
Şekil 4-17 PN 1 numaralı örneğin SEM görüntüsü.....	67
Şekil 4-18 PN 32 numaralı örneğin SEM görüntüsü.....	68
Şekil 4-19 PN1 numaralı örneğin 750x büyütülmüş SEM görüntüsü.....	70



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfalar

Tablo 4-1 İlk silisyum dilim üzerinde yapılan dokulandırma parametreleri ile ilgili lazer parametreleri	48
Tablo 4-2 İkinci silisyum dilim üzerinde yapılan dokulandırma parametreleri	49
Tablo 4-3 Üçüncü silisyum dilim üzerinde yapılan dokulandırma parametreleri	51
Tablo 4-4 PN1, PN2, PN3 numaralı örneklerin dokulandırma parametreleri	55
Tablo 4-5 PN6, PN8, PN11 numaralı örneklerin dokulandırma parametreleri	56
Tablo 4-6 PN22, PN24, PN20 numaralı örneklerin dokulandırma parametreleri	57
Tablo 4-7 PA1, PA3, PA5, PA7, PA10 numaralı örneklerin dokulandırma parametreleri ..	59
Tablo 4-8 PA2 ve PA4 numaralı örneklerin dokulandırma parametreleri	60
Tablo 4-9 PC4, PC1, PC5, PC9 numaralı örneklerin dokulandırma parametreleri	62
Tablo 4-10 PA1, PA3, PA5, PA7, PA10 numaralı örneklerin dokulandırma parametreleri	64
Tablo 4-11 PA2, PA4, PA6, PA9 numaralı örneklerin dokulandırma parametreleri	64
Tablo 4-12 PA2, PA4, PA6, PA9 numaralı örneklerin dokulandırma parametreleri	65
Tablo 4-13 PN1 numaralı örneğin dokulandırma parametreleri	67
Tablo 4-14 PN32 numaralı örneğin dokulandırma parametreleri	68
Tablo 4-15 PN33 numaralı örneğin dokulandırma parametreleri	69

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

n	Durum Yoğunluğu
FF	Dolum Faktörü
k	Dalga Sayısı
f	Lazer Atım Tekrar Hızı
f	Merceğin Odak Uzaklığı
p_a	Lazer Atım Tepe Gücü
p_Φ	Lazer Güç Yoğunluğu
E_Φ	Lazer Akısı
$E_{\Phi_{th}}$	Lazer Akısı Eşik Değeri
E_a	Lazer Atım Enerjisini
p_{ort}	Ortalama Güç
ζ	Çakışma Oranı
W_0	Odaklanmış Lazer Demetinin Çapı
M^2	Demet Kalitesi
Φ	Lazer Demetinin Saçılma Oranı
u_n	Deşik Sürüklenme Mobilitesi
u_p	Elektron Sürüklenme Mobilitesi
g	Hareketli Aynanın Uzaklığı
v_m	Hareketli Aynanın Hızı
η	Kuantum Verimliliği
I_0	Gelen Radyasyon Yoğunluğu
I_z	Radyasyon Yoğunluğu
V	Malzeme Hacmi
C_i	Birim Hacimdeki Örgü Isı Kapasitesi
C_e	Birim Hacimdeki Elektron Isı Kapasitesi
γ	Elektron-Örgü Etkileşim Parametresi
k_e	Elektronların Isıl İletkenliği
k_o	Isıl Denge Durumunda Isıl İletkenlik
k_s	Kırma İndisinin Reel Kısmı

Q	Isı Akısı
T_i	Örgü Sıcaklığı
T_e	Elektron Sıcaklığı
$P(\delta)$	İnterferometreye Gelen Demet Gücü
$B(\sigma)$	İnterferometreye Gelen Demet Gücü ile İlgili Değişken
τ_L	Lazer Atım Süresi
τ_i	Örgü Isınma Zamanı
τ_e	Elektron Soğuma Zamanı
τ	Azınlık Taşıyıcılar İçin Yeniden Birleşme Ömür Süresi
τ_y	Isıl Gevşeme Zamanı
a	Isıl Yayınlılık
I_{ayna}	Aynadan Yansıyan Işığın Şiddeti
ϕ_{ayna}	Aynadan Gelen Foton Akısı
$\phi_{örnek}$	Örnekten Gelen Foton Akısı
R_{ayna}	Aynanın Yansıtma Oranı
$I_{örnek}$	Örnekten Yansıyan Işığın Şiddeti
$R_{örnek}$	Örneğin Yansıtma Oranı
S_r	Dedektörün Tayfsal Duyarlılığı
σ_p	Fotoiletkenlik
G	Elektron-Boşluk Üretim Hızı
F_{th}	Eşik Lazer Enerji Akısı
$E_{\phi_{th}}$	Eşik Lazer Güç Yoğunluğu
Ω	Buharlaşıma İçin Gerekli Isı
δ	Faz Farkı

Kısaltmalar

LAZER	Zorlanmış Radyasyon Yayılımı İle Güçlendirilmiş Işık
MAZER	Zorlanmış Radyasyon Yayılımı İle Güçlendirilmiş Mikrodalgası
MOPA	(Master Oscillator Preamplifier Amplifier) (Ana Salıncı Güç Yükselteçleri)
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
FTPS	Fourier Dönüşümlü Fotoiletkenlik Spektroskopisi
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi



1. GİRİŞ

Günümüzün büyük bir küresel sorunu olan, enerji kaynaklarının tükenmesine karşı, birçok alternatif çözüm geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bu konuda en çok popüler olan konulardan biri de temiz ve uzun bir zaman boyunca tükenmeyecek olan güneş enerjisidir. Güneş enerjisinden yararlanma fikrinin, antik Yunan çağlarından beri düşünüldüğü bilinmektedir. O dönemlerde bile insanlar enerji ihtiyacını karşılamak için güneşe ihtiyaç duymuş ve güneş enerjisinden faydalanmışlardır. İlk olarak 19. yüzyılda güneş enerjisi ile çalışan motorlar ile ilgili ilk adımlar atılmıştır [1]. Ardından bu buluşlar güneş ışığı toplayıcılarına kadar gitmiştir [2]. İlk olarak güneş enerjisini elektriksel akıma çevirebilen fotovoltaiik yapı 19. yüzyıllarda Edmond Becquerel tarafından ortaya atılmıştır [3].

Fotovoltaiik güneş gözeleri güneş enerjisini doğrudan elektrik akımına çeviren aygıtlardır. Çevrelerine zararlı bir atık malzeme oluşturmazlar ve çevreyi kirletmezler. Ayrıca, sokak lambalarından, uzaya gönderilen uydulara kadar her alanda kullanılmaktadırlar. Organik güneş gözeleri dışında genel olarak güneş ışığını elektriksel enerjiye çevirme prensipleri aynı olup, ışığı soğurarak elektrik akımına çeviren yarıiletken malzemelerden oluşturmaktadırlar. Normal şartlarda bu yarıiletken malzemelerin yasak enerji aralığına denk ya da bu yasak enerji aralığından daha fazla enerjiye sahip fotonların, gözünün içerisinde soğrulması ve elektron deşik çifti oluşumu söz konusu olur [64]. Bu taşıyıcılar, gözeyi oluşturan p-n yarıiletken eklemlerin aralarında yaratılan yapısal elektrik alanının yardımıyla tekrar birleşmeden önce, p-n eklemının dış devresinde bir akım oluşturmurlar [4-5]. Buradan da anlaşılacağı gibi güneş gözesinin oluşturmacağı enerjinin kaynağı fotonlardır. Bu yüzden güneş gözelerinin, fotonları verimli bir şekilde soğrulabilmesi, fotovoltaiik verimin yükseltilebilmesi için çok önemlidir. Foton tuzaklama, gözelerin fotonları soğurabilmesi için kullanılan bir yöntemdir [6-7] ve genelde güneş gözelerindeki göze ara yüzlerinin dokulandırılması ile gerçekleştirilir [7-19, 68]. Dokulandırma ile fotonların malzeme içerisinde kat ettikleri yol artar ve dolayısıyla malzeme ile etkileşime girme ihtimalleri artar.

Yüzey dokulandırma işlemi periyodik olarak yapılabileceği gibi gelişigüzel bir yüzey işleme geometrisi ile de yapılabilir [20-21]. Kaotik olarak yapılan dokulandırmalar için gerekli deneysel hazırlanma koşulları göreceli olarak daha komplekstir [20]. Bununla birlikte kendini tekrar eden yapılarda, saçılan ışığın miktarı yüzeyin fiziksel özellikleri ile belirlenir [22-23]. Kendini tekrar eden dokulandırılmış yüzeylerin elde edilmesini sağlayan bir takım fotolitografi yöntemleri dışında kullanılan bir başka yöntem ise lazer ablasyon

yöntemidir [20]. Literatürde, bu yöntem ile yapılan yüzey dokulandırmaları ile tabakaların birleştirilmesiyle oluşturulan güneş gözelerinde %19,8 verimlere ulaşılabilmiştir [19].

LAZER (Zorlanmış Radyasyon Yayılımı İle Güçlendirilmiş Işık) fikri ilk olarak Albert Einstein tarafından ortaya atılmıştır [33], [81, 86]. Ancak 20. Yüzyılda öne atılan bu fikrin, o dönemin teknolojisi ile gerçekleşebilmesi neredeyse imkansızdır. 20. Yüzyılın ortalarına doğru ilk olarak MAZER (Zorlanmış Radyasyon Yayılımı İle Güçlendirilmiş Mikrodalga) [86] deneysel olarak gözlenmiş ve ardından geçen 10 yıllık süre içerisinde üretimi gerçekleştirilmiştir. Ardından geçen sürede ortaya ilk çıkan lazerler genel olarak sağlık sorunlarına çözüm olarak üretilmiştir [85]. Günümüzde birçok alanda kullanım alanı olan lazerlerin, farklı merkez dalgaboylarında, farklı atım tekrar hızlarında ve atımlı/atımsız çalışma prensiplerine bağlı olarak birçok değişik türü bulunmaktadır.

Bu kapsamda lazer türleri arasında fiber lazerin, kompakt yapısı, yüksek demet kalitesi [37], elektro-optik verimliliklerinin yüksek olması, bakım gerektirmemesi gibi endüstriyel anlamda pozitif özellikleri yanında, diğer lazerlere nazaran atımlı fiber lazerlerin atım süreleri ve atım tekrar hızlarının birbirlerinden bağımsız bir şekilde kontrol edilmesi [88] gibi yüzey dokulandırma işlemleri açısından çok önemli özellikleri vardır.

Fiber optik, ilk radyoların bant genişliğinin belli değerlere limitlenmiş olmasından dolayı ortaya bir çözüm olarak atılmış bir konudur [24]. Bant genişliğindeki limitlemenin nedeni, boşlukta yayılmaları süresince sahip olacağı saçılmalar ve kayıplar ile iletişim için güvenilir ve hızlı bağlantılar sağlanılamamasındandır. Bu sebepten ötürü fotonların bir dalga kılavuzu aracılığıyla taşınma fikri ortaya atılmış ve bu konularda yapılan ilk üretimler 20. Yüzyılın başlarında yapılmıştır [24]. Fakat bu fiberlerin kılıfsız olması, ışığın iletilmesinde zorluklar ortaya çıkarmıştır ve ardından silika kılıflı fiberler üretilmeye başlanmıştır [25]. Fiber kılıf teknolojisi üzerine yapılan araştırmalar ve farklı katkı malzemelerinin kullanılması sayesinde verim seviyeleri yukarılara çekilmiştir. Günümüzde genel olarak fiber lazer yükselteç mimarilerinde akla ilk gelen, MOPA tasarımı 20. yüzyılın sonlarına doğru kendini göstermeye başlamıştır. Bu sistemlerde kullanılan lazer diyotlarının parlaklık limitinden dolayı yüksek güce çıkılamaması sorunu, çift kılıflı fiber dizaynı ile çözülmüştür [26].

Bu tez kapsamında silisyum dilimlerin periyodik olarak MOPA mimarili fiber lazer ile 40 – 100 kHz tekrar hızı aralığında, 10 – 20 W ortalama güç aralığında ve 50 – 2000 mm/s tarama hızı aralığında yüzey dokulandırılması yapılmıştır. Dokulandırılmış yapılardaki

yansımanın azaltılması ve soğurma katsayısının artırılması hedeflenmiştir. Yansıma tayfi ve soğurma katsayısı, harici bir çıkışı ve 350 ile 2200 nm aralığında optik tayf aralığına sahip ışık kaynağına sahip, bir FT (Fourier dönüşümlü)-Spektrometre ile ölçülüp incelenmiştir. FT-Spektroskopisi fotoiletkenlik temeline dayanan bir ölçüm tekniğidir. İçerisinde bir Michelson interferometresi ve akım gerilim çevirimi yapan bir yükselteç bulunur. Kullanılan Michelson interferometresi sayesinde diğer ölçüm tekniklerine nazaran daha hızlı bir şekilde ölçüm alınır. Bu ölçüm düzeneği ile, düzenekten çıkan FT demet, ilk ölçümde referans olarak kabul edilmiş ve dolayısıyla tayfsal özellikleri bilinen bir fotodedektöre gönderilmiş ardından ikinci aşamada örneğe gönderilmiştir. Akım yükselteci çıkışından alınan interferogramın Fourier dönüşümü alınıp, referans ölçümü ile oranlanarak örneğe ait soğurma tayfi elde edilmiştir [27]. Ayrıca yansıma tayfinin ölçülmesi için FT demet, kapalı bir kutuda önce alüminyum kaplı bir ayna üzerine düşürülerek gelen ışık şiddeti belirlenmiş ve deney, ayna yerine örnek konularak tekrarlanmıştır. Örnekten ve aynadan gelen ışık dedektöre yansıtılmış ve ardından akım yükselteci çıkışından alınan interferogramın Fourier dönüşümü alınarak, örneklerin yansıma tayfi belirlenmiştir. Bunun dışında yansıma tayfi standart bir monokromatör ile ölçülmüş ve FT-Spektrometre ölçüm düzeneği ile ölçülen yansıma değerleri ile karşılaştırılması yapılmıştır.

2. TEMEL BİLGİLER

Bu bölümde tez kapsamında yapılan çalışmaların ve gözlemlerin daha iyi anlaşılması için foton ve elektromanyetik tayf, ışık tuzaklama ve dokulandırma hakkında genel bilgi verilmiştir.

2.1. Foton Enerji Yoğunluğu

Birim yüzeye saniye başına düşen foton sayısı, foton akısı olarak tanımlanan

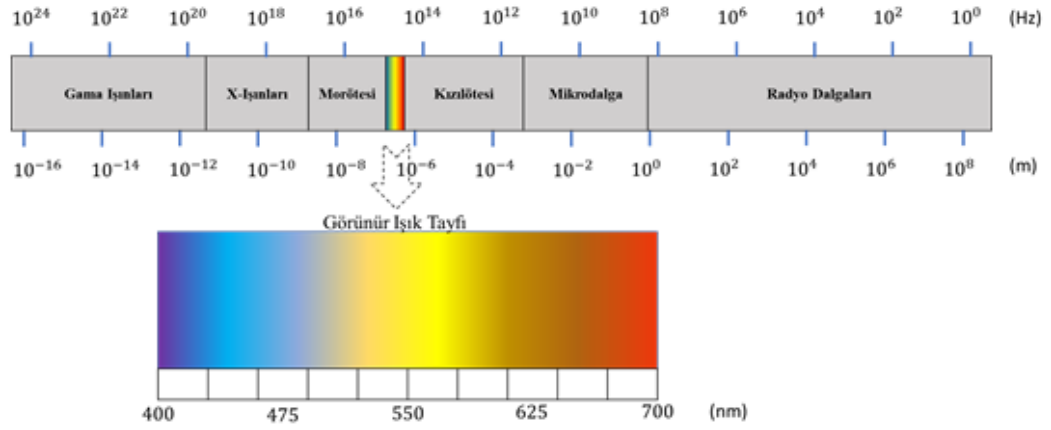
$$\phi = \left(\frac{\text{Foton sayısı}}{t A} \right) \quad (2.1)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada t zamanı, A da birim alanı ifade eder. Akının birimi $1/s.m^2$ olarak verilebilir. Foton akısı bir yüzey üzerine düşen foton sayısı hakkında bize bilgi verdiği gibi, enerjiden bağımsızdır. Ancak foton akısı enerji ile çarpılırsa bize güç yoğunluğu hakkında bilgi verecektir. Böylece birim alana düşen foton akısının, transfer ettiği enerji hakkında yorum yapılabilir. Güç yoğunluğu matematiksel olarak

$$H = \phi \left(\frac{hc}{\lambda} \right) \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir. Birimi W/m^2 'dir. Burada h Planck sabitidir ve c ışık hızıdır. Eşitlik 2.2'de de görüldüğü gibi güç yoğunluğu dalga boyuna bağlıdır. Dolayısıyla farklı dalgaboylarındaki fotonların birim yüzeydeki güç yoğunlukları farklı olacaktır. Enerji ile dalgaboyu ters orantılı olduğu için kısa dalgaboylarında birim alana transfer edilen güç yoğunluğu büyükken, uzun dalgaboylarında birim alana transfer edilen güç yoğunluğu daha küçük olacaktır.

Foton bir elektromanyetik dalgadır ve vakum ortamında bütün elektromanyetik dalgalar ışık hızında hareket etmektedir. Maxwell denklemlerinden elde edilen sonuca göre ışık hızı sabittir [28]. Bununla birlikte bir dalganın frekansı, dalganın kaynağınca belirlenebilmektedir. Bu sebepten farklı frekans değeri olan her elektromanyetik dalganın farklı bir dalgaboyu vardır. Bu elektromanyetik dalgaların enerjiye bağlı olarak dağılımı elektromanyetik tayfı (spektrumu) oluşturmaktadır. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi elektromanyetik tayf içindeki $0.4 \mu m$ ile $0.7 \mu m$ aralığındaki ışımaya, görünür ışık tayfı ve $0.7 \mu m$ ile $1 mm$ aralığındaki ışımaya da kızılötesi tayfı olarak tanımlanır [29].



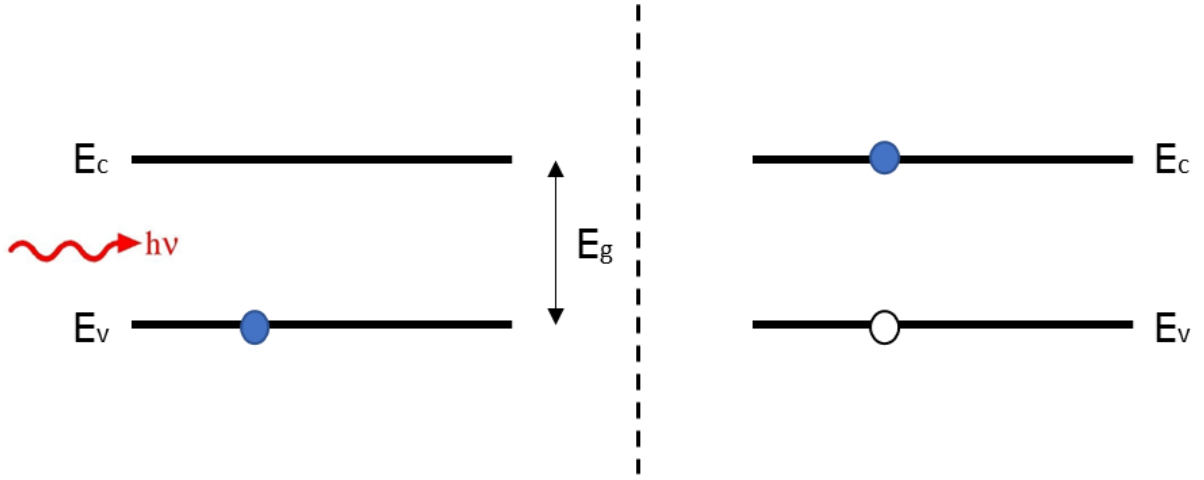
Şekil 2-1 Elektromanyetik tayf [30]

2.2. Fotovoltaik

Yarıiletkenler çevresel şartların veya üzerine uygulanan fiziksel birtakım etkenlerin sonucunda, elektriksel iletkenliğe sahip olabilen malzemelerdir. Söz konusu bu etkenler, yarıiletken malzemelerin içinde bulunan elektronlara enerji transferini mümkün kılabilen; malzeme üzerinde elektrik alan uygulama, malzemenin sıcaklık değerini artırma ya da malzeme üzerine foton düşürme gibi uygulamalardır.

Kuantum mekaniğine göre elektronların kesikli enerji seviyeleri vardır [52]. Fermi Dirac istatistiğine göre bu moleküllerdeki aynı enerji düzeyindeki elektronlar, değerliklerinden dolayı birbirlerini yararlar [49]. Dolayısıyla kesikli enerji seviyelerinde oluşan sanki sürekli bir enerji diyagramı ortaya çıkar.

Şekil 2.2’de görülen, yarıiletken bant diyagramında E_c , en düşük boş enerji bandının yani iletkenlik bandıdır. E_v ise en yüksek dolu enerji bandı olan değerlik bandıdır. Bu iki bant diyagramındaki enerji aralığı E_g ile gösterilir ve yasak enerji aralığıdır.



Şekil 2-2 Yarıiletkenin basitleştirilmiş bant diyagramı

Şayet bu yasak enerji aralığına denk veya bu yasak enerji aralığından daha yüksek enerji değerine sahip bir foton malzemeye gönderilir ise, değerlik bandından bir elektron iletkenlik bandına geçiş yapar ve bu sırada artlarında bir deşik bırakır. İletkenlik bandındaki bu serbest elektronlar ve aynı zamanda değerlik bandındaki deşikler, malzemeye iletkenlik özelliği kazandırır. Dolayısıyla yasak enerji aralığı bizlere katkısız bir yarıiletkende elektronların bulunmayacağı bölgeyi ifade ettiği gibi elektronların bulunduğu enerji bandından kopması için gerekli minimum enerji miktarı hakkında da bilgi vermektedir [34]. Söz konusu bu enerji, yarıiletken malzemeye çevresinden transfer edilen ısı ile de aşılabılır.

İletkenlik bandındaki serbest elektron, kararsızlığından ötürü değerlik bandına geri dönüş yapacak ve buradaki deşik ile birleşecektir. Bu olaya yeniden birleşme denmektedir [55].

Yarıiletkenlerin malzeme yapısına göre değişecek olan yasak enerji aralığı aynı zamanda bizlere, bu yarıiletkenin hangi aralıktaki tayf aralığına sahip fotonlara tepki verebileceği hakkında bilgi vermektedir. Dolayısıyla yasak enerji aralığı, malzemeye göre yarıiletkenler için karakteristik bir özelliktir. Yarıiletkenin söz konusu bu tayfsal duyarlılığını değiştirebilmek için katkılanmış yarıiletkenlerin yapılabilmesi mümkündür [56].

Katkılama işlemi, yarıiletkenin kristal yapısını bozmayacak düzeyde yapılmaktadır. Periyodik tabloda bulunan 3. grup elementler veya 5. grup elementler, 4. grup bir yarıiletkende katkılama için kullanılmaktadır. Bu işlem ile yarıiletkendeki elektron ya da deşik yoğunlukları değiştirilebilir. Örnek olarak bir yarıiletken malzemeye 3. grup bir

element ile katkılama yapılırsa, katkılı yarıiletkende fazladan deşikler bulunmaya başlayacaktır. Bunun sebebi 3. grup elementlerinin değerlik elektron sayısı 3 olmasıdır. Yani bir elektron ihtiyacı vardır [57]. Bu sayede deşik yoğunluğu artacaktır. Buna p tipi katkılama denir. Deşik sayısını artıran bu iyonlara verici iyonları denir [58]. Aynı şekilde bir yarıiletken 5. grup bir element ile katkılanırsa, katkılı yarıiletkende fazladan elektronlar bulunmaya başlayacaktır. Bunun sebebi 5. grup elementlerinin değerlik elektron sayısı 5'tir. Yani fazladan bir elektron vardır [57]. Bu sayede elektron yoğunluğu artacaktır. Buna da n tipi katkılama denir. Elektron sayısını artıran bu iyonlara alıcı iyonları denir [58].

Yarıiletkende, ısı dengede azınlık ve çoğunluk taşıyıcılarının yoğunluklarının çarpımları sabittir. Bu duruma kütle hareketi kanunu denir [59].

$$n_o p_o = n_i^2 \quad (2.3)$$

$$n_i = \frac{\text{serbest elektron sayısı yada deşik sayısı}}{cm^3} \quad (2.4)$$

Eşitlik 2.3'te n_o elektron denge taşıyıcı yoğunluğu ve p_o 'da deşik denge taşıyıcı yoğunluğudur. Eşitlik 2.4'te n_i özgün durumdaki taşıyıcı yoğunluğudur.

Yapılan katkılama ile birlikte elektron ile deşik yoğunlukları değişir.

N tipi katkılama için kütle hareketi yasası

$$n_o N_A = n_i^2 \quad (2.5)$$

halini alır. P tipi katkılama için kütle hareketi yasası,

$$p_o N_D = n_i^2 \quad (2.6)$$

halini alır. Burada N_D verici atom konsantrasyonudur. N_A ise alıcı atom konsantrasyonudur.

Eşitlik 2.5 ve 2.4'ten de görüleceği gibi katkılama miktarı artıkça azınlık taşıyıcıların sayısı azalmaktadır [60].

Temel olarak güneş gözeleri, anlatılan p tipi ve n tipi yarıiletkenlerin birleşmesiyle oluşturulurlar. Bir güneş gözesinin karanlıkta iken, sahip olduğu akım

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad (2.7)$$

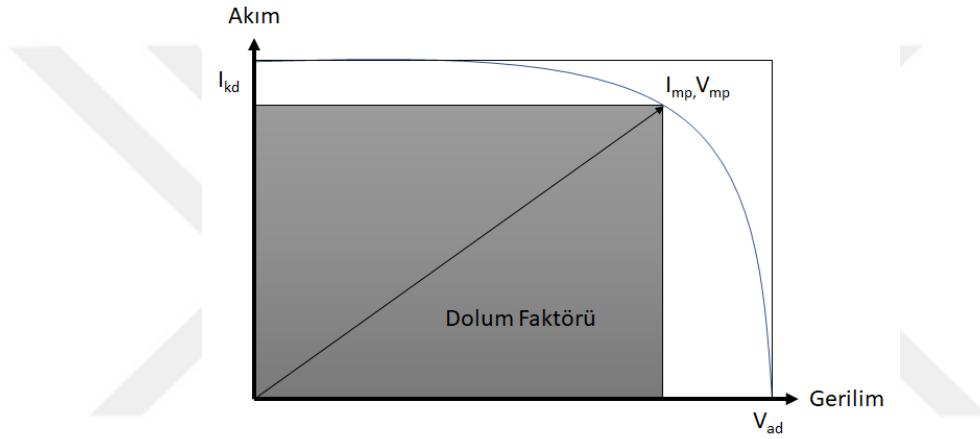
eşitliği ile verilir. Burada q elektron yükünü, V bir güneş gözesine uygulanan gerilimi, k Boltzmann sabitini, I_0 doyum akımını, T de gözenin sıcaklığını belirtmektedir. n idealite

faktörüdür. Göze aydınlatıldığında 2.7 eşitliğine, güneş gözesi tarafından soğrulacak elektromanyetik dalgadan dolayı I_{op} terimi eklenir ve güneş gözesi için akım

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) - I_{op} \quad (2.8)$$

olarak yazılır. I_{op} aydınlatma durumunda üretilen akımdır.

Şekil 2.3'te bir güneş gözesinin I-V grafiği gösterilmiştir. Bu grafikte gözede üretilen akım sıfır iken, göze üzerindeki gerilim yani açık devre gerilimi V_{ad} ve göze terminallerinde uygulanan gerilim sıfır iken, göze tarafından elde edilen I_{kd} yani kısadevre akımı görülebilmektedir.



Şekil 2-3 Güneş gözelerinin akım-gerilim grafiği

Gözelerin verimlerini ifade ederken kullanılan bir parametrede dolum faktörüdür. Eşitlik 2.9'daki gibi tanımlanır.

$$FF = \frac{I_{mp} * V_{mp}}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (2.9)$$

I_{mp}, V_{mp} terimleri Şekil 2.3'te I-V gözükmeğmektedir. Bu iki terimin çarpımı I-V grafiğindeki maksimum güç noktasını bize gösterir. Maksimum güç bize dolum faktörü hakkında bilgi verirken, güneş gözelerinin verimi de bu dolum faktörü ile hesaplanır. Eşitlik 2.10'da verim denklemi verilmektedir.

$$\eta = \frac{I_{sc} * V_{oc}}{P_{in}} FF \quad (2.10)$$

Burada P_{in} güneş gözesi üzerinde düşen optik gücü ifade etmektedir.

2.3. Dokulandırma

Yüzey dokulandırması, malzemenin üzerine uygulanan mekanik veya kimyasal işlemler ile çeşitli geometrik yapıların oluşturulmasıdır. Bu geometrik yapılar, düzenli bir şekilde kendini tekrar edebileceği gibi, gelişigüzel bir şekilde de oluşturulabilir. Yüzey dokulandırma işlemindeki asıl amaç, yüzeye düşen fotonların geri yansıma ihtimallerini azaltmak ve dolayısıyla, ön ve arka yüzeylerinde soğrulma ihtimalini arttırmaktır [6]. Genel olarak geri yansımayı azaltmak için, güneş gözelerinin yüzeylerine yapılan işlemlerden biri yansıtma kaplamalarıdır (ARC-Anti-Reflection Coating) [20]. Bu konuda en çok kullanılan malzemelerden biri SiN_x 'tir [65] ve kullanılan kaplama yöntemlerinden en çok tercih edilenlerinden biri plazma-destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD - Plasma-enhanced chemical vapor deposition) yöntemidir [35,98]. Yansıtma kaplamaların çalışma ilkesi, malzemeden ve kaplamadan yansıyan ışığın, birbirlerini sönmüleyebilmesine dayanır. Bu durum teorik olarak incelendiğinde,

$$\alpha = \frac{4\pi k_s}{\lambda} \quad (2.11)$$

eşitliğinden soğurma katsayısını (α) elde edilmektedir. k_s ise kırma indisinin reel kısmıdır. Kırma indisi n_0 olan bir ortamdan, yansıtma kaplaması olmayan ve kırma indisi n_s olan bir ortama geçiş yapan bir demet için yansıma değeri

$$R = \left(\frac{n_0 - n_s}{n_0 + n_s} \right)^2 \quad (2.12)$$

eşitliği ile verilir. Şayet malzeme üzerine kaplama yapıldıysa, gelen demetin yansıma değeri

$$R = \frac{(n_0 - n_s) + \left(\left(\frac{n_s * n_0}{n_1} \right) - n_1 \right)^2 \tan^2 \delta_1}{(n_0 + n_s) + \left(\left(\frac{n_s * n_0}{n_1} \right) + n_1 \right)^2 \tan^2 \delta_1} \quad (2.13)$$

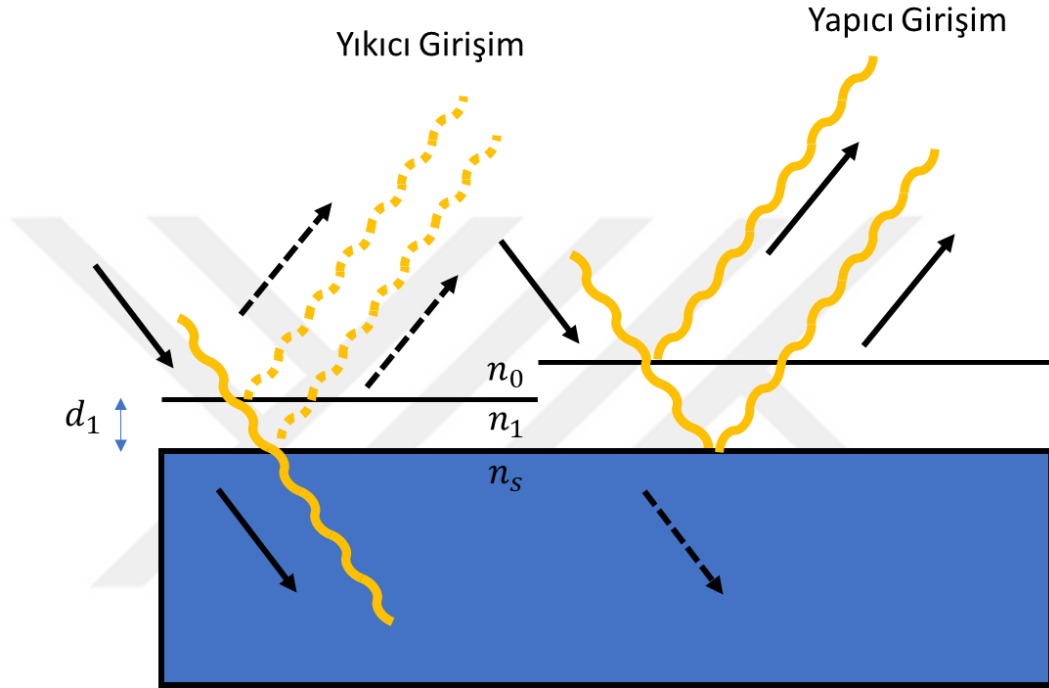
şekline gelir. Eşitlik 2.14'te ise δ , yani malzeme yüzeyinden gelen ve malzeme üzerindeki d_1 kalınlığındaki kaplamanın yüzeyinden gelen yansımaların aralarındaki faz farkının ifadesi

$$\delta = \frac{2 * \pi * d_1 * n_1 * \cos \theta_1}{\lambda} \quad (2.14)$$

ile verilmektedir. Bu faz farkı ifadesinde, $\theta_1 = 0$ iken ve minimum yansıma $\delta=1/2$ iken kaplama kalınlığı

$$d_1 = \frac{\lambda}{4n_1} \quad (2.15)$$

ile ifade edilir. Şekil 2.4'te yansıtma kaplamanın bir kesiti gösterilmektedir.

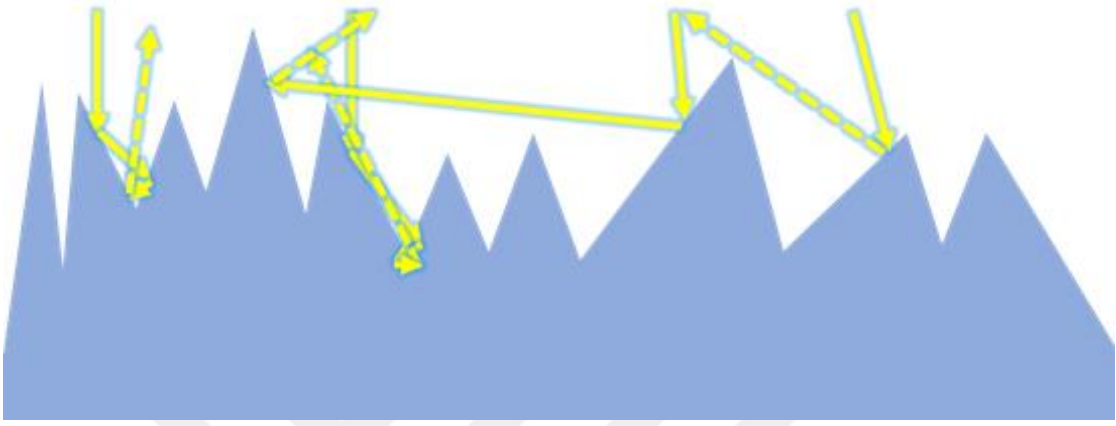


Şekil 2-4 Yansıtma kaplamanın kesiti

Eşitlik 2.15'e bağlı olarak yapılan kaplama ile, geri yansıma önemli oranda azaltılmış olur [66-67]. Ancak bu yansıtma kaplamanın performansı sınırlıdır. Yansımanın oranı, kaplama malzemesinin optik doğasından ötürü, gelen demetin dar bir tayf aralığında sınırlı olmasıyla birlikte, kaplama kalınlığı ve kırma indisine bağlıdır [66-67]. Parlatılmış dilim için elde edilen yansıma %40 civarlarında iken, yapılan yansıtma kaplama ile değer %6 azaltılabilmektedir [66].

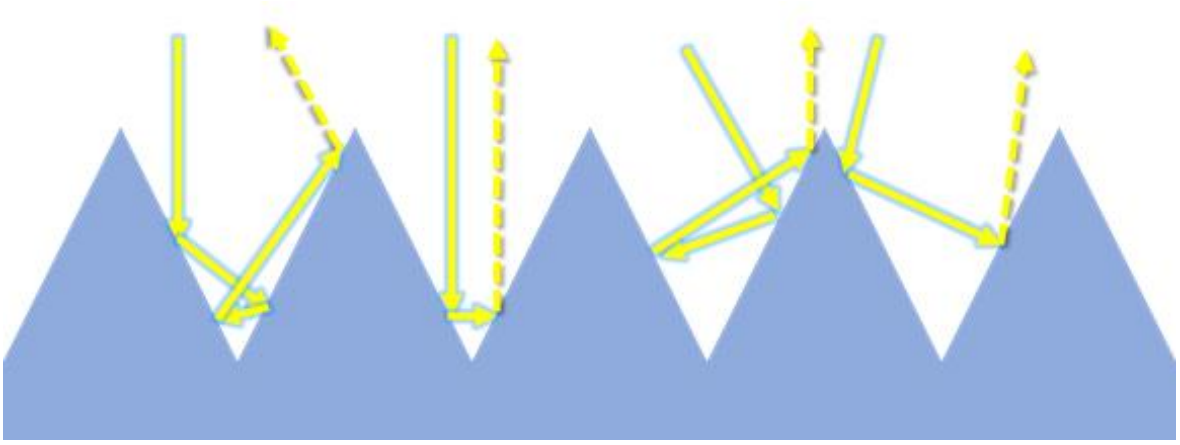
Dokulandırmada, genellikle kullanılan piramit geometrisinde, piramit benzeri yüzeylere düşen ışık ya kırılarak malzemeye girecek ya da yüzeyden yansıtılacaktır. Piramit yüzeylerinden gerçekleşen ardışık yansımalar nedeniyle, gelen demetin malzeme

tarafından soğrulabilme olasılığı artacaktır. Buna ışık tuzaklama denir. Düzensiz bir yüzeyde ışığın tuzaklanması, Şekil 2.5'te gösterilmektedir. Foton tuzaklamanın bir başka pozitif yanı ise malzemeye giriş açısının 0° 'den büyük olması nedeniyle, ışığın fotovolttaik içinde aldığı yolun uzamasıdır [6]. Bu da ışığın soğrulma olasılığını artırır.



Şekil 2-5 Düzensiz bir şekilde kendini tekrar eden yüzey dokulandırılması

Üçgen prizma şeklinde yapılan dokulandırma geometrisi genel olarak literatürde iki farklı şekilde yapılandırılır [20]. Bunlardan biri, Şekil 2.5'teki kesit görünümünde görüldüğü gibi yüzeyde gelişigüzel piramitlerin oluşturulması, bir diğeri de terslenmiş piramitlerin oluşturulması, yani yüzeyde malzeme içine düzgün bir şekilde kendini tekrar eden üçgen piramit oyukların açılmasıdır. Şekil 2.6'da yer alan kesit görünümünde görüldüğü gibi bu yapılar, dokulandırılan malzemenin kristal yönelimine dik veya paralel olacak şekilde, birbirlerine dik olarak yapılandırılabilirler [70].



Şekil 2-6 Düzenli bir şekilde kendini tekrar eden terslenmiş piramitlerden oluşan yüzey dokulandırılması

2.3.1. Dokulandırma Türleri

Dokulandırma türleri kimyasal dokulandırma ve fiziksel dokulandırma olarak sınıflandırılabilir. Söz konusu kimyasal dokulandırma yöntemi, malzeme yüzeyine uygulanan bitmemiş bir ıslak kimyasal aşındırma yöntemi olarak tanımlanabilir. Islak kimyasal aşındırma yöntemi ise dokulandırılacak olan malzemenin yüzeyinde izotropik ve anizotropik işlem yapmak üzere, kullanılacak kimyasal aşındırma malzemesine göre ikiye ayrılmaktadır. İzotropik işlemde ıslak aşındırma asidik kimyasallar (HNO_3 - CH_3COOH -H karışımı, HF - HNO_3 - H_2O karışımı, [90] veya NaOH (sodyum hidroksit) ile NaOCl (sodyum hipoklorit) karışımı [91] vb.) ile yapılırken, anizotropik dokulandırmada ıslak aşındırma bazik kimyasallar (KOH , NaOH ve TMAH vb.) ile yapılmaktadır [20]. Bunun nedeni bazik kimyasallar, kullanılan malzemenin kristal yönelimine bağlı olarak aşındırma işlemini gerçekleştirir [77].

Bir diğer dokulandırma türü olan fiziksel dokulandırma ise, malzemenin yüzeyindeki bir kısmın kuru bir işlemle dokulandırma işlemi yapılarak sökülmesini sağlayan bütün dokulandırma yöntemleri olarak tanımlanabilir [20]. Bu kapsamda temel olarak dört adet dokulandırma türüne değinmek mümkündür.

2.3.1.1 Mekanik Kanallama Yöntemi

Genel olarak silisyum dokulandırma işleminde tercih edilen bir metot olmakla birlikte, diğer dokulandırma metotlarına nazaran zaman alıcı bir işlemdir. Bu işlemde, çoklu bıçaklara sahip bir alet kullanılmaktadır. Söz konusu bu aletin geometrik yapısı ve

yüzeyinde yapılmış olan kaplama, gerçekleştirilecek olan dokulandırma işlemi için uygun olmalıdır. Örnek olarak mekanik kanallama ile dokulandırma yapılan bir çalışmada [20] [71] uçlarında “V” şeklinde çukurlar olan metal bir bıçaktan bahsedilmektedir. Bu bıçağın üzerinde aşındırıcı elmas bir kaplama vardır. Bu kaplama sayesinde bıçak, birçok işlemde kullanılabilir. Böylece dokulandırma maliyeti ucuz bir hal alır.

Bu yöntemde dikkat edilmesi gereken en önemli unsur, kullanılan aletin kusursuz, keskin ve düzgün bir doğrusalılıkta şekillendirilmesinin gerekliliğidir [20] [72].

2.3.2. Kuru Gaz Aşındırma Yöntemi

Kuru gaz aşındırma yönteminde malzeme yüzeyine gaz molekülleri vurdurulur. Ancak bu işlemle moleküllerin yüzey üzerinde oluşturdıkları aşınma, izotropik bir davranış sergiler. Dolayısıyla oluşan kanallar, malzemenin kristal yöneliminden bağımsızdır [20]. Bu yöneme örnek olarak monokristal bir silisyum diliminin üzerinde balpeteği geometrisinde dokulandırma işlemi için Ar ve ClF_3 (chlorine trifluoride) gazlarının kullanıldığı bir çalışma örnek verilebilir [89].

2.3.3. Lazer Ablasyon Yöntemi

Lazer ablasyon ile yüzey dokulandırma metodu, lazer demetinin malzeme ile etkileşimi sonucu erime ve buharlaşmaya dayalı olarak yüzeyden, kullanılan lazerin spesifik parametrelerine göre hedeflenen geometride malzeme uzaklaştırılması işlemidir [20, 44] [73-74]. Bu işlemde lazerin, ortalama gücü, atım süresi, atım tekrar frekansı, atım tarama hızı, demet çapı, atımlı lazerin mod parametreleri, dokulandırılacak olan malzeme üzerinde elde edilecek olan oyukların genişliklerini ve uzunluklarını belirlemede en önemli etkenlerdir. Lazer ablasyon ile malzeme üzerinde istenilen süreklilikte ve istenilen yönelimde dokulandırma kanalları hızlı bir şekilde açılabilir ve bu kanallar birbirlerine dik olarak iki ayrı yönelimde de yapılandırılabilir [75]. Bu metottaki başlıca dezavantaj, lazer parametrelerine bağlı olarak, malzeme ile lazer etkileşiminde oluşacak olan sıcaklığın yan etkileridir [20]. Dokulandırma sürecinde sıcaklığa bağlı olarak oluşan bu yan etkiler, malzeme yüzeyinde oluşturulan oyukların çevresinde, döküntü ile eriyik tabakaların oluşması [20, 76], oyuk içerisinde eriyik kısımların hızla soğuyarak tekrar kristalleşmesi ve benzeri durumlar olarak sıralanabilir.

2.4. Lazer Malzeme Etkileşimi

Bu bölümde lazer ile malzeme etkileşiminin nasıl olduğu ve lazer parametrelerine bağlı olarak, etkileşim boyunca malzeme üzerinde ne gibi değişikliklerin olacağından bahsedilecektir. Günümüzde malzeme işleme için kullanılan ve birçok farklı uygulama

alanları bulunan yöntemlerden biri de atımlı modüle edilen lazerlerdir. Bu uygulamalar, malzeme üzerinde kazıma, derin markalama, malzeme kesme ve delme gibi endüstride yeri olan malzeme işleme alanlarıdır.

Lazer ile malzeme etkileşmesi sırasında üç temel olay gerçekleşir: soğurma, yansıma ve geçirme. Malzeme ile lazerin ilk etkileşiminde kendini gösteren yansımadır. Yansımanın ardından geriye kalan lazer enerjisinin bir kısmı malzeme tarafından soğrulur, bir kısmı ise malzemeden geçer. Yarıiletken malzemelerde elektromanyetik dalganın soğrulması genel olarak, gelen elektromanyetik dalganın malzemedeki serbest ya da bağlı elektronlarla etkileşmesinden ötürü olmaktadır. Bu etkileşimden dolayı, malzemede ısınma, erime ve buharlaşma gibi etkiler meydana çıkar.

Malzeme üzerine gelen ışık demetinin yansıma ve soğurma özellikleri birbirleriyle bağlantılıdır. Bu ilişki, tüm elektromanyetik dalganın soğrulduğu opak malzemeler için

$$A = 1 - R \quad (2.16)$$

eşitliğine tanımlanır. Bu eşitlikte A soğurmayı, R ise yansımayı ifade eder. Söz konusu bu yansıma ve soğurma özellikleri ile ilgili hesaplamalar, etkileşime girilen malzemenin kırma indisi ile bağlantılıdır. Malzeme içine, z derinliği boyunca ilerleyen dalganın şiddeti, Beer-Lambert yasası olarak tanımlanan

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \quad (2.17)$$

eşitliği ile verilir. Bu eşitlikte z giricilik derinliğini, I_0 gelen elektromanyetik dalga yoğunluğunu, α soğurma katsayısını ve $I(z)$ ise malzeme içindeki radyasyon yoğunluğunu verir. Lazerin demetinin malzeme içerisinde soğrulanabileceği maksimum derinlik $1/\alpha$ ile ifade edilir. Bu uzunluk ışık demetinin şiddetinin $1/e$ 'ye düştüğü yeri tanımlar [81, 82].

Lazerin çalışma prensibi ile ilgili olarak, doğrudan bu faktörleri etkileyen parametreler, lazer dalgaboyu, ortalama gücü veya tepe gücü, atım tekrar oranı ve atım süresi olarak verilebilir. Atım tekrar hızı, atımlı bir lazerin atımlarının ne kadar sürelik zaman farkları ile yayınlandıklarını ifade ettiği için, lazer tepe gücü ve lazer atım süresine bağlı olarak malzeme üzerinde söz konusu olacak etkiyi belirlemektedir. Aynı şekilde, tepe gücü, lazerden gerçekleştirilen enerji akışını (fluence) etkileyerek, malzeme işlemede önemli bir parametre olacaktır. Ancak atımsız lazerlerde tepe gücünden bahsedilmez. Lazer sürekli olarak yayınlandığı için, lazerin sahip olduğu güç aynı zamanda tepe gücünü ifade eder. Lazer dalgaboyu, üzerinde işlem yapılacak malzemenin soğurma tayfına bağlı olarak

değişiklik gösterir. Bunun dışında atım süresi, lazer ile malzeme üzerinde işlem yapılırken, malzeme üzerinde biriken ısı ve bu biriken ısıya bağlı olarak malzeme yüzeyinden parça koparılmasında belirleyici bir parametredir.

Genel olarak, lazer ile malzeme işleme sürecinde uzun ve kısa dalgaboylu atım sürelerinden bahsedilmektedir. Nanosaniye mertebesinde olan atım süresi uzun, pikosaniye mertebesinde olan atım süresi ise kısa olarak tanımlanır. Pikosaniyelerden daha kısa atım süreleri için ise ultrakısa atım süreleri ifadesi kullanılır. Nanosaniye atım sürelerinde işlem yapıldığında malzeme işleme süresince, atım süresi, termalizasyon için gerekli zamandan uzundur. Dolayısıyla malzeme üzerinde işlem yapılan kısımlarda, ısıdan etkilenmiş bölgeler (heat-affected zone) söz konusu olur [73]. Daha düşük atım süresine sahip atımlı lazerler ile malzeme üzerinde ısı etkileşimi az olacağından ötürü, daha keskin mikro işlemlerin yapılması söz konusudur [73].

2.4.1. Ablasyon

Fotokimyasal ve fototermal etkileşimler ile yüzeyden malzeme kaldırma işlemi ablasyon olarak tanımlanır [99]. Şayet malzeme ile etkileşime girecek olan lazerin enerjisi çok yüksekse ve malzeme etkileşim yüzeyinde bu enerjinin oluşturduğu ısı ile kaynama sıcaklığı aşılabiliyorsa, malzeme üzerinde buharlaşma ve ısıl stres oluşur. Bu şekilde malzeme üzerinden materyal kaldırma işlemi, ısıl ablasyon olarak tanımlanır [99].

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 tanımlanır [99]. Söz konusu bu ablasyon olayı sadece bağ kırılma enerjisinin geçmekle değil, bağ bozulma eşik enerjisinin aşağı çekilmesiyle de gerçekleşebilir. Bu çoklu foton soğurması işlemi ile gerçekleştirilir [84]. Bu işlemde daha az enerjili yani uzun dalgaboylu fotonlar, aynı anda fazla sayıda soğrulabilir. Tek bir fotonun soğrulması ile bağ enerjisi aşılamayabilir ancak birden fazla fotonun soğrulması ile eşik enerjisi geçilebilir.

Isıl işlemin gevşeme zamanı

$$\tau_y = \frac{d^2}{4a} \quad (2.18)$$

ile verilir. Burada d soğurma derinliğini ve a ısıl yayınlılığı ifade eder. Dolayısıyla τ_y , ısı dağılımı ile ilgilidir. Isıl gevşeme zamanı, ablasyon işleminde, malzeme ile etkileşime

girecek olan lazer demetinin atım süresinin belirlenmesinde önemli bir kriterdir. Şayet atım süresi ısıl gevşeme zamanından küçükse, malzeme ısıl olarak zarar görebilir.

Malzeme üzerinde lazer ablasyonu işlemi, foton soğrulması ile başlar ve işlem yapılan bölgenin ısınması ile devam eder. Ardından lazerin düşürüldüğü bölgede fotoiyonizasyon söz konusu olur [73]. İşlem sonucunda malzemeyi terk edecek olan parçalar, katı, sıvı, gaz ve plazma formunda olabilir. Ablasyona uğrayacak malzeme miktarı ile bu faz değişimleri, malzeme üzerine bırakılan enerji miktarına bağlı olacaktır [73].

Malzeme ile lazer etkileşimi sırasında, hedef malzemede kısa süreli atımlara sahip bir lazerin atım enerjisi, ters Bremsstrahlung kuralına göre serbest elektronlar tarafından soğrulacaktır [73], [93]. Ardından soğrulan enerji örgüye transfer olacaktır. Belirli bir süre sonra enerji transferi sonlanacaktır. Örgü ve elektronların sıcaklıkları baz alınarak, 1D ve 2D difüzyon modeline göre lazer atımlarının hedef malzemeye enerji transferi ifade edilecek olursa [93]:

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = -\frac{\partial Q(z)}{\partial z} - \gamma(T_e - T_i) + S \quad (2.19)$$

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \gamma(T_e - T_i) \quad (2.20)$$

$$Q(z) = -k_e \frac{\partial T_e}{\partial z} \quad (2.21)$$

$$S = I(t)A\alpha e^{-\alpha z} \quad (2.22)$$

eşitlikleri elde edilir. Burada T_i örgü sıcaklığı, T_e elektron sıcaklığıdır. $Q(z)$ lazer ablasyonu işleminin yapıldığı eksenindeki (z eksen) ısı akısını, S lazer ısı kaynağını, $I(t)$ zamana bağlı lazerin güç yoğunluk fonksiyonunu, α malzemenin soğurma katsayısını, C_e birim hacimdeki elektron ısı kapasitesini, C_i birim hacimdeki örgü ısı kapasitesini, γ elektron-örgü etkileşim parametresini, k_e elektronların ısıl iletkenliğini ifade etmektedir. 2.19 ve 2.20 eşitlikleri fonon etkileşimi ve termal iletkenlik hakkında bize bilgi veren, örgü sıcaklığı ve elektron sıcaklığı için gerekli soğuma dinamikleridir [73], [93]. Bu eşitliklerde örgünün ısıl iletkenliği ihmal edilmiştir [93].

2.19, 2.20, 2.21 ve 2.22 eşitlikleri birbirleri cinsinden yazılırsa,

$$C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = k_e \frac{\partial^2 T_e}{\partial z^2} - C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} + I(t)A\alpha e^{-\alpha z} \quad (2.23)$$

eşitliği elde edilir. Burada örgünün ısı kapasitesi elektronunkinden büyüktür. Termal iletkenlik değeri örgüde ihmal edilir ve üç ayrı önemli zaman skalası söz konusu olur. Bunlar, elektron soğuma zamanı τ_e , örgü ısınma zamanı τ_i ve lazer atım süresi τ_L dir [93].

2.4.1.1. Atım Süresine Bağlı Lazer Malzeme Etkileşimi

Lazer atım süresinin hem malzeme ablasyonu eşik değeri hem giricilik derinliği üzerinde etkisi vardır. Nanosaniye mertebelerinde atım sürelerinde ablasyon için gerekli enerji eşik değeri artar ve giricilik derinliği azalır [73]. Atım süresi nanosaniye sürelerinde ise $\tau_L \gg \tau_i$ olarak kabul edilir. Bu durumda elektron ve örgü sıcaklıkları eşit kabulü yapılarak ($T_e = T_i$) [93] 2.20 eşitliğinde sıcaklıklar yerine konulursa,

$$C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = k_0 \frac{\partial^2 T_e}{\partial z^2} + I_\alpha \alpha e^{-\alpha z} \quad (2.24)$$

ifadesi oluşur.

Lazer atımı öncelikle etkileşime girdiği malzeme yüzeyinde soğrulacağından dolayı yüzey, önce erime noktasına, ardından buharlaştırma sıcaklığına kadar ısınır. Genelde metallerin yüzeyinde buharlaştırma işlemi için, kaynama işlemine nazaran daha fazla enerji gereklidir. Söz konusu ablasyon sürecinde ısıl giricilik derinliği $Z \sim (D_t)^{1/2}$ ile ifade edilir [93]. D difüzyon katsayısıdır ve $D = k_0/c_i$ ile verilir. Z ise giricilik derinliğidir. Malzeme yüzeyinde, uzun atımlı lazer ile yapılan ablasyon işleminde ise $D\tau_L\alpha \gg 1$ kabulü yapılır [93].

Malzemenin birim kütlesinde biriken enerji, Buharlaşma için gerekli ısı enerjisinden daha büyük olduğunda buharlaşma mümkün olur. Bu durumun oluşması için gerekli süre eşik süresi olarak adlandırılır ve t_h ile gösterilir. Bu durumda lazer güç yoğunluğu (P_ϕ) ve enerji akısı (E_ϕ) eşitlik 2.25 ve 2.26'daki gibi belirtilir [93].

$$E_\phi > E_{\phi_{th}} \sim \Omega \rho D^{1/2} \tau_L^{1/2} \quad (2.25)$$

$$P_\phi > P_{\phi_{th}} \sim \frac{\Omega \rho D^{1/2}}{\tau_L^{1/2}} \quad (2.26)$$

Burada Ω buharlaştırma için gerekli ısıyı belirtir, ρ malzeme yoğunluğudur. $E_{\phi_{th}}$ ve $P_{\phi_{th}}$ sırasıyla, ablasyon için gerekli eşik lazer enerji akısı ve eşik lazer güç yoğunluğunu belirtir. Eşitlik 2.26 ve eşitlik 2.27'de görüldüğü gibi $(\tau_L)^{1/2}$ yani lazer atım uzunluğunun kare kökü, eşik lazer enerji akısı ve eşik lazer güç yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Dolayısıyla uzun atımlı lazer ile yapılan ablasyon işlemi süresince ısının, malzeme içine yayılıp eriyik bir tabaka oluşturması için yeterli zaman vardır. [93,94]

2.5. Lazer

Bu bölümde yükselteç ile güçlendirilmiş ana salıncı (MOPA- master oscillator power amplifier) mimarili olan Yb^{+3} katkılı, 1064 nm merkez dalga boyu ile çalışan bir fiber lazer ve parametreleri hakkında bilgi verilmiştir. MOPA mimarili fiber lazerde, zorla yayınının gerçekleştirileceği kazanç ortamı nadir toprak elementi katkılı optik fiberdir. Bu aktif fiberde nüfus terslenmesinin, gerçekleştirilmesi için, daha kısa dalga boyu foton salan bir lazer diyot kullanılır [36].

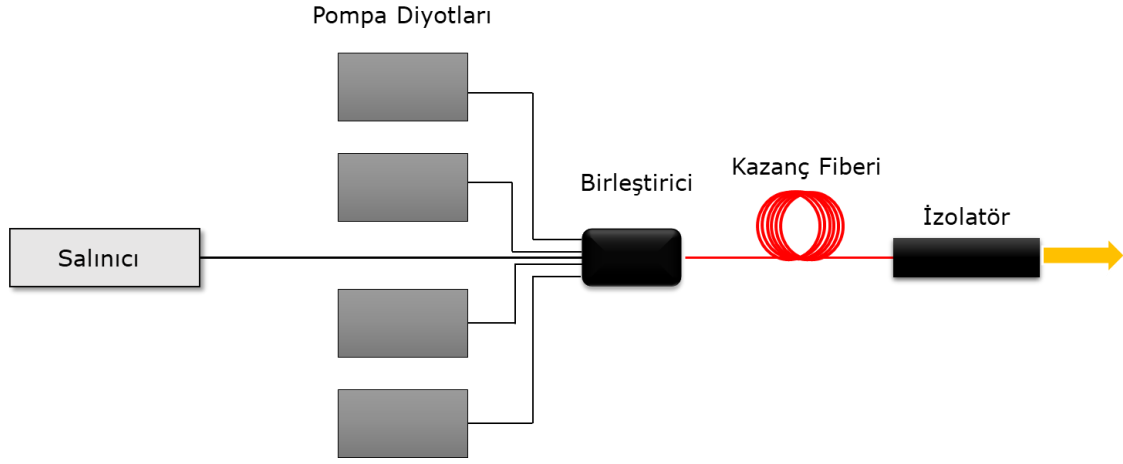
2.5.1. Atımlı MOPA Mimarili Fiber lazer

Fiber lazerler, kazanç ortamı olarak optik fiberi kullanan her türlü lazere verilen bir tanımdır [39,40]. Genel olarak bu kazanç ortamında kullanılan fiberin çekirdeği, nadir toprak elementleri olan erbiyum (Er^{+3}) [40,41], neodim (Nd^{+3}) [40,41], iterbiyum (Yb^{+3}) [40,41], tulyum (Tm^{+3}) [40,41], praseodim (Pr^{+3}) [40,41] elementleri ile katkılanarak yapılır.

MOPA kısaltmasında, MO ana salıncı ve PA ise yükselteç anlamına gelmektedir [36]. Ana salıncı, fiber çıkışlı bir lazer diyotunun [38] elektronik olarak kontrol edilmesiyle ya da klasik bir lazer kavite yönteminin kullanılması ile gerçekleştirilebilir [40,42]. Her iki durumda da lazerin atım tekrar hızı, yani atımlar arası zamanı birbirlerinden bağımsız olarak, belirli aralıklarda ayarlamak mümkündür. Atım süresi ise salıncıda bulunan lazer diyotun elektronik olarak modüle edilmesi, ya da ultrahızlı lazer kavitesindeki birtakım parametrelerin ayarlanmasıyla değiştirilebilir [36].

Ana salıncıdan gelen atımlı lazer demeti, fiberoptik yükselteç için sinyal görevi görmektedir. Fiberoptik yükselteçte, pompa diyotu olarak fiberoptik çıkışa sahip lazer diyotlar bulunur. Bu diyotlar modüle edilmeden sürekli olarak sürülebileceği gibi modüle edilerek de kullanılabilirler. Pompa diyotlarından elde edilen yüksek parlaklığa sahip lazer demeti, bir fiberoptik birleştirici ile kazanç fiberine gönderilir. Lazer diyottan pompalanan bu ışık demeti ile kazanç fiberinde nüfus terslenmesi olayı gerçekleşir [32].

Salıncıdan gelen sinyal, kendiliğinden yayını yapma durumundan önce kazanç fiberine iletilir ve zorlanmış salınım için indüklenme işlemi gerçekleşmiş olur. Böylece MOPA çıkışında yükseltilmiş bir sinyal elde edilmiş olur. Yükseltimenin seviyesi, kullanılan pompa diyotlarının gücüne, aktif fiberin tipine ve yükseltilecek olan lazer sinyalinin parametrelerine bağlı olarak değişecektir. Şekil 2.7’de atımlı MOPA mimarisine sahip bir lazerin şekli görünmektedir.



Şekil 2-7 MOPA mimarili bir fiber lazer

2.5.2. Lazer Parametreleri

Lazer ve malzeme etkileşimi ile ilgili olarak, malzemeye transfer edilecek olan enerji miktarının, lazer ile yüzey temas aralığının ve temas süresinin, sıcaklığa bağlı olarak önemli etkileri vardır. Bu etkilerin kontrolü, yüzeye gönderilen lazerin parametreleri ile kontrol edilebilir. Söz konusu bu parametreler, atım süresi, atım tekrar hızı veya frekansı, ortalama gücü veya atım enerjisi, atım tepe gücü, odaklanmış atımın odak çapı ve lazerin çalıştığı dalgaboyu olarak ifade edilebilir.

2.5.2.1 Lazer Dalgaboyu

Lazerin merkez dalga boyunu ifade eder. Lazer dalgaboyu, sistemde kullanılan aktif ortam ve pompa dalgaboyu ile doğrudan ilişkilidir. Malzeme ile olan etkileşimi ise, kullanılan malzemenin soğurma katsayısı ve yansıma özelliklerine bağlı olarak değişmektedir [44].

2.5.2.2 Lazer Atım Süresi

Atım süresi, lazer çıkışında elde edilen demetin sahip olduğu modüle edilmiş atımların zaman boyutundaki uzunluğudur. Şekil 2.8’de de Δ ile ifade edilmiştir. Genel olarak uzun ve kısa atım süresi olarak ikiye ayrılır. Kısa atımlar piko ve femtosaniyeler (ultrahızlı) mertebelerindedir. Ultrahızlı lazerlerin, atım sürelerinin çok kısa olmasından dolayı, malzeme ile etkileşimleri durumunda ısı etkileri, uzun atımlı lazerlere göre çok daha az olacaktır. Bu ısı etkileri, lazer malzeme etkileşimi uzayacağı için nanosaniyeler boyutunda

olan uzun atım süreli lazerler için artacak, mikrosaniye boyutlarında olan uzun atımlı lazerler için çok daha etkili olacaktır [44].

2.5.2.3 Lazer Atım Tekrar Hızı

Her bir lazer atım süresi arasındaki zaman farkına karşılık gelen frekanstır. Şekil 2.8’de de görüldüğü gibi iki lazer atımının arasında kalan zaman boyutunda tanımlanan bu süre kısaldıkça, yüzey işleme sürecinde birim zamanda yüzeyle etkileşime girecek olan lazer atım sayısı artacaktır. Bu parametre, tez kapsamında atım tekrar hızı ya da atım tekrar frekansı olarak tanımlanmıştır.

2.5.2.4 Lazer Atım Enerjisi

Lazer çıkışında elde edilen demetin atım başına enerjisidir [44,45]. Şekil 2.8’de de görüldüğü gibi lazer atımının altında kalan alana tekabül etmektedir. Dolayısıyla eşitlik 2.27’de görüldüğü gibi lazer atım süresi ile lazer atım tepe gücünün çarpımıyla bulunmaktadır [44]

$$E_a = \Delta * P_a \quad (2.27)$$

Burada E_a lazer atım enerjisini, P_a lazer atım tepe gücünü ifade eder.

2.5.2.5 Lazer Ortalama Gücü

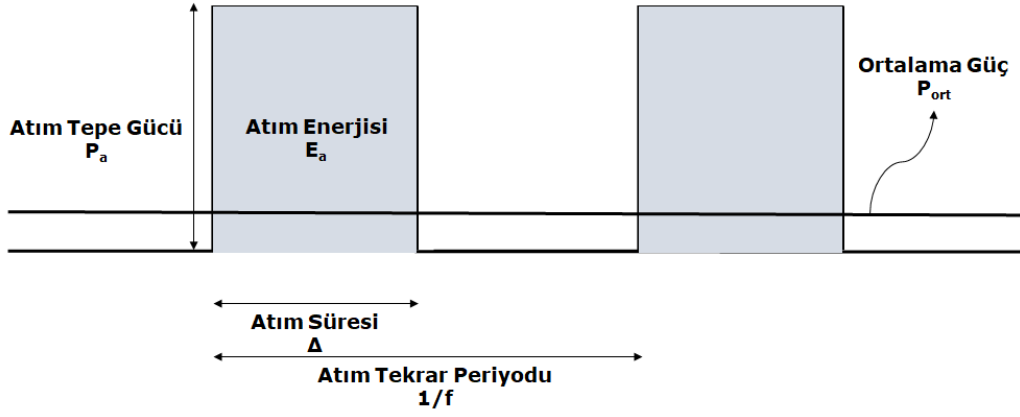
Lazer atım enerjisinin, Şekil 2.8’de de görüldüğü gibi, tüm frekansa (periyoda) dağılımıdır. Eşitlik 2.28’te gösterilmektedir [44].

$$P_{ort} = E_a * F \quad (2.28)$$

Bu ifadede P_{ort} ortalama gücü, F ise lazer atım tekrar hızını ifade eder.

2.5.2.6 Lazer Atım Tepe Gücü

Lazer atımının sahip olduğu maksimum güçtür. Atım süresi ve tekrar hızı ile bağlantılıdır. Lazerin ortalama gücü sabit olacağı için, atım süresinin sabit tutulması durumunda, atım tepe gücü tekrar hızının azalması ile ters orantılı olacaktır. Aynı şekilde atım tepe gücü, tekrar oranı sabit kaldığı sürece atım süresinin azalması ile ters orantılı olacaktır.



Şekil 2-8 Lazer atım süresi, atım tekrar hızı, atım tepe gücü, atım enerjisi ve lazer ortalama güç hakkında bilgi veren, lazer atımının şematik gösterimi

2.5.2.7 Odaklanmış Lazer Atımının Odak Çapı

Genel olarak kullanılan lazer sistemlerinin çıkışında odaklayıcı bir optik mercek bulunur. Bu mercek tarafından odaklanan demetin çapı, merceğin odak uzaklığı, gelen lazer demetinin çapı, dalga boyu ve demet kalitesine bağlı olarak değişmektedir. Odak çapı eşitlik 2.29’da verilmiştir.

$$Z = \frac{4 * f * \lambda * M^2}{\pi * D} \quad (2.29)$$

Z odak çapıdır. λ dalga boyunu ifade ederken, D değeri de merceğe gelen lazer demetinin çapını belirtir. f , merceğin odak çapı M^2 ise demet kalitesi olmaktadır [44,46,48].

2.5.2.8 Lazer Güç Yoğunluğu ve Lazer Akısı

Lazer güç yoğunluğu, lazer demetinin etkin olarak odaklandığı alana düşen ortalama güç dağılımını ifade eder. Dolayısıyla bu değer ortalama güç ve odaklanmış lazer atımının çapına bağlıdır. Eşitlik 2.30’da lazer güç yoğunluğu görülmektedir.

$$P_{\phi} = \frac{P_{ort}}{\text{Etkin Odak Alanı}} \quad (2.30)$$

Eşitlikte P_{ort} ortalama gücü ifade etmektedir.

Lazer foton akısı ise E_{ϕ} ile gösterilir ve lazer demetinin etkin olarak odaklandığı alana düşen atım enerjisinin dağılımını ifade eder. Dolayısıyla bu değer atım enerjisi ve odaklanmış atımın çapına bağlıdır.

$$E_{\phi} = \frac{E_a}{\text{Etkin Odak Alanı}} \quad (2.31)$$

Eşitlikte E_a lazer akısını ifade etmektedir.

2.5.2.9 Tarama Hızı

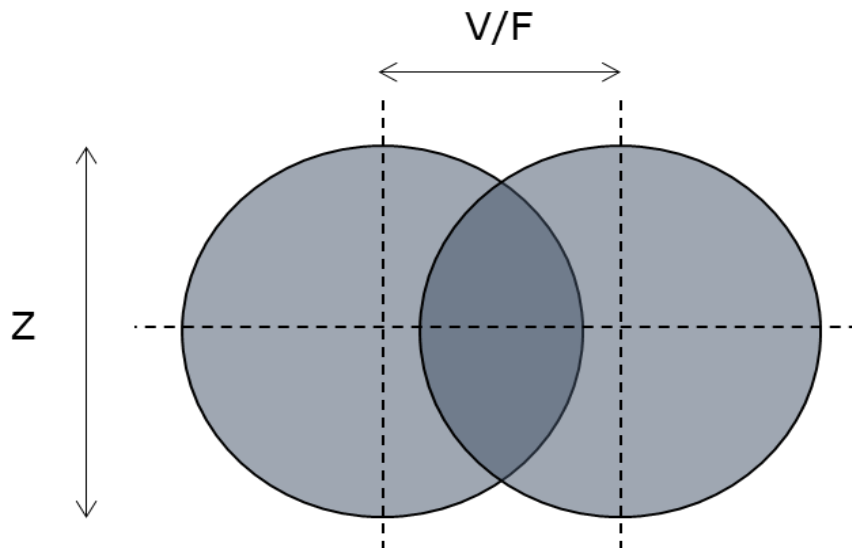
Lazerin son kesiminde bulunan odaklayıcı merceğe gelmeden önce, lazer çıkışındaki odaklanmış lazer demetinin hızını ve pozisyonunu kontrol etmek için genel olarak özel kaplamalı aynalar kullanılmaktadır. Bu aynaların hızı, lazerin malzeme ile etkileşime geçeceği işlemlerin hızını belirleyeceği gibi atımların çakışma oranlarını belirlemekte önemli bir parametre olmaktadır [50].

2.5.2.10 Çakışma Oranı

Lazer atımlarının üst üste binmesi sonucu kesiştikleri alanın tüm alana oranı bize çakışma oranını vermektedir. Bu oran atım süresi, tekrar hızı ya da frekansı, atımını malzeme üzerindeki odaklanmış çapı ve tarama hızı parametreleri ile ayarlanabilir. Atımlar, tarama hızına bağlı olarak atım süresi boyunca malzeme ile etkileşime girecektir. Bir sonraki atımın ne kadar süre sonra başlayacağı atım tekrar hızı ile belirleneceği gibi, bu ikinci atımın malzeme üzerinde birinci atımdan ne kadarlık mesafe sonra etkileşeceği de tarama hızına bağlıdır. Doğal olarak malzeme yüzeyinde odaklanmış olan atımların çapları da atımların yüzey üzerinde etkileşeceği alanı belirleyeceği gibi ilk atım ile ikinci atımın çakışma oranını da etkilemektedir. Çakışma oranı Şekil 2.9'da görselleştirilmiş koyu kısım olup, bu oranı veren ifade, yüzde çakışma oranı olarak

$$\%Ç = 1 - \frac{V/F}{Z} \quad (2.32)$$

eşitliği ile ifade edilir [44].



2.5.2.11 Lazer Demet Kalitesi

Lazer demet kalitesi demet çapının dar bir şekilde odaklanabilmesi ile ilgili bilgi veren bir parametredir. Bu parametreye göre M^2 değeri, yani demet kalitesi, bire ne kadar yakın olursa, lazer demetinin kalitesi de o kadar yüksek olur denir. Dolayısıyla bu parametre, odaklanacak olan lazer demetinin saçılma oranı ve odaklandığı andaki çapı ile orantılıdır. Bu durum eşitlik 2.33'te görülmektedir [36,48].

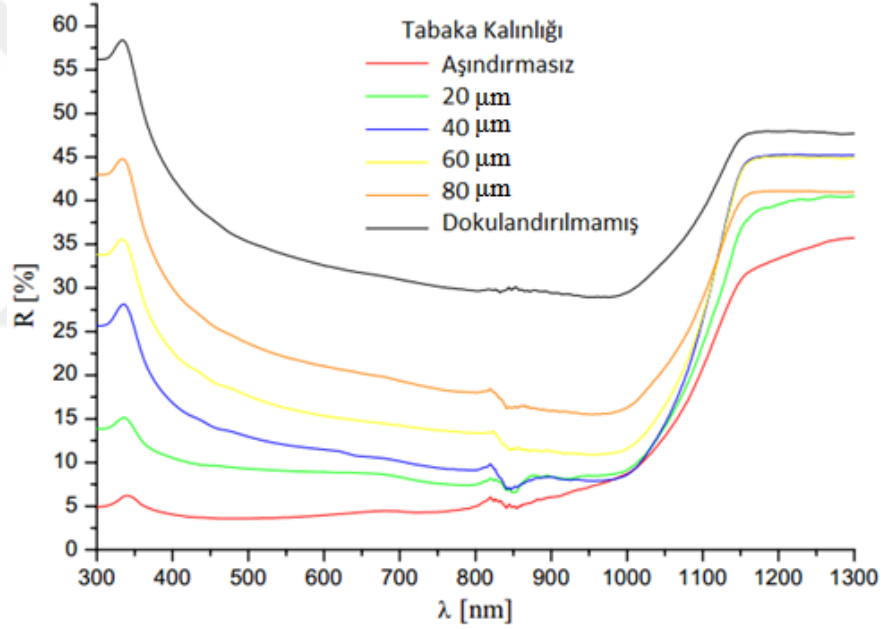
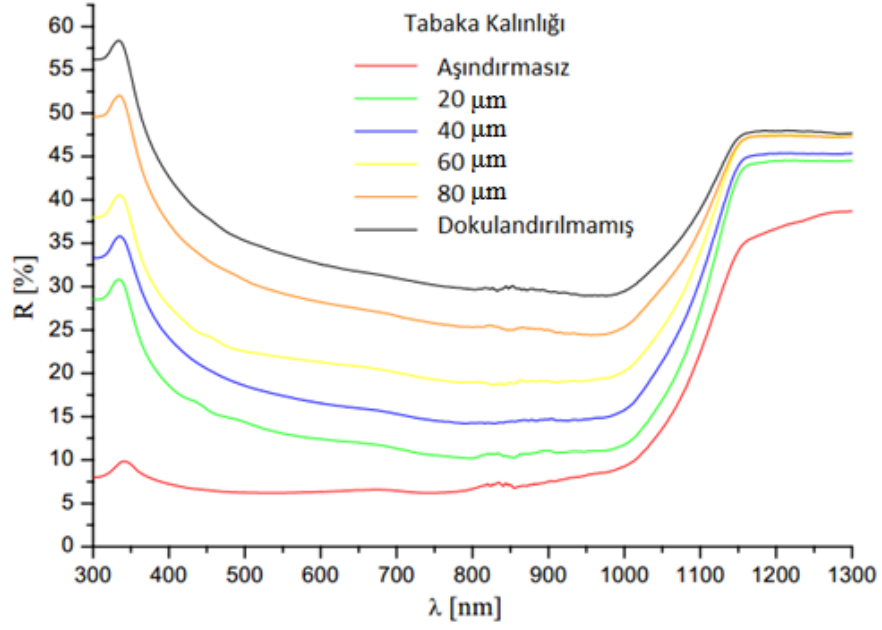
$$M^2 = \frac{W_0 * \pi * \varphi}{\lambda} \quad (2.33)$$

W_0 odaklanmış lazer demetinin çapını vermektedir. φ değeri ise lazer demetinin saçılma oranını belirtir.

2.6. Literatürde Yapılan Dokulandırma Çalışmaları

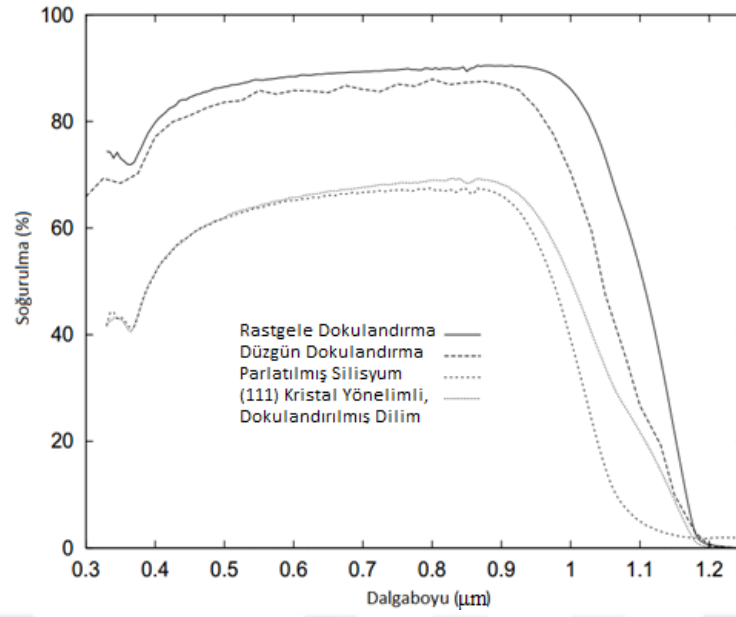
Literatürde, silisyum dilimler üzerinde yapılan çeşitli dokulandırma işlemleri söz konusudur. Bu işlemlerin değişiklik gösteren önemli parametreleri, dokulandırma yönelimleri, dokulandırma teknikleri olmak üzere temel olarak sınıflandırılabilir.

Şekil 2.10'da p tipi, 330 μm 'lik bir kalınlığa sahip çoklukristal silisyum yüzeyinin, yansıma tayf şiddetinin azalması için, 50 W ortalama güce sahip, 15 kHz atım tekrar hızlı, 10 μm odak çaplı ve 50 mm/s tarama hızlı Nd:YAG lazer ile yapılan bir dokulandırma işleminden sonra alınmış optik yansıma tayfı görülmektedir. Şekilde dokulandırılmamış örnek, lazer ile dokulandırıldıktan sonra aşındırılmamış ve KOH çözeltisi ile 20, 40, 60, 80 μm derinliklere kadar aşındırılmış örneklerin dalga boyuna bağlı olarak yansıma tayflarındaki artış ve azalma görülmektedir. Şekil 2.10a'da (üstteki grafik), tek doğrultuda paralel dokulandırılma yapılmış örnekler için çizilmiştir. Şekil 2.10b'de (alttaki grafik) ise birbirleriyle çakışan karşılıklı hatlar ile dokulandırılmış örnekler için çizilmiştir [95].

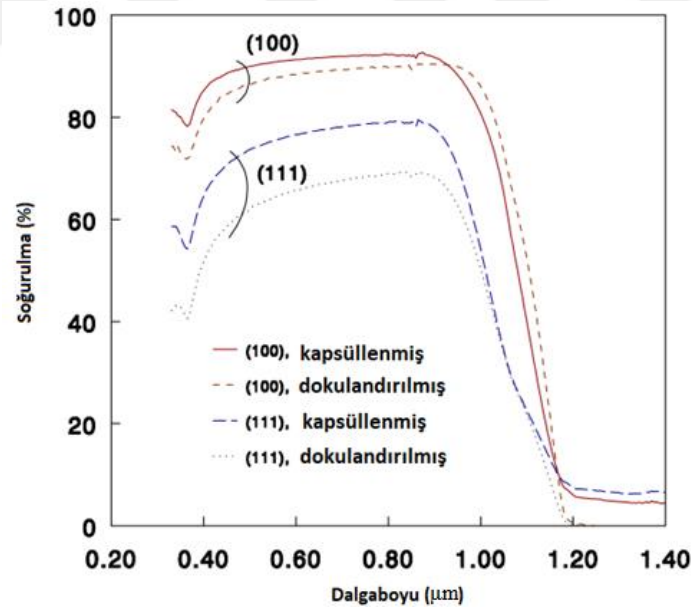


Şekil 2-10a ve Şekil 2-10b Dalgaboyuna bağlı yansıma grafiği, a) tek doğrultuda paralel dokulandırılma yapılmış örneklere ait, b) birbirleriyle çakışan karşılıklı hatlar ile dokulandırılmış örneklere aittir [95].

Bir başka çalışmada ise (100) ve (111) kristal yönelimine sahip silisyum dilimin üzerinde NaOH ile yapılan gelişigüzel dokulandırma incelenmiştir [69]. Şekil 2.11 ve Şekil 2.12’de örneklerin dalgaboyuna bağlı soğurma grafikleri görülmektedir.



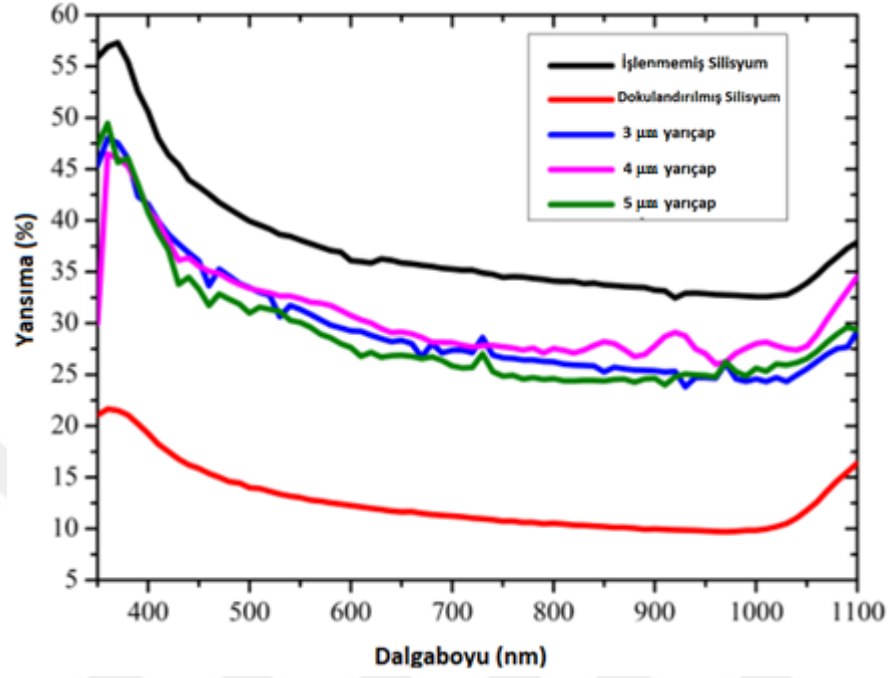
Şekil 2-11 Gelişi güzel dokulandırılmış, düzgün dokulandırılmış, parlatılmış ve (111) kristal yönelimli dokulandırılmış silisyum dilimin, dalgaboyuna bağlı soğurma grafiği [69]



Şekil 2-12 (100) ve (111) kristal yönelimli dokulandırılmış silisyum dilimin, kapsüllenmiş ve kapsüllenmemiş, dalgaboyuna bağlı soğurma grafiği [69]

Bir diğer çalışmada ise silisyum dilim yüzeyinde fotolitografi yöntemi ile 4 μm derinlikte oyuklar açılmış ve bu oyukların yüzeyleri 0.8 μm ve 5 μm aralıklar ile 40, 80 ve 160 s

boyunca kuru plazma aşındırma tekniğiyle aşındırılmıştır [97]. Söz konusu çalışma ile ilgili dalgaboyuna bağlı yansımaya grafiği Şekil 2.13'te görülmektedir.



Şekil 2-13 0.8 µm aralık ile 40, 80 ve 160 s boyunca kuru plazma aşındırma tekniğiyle aşındırılmış örneğin optik yansımaya tayfı [97].

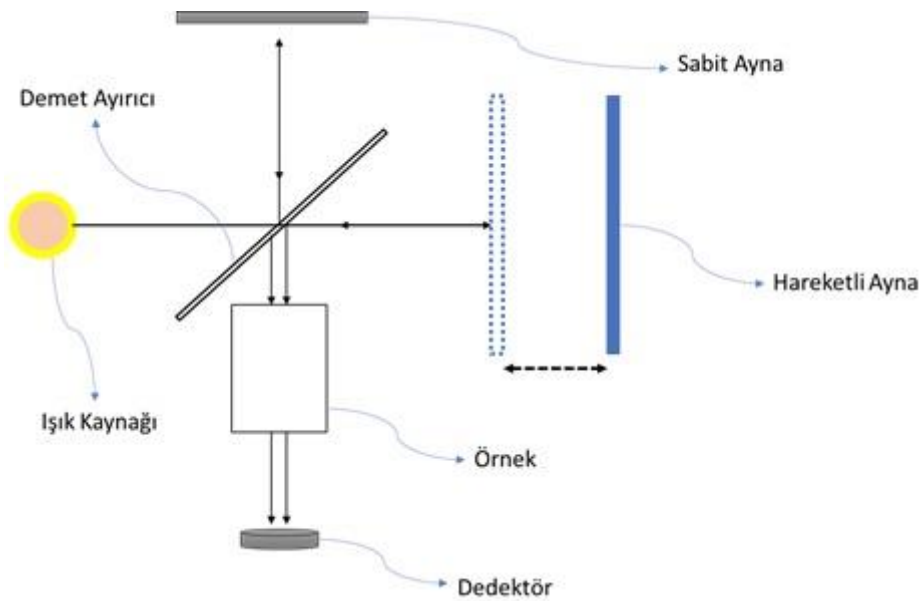
3. DENEYSEL ÖLÇÜM DÜZENEKLERİ VE İŞLEYİŞLERİ

Bu bölümde tez kapsamında, bütün çalışmaların yapıldığı deney düzenekleri, çalışma düzenleri hakkında bilgi verilecektir.

3.1. Fourier Dönüştümlü Fotoakım Spektroskopisi (FTPS) Sistemi

Fourier dönüştümlü foto-akım spektroskopisi, diğer spektroskopi tekniklerine nazaran dalga boyuna bağlı olarak ulaşmak istediğimiz tayfı çok daha hızlı oluşturur. Buna ek olarak bir Fourier dönüştümü yapabilen yazılım ile gelen tayf verisini, gerekli ise frekans boyutunda elde etmemizi sağlar. Fourier dönüştümlü foto-iletkenlik spektroskopi sisteminde temel olarak bir Michelson interferometresi bulunmaktadır [78].

Michelson interferometresi, gelen ışık demetinin ikiye ayrılıp daha sonra tekrar faz farkı ile birleştirilmesinden dolayı bir interferogram oluşturulmasına dayalı olarak çalışmaktadır. İnterferometreye gelen bir demet ayırıcıda ikiye ayrılır. Şekil 3.1’de de görüldüğü gibi ayrılan demetlerden biri sabit aynaya, diğeri ise hareketli aynaya gidip geri yansır ve tekrar demet ayırıcıda birleşerek örnek tarafından soğrulurlar. Örnekten soğrulmadan geçen demet bir dedektöre gönderilir. Hareketli aynadan yansıyan ışık demetleri ile sabit aynadan geri yansıyan ışık demetleri arasında oluşacak olan faz farkından ötürü, demetlerin bileşkesinde bir girişim deseni oluşur. Dedektörden elde edilen gücün, hareketli aynanın sebep olacağı faz farkına bağlı olarak oluşacak girişimlerin tayfı bize interferogramı verir. Buradan da anlaşılabacağı gibi interferogram, hareketli aynanın hızına bağlı bir tayftır.



Şekil 3-1 Michelson interferometresi

Girişimlere sebep olan gecikme

$$\delta = 2(H_m - G) \quad (3.1)$$

eşitliği ile verilir. Bu ifade de H_m hareketli ayna ile demet ayırıcının arasındaki mesafeyi, G ise sabit ayna ile demet ayırıcının arasındaki mesafeyi vermektedir. δ 'nın sıfır olduğu durumda yapıcı girişimler maksimumdur.

$$F = 2 \frac{V_m}{\lambda} = 2\sigma V_m = 2 \frac{V_m}{c} * \nu \quad (3.2)$$

İnterferogramın frekansı aynanın hızına bağlıdır. λ değeri gelen demetin dalgaboyudur. 2 faktörü ise yansılardan dolayı 2 kate çıkan gecikme yolunun etkisidir. Hareketli ayna hızı sabitken, interferogram frekansının optik frekans ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.

3.1.1. İnterferogramların Fourier Transformasyonu

İnterferogram bir kosinüs dalgası olarak tanımlanabilir.

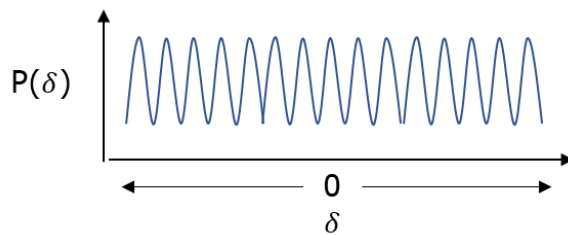
$$P(\delta) = B(\sigma) \cos 2\pi f t \quad (3.3)$$

Burada $P(\delta)$ ifadesi interferometreye gelen demet gücünü tanımlar. $B(\sigma)$ ifadesi ise demet ayırıcının yansıma oranı, geçirgenliği gibi optik elementlerden gelen katkılar ve interferograma gelen sinyal gücünün kapsayan bir terimdir [79]. Eşitlik 3.2'yi eşitlik 3.3'te yerine koyarsak,

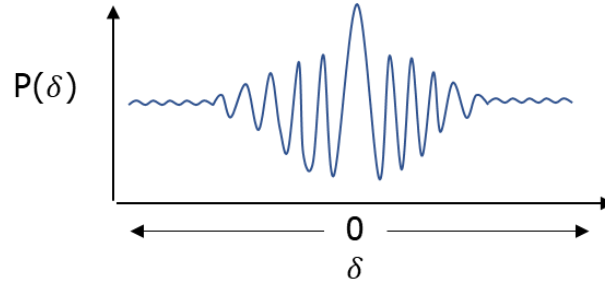
$$P(\delta) = B(\sigma) \cos 2\pi V_m \sigma t \quad (3.4)$$

eşitliğini elde ederiz. Bu ifade de $V_m = \delta/2t$ eşitliğini yazılırsa

$$P(\delta) = B(\sigma) \cos 2\pi \delta \sigma \quad (3.5)$$



Şekil 3-2 Tek bir frekanstan oluşan bir interferogram



Şekil 3-3 Birden çok frekansın bileşkesi sonucu oluşan bir interferogram

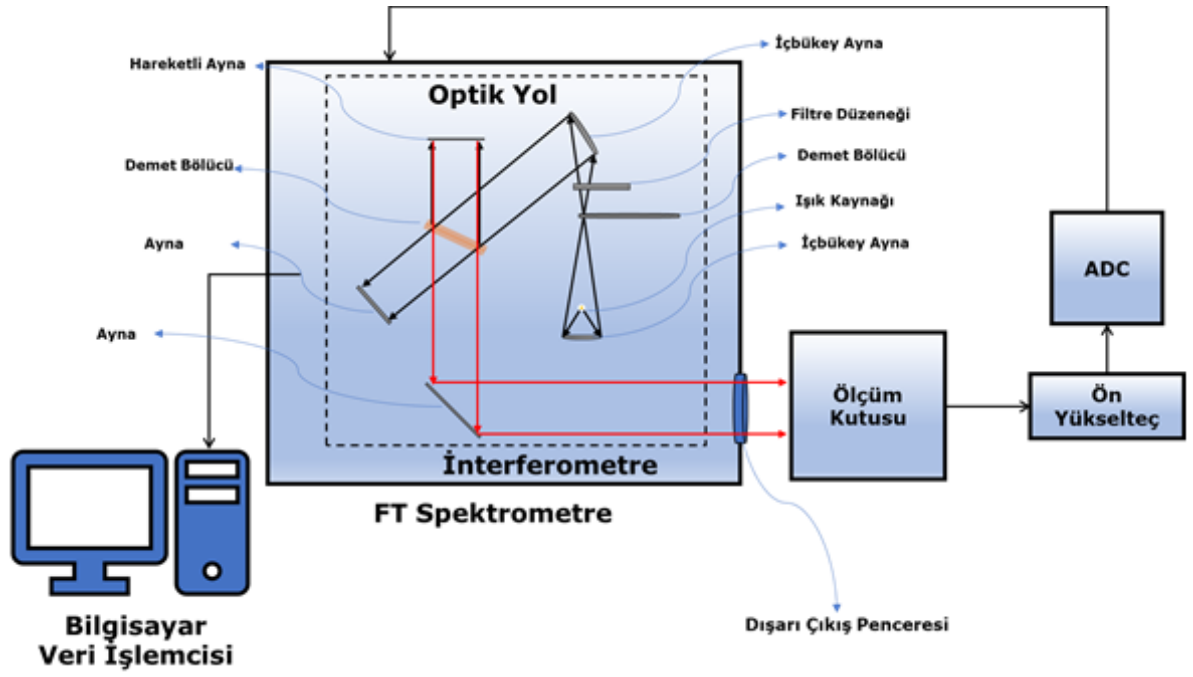
eşitliğini elde ederiz. Bu ifade Şekil 3.2’de görüldüğü gibi tek bir frekans içeren interferogram için geçerlidir. Şayet interferogram içinde Şekil 3.3’teki gibi birden çok frekans varsa ve aynanın hareket uzunluğu sonsuz kabul edilirse,

$$P(\delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\sigma) \cos 2\pi \delta \sigma d\sigma \quad (3.6)$$

ifadesi elde edilir.

3.2. FT-Spektrometre Ölçüm Düzeneği

Bu tez çalışmasında dokulandırılmış örneklerin yansımaya değerleri ve soğurma katsayıları tayfı, Amorf Yarıiletkenler Laboratuvarı’nda bulunan Bruker Vertex 70 model FTIR (Fourier dönüşümlü kızılötesi) spektroskopi deney düzeneğinde ölçülmüştür. Bu düzeneğin harici bir çıkışı ve değiştirilebilir bir ışık kaynağı vardır. Işık kaynağı olarak kuvars halojen lamba kullanılmaktadır. Bunun dışında düzenekte bir demet bölücü olmakta olup, harici bir dedektör bağlanarak üretilen örneklerin (dedektörlerin) dışarıdan test edilmesi mümkün hale getirilmiştir. Böylece deney düzeneği ile 350 nm – 2200 nm tayf aralığında çalışabilen bir FT Spektrometre haline getirilmiştir. Şekil 3.4’te görüldüğü FT-Spektrometre sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3-4 FT-Spektrometre ölçüm düzeneğinin şeması



Şekil 3-5 FT-Spektrometre'nin bir fotoğrafı

Deney düzeneği içerisindeki FT-Spektrometre ölçüm düzeneğinde bulunan interferometre, daha önce anlatılan Michelson interferometresi ile aynı çalışma prensiplerine sahip olup, ışık kaynağı ve demet bölücünün dışında, hareketli bir düzlem ayna, hareketsiz bir düzlem

ayna, iki adet içbükey demet toplayıcı ayna, içerisinde 0.25 mm ile 8.00 mm aralığında çaplara sahip 12 adet demet çap ayarlayıcı, bir adet demet ayırıcı ve filtre düzeneğini içermektedir.

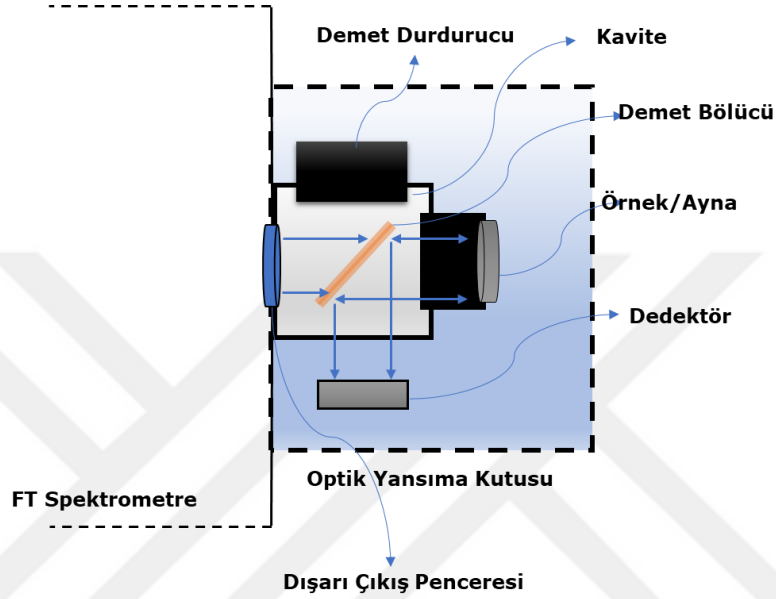
Bu deney düzeneği ile yapılan bütün denemelerde, interferometre içerisinde kullanılan demet ayırıcısı $30,000 - 3,500 \text{ cm}^{-1}$ dalga sayısı aralığında çalışan kuvars (Görünür/UV), ışık kaynağı olarak kullanılmış ve demet çap ayarlayıcı 8 mm'lik kesite ayarlanmıştır.

Şekil 3.4'ten de görülebileceği gibi, interferometre çıkışına gelen demet, ölçüm kutusuna ilerler. Ölçüm kutusu, yapılacak ölçüme göre (optik yansıma veya fotoiletkenlik) farklı geliştirilmiştir. FT-Spektrometre'nin harici çıkışına gelen foton akısının, ölçülebilmesi için ticari bir fotodedektör kullanılır. Kullanılan fotodedektörler BPW34 (Silisyum PİN) ve ING26 (InGaAs tabanlı PIN) dedektörleri olmaktadır. Spektrometrenin dışına çıkan bu ışık demeti, kullanılan kaynağın tüm ışık dağılımını içerir. Bu dedektörlerde üretilen kısıadevre akımı, akımı gerilime çeviren bir ön yükseltece iletilir. Burada yükseltip gerilime çevrilen sinyal, bir analog-dijital çevirici ile dijital veriye çevrilip FT-Spektrometresine, oradan da bilgisayar yani veri işleme birimine gönderilir. Bilgisayarda FT-Spektrometre ölçüm düzeneğini, değiştirilebilir parametrelerine bağlı olarak kontrol etmemizi sağlayan bir uygulama (OPUS) vasıtasıyla, gelen interferogramın ve interferogramın dönüştürüldüğü tayfsal verilerin analizi yapılır. [79]

3.2.1. Yansıma Ölçümü Kutusu

Lazer ile dokulandırılmış örneklerin yansıma değerleri FT-Spektrometre ölçüm düzeneği ve yansıma ölçüm kutusu ile ölçülmüştür. Interferometreden çıkan ışık, yansıma ölçümü için kurulan ölçüm kutusuna gönderilmektedir. Şekil 3.6'da da görüldüğü gibi, yansıma ölçümünde kullanılan ölçüm kutusu ile interferometre arasında boşluk yoktur. Ölçüm kutusunun içinde, dışarıdan ışık gelmesini engelleyecek bir kavite bulunmaktadır. Gelen ışık kavite içerisindeki demet ayırıcıdan geçerek öncelikle alüminyum kaplı cam ayna üzerine gönderilir. Aynadan yansıyan demet yarı geçirgen aynadan yansıyarak dedektör üzerine düşürülür. Dedektör ile algılanan sinyal ön yükselteçte belirlenen oranda gerilime çevrilir ve ardından analog-dijital çevirici yardımıyla spektrometreye iletilir. Spektrometreye gelen zamana bağlı fotoakım (interferogram), veri işlemcisine gönderilir ve burada Fourier dönüşümü alınarak frekansa bağlı fotoakım üretilir. Aynı işlem alüminyum kaplanmış tam yansıtıcı ayna yerine dokulandırılmış örnekler ile tekrarlanmıştır. Tam yansıtıcı ayna ile alınan ölçümler, optik yansıma deneylerinde referans ölçümü olarak kullanılmıştır. Aynı zamanda alüminyumun dalgaboyuna bağlı

yansıma oranı da hesaplamaya katılarak spektrometreden çıkan frekansa bağlı foton akısı hesaplanmıştır. Ölçüm boyunca iki ayrı fotodedektör kullanılmıştır. Bunlardan ilki, tayfsal tepkisi 500 ile 2600 nm dalgaboyu aralığında olan InGaAs tabanlı PIN geometriye sahip ING26 modellenli fotodedektörü, ikincisi ise tayfsal tepkisi 340 ile 1100 nm dalgaboyu aralığında olan silisyum tabanlı PIN yapısında BPW34 modellenli fotodedektörüdür.



Şekil 3-6 Optik yansıtma kutusu

Dışarı çıkış penceresinden gelen spektral foton akısı (örnekten gelen $\phi_{\text{örnek}}$ aynadan gelen ϕ_{ayna}), kullanılan yansıtıcı örnek olsa da ayna olsa da spektrometrenin içerisinde bulunan lamba ve diğer optik bileşenlere bağlı olacaktır. Dolayısıyla, ayna ve örneğin yansıtma değerleriyle çarpılmamış foton akısı değerleri, doğrudan FT-Spektrometredeki ışık kaynağına bağlı olduğu için hem örnek hem ayna ile yapılan ölçümlerde aynı olacaktır.

$$\phi_{\text{ayna}} = \frac{I_{\text{ayna}}}{h\nu \cdot \zeta \cdot S_r \cdot R_{al}}, \quad \phi_{\text{örnek}} = \frac{I_{\text{örnek}}}{h\nu \cdot \zeta \cdot S_r \cdot R_{\text{örnek}}} \quad (3.7)$$

$$\phi_0 \cdot R_{al} = \frac{I_{\text{ayna}}}{h\nu \cdot \zeta \cdot S_r}, \quad \phi_0 \cdot R_{\text{örnek}} = \frac{I_{\text{örnek}}}{h\nu \cdot \zeta \cdot S_r} \quad (3.8)$$

Burada I_{ayna} aynadan yansıyan ışığın şiddeti, R_{al} aynanın yansıtma oranı, $I_{\text{örnek}}$ örnekten yansıyan ışığın şiddeti, $R_{\text{örnek}}$ örneğin yansıtma oranı ζ demetin düştüğü etkin alan, S_r ise dedektörün tayfsal duyarlılığıdır. Eşitlik 3.7 ve 3.8 kullanılarak,

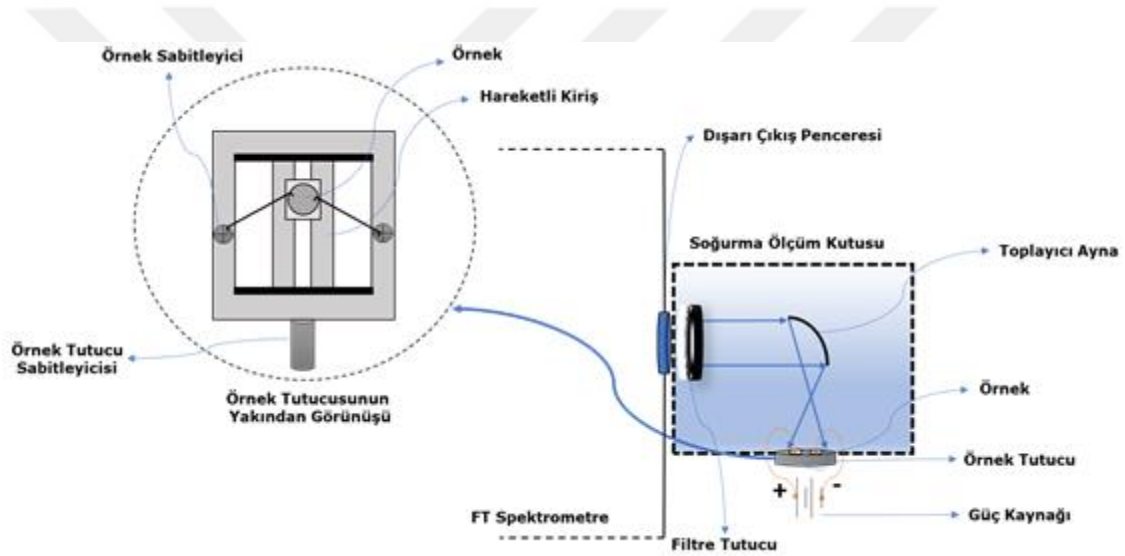
$$\frac{I_{ayna}}{R_{Al}} = \frac{I_{örnek}}{R_{örnek}} \quad (3.9)$$

$$R_{örnek} = \frac{I_{ayna}}{I_{örnek} \cdot R_{ayna}} \quad (3.10)$$

ifadeleri bulunur. Böylelikle örneğin dalgaboyuna bağlı yansıma tayfı hesaplanabilir.

3.2.2. Soğurma Ölçüm Kutusu

Dokulandırılmış örneklerin soğurma katsayıları FT-Spektrometre ölçüm düzeneği ve soğurma ölçüm kutusu ile ölçülmüştür. İnterferometreden çıkan ışık demeti, soğurma katsayısı ölçümü için kurulan ölçüm kutusuna gönderilmektedir. Şekil 3.7’de de görüldüğü gibi, soğurma ölçümünde kullanılan ölçüm kutusunun içinde herhangi bir kavite yoktur.



Şekil 3-7 Soğurma ölçüm kutusu

Dışarı çıkış penceresinden gelen demeti, bir toplayıcı aynaya yönlendirilir ve toplayıcı ayna yardımı ile belirli bir mesafe sonra odaklanır. Odaklanmış demet dokulandırılmış örneğin üzerine gönderilir. Bu arada örnekler, örneğin iki boyutta konumlandırılacağı yerin ayarlanmasında son derece kullanışlı olan, bir örnek tutucunun üzerine yerleştirilir. Daha sonra bir güç kaynağı ile örnek üzerine gerilim uygulanır. Bu gerilim ile, örnek tarafından oluşturulan fotoakım çekilir ve yükseltece gönderilerek sistem tamamlanır. FT-Spektrometre ölçüm düzeneği ile soğurma ölçüm kutusu arasında optik tutucu bulunmaktadır. Bu optik tutucu, Michelson interferometresindeki, girişime katkıda

bulunabilecek harmonik oluşumları engellemek için kullanılması gereken optik filtrelerin yerleştirilmesi için konulmuştur. Örnek tarafından elde edilen fotoakımın yardımıyla soğurma katsayısını bulmak için öncelikle yarıiletken bir dilimin eşitlik 3.11'deki gibi fotoiletkeniliğinin

$$\sigma_p = q((n+\Delta n)u_n + (\Delta p + p)u_p) \quad (3.11)$$

eşitliği ile hesaplanması gereklidir. Burada σ_p fotoiletkenliktir. u_n ve u_p sırasıyla elektron ve deşğin sürüklenme mobiliteleridir. n serbest elektron yoğunluğu, p serbest deşik taşıyıcı yoğunlukları olup, Δn ve Δp ise sırasıyla aydınlatma altında üretilen elektron ve deşik taşıyıcı yoğunluklarıdır. Katkılanmamış yarıiletkende $\Delta n \gg n$ ve $\Delta p \gg p$ olacağı için 3.11 eşitliği

$$\sigma_p = q(\Delta n u_n + \Delta p u_p) \quad (3.12)$$

halini alır. Elektronların ömür süreleri silisyum için daha uzun olduğu için deşiklerin katkısı ihmal edilebilir. Bu durumda eşitlik 3.12

$$\sigma_p = q\Delta n u_n \quad (3.13)$$

ifadesine dönüşür. Kararlı durum aydınlatma altında elektron-deşik çiftlerinin üretim hızı net yeniden birleşme hızına eşit olacağından,

$$G = \frac{\Delta n}{\tau} \quad (3.14)$$

ifadesi ile verilir. Burada G elektron-boşluk çifti üretim hızı oranı olup, τ ise azınlık taşıyıcılar için yeniden birleşme ömür süresidir ve taşıyıcılar için ömür süresini ifade eder. Eşitlik 3.14, eşitlik 3.13 yerine konulursa,

$$\sigma_p = qG\tau u_n \quad (3.15)$$

eşitliği elde edilir. Fazlalık taşıyıcı üretim hızı, foton akısı cinsinden

$$G = \frac{\phi(1-R)\eta(1-e^{-\alpha d})}{d} \quad (3.16)$$

de yazılabilir. Burada $(1 - R)$ ifadesi soğurma yüzdesini, η kuantum verimliliğini, α soğurma katsayısını ve d ise örnek kalınlığını belirtmektedir.

Eşitlik 3.16, eşitlik 3.15'te yerine konulursa,

$$\sigma_p = q\tau u_n \phi(1 - R)\eta \frac{(1-e^{-\alpha d})}{d} \quad (3.17)$$

ifadesine dönüşür. Örnek kalınlığının küçük olduğu durumlarda, $\alpha d \ll 1$ yaklaşımı yapılabilir. Bu durumda $e^{-\alpha d}$ ifadesi Taylor serisine açılabilir.

$$e^{-\alpha d} = 1 - \alpha d + (\alpha d)^2 - (\alpha d)^3 + \dots \cong 1 - \alpha d \quad \alpha d \ll 1 \quad (3.18)$$

Eşitlik 3.18, ile eşitlik 3.17 tekrar biçimlendirilirse,

$$\sigma_p = q\tau u_n \phi (1 - R) \eta \alpha \quad (3.19)$$

eşitliği elde edilir. Serbest elektronların mobilitesini yaklaşık $1 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak kabul edersek ve dalgaboyu değişimi karşısında fotoakımın sabit olduğu varsayımını yaparsak eşitlik 3.19

$$\phi = \frac{K}{\alpha} \quad (3.20)$$

halini alır. Burada K sabittir ve $\frac{\sigma_p}{\alpha q(1-R)\eta\tau u_n}$ ifadesini içine alır. Böylece akı ile soğurma katsayısı arasında ters orantılı basit bir bağlantı kurulur.

Şayet örnek kalınlığının $\alpha d \ll 1$ yaklaşımının yapılamayacağı kadar büyük olduğu durumda ($d \sim 300 \text{ } \mu\text{m}$), eşitlik 3.17,

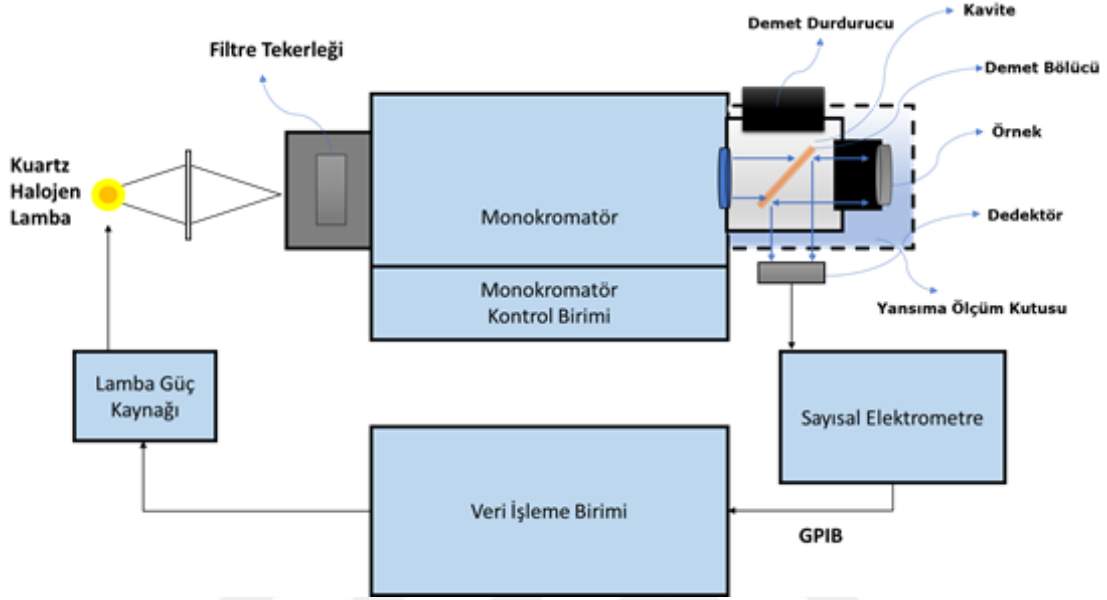
$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \left(1 - \frac{\sigma_p * d}{q\tau u_n \phi (1-R)\eta} \right) \quad (3.21)$$

halini alır.

Optik yansımaya ölçüm düzeneği, tez kapsamında dokulandırılmış örneklerin yansımaya tayflarının ölçülmesi için kurulmuş ikincil ölçüm düzeneğidir.

Şekil 3.8’de de görüldüğü gibi deney düzeneğinde bilgisayar kontrollü bir güç kaynağı vardır. Bu güç kaynağı, sistemdeki ışık kaynağı olan lambaya, istenilen şiddete göre gerekli akımı artırıp azaltabilecek bir şekilde ya da sabit tutacak bir şekilde sürebilmektedir. Lambadan çıkan demet, bir filtre diskinden geçer. Burada hangi filtrenin ayarlanacağı bilgisayar tarafından kontrol edilir. Filtre diskinden sonra demetin dalgaboyu CVI Digikrom 240 monokromatörü ile ayarlanmaktadır. Monokromatörün kontrolü, monokromatör kontrol birimi ya da bilgisayar tarafından yapılır. Monokromatörden gelen demeti, yansımaya ölçüm kutusuna gönderilir. Yansımaya ölçüm düzeneği kutusunun içerisine, ışığın içeri sızmasını engelleyecek bir kavite konulmuştur. Gelen demet ölçüm düzeneği içerisindeki demet bölücünden geçerek, cam üzerine ısı buharlaştırma ile kaplama yöntemi ile alüminyum kaplanarak elde edilmiş bir aynaya gönderilir. Aynadan geri gelen ışık, demet bölücünden yansıtılarak dedektöre iletilir. Aynı işlem alüminyum kaplı tam yansıtıcı

ayna yerine dokulandırılmış örnekler konularak tekrar yapılır. Dedektör ile ölçülen sinyal, elektrometre tarafından ölçülüp, GPIB bağlantısı üzerinden veri işleme ünitesine gönderilir.



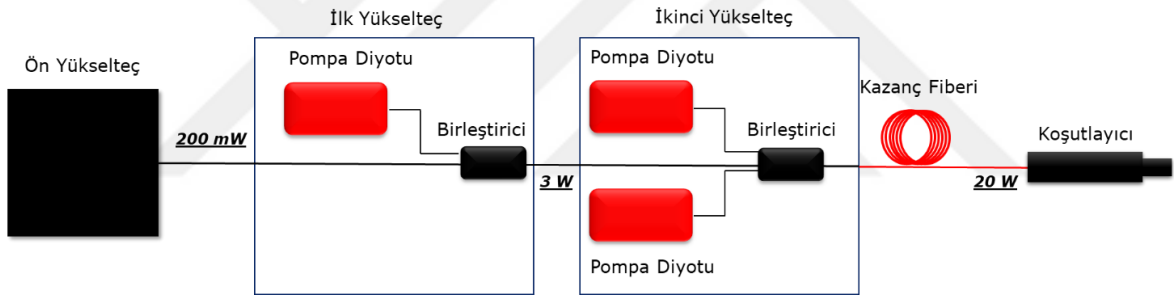
Şekil 3-8 Optik yansıma deney düzeneğinin şeması

3.3. Lazer Mimarisi ve Lazer Düzeneği

Bu tez çalışmasında bütün dokulandırma çalışmaları, 40 ila 100 kHz arası tekrar frekansı aralığında, 18 W ortalama güçte, 0,18 ile 0,45 mJ aralığında değişebilen atım enerjisine sahip, 1064 nm merkez dalgaboyunda çalışan ve tarama kafasının sonunda bulunan odaklayıcı 100 mm'lik mercekten gelen atımları 50 μ m bir çapta odaklayabilen FiberLAST Nanomark 20 W marka ismine sahip fiber lazer ile yapılmıştır. Söz konusu bu lazerin çalışma mimarisi MOPA olup, kazanç ortamı Yb^{+3} katkılı fiberden oluşmaktadır [51].

Kullanılan fiber lazer bir ön yükselteç ve iki yükselteçten oluşmaktadır. Ön yükseltecin başlangıç kesimi ve ayrıca bütün lazerin en temel noktası 1064 nm dalgaboyunda çalışan ve modüle bir şekilde kare dalgalar halinde 1064 nm dalga boyuna sahip sinyal (lazer) gönderebilen fiberoptik çıkışlı bir lazer diyottur. Bu lazer diyottan gelen 1064 nm sinyal ön yükselteç içerisinde kazanç ortamında 976 nm dalgaboyunda çalışan bir fiberoptik lazer diyottan gelen 976 nm dalgaboyuna sahip pompa (lazer) ile birleştirilir. Ön yükselteç kısmında kullanılan Yb^{+3} katkılı kazanç fiberinde sinyal pompa ile yükseltilir ve ön

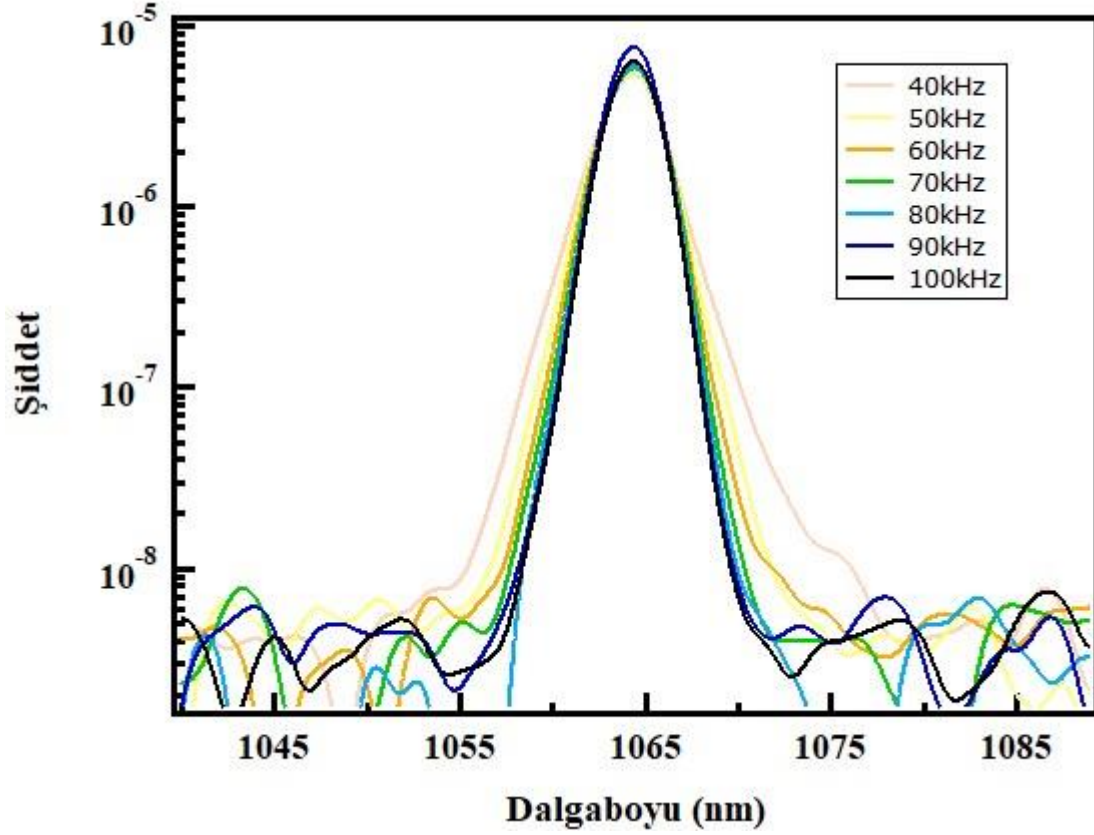
yükselteç çıkışında yaklaşık 200 mW değerinde bir 1064 nm sinyal gücü elde edilir. Ön yükselteç içerisinde sinyal ve pompa diyotların birbirlerine bağlanmasını sağlayan bileşenler ve aynı zamanda bu diyotlara olan geri dönüşler ile ön yükselteçteki birtakım bölgelerdeki geri dönüşleri engellemek için kullanılan bütün filtreler, fiberoptik malzemelerdir. Ön yükselteçten gelen sinyal, ilk yükselteçte birleştirici fiberoptik bileşenler yardımı ile 976 nm’de çalışan çok kipli bir fiberoptik lazer diyotundan elde edilen 976 nm dalgaboylu pompa ile birleştirilir. Bu yükselteçte kullanılan ayrı bir Yb^{+3} katkılı kazanç fiberinde yükseltilir. Yaklaşık 3 W’lık güç elde ettikten sonra 1064 nm dalga boyundaki bu sinyal, ikinci yükselteçte bir başka birleştirici ile 976 nm’de çalışan çok kipli iki adet fiberoptik lazer diyotundan elde edilen 976 nm dalgaboylu pompa ile birleştirilir ve sinyal yaklaşık 20 W güç değerine yükseltilir. 20 W’lık güç değerindeki 1064 nm dalgaboyundaki sinyal fiberoptik izolatörlü koştulayıcıya (collimator) gönderilir [61]. Sistemin bu haline kadar olan kesmi Şekil 3.9’da gösterilmektedir.



Şekil 3-9 Tez kapsamında kullanılan lazerin mimarisi

Koştulayıcıdan çıkan lazerin frekans değerlerinin değiştirilmesi için, 1064 nm dalga boyunda lazer üreten fiberoptik sinyal diyotunun farklı frekans aralıklarıyla modüle edilmesi gerekir. Bu sinyal diyotu farklı frekanslarda modüle edildiğinde atımlar arası mesafe değişecektir. Frekans değeri 40 kHz’den 100 kHz değerine arttırıldıkça atımlar arasındaki süre kısalmaktadır. Bu azalma ile her bir sinyalin gelen 976 nm dalgaboyundaki pompa ile etkileşip zorlanmış yayınım yapma olasılığının artması beklenen bir sonuçtur [32]. Ancak frekans azaldıkça zorlanmış yayınım yapma ihtimali azalacak ve fiber içerisinde doğrusal olmayan optik etkiler söz konusu olacaktır [40]. Bu etkilerden ötürü

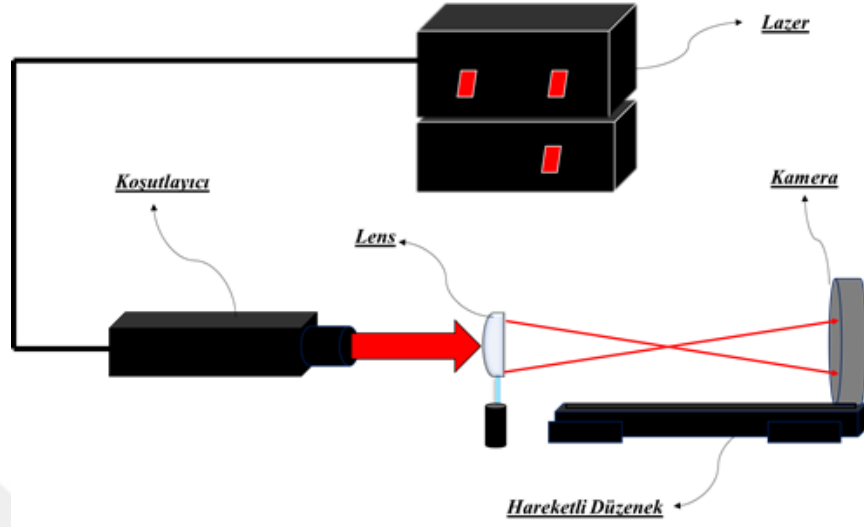
sinyalin dalga boyuna bağı spektrumunda düşük frekanslarda, yüksek frekanslara göre bir genişleme söz konusu olacaktır. Şekil 3.10’da bu görülmektedir.



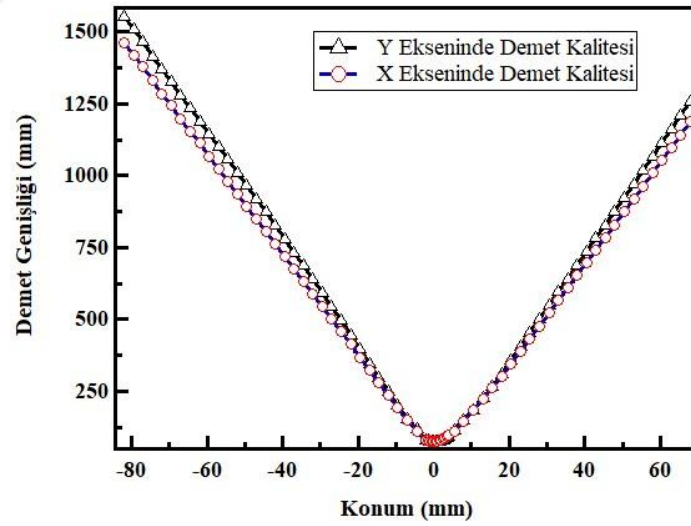
Şekil 3-10 40 -100kHz aralığındaki atım tekrar hızlarında, 20 W ortalama güç çıkışında lazerin bağıl şiddet tayfı

Lazerin demet kalitesi ile ilgili olarak yapılan ölçümleri bir BC106-VIS tipi CCD kamera ile yapılmıştır. CCD kameranın altında bulunan BC1M2-150 tipi hareketli düzeneğe ve bu düzeneğin tek düzlemde 150 mm’lik bir hareket alanı vardır. Demet kalitesi ölçümünün doğası gereği, CCD kameranın gelen koşutlanmış lazerin (collimated beam), bütün Rayleigh uzaklığını [54] kapsayabilmesi için 150 mm’nin yarısı kadarlık mesafede, lazer bir mercekle vasıtasıyla odaklanmalıdır. Bu nedenle koşutlayıcının hemen önüne 75 mm’lik bir düzlem dışbükey mercek konulmuştur. Merceğin önünde de hareketli bir düzeneğe ve üzerinde bulunan CCD kamera vardır. Lazer, hareketli düzeneğin 150 mm hareketi boyunca, CCD kameraya aynı doğrultuda odaklanıp tekrar genişleyecektir. Demet

kalitesinin ölçüldüğü düzeneğ Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Demet kalitesi sonuçları ise Şekil 3.13’de gösterilmiştir.



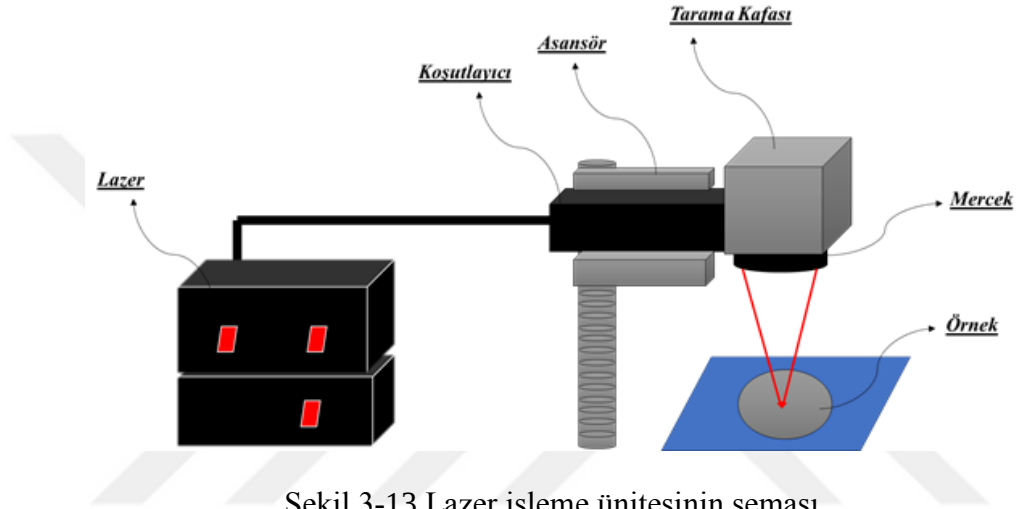
Şekil 3-11 Demet kalitesi ölçüm düzeneği



Şekil 3-12 Demet kalitesi grafiği

Sinyal bu bileşenlerden sonra koşutlanmış bir şekilde tarama kafasına gönderilir. Tarama kafasının sonundaki odaklayıcı mercek, lazer demetinin odaklandığı sıradaki çapını belirler [54].

Tarama kafasında bulunan tarama aynalarının hızı ve bu aynaların kontrolü, lazerin frekansı ve ortalama güç değeri, bir markalama uygulaması ile bilgisayar üzerinden yapılmaktadır. Aynı zamanda tarama kafasından gelen lazerin malzeme üzerindeki odak mesafesini ayarlayan 10 mikronluk hassasiyetle hareket edebilme özelliğine sahip bir asansör yardımıyla, tarama kafasının yüksekliği ayarlanabilmektedir [51]. Kullanılan lazer düzeneği Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Şekil 3.15'te ise kullanılan fiber lazerin gerçek görüntüsü gösterilmiştir.



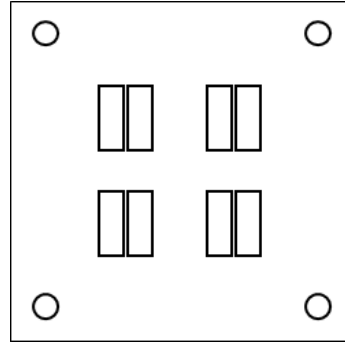
Şekil 3-13 Lazer işleme ünitesinin şeması



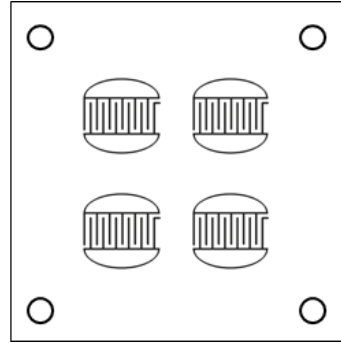
Şekil 3-14 Lazer işleme ünitesinin fotoğrafı [31]

3.4. Maske Tasarımı

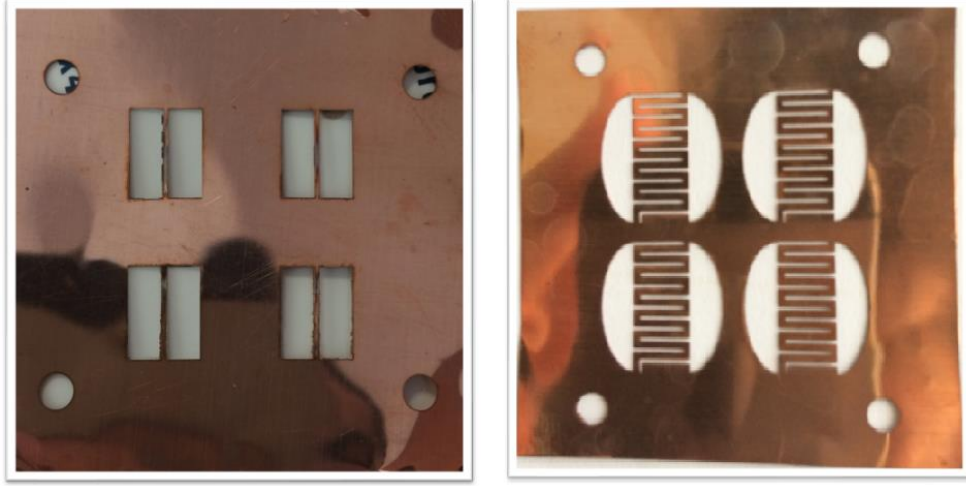
Dokulandırılmış örneklerin fotoiletkenliklerine bağlı olarak ölçüm yapabilmek için örnekler üzerinde bir potansiyel farkın oluşturulması gerektiği gibi, fotoiletkenlik sonucu oluşan serbest elektronların bir kontak üzerinden ölçülmesi gereklidir. Bu sebepten ötürü örneklerin yüzeylerine, iki ayrı geometrideki maskenin yardımıyla alüminyum kontaklar atılmıştır. Söz konusu bu maskeler, 0.05 mm kalınlığa sahip bakır folyonun örnek işlemede kullanılan aynı tip fiber lazerin yardımı ile işlenmiştir. Nanosaniye atım süresine sahip bir lazer kullanıldığı için, bakır folyonun üzerinde oluşacak olan ısı etkilerinin, maske yapımında pürüzsüzlüğe sebep olması ve bakır folyoyu aşırı ısıtmaması için gerekli olan lazer işleme parametreleri denenerek bulunmuştur. Bu lazer işleme parametreleri 10 W ortalama güç, 100 kHz atım tekrar hızı ve 200 ile 400 mm/s aralığında atım tarama hızlarından oluşmaktadır. Maske geometrisi, kullanılan fiber lazerin kontrolünün sağlandığı bir bilgisayar uygulamasıyla yapılmış ve lazer ile maske işleme sürecinde ısı aktarımı minimuma indirebilmek için, belirli aralıklar ile lazer kapatılmıştır. Maskelerin geometrik yapısı Şekil 3.16a ve 3.16b’de görülmektedir.



Şekil 3-15a İlk maske tasarımı

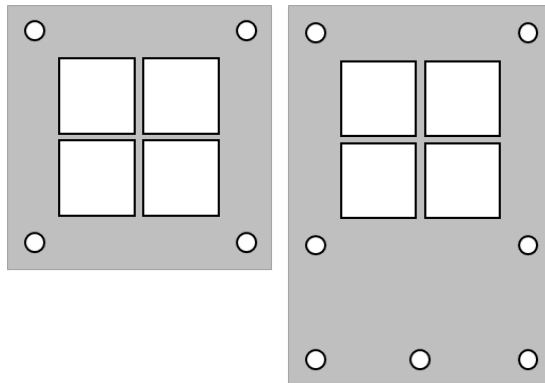


Şekil 3-15b İkinci maske tasarımı



Şekil 3-16 İki maskenin fotoğrafı

Vakumda kaplama işlemi sırasında, vakum fanusunda örneklerin sabit tutabilmek için, maske tutucu ve maske sabitleyicinin de tasarlanmasına gerek duyulmuştur. Bu maskeleri tutmak için gerekli maske tutucu ve maske sabitleyici, 1 mm'lik kalınlığa sahip alüminyum dilimlerin aynı tip fiber lazerin yardımı ile işlenmesiyle oluşturulmuştur. Nanosaniye atım süresine sahip bir lazer kullanıldığı için, maske işlenmesinde olduğu gibi bir takım lazer işleme parametreleri, ısı etkilere bağlı olarak denenerek bulunmuştur. Bu lazer işleme parametreleri 50 W ortalama güç, ≤ 100 kHz atım tekrar hızı ve 100 ile 1000 mm/s aralığında atım tarama hızlarından oluşmaktadır. İki maske tutucunun üzerinde, örnek boyutlarında kareler kesilmiştir. Şekil 3.18a'da maske sabitleyici ve Şekil 3.18b'de maske tutucu görülmektedir.



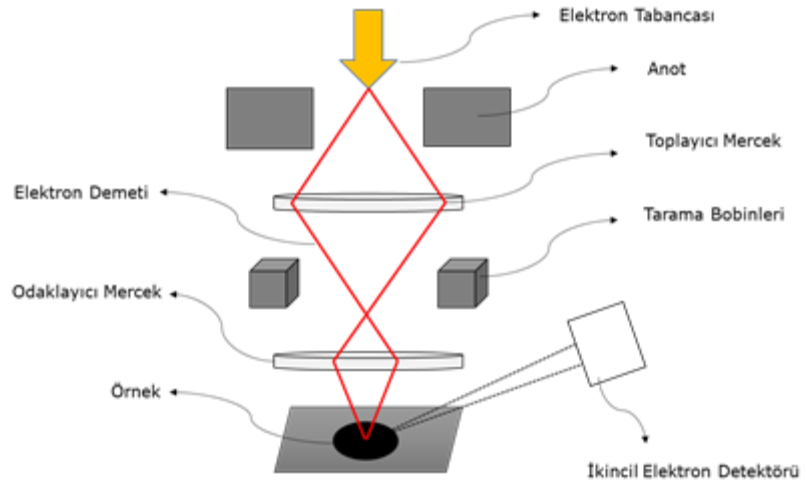
Şekil 3-17a) Maske sabitleyici ve b) Maske tutucu

Maske tutucu ve maske sabitleyicilerin lazer kesimi sırasında kesilen kısımlarındaki pürüzlü alanlar ve çapaklar, freze yardımı ile giderilmiştir. Maske sabitleyici ile maske tutucu arasında maske konumlandırılmış ve bu bileşenler, köşelerine açılmış vida deliklerinden birbirlerine sabitlendirilmişlerdir. Maske tutucu, vakum fanusundaki buharlaşma alanına karşı duracak şekilde alt kısımda kalacaktır. Örnekler ise maske tutucunun üzerine ters bir şekilde konulacak ve buharlaşarak gelen alüminyum, maskenin olmadığı bölgedeki örneklerin üzerlerine kaplanacaktır.

3.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Tez çalışması kapsamında elde edilen dokulandırılmış örneklerin yüzeylerinin görüntülerinin elde edilmesi ve böylelikle dokulandırma işlemleri süresince kullanılan lazer parametrelerine bağlı olarak, örneklerin yüzeylerinde oluşan desenleri gözlemleyebilmek için Taramalı Elektron Mikroskobu (scanning electron microscope-SEM) kullanılmıştır.

Taramalı elektron mikroskobunun çalışma prensibi, incelenecek olan malzeme yüzeyine gönderilen elektronların, malzeme yüzeyi ile etkileşmesi sonucunda algılanan sinyalle, malzeme yüzey morfolojisi hakkında bilgi almaya dayalıdır. Malzeme yüzeyine gönderilen elektron demeti bir elektron tabancası ile gönderilir. Şekil 3.19’da de görüldüğü gibi, gönderilen elektron demeti, toplayıcı bir elektromanyetik mercekte toplanır ve burada odaklanan elektron demeti ile, örnek yüzeyinde yüzey tarama işlemi, tarama bobinleri ile gerçekleştirilir. Elektronların yüzey ile girdiği fiziksel etkileşimler sonucunda ortaya çıkan sinyaller algılanır ve incelenir. Bu sinyaller, ilk olarak elektron demetindeki elektronların yüzeydeki atomlar ile yaptığı elastik olmayan çarpışma sebebiyle ortaya çıkan elektronlar, ikinci olarak yüzeyin daha derin kısımlarından gelen geri saçılmalardan ve üçüncü olarak yüzeye gelen elektronların, örneğin yüzeyindeki atomlardan elektron koparması sebebiyle, örnekteki elektronların bulundukları seviyeden daha yüksek seviyeye geçiş yapması sürecinde yayımlanan x-ışınlarıdır. Bu sinyaller, dedektörler tarafından dedekte edilmesi ile yüzey hakkında bilgi edilir.



Şekil 3-18 Taramalı elektron mikroskobunun şematik gösterimi

4. ÖRNEK HAZIRLANIŞI, VERİLER VE TARTIŞMA

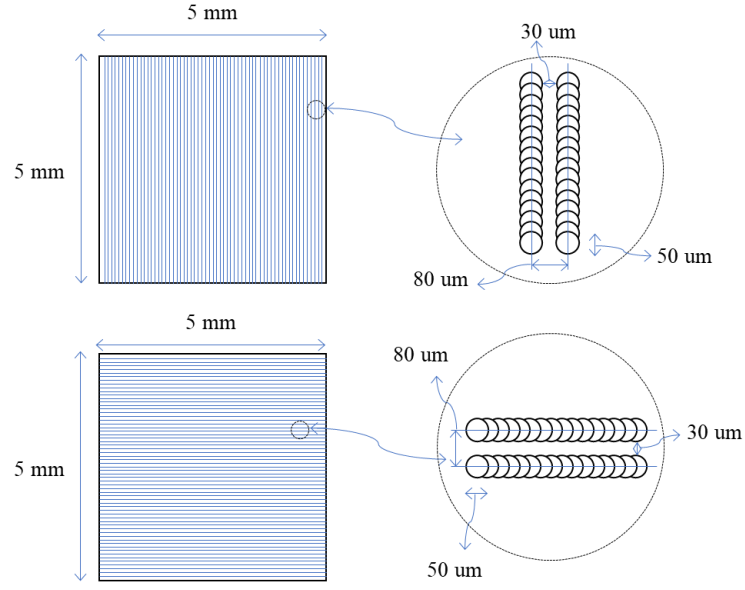
Daha önceki bölümlerde yüzeyleri dokulandırılmış silisyum dilim örneklerinin elektriksel ve optik özelliklerinin incelenmesi için gerekli deney düzenekleri ve bu deney düzenekleri için çalışma prensipleri anlatılmıştı. Bu bölümde n-tipi (100) kristal yönelimine sahip silisyum dilim ile dokulandırılmış örneklerin hazırlanışı ve farklı lazer parametreleri ile dokulandırılmış hallerinin, daha önce belirtilen ölçüm yöntemleriyle elde edilen sonuçları tartışılacaktır.

4.1. Malzeme Hazırlanışı

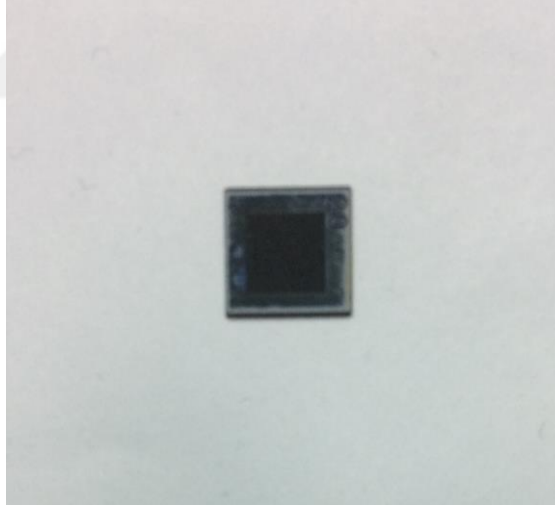
Yapılan çalışmada n-tipi silisyum dilim, fiber lazer ile üç kere yüzey dokulandırma işlemine tabi tutulmuştur. İlk işlem sonucunda FT-spektrometre ölçüm düzeneğinde örneklerin yansıma tayfi incelenmiş, ardından elde edilen en iyi sonuçları veren örneklerin SEM görüntüleri alınmış ve bu sonuçların elde edilmesini sağlayan yüzey dokulandırma işlemlerini mümkün kılan lazer parametreleri seçilerek, aynı silisyum dilime ikinci kere dokulandırma işlemi uygulanmıştır. Bu dokulandırma işlemi sırasında belirlenen dokulandırılmış bölgelerin sınırları, daha sonra fotoakım ölçümü için örnek yüzeyine atılacak olan kontakların uzunluklarına göre optimize edilmiştir. Ardından aynı tür silisyum dilim ile, ikinci silisyum denemelerinden alınan en iyi sonuçları, farklı geometride tasarlanmış bir maske ile atılacak kontak işlemine göre tekrar yorumlanmış ve üçüncü bir silisyum dilim ile dokulandırma işlemi yapılmıştır.

4.1.1. Fiber lazer ile silisyum dilim dokulandırılması

Çapı 3 inç olup, kalınlığı yaklaşık olarak 350 μm civarında olan n-tipi bir silisyum dilim, 1064 nm'de çalışan nanosaniye atımlı Yb^{+3} katkılı fiber lazer ile farklı güç, tarama hızı ve frekans parametreleriyle dokulandırma işlemlerine tabi tutulmuştur. İlk yapılan işlemde n-tipi silisyum dilim üzerinde 5 mm x 5 mm'lik boyutlara sahip kareler halinde 60 adet dokulandırma alanı belirlenip, bu alanlar üzerinde farklı lazer parametrelerinde dokulandırma işlemi yapılmıştır. Karelerin içerisine, silisyum dilim Şekil 4'ten de görüldüğü gibi, kristal yönelimine dik ve veya paralel hatlarda olmak üzere tek ve veya aynı örnekte çift doğrultuda olmak üzere, 5 mm uzunluğunda, lazer atımları ile gerçekleştirilmiş oyuğumsu yapılarla dokulandırılmış ve bu çizgiler 25 mm² karenin köşelerine paralel ve boylu boyunca 0.08 mm aralıklar ile Şekil 4.1'den de görüldüğü gibi tekrarlanmıştır.



Şekil 4-1 İlk silisyum dilim üzerindeki tek doğrultuda yapılmış dokulandırmada kullanılan lazer işleme deseni

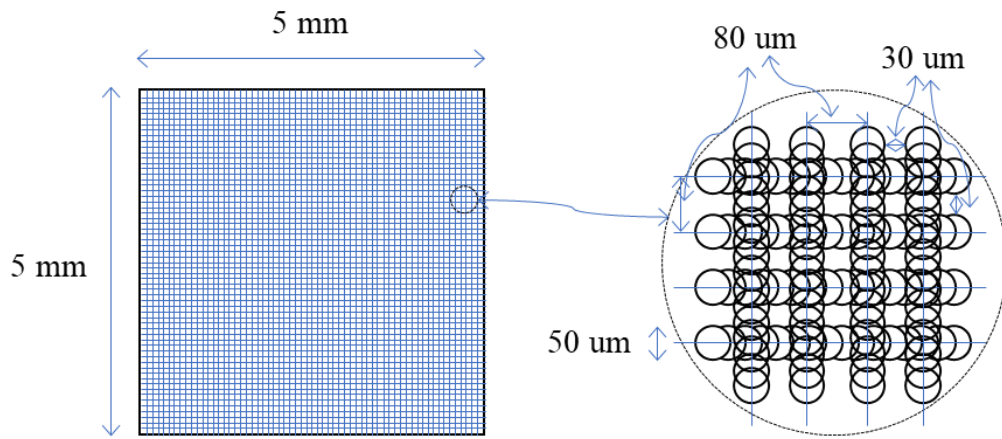


Şekil 4-2 İlk silisyum dilimde yapılan bir örneğin fotoğrafı

Şekil 4.1'den de görüldüğü gibi tarama kafasında kullanılan merceğin odaklayabilme gücü ve demet kalitesi ile dalgaboyu parametrelerinden yola çıkarak yapılan hesaplamalardan da beklenildiği gibi, dokulandırma desenleri oluşturan her bir lazer atımının çapı yaklaşık 50

μm olmaktadır. Bu desenlerin merkezleri arasındaki mesafe $80\ \mu\text{m}$ olup, dolayısıyla demet $\text{çap sınırlarının arasındaki mesafe } 30\ \mu\text{m}$ olmaktadır.

Bu desenleri oluşturan demetlerin $\text{çakışma oranının tarama hızı, frekans ve demet çapı parametreleri ile belirlendiğinden daha önce de bahsedilmiştir. Lazerden gelen ışık demetlerinin malzeme ile etkileşimi sırasındaki ısı etkiye en çok katkıda bulunan parametrelerden biri de lazerin ortalama gücüdür. Bu sebeplerden ötürü } 25\ \text{mm}^2\text{'lik karesel bölgelerin içeriğinde bulunan bu dokulandırma işlemlerinin, her birinin lazer parametresi bütün işlemlerde ayrı tutulmuştur. Yapılan dokulandırmalarda, işlenen çizgiler 10, 15, 20 W ortalama güçlerde, her bir güç değeri için 40, 70 ve 100 kHz parametrelere sahip lazer atımlarıyla yapılmıştır. Söz konusu bu her bir frekans değeri içinde 5, 50 ve 800 mm/s tarama hızlarında lazer atımları ile üçer kere işlem yapılmıştır. Bu parametreler ile yapılan bütün işlemler silisyum dilimin kristal yönelimine hem dik hem de paralel hatlarda yapılmıştır. Bunun dışında aynı } 25\ \text{mm}^2\text{'lik ebatlarda 6 adet örnek, lazer atımlarından oluşan birbirlerine dik yönelimde iki adet dokulandırma deseni işlenmiştir. Bu 6 adet örnekteki çizgiler, Şekil 4.3'te görüldüğü gibi silisyum diliminin kristal dizilimine } 90^\circ\text{ ile } 0^\circ\text{C açıyla ve } 45^\circ\text{ ile } 135^\circ\text{C açıyla işlenmiştir.}$



Şekil 4-3 İlk silisyum dilim üzerindeki tek yönlü dokulandırma deseni

Bu iki durum içinde örnekler 20 W güçte, 40 kHz tekrarlama oranında üçer adet ayrı tarama hızında işlenmiştir. Bu tarama hızları sırasıyla 5, 50, 800 mm/s olmaktadır. Tablo 4.1'de tüm dokulandırma örneklerinin işlenme parametreleri verilmektedir.

Tablo 4-1 İlk silisyum dilim üzerinde yapılan dokulandırma parametreleri ile ilgili lazer parametreleri

Örnekler	Tarama Hızı (mm/s)	Atım Tekrar Frekansı (kHz)	Güç (W)	Dokulandırma Yönelimi	Çakışma Oranları
PN1	5	40	10	90	0.998
PN2	5	70	10	90	0.999
PN3	5	100	10	90	0.999
PN4	50	100	10	90	0.990
PN5	50	40	15	90	0.975
PN6	800	40	15	90	0.400
PN7	5	70	15	90	0.999
PN8	800	70	15	90	0.770
PN9	5	100	15	90	0.999
PN10	50	100	15	90	0.990
PN11	800	100	15	90	0.840
PN12	800	70	20	90	0.770
PN13	5	100	20	90	0.999
PN14	50	100	20	90	0.990
PN15	800	100	20	90	0.840
PN16	50	40	10	0	0.975
PN17	5	70	10	0	0.999
PN18	800	70	10	0	0.770
PN19	5	100	10	0	0.999
PN20	50	100	10	0	0.990
PN21	800	100	10	0	0.840
PN22	50	40	15	0	0.975
PN23	800	40	15	0	0.400
PN24	50	70	15	0	0.999
PN25	800	70	15	0	0.770
PN26	50	40	20	0	0.975
PN27	800	40	20	0	0.400
PN28	800	70	20	0	0.770
PN29	50	100	20	0	0.990
PN30	800	40	20	0 + 90	0.400
PN31	1000	40	20	0 + 90	0.500
PN32	1500	40	20	0 + 90	0.250
PN33	2000	40	20	0 + 90	0

İşlenmiş karesel bölgelerin, silisyum dilimden kesilebilmesi için, karelerin arasında eşit mesafelerde, 20 W ortalama güçte, kristal düzlemine dik ve paralel olacak hatlarda, silisyum boyunca lazer ile dokulandırma işlemi yapılmıştır.

İkincil yapılan işlemde, birincil yapılan işlemde yapılan örneklerden elde edilen verilere göre en uygun olan parametreler seçilmiş ve bu parametrelerde farklı frekanslarda tekrar dokulandırma işlemleri, özdeş silisyum diliminin üzerinde denenmiştir. Seçilen parametreler Tablo 4.2’de verilmektedir.

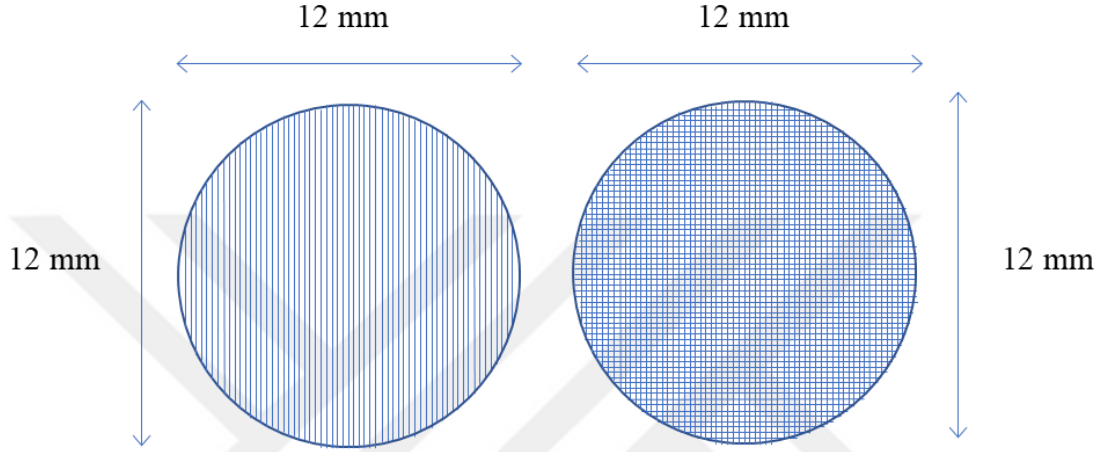
Tablo 4-2 İkinci silisyum dilim üzerinde yapılan dokulandırma parametreleri

Örnekler	Tarama Hızı (mm/s)	Atım Tekrar Frekansı (kHz)	Güç (W)	Dokulandırma Yönelimi	Çakışma Oranı
PA1	800	50	20	0	0.680
PA2	50	70	20	0	0.986
PA3	800	70	20	0	0.770
PA4	50	80	20	0	0.988
PA5	800	80	20	0	0.800
PA6	50	90	20	0	0.989
PA7	800	90	20	0	0.820
PA8	5	100	20	0	0.999
PA9	50	100	20	0	0.990
PA10	800	100	20	0	0.840
PA11	5	40	15	0+90 (Çift Doğrultuda)	0.998
PA12	50	40	15	0+90 (Çift Doğrultuda)	0.975
PA13	800	40	20	0+90 (Çift Doğrultuda)	0.400
PA14	1500	40	20	0+90 (Çift Doğrultuda)	0.250
PA15	2000	40	20	0+90 (Çift Doğrultuda)	0

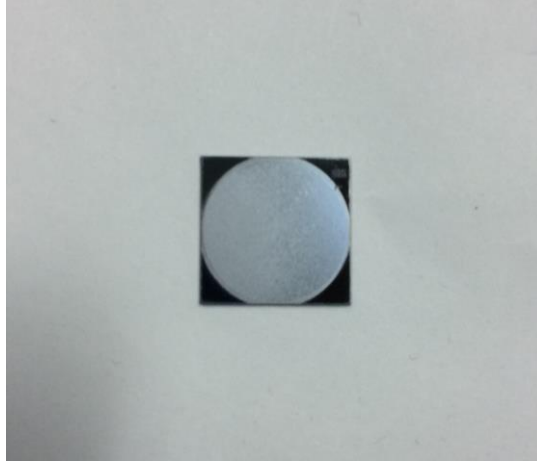
Ayrıca örneklerin boyutları 12 mm x 12 mm’lik kare alanlar içerisinde tutulmuş ve bu alan içerisinde dokulandırma, 12 mm çapında bir dairenin içerisinde yapılmıştır. Dokulandırma çizgilerinin arasındaki mesafe aynı tutulmuştur ve çizgilerin doğrultuları silisyum dilimin kristal yönelimine paralel hatta işlenmiştir. İşlenen dokulandırma desenleri 20 W ortalama güçte, 50, 60, 70, 80, 90 ve 100 kHz tekrarlama hızlarında lazer atımlarıyla yapılmıştır. Söz konusu bu her bir frekans değeri içinde 5, 50 ve 800 mm/s tarama hızında lazer atımları ile üçer kere işlem yapılmıştır.

Bunun dışında aynı 144 mm^2 'lik bu ebatlarda örnekler, lazer atımlarından oluşan, birbirlerine dik yönelimde çift doğrultuda dokulandırılmıştır. Bu örneklerdeki dokulandırma desenleri, silisyum diliminin kristal dizilimine 90° ve 0° açıyla işlenmiştir.

Şekil 4.4'te sol tarafta tek yönlü olanı ve sağ tarafta ise çift yönlü olan dokulandırma desenleri verilmiştir.



Şekil 4-4 İkinci silisyum dilim üzerindeki tek ve çift yönlü dokulandırma desenleri



Şekil 4-5 İkinci silisyum dilim ile yapılan bir örneğin fotoğrafı

Çift doğrultuda yapılan bu dokulandırmaların iki tanesi 15 W ortalama güçte, atım tekrar frekansı 40 kHz’de sabit tutulmuş ve 5 ve 50 mm/s tarama hızında yapılmıştır. Geri kalan 5 örnekte 20 W ortalama güçte, 40 kHz atım tekrar oranında yapılmıştır. Bu 5 örneğin tarama hızları: 5, 50, 800, 1500 ve 2000 mm/s olarak belirlenmiştir.

Üçüncü silisyum dilim kullanılarak hazırlanan örneklerde, ikinci silisyum ile yapılan örneklerden elde edilen verilere göre en uygun olan parametreler seçilmiştir. Bu parametreler farklı atım çakışma oranlarını içerecek şekilde revize edilmiş ve tekrar özdeş bir silisyum dilimin üzerinde dokulandırma işlemi yapılmıştır. Örneklerin boyutları 12 mm x 12 mm’lik kare alanlar içerisinde tutulmuş ve bu alan içerisinde dokulandırma, 12 mm çapında bir dairenin içerisinde yapılmıştır. Seçilen parametreler Tablo 4.3’te verilmektedir.

Tablo 4-3 Üçüncü silisyum dilim üzerinde yapılan dokulandırma parametreleri

Örnekler	Tarama Hızı (mm/s)	Atım Tekrar Frekansı (kHz)	Güç (W)	Dokulandırma Yönelimi	Çakışma Oranı
PC1	120	40	20	0	0.940
PC2	100	40	20	0	0.950
PC3	80	40	20	0	0.960
PC4	60	40	20	0	0.970
PC5	40	40	20	0	0.980
PC6	20	40	20	0	0.990
PC7	240	80	20	0	0.940
PC8	200	80	20	0	0.950
PC9	160	80	20	0	0.960

Her bir örnekte 20 W ortalama güçte, 40 kHz atım tekrar oranında yapılmıştır. Örneklerin tarama hızları: 20, 40, 60, 80, 100, 120, 160, 200 ve 240 mm/s olarak verilmiştir.

Bütün bu işlemlerin ardından, soğurma ölçümü alınan PA1, PA3, PA5, PA7, PA10, PA2 ve PA4 örneklerine yüzey pasivasyonu yapılmıştır. Pasivasyon işlemi için, Amorf Yarıiletkenler Laboratuvarında bulunan plazma-destekli kimyasal buhar biriktirme (PECVD - Plasma-enhanced chemical vapor deposition) sistemi kullanılmıştır. Ardından sisteme (Azot) N₂ gazı ve SiH₄ gazı 2 sccm ve 8 sccm oranlarında, kütle akışı kontrolcülerinin, gaz akışını kontrolü altında aktarılmıştır. Kaplama odasının basıncı sabitlendikten sonra ısıtıcıya akım sürülmüş ve sıcaklık 30 dakikada 350°C'ye yükseltilmiştir. Sıcaklığın artışı sırasında, ısıtıcıya anlık yüksek akım sürülmemesi için 50°C adımlar ile arttırılacak bir optimizasyonla, ısıtıcıya akım sürülmüştür. Ardından 13.56 MHz'de RF gücü yardımıyla elektrotlara sinyal uygulanarak, örneklerin üzerinde kaplama işlemi, 350°C'de 30 dakika boyunca yapılmıştır. Ancak tüm bu işlemlerin ardından elde edilen örneklerin soğurma tayfı incelendiğine, verimli bir şekilde fotoakım ölçümü yapılamamıştır. Dolayısıyla veriler ve tartışma bölümünde, yüzey pasivasyonu yapılmış örneklerin sonuçları verilmemiştir.

4.2. Veriler ve Tartışma

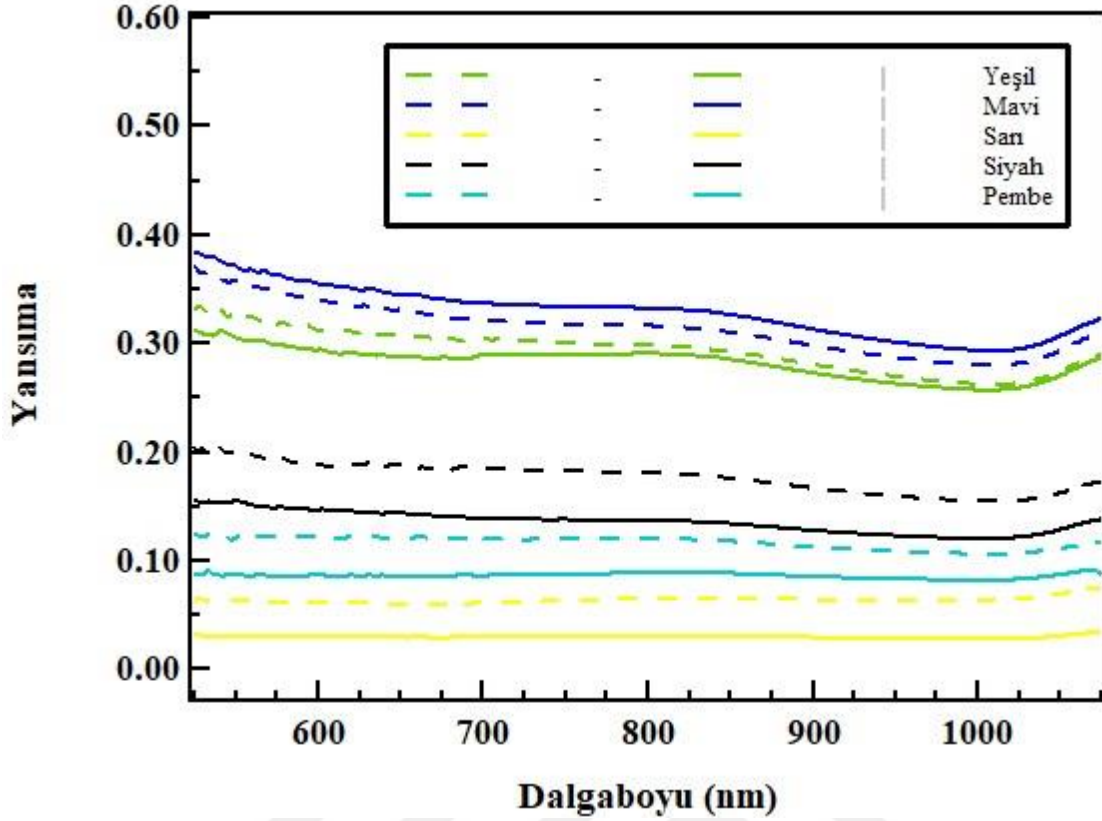
Bu bölümde FT-Spektrometre ölçüm düzeneği ve optik yansımaya ölçüm düzeneği ile alınan veriler incelenmiştir ve örneklerin SEM görüntüleri değerlendirilmiştir.

4.2.1. FT-Spektrometre Ölçüm Düzeneği ile Elde Edilen Yansımaya Verileri

FT spektrometre kullanılarak, dokulandırılmış örneklerin optik yansımaya değerleri ölçülmüş ve yansımaya tayfı elde edilmiştir.

Alınan veriler, dokulandırılmış örneklerin dokulandırıldığı lazer parametreleriyle ilgili olarak, atım tekrar hızı, tarama hızı ve çakışma oranlarına göre incelenmiştir.

Şekil 4.6'daki ilk silisyum dilimden alınan veriler ile çizilmiş optik yansımaya tayfının grafiği bulunmaktadır. Grafikte kristal yönelimine dik ve paralel hatlarda dokulandırılmış örnekler gösterilmiştir. Dik olarak dokulandırılmış örnekler “|”, paralel olarak dokulandırılmış örnekler “—” ifadeleri ile belirtilmiştir.



Şekil 4-6 Kristale dik (|) ve paralel yönelimde (—) aynı lazer parametreleriyle dokulandırmış örneklerin yansıma tayfı

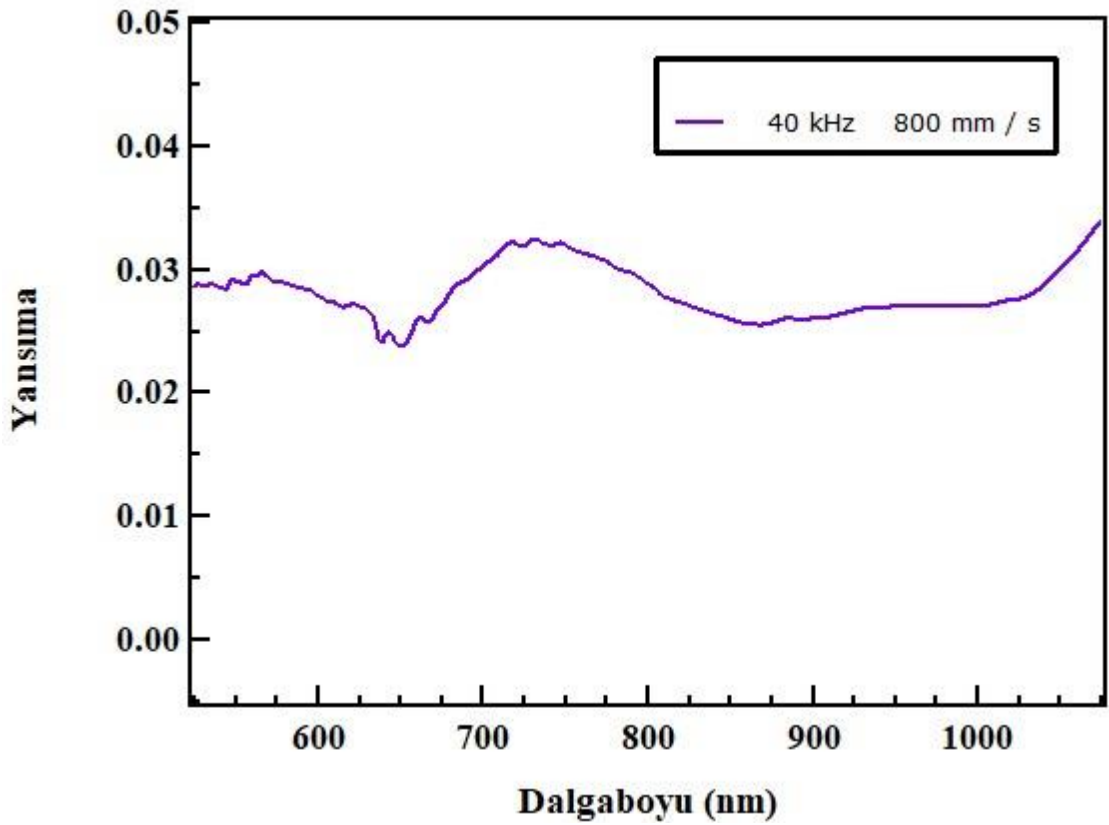
İki ayrı yönelimde dokulandırılan ve aynı lazer parametreleri ile işlenen örnekler, PN3 ile PN19 turkuaz renk ile, PN5 ve PN22 kırmızı renk ile, PN8 ve PN25 siyah renk ile, PN4 ve PN20 sarı renk ile, PN14 ve PN29 yeşil renk ile ifade edilmiştir. PN3, PN5, PN8, PN4 ve PN14 örnekleri kesikli çizgiler ile belirtilmiştir.

Temel olarak kristale dik ve paralel yönelimde yapılan dokulandırma sonucunun özdeş sonuçlar vermesini beklenmektedir. Bunun sebebi (100) yönelimli silisyum dilimin yüzeyinde atomları dizilim doğrultularının, x, y, z düzlemlerinde eşdeğer geometriye, sahip olmasıdır. Dolayısıyla silisyum dilim üzerinde birbirine dik iki hatta yapılan dokulandırma işleminin, yansıma değerleri için eşdeğer sonuçlar vereceği beklenmiştir. Burada yüzeye dik olarak ifade edilen iki hatta, silisyum diliminin yüzeyinden içeri ya da dışarı doğru değildir. Dilimin yüzeyine paralel, ancak birbirlerine dik iki hattır.

Bu parametrelerin işlenmesindeki asıl gaye, aynı durumun soğurma katsayısına etkisinin incelenmesi sırasında, atılan kontakların dokulandırma hattına dik veya paralel doğrultuda

olmasına bağılı olarak fotoiletkenlik özelliğinin değışıp, değışmediğini görebilmekti. Ancak, deney sürecinde bazı örneklerin kullanılamaz hale gelmesinden ötürü sonuçlar net ve sistematik olarak gözlenememiştir. Grafikten de görüldüğü gibi kristale dik ve paralel yönelimde dokulandırmaya göre yansıma değıerleri, beklenildiğı gibi birbirlerine yakındır.

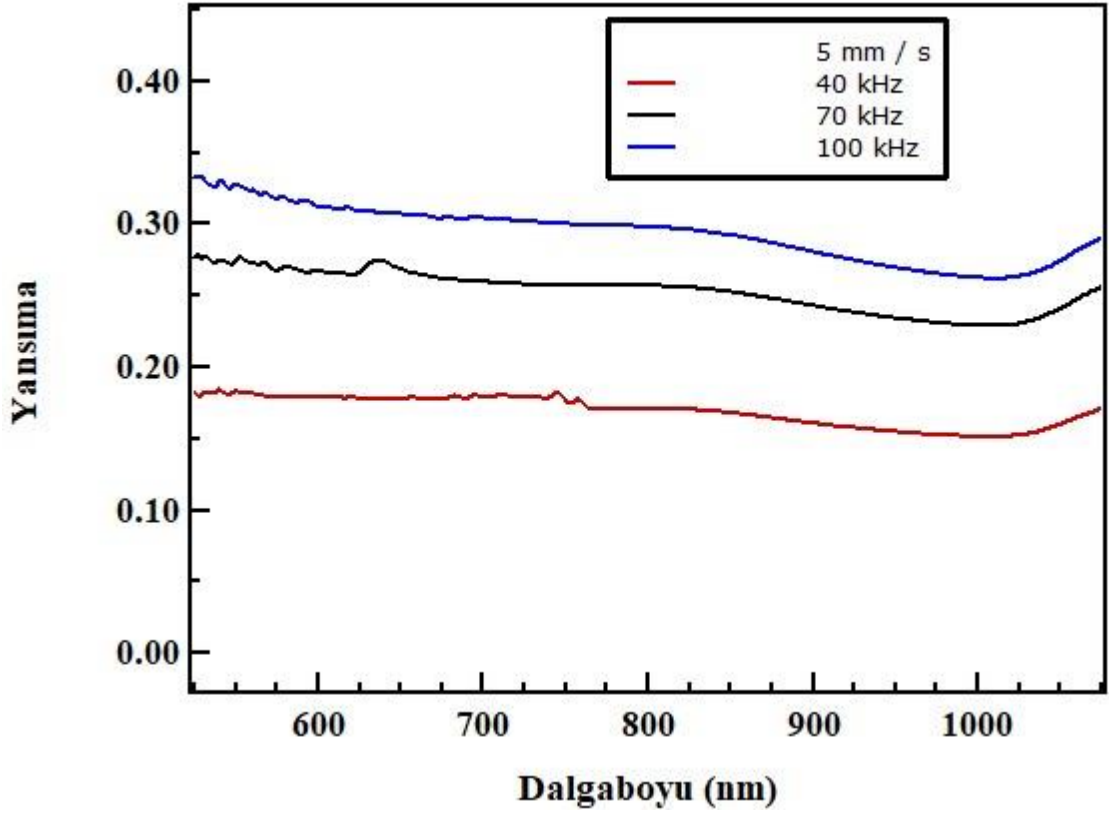
Şekil 4.7’de işlenen örnekler arasında en düşük yansıma değıerine sahip olan PN23 görülmektedir. Bu örnek, grafikten de görüldüğü gibi 800 mm/s tarama hızı ve 40 kHz atım tekrar hızı ile işlenmiştir. Çakışma oranı %96’dır. Grafikten de gözüktüğü gibi yansıma değıeri yaklaşık %3 civarlarındadır.



Şekil 4-7 PN23 numaralı örneğinin yansıma tayfı

Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da sabit lazer tarama hızlarında, farklı frekanslarda dokulandırılmış örneklerin yansıma tayfları gözükmemektedir.

Şekil 4.8’de 5 mm/s tarama hızında, sırasıyla 40, 70 ve 100 kHz lazer tekrar frekanslarıyla dokulandırılmış örneklerin yansımalarının, atım tekrar frekansı ile arttığı görülmektedir. Tablo 4.4’te, bu örneklerin dokulandırma parametreleri verilmiştir.



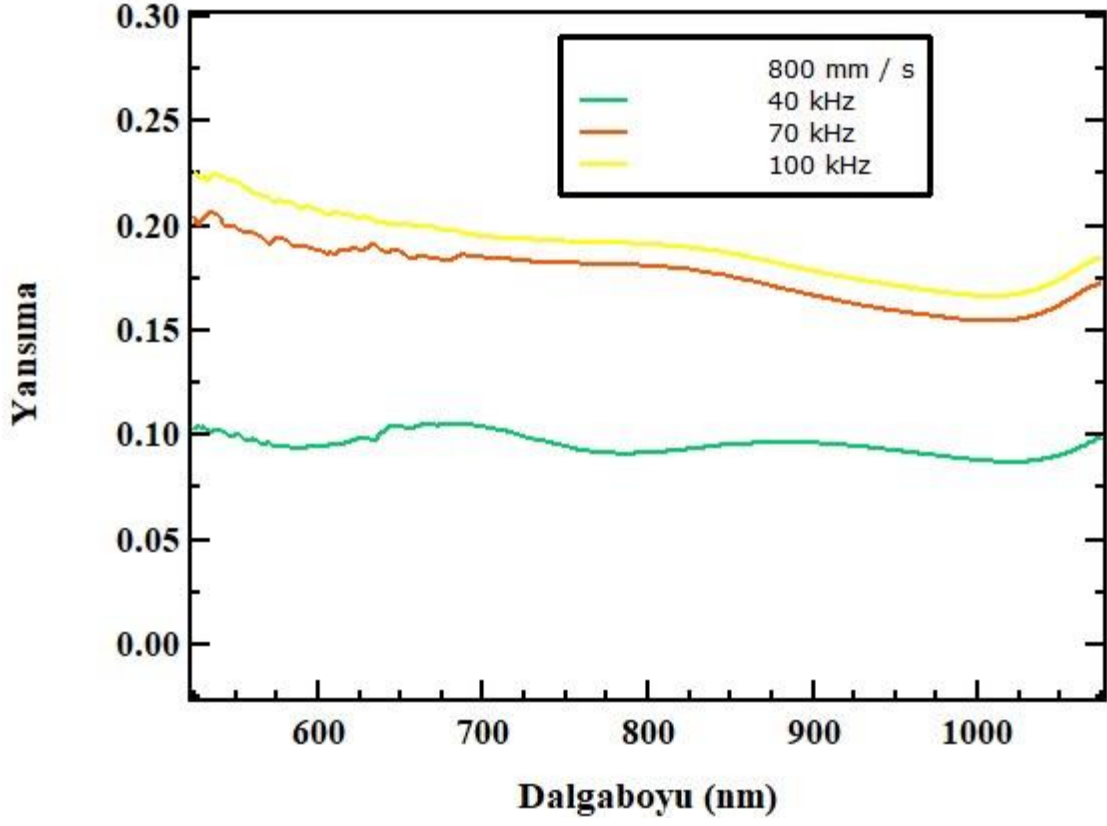
Şekil 4-8 PN1, PN2, PN3 numaralı örneklerin yansıma tayfı

Tablo 4-4 PN1, PN2, PN3 numaralı örneklerin dokulandırma parametreleri

Örnekler	Tarama Hızı (mm/s)	Atım Tekrar Frekansı (kHz)	Çakışma Oranı
PN1	5	40	0.998
PN2	5	70	0.999
PN3	5	100	0.999

Şekil 4.9’da 800 mm/s tarama hızında, sırasıyla 40, 70, 100 kHz lazer tekrar frekanslarıyla dokulandırılmış örneklerin, Şekil 4.10’da da 50 mm/s tarama hızında, sırasıyla 40, 70, 100 kHz lazer tekrar oranlarıyla dokulandırılmış örneklerin yansıma tayflarının, atım tekrar

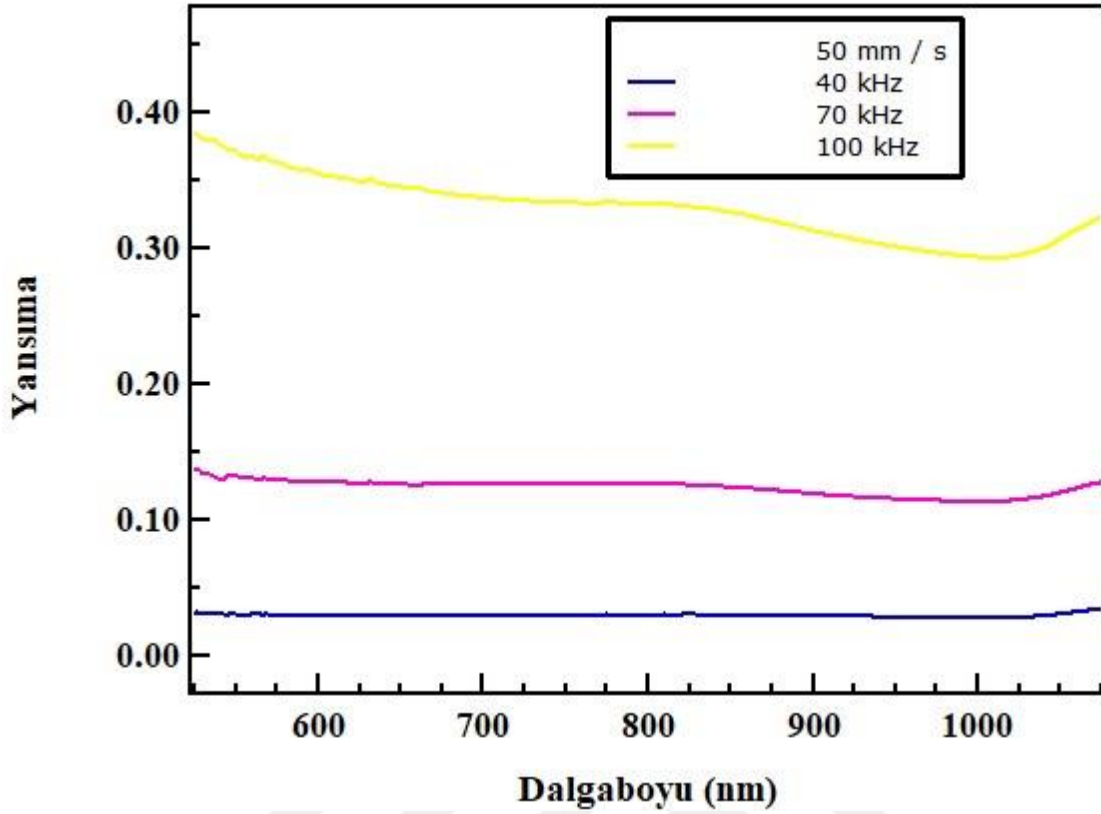
oranının hızıyla arttığı görülmektedir. Tablo 4.5 ve Tablo 4.6’da şekil 4.9 ve 4.10’daki örneklerin dokulandırma parametreleri verilmiştir.



Şekil 4-9 PN6, PN8, PN11 numaralı örneklerin yansıma tayfi

Tablo 4-5 PN6, PN8, PN11 numaralı örneklerin dokulandırma parametreleri

Örnekler	Tarama Hızı (mm/s)	Atım Tekrar Frekansı (kHz)	Çakışma Oranı
PN6	800	40	0.400
PN8	800	70	0.770
PN11	800	100	0.840



Şekil 4-10 PN22, PN24, PN20 numaralı örnekleri yansıma tayfı

Tablo 4-6 PN22, PN24, PN20 numaralı örneklerin dokulandırma parametreleri

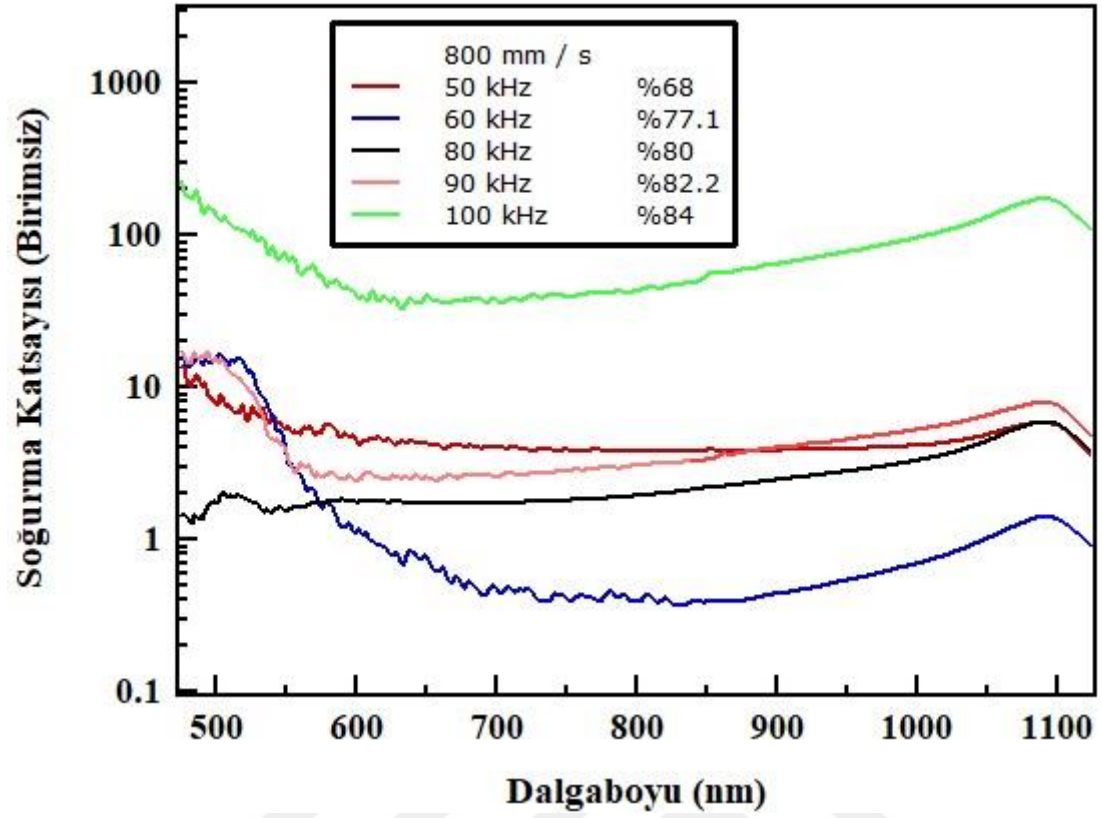
Örnekler	Tarama Hızı (mm/s)	Atım Tekrar Frekansı (kHz)	Çakışma Oranı
PN22	50	40	0.965
PN24	50	70	0.999
PN20	50	100	0.990

Grafiklerde görüldüğü gibi, aynı tarama hızlarında, farklı tarama frekanslarında örnekler incelenmiş ve artan frekans, yani artan çakışma oranı ile yansımanın arttığı görülmüştür.

Bu durumun sebebi, çakışma oranı ile yüzeylerde oluşan oyukların birbirleriyle birleşerek, ardışık bir yapıdan daha çok sürekli bir oyuk geometrisi ya da başka bir ifade ile bir kanal oluşturması ile yansımanın artması olarak açıklanabilir. Ayrıca çakışma oranının artmasıyla sebep olabilecek ısı transferinin artmasından ötürü yüzey kusurlarının artması ve kristalize olabilecek bölgelerin oluşması ile yansımanın artması mümkündür [62].

4.2.2. FT-Spektrometre Ölçüm Düzeneği ile Elde Edilen Soğurma Katsayısı Verileri

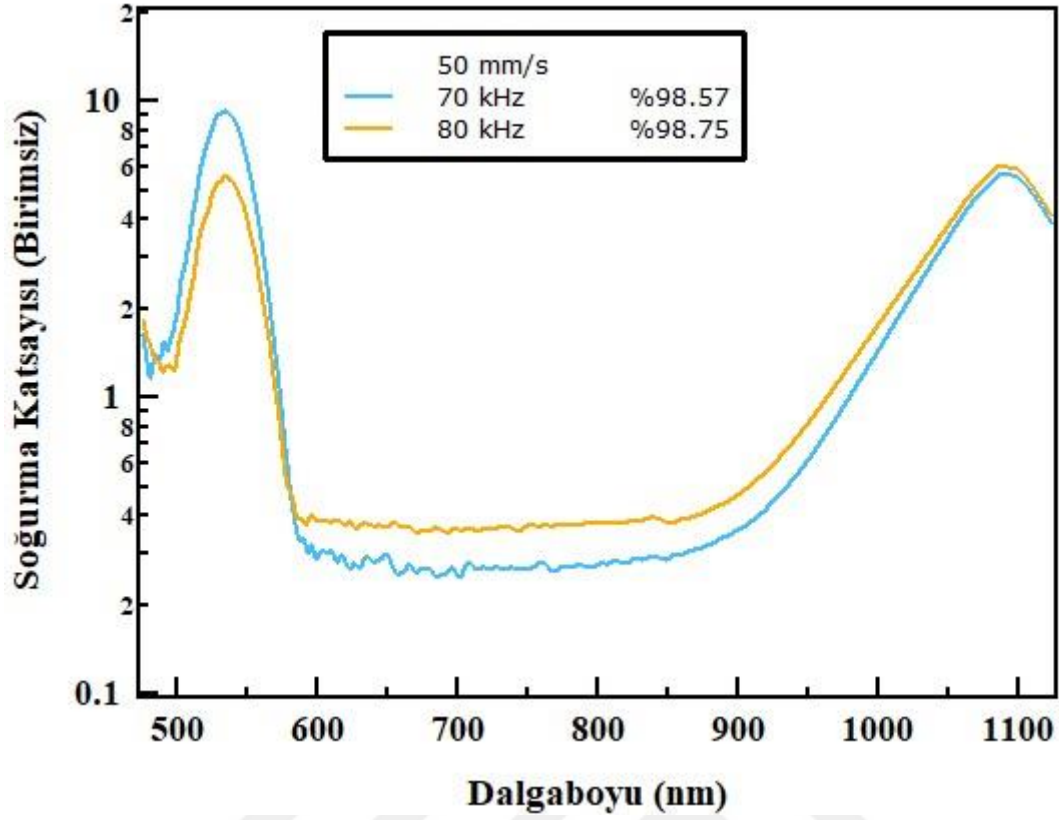
FT-Spektrometre ölçüm düzeneği kullanılarak, dokulandırılmış örneklerin dalga boylarına karşılık soğurma katsayıları ölçülmüştür. Örneklerin silisyum olmasından ötürü, beklenen soğurma tayf aralığı yaklaşık olarak 450 - 1100 nm civarlarındadır. Bu sebepten ötürü referans ölçümü için kullanılan silisyum tabanlı BPW34 ve InGaAs tabanlı IG26 fotodedektörleri ile alınan veriler bu tayf aralığına göre bölünmüştür. Alınan verilerin referans değerleri, 1100 nm ve daha kısa dalga boyları için BPW34 kullanılarak hesaplanmıştır. 1100 nm'den daha uzun dalga boyları için ise IG26 dedektörü kullanılmıştır. Böylece BPW34 fotodedektörünün, silisyum fotodedektör olmasından dolayı 1100 nm değerlerinde okuyabileceği yanlış ölçümler yok edilmiş olacaktır. Ayrıca, harmonik oluşumunu yok etmek için, 850 ile 1100 nm arasında alınan referans ve örnek ölçümleri ile 1100 nm ile 1300 nm arasındaki referans ve örnek ölçümleri, bu bölgeleri kapsayacak kısa geçirmeli, uzun geçirmeli ve bant geçirmeli optik filtreler kullanılarak alınmıştır. Elde edilen verilerin soğurma katsayısı grafiklerinin hepsi boyutsuz değerdedir. Bunun nedeni FT-Spektrometre ile yapılan ölçümlerin bağıl ölçüm olmasından ötürüdür. İstenildiği takdirde, Eş. 3.21'e göre soğurma katsayıları mutlak değerde hesaplanabilir. İkinci silisyum dilim ile yapılan işlemde, tek doğrultuda dokulandırılmış örneklerin soğurma tayfları, %90 çakışma oranının altında çakışma oranına sahip olanlar Şekil 4.8'de, %90 çakışma oranının üstünde olanlar ise Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Bu ayrımın yapılması, %90 çakışma oranının üstünde işlenmiş örneklerin belirli dalga boyu aralıklarında daha farklı bir tayf aralığına sahip olmalarından ötürü, daha net bir gözlem yapılabilmesi için tercih edilmiştir. Her iki şekilde de yapılan ölçümlerde alınan veriler, 850 nm dalga boyunun altındaki değerlerde KG5 kısa bant filtre ve 850 nm üzeri dalga boyunda RG780 uzun geçirmeli filtre kullanılmıştır.



Şekil 4-11 PA1, PA3, PA5, PA7, PA10 numaralı örneklerin soğurma katsayısı tayfı

Tablo 4-7 PA1, PA3, PA5, PA7, PA10 numaralı örneklerin dokulandırma parametreleri

Örnekler	Tarama Hızı (mm/s)	Atım Tekrar Frekansı (kHz)	Çakışma Oranı
PA1	800	50	0.680
PA3	800	60	0.770
PA5	800	80	0.800
PA7	800	90	0.820
PA10	800	100	0.840



Şekil 4-12 PA2 ve PA4 numaralı örneklerin soğurma tayfı

Tablo 4-8 PA2 ve PA4 numaralı örneklerin dokulandırma parametreleri

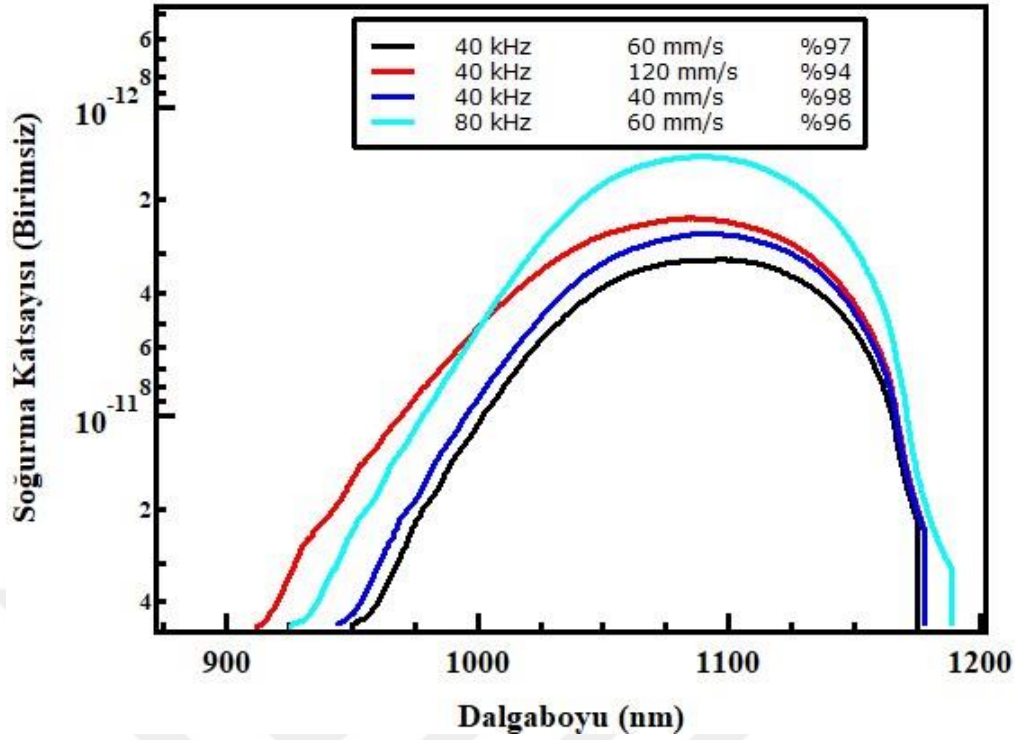
Örnekler	Tarama Hızı (mm/s)	Atım Tekrar Frekansı (kHz)	Çakışma Oranı
PA2	50	70	0.986
PA4	50	80	0.988

Soğurma katsayısı grafikleri Şekil 4.12’de verilen, PA2 ve PA4 örnekleri diğer örneklerle nazaran yüksek çakışma oranına (>%98) sahiptir. PA1, PA3, PA5, PA7, PA10 örneklerine de bakacak olursak, bütün bu değerler için 600 ile 900 nm aralığında düzgün bir soğurma tayfı olduğu görülmektedir. Ancak, yine PA2 ve PA4 örneklerinin, 538 nm merkez dalgaboyunda yaklaşık 50 nm yarı genişliğinde (full width at half maximum) artış gösteren bir soğurma tayfı bandı olduğu görülmektedir. Benzer şekilde 1070 nm civarlarında da soğurma katsayısı tayfında bir artış gözlemlenmiştir. Bu durumun gözlemlenmediği PA1, PA3, PA5, PA7, PA10 örneklerinde ise çakışma oranı %70 ile %80 civarlarında değişmektedir. Bu şartlarda PA2 ve PA4 örneklerinde, atımların yüksek çakışma oranlarına

bağlı olarak, odaklanmış lazer demet çapı ve dokulandırma derinliği göz önüne alınarak, sadece 480 ile 550 nm aralığında dalgaboyuna sahip fotonların örnekte hareket edebileceği yol uzunluğu arttırılmış olabileceği yorumlanmıştır. Şekil 4.15'te PA2 ve PA4 örneklerinin yansıma tayfında, 480 ile 550 nm aralığında bir azalmanın olduğu da görülmektedir. Bu durum, bu iki örnekte 480 ile 550 nm aralığında soğurma tayf aralığının artışı bir ölçüde desteklemektedir. Tez kapsamında, üretilen tüm örneklerde odak çapı ve lazer gücü değiştirilmediğinden, sözü edilen dalgaboylarındaki soğurma artışının bu parametrelere bağlı olduğu sonucu çıkartılabilir. Başka bir deyişle odaklanmış demet çapı da tarama hızı ve atım tekrar hızı kadar, soğurma özelliklerinde değişiklik yapabilen bir parametredir.

Bir başka durumda ise PA2 ve PA4 örneklerinde 550 ile 1000 nm aralığında, soğurma katsayısı tayfında bir azalma söz konusu olabilir. Bu azalma, daha düşük çakışma oranına sahip lazer atımları ile dokulandırılmış olan PA1, PA3, PA5, PA7, PA10 örneklerinde görülmemektedir. Söz konusu bu azalma iki ayrı hipotez tanımlamak mümkündür. Bunlardan biri şöyle açıklanabilir. Nanosaniye atımlı lazer ile yapılan dokulandırma işlemiyle, yüzeye aktarılan ısı enerjisi vasıtasıyla kristal diziliminde kopukluklar meydana gelebilir. Böylelikle yüzey rekombinasyonları artacaktır [92]. Bir diğer durumda ise, dokulandırma işleminin yüzey alanının büyümesine vesile olmasıdır. Bu durumda yüzey rekombinasyonunun olma ihtimalini artacaktır [96]. Yüzey rekombinasyonunda söz konusu olacak bu artış, fotoiletkenliğe gelen katkıyı azaltacaktır. Bu durumu çözmek için, yüzey rekombinasyonu hızını azaltmaya yönelik olarak, PECVD yöntemi ile yüzey pasivasyonu yapılmıştır [43, 53, 63]. Ancak, pasivasyon işlemi yapılarak elde edilen örneklerden, verimli bir şekilde fotoiletkenlik ölçümü alınamamıştır.

Bunların dışında, yüksek enerji akımlı nanosaniye atımlar ile yapılan dokulandırma işlemlerinde, ısı aktarımının fazla olmasından ötürü silisyum diliminin üzerinde erimiş tabakaların oluşması söz konusu olur. Bu eriyik tabakaların kristalleşmesi veya amorflaşması mümkündür [61]. Bu da yüzey yansımasını arttıracak gibi fotoiletkenlik ölçümünü de azaltacaktır. Dolayısıyla PA2 ve PA4 örneklerinin yüzeylerindeki kusurlardan ötürü, soğurulan fotonların fotoiletkenliğe katkısı azalmış olabilir. Söz konusu bu eriyik tabakalara, ileriki bölümde verilecek olan SEM görüntülerinde belirtilecektir.



Şekil 4-13 İkinci maskenin kullanılması ile üzerine alüminyum kontak atılmış PC4, PC1, PC5, PC9 örneklerinin soğurma katsayısı tayfı

Tablo 4-9 PC4, PC1, PC5, PC9 numaralı örneklerin dokulandırma parametreleri

Örnekler	Tarama Hızı (mm/s)	Atım Tekrar Frekansı (kHz)	Çakışma Oranı
PC4	50	70	0.986
PC1	50	80	0.988
PA6	50	90	0.989
PA9	50	100	0.99

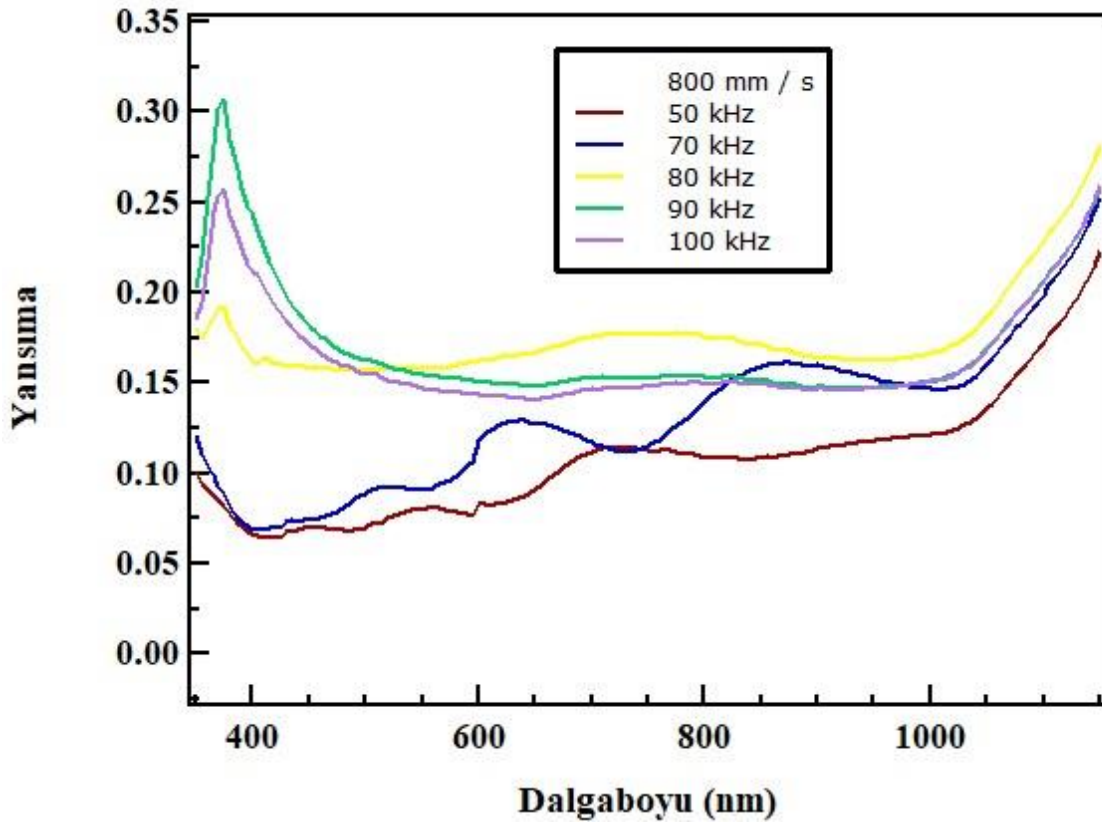
Şekil 4.13'ten de görüldüğü gibi ikinci maskenin kaplama için kullanıldığı örneklerde, soğurma tayfı 925 ila 1150 nm arasında çıkmıştır. Soğurma tayf aralığının azalması, yapılan ızgara şeklinde maskenin, örneklerin dokulandırma yönelimi ile uyumlu olmaması ve dolayısıyla kontakların örnek ile birleştiği yüzeyde, yüzey yeniden birleşmelerine sebebiyet verecek kusurlara bağlı fotoakım üretimindeki azalma ile yorumlanabilir.

4.2.3. Optik Yansıma Deney Düzeneği ile Elde Edilen Yansıma Verileri

Optik yansıma deney düzeneği kullanılarak dokulandırılmış örneklerin yansıma değerleri ölçülmüş ve bu değerlerin dalgaboylarına bağlı grafikleri çizilmiştir. Grafiklerin çiziminde, aynı tarama hızında, tek doğrultuda dokulandırılmış örneklerin farklı lazer atım tekrar

hızında yansıma değerleri çizdirilmiş, birbirlerine dik iki doğrultuda dokulandırılmış örneklerin hepsinin aynı lazer atım tekrar hızında işlenmiş olmasından dolayı, tarama hızlarına bağlı olarak grafikleri çizdirilmiş ve bütün örneklerin çıkışma oranlarına göre grafikleri gösterilmektedir.

Deney düzeneğinin kontrolünün yapıldığı bilgisayar ünitesi ile, monokromatör çıkış yarığının genişliği 2000 μm , ölçüm dalgaboyu aralığı 350 – 1100 nm ve dalgaboyu artış aralığı 5 nm olarak ayarlanmıştır. Her veri, bilgisayar veri işleme ünitesi ile 3 kere ölçülmüş ve ortalamaları alınmıştır. Referans ölçümleri için BPW34 silisyum dedektörü kullanılmış ve harmonik etkileri elimine etmek için, ölçülecek yansıma tayfında 600 ile 900 nm arasında OG550 uzun geçirmeli filtre, 900 nm den sonra ise RG715 uzun geçirmeli filtre kullanılmıştır.

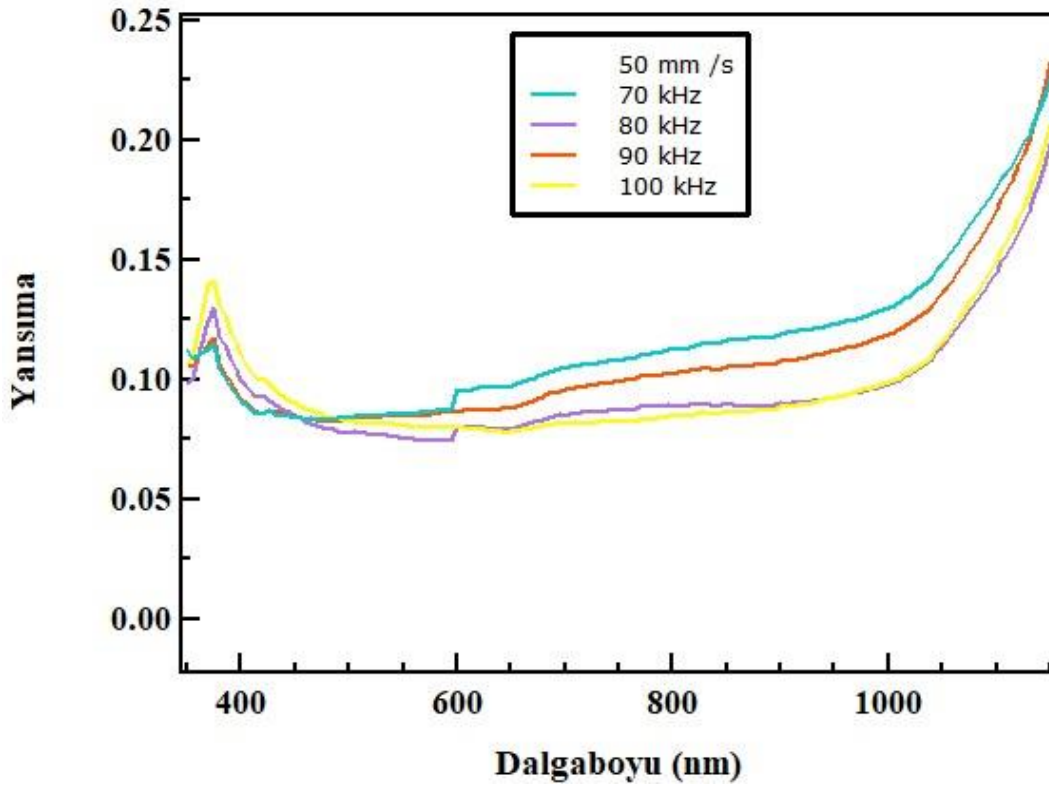


Şekil 4-14 PA1, PA3, PA5, PA7, PA10 numaralı örneklerin yansıma tayfi

Tablo 4-10 PA1, PA3, PA5, PA7, PA10 numaralı örneklerin dokulandırma parametreleri

Örnekler	Tarama Hızı (mm/s)	Atım Tekrar Frekansı (kHz)	Çakışma Oranı
PA1	800	50	0.680
PA3	800	60	0.770
PA5	800	80	0.800
PA7	800	90	0.820
PA10	800	100	0.840

Şekil 4.14'te 800 mm / s tarama hızında ve 20 W ortalama lazer gücü ile 50, 70, 80, 90 ve 100 kHz lazer atım tekrar frekanslarında dokulandırılmış örneklerin, yansıma değerlerinin dalgaboyuna bağlı grafiği gösterilmektedir.

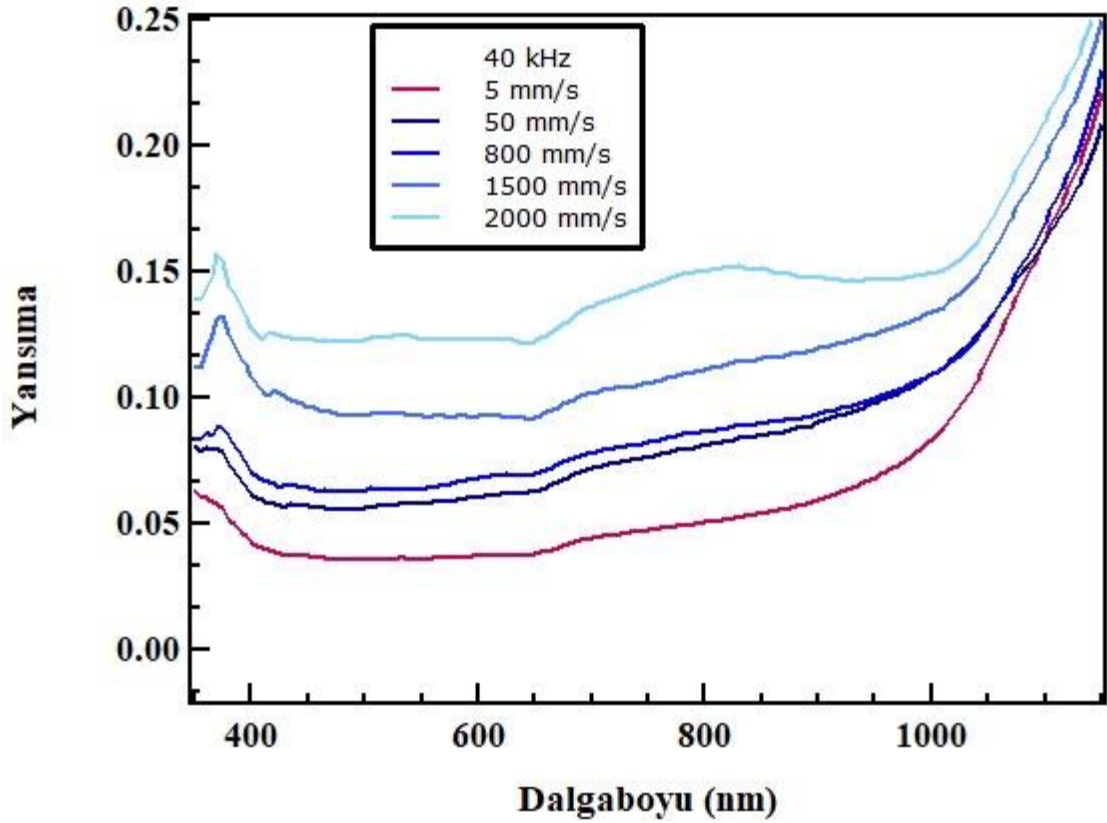


Şekil 4-15 PA2, PA4, PA6, PA9 numaralı örneklerin yansıma tayfı

Tablo 4-11 PA2, PA4, PA6, PA9 numaralı örneklerin dokulandırma parametreleri

Örnekler	Tarama Hızı (mm/s)	Atım Tekrar Frekansı (kHz)	Çakışma Oranı
PA2	50	70	0.986
PA4	50	80	0.988
PA6	50	90	0.989
PA9	50	100	0.990

Şekil 4.15'te, 50 mm / s tarama hızında ve 20 W ortalama lazer gücü ile 50, 80, 90 ve 100 kHz lazer atım tekrar frekanslarında dokulandırılmış örneklerin, yansımaya tayflarının dalgaboyuna bağlı grafiği gösterilmektedir. Bu iki grafikte de görüldüğü gibi tek doğrultuda dokulandırılmış örneklerin yansımaya değerleri, çakışma oranının artması ile artmaktadır. Bu durum, FT- Spektrometre ile aldığımız yansımaya ölçümleri ile örtüşmektedir.



Şekil 4-16 PA11, PA12, PA13, PA14, PA15 numaralı örneklerin yansımaya tayfı

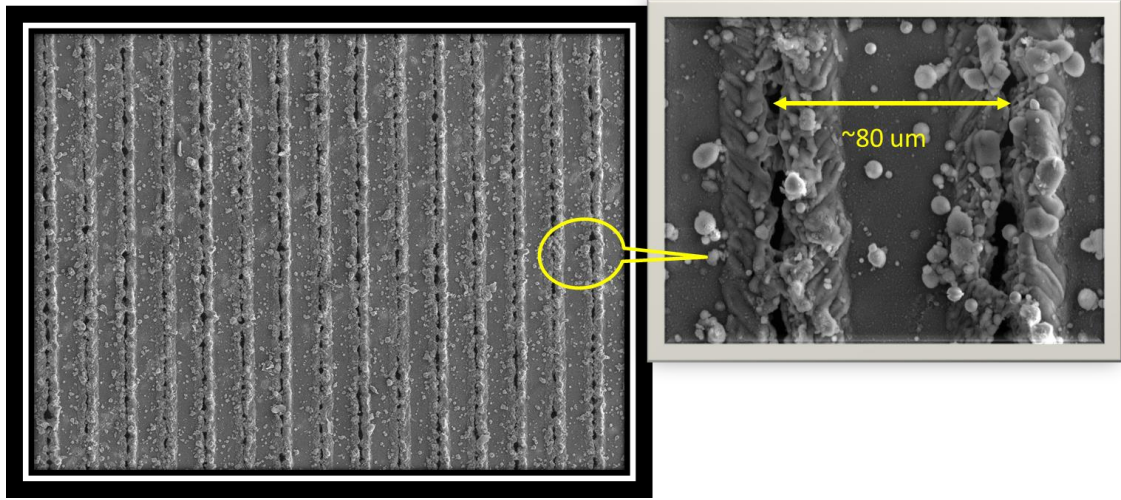
Tablo 4-12 PA2, PA4, PA6, PA9 numaralı örneklerin dokulandırma parametreleri

Örnekler	Tarama Hızı (mm/s)	Atım Tekrar Frekansı (kHz)	Çakışma Oranı
PA11	5	40	0.998
PA12	50	40	0.975
PA13	800	40	0.400
PA14	1500	40	0.250
PA15	200	40	0

Şekil 4.16’da ise, 40 kHz lazer atım tekrar frekansında birbirine dik çift doğrultuda dokulandırılmış örneklerin, yansıma tayflarının dalgaboyuna bağlı grafiği gösterilmektedir. Grafikte de görüldüğü gibi yansıma değerleri sabit frekansta, tarama hızı arttıkça artmaktadır. Aynı zamanda Şekil 4.16’dan da görüleceği gibi lazer atım çakışma oranı arttıkça, yansıma değerleri artmaktadır. Aynı zamanda çakışma oranının artışıyla, yansıma oranının azaldığı gözlemlenmiştir. Tek doğrultuda dokulandırmanın yapıldığı örneklerdeki çakışma oranının artışına bağlı yansıma oranının artmaya nazaran, çift doğrultuda dokulandırmanın yapıldığı örneklerde bu durumun tersi gözlemlenmiştir. Bu durum şu şekilde açıklanabilir. Bir doğrultuda, yüksek çakışma oranlarında, artık sürekli bir oyuğumsu yapılar bir kanala dönüşecektir. Bu yorumdan daha önce de bahsedilmiştir. Ancak bu işlem iki doğrultuda birbirine dik dokulandırma işlemi yapıldığında, iki doğrultunun kesiştiği noktalarda daha derin oyukların oluşumuna sebep olabilir. Daha yüksek çakışma oranında, bu kesişen oyukların çokluğu ile foton tuzaklamada fotonların aldığı yolun artma ihtimali söz konusu olabilir ve yansımanın azalması beklenebilir. Literatürde çakışma oranına bağlı olarak, bu konuya benzer nitelikte bir çalışma ile karşılaşılmamıştır.

4.2.4. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntülerinin Analizi

Aşağıda üç örneğin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekillerde solda kalan görüntüler 100x büyütülmüş, sağda kalan şekiller ise aynı örneklerin 750x büyütülmüş halleridir. Görüntüsü alınan örneklerin dokulandırma parametreleri, tablolar halinde şekillerin hemen altında bulunmaktadır.



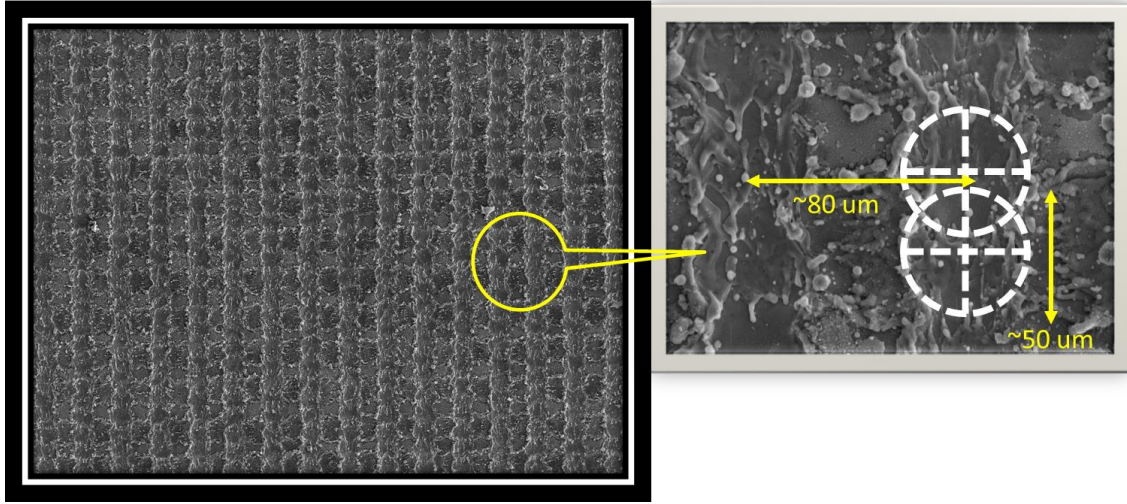
Şekil 4-17 PN 1 numaralı örneğin SEM görüntüsü

Tablo 4-13 PN1 numaralı örneğin dokulandırma parametreleri

Örnekler	Tarama Hızı (mm/s)	Atım Tekrar Frekansı (kHz)	Güç (W)	Dokulandırma Yönelimi	Çakışma Oranları
PN1	5	40	10	90	0.998

Şekil 4.17’de de görüldüğü gibi dokulandırma hatlarının arasında yaklaşık 80 μm mesafe vardır. Atımların şekilleri çok belli olmamaktadır. Bunun nedeni bu örneğin %99,8 çakışma oranı ile dokulandırılmasından ötürüdür. Bu çakışma oranı bize, atımların arasında 0.1 μm mesafe olduğunu belirtir. Dolayısıyla atımların bu denli yakın olması, bir kanal gibi gözükmelerine sebep olmaktadır.

PN 32 nolu örneğin SEM görüntüsü Şekil 4.18’de gösterilmektedir.



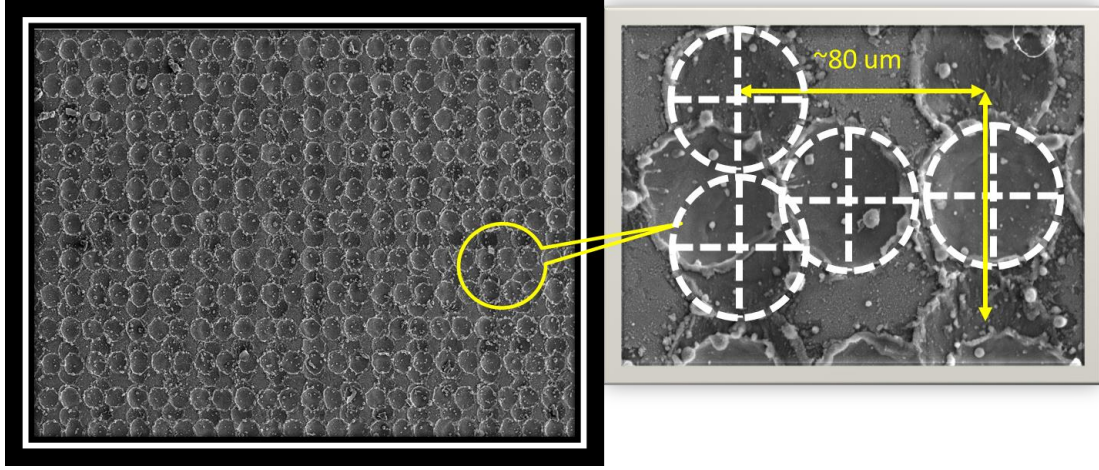
Şekil 4-18 PN 32 numaralı örneğin SEM görüntüsü

Tablo 4-14 PN32 numaralı örneğin dokulandırma parametreleri

Örnekler	Tarama Hızı (mm/s)	Atım	Tekrar	Frekansı	Güç (W)	Dokulandırma Yönelimi	Çakışma Oranları
PN32	1500	40			20	0 + 90	0.250

Şekilden de görüldüğü gibi lazer atımlarının çapları 50 μm 'ye yakın olmakla birlikte, iki dokulandırma doğrultusu arasındaki mesafe 80 μm 'ye yakındır. Çakışma oranları, belirtildiği gibi yaklaşık olarak, atımların %25'i kadardır.

PN 33 nolu örneğin SEM görüntüsü Şekil 4.19'da gösterilmektedir.

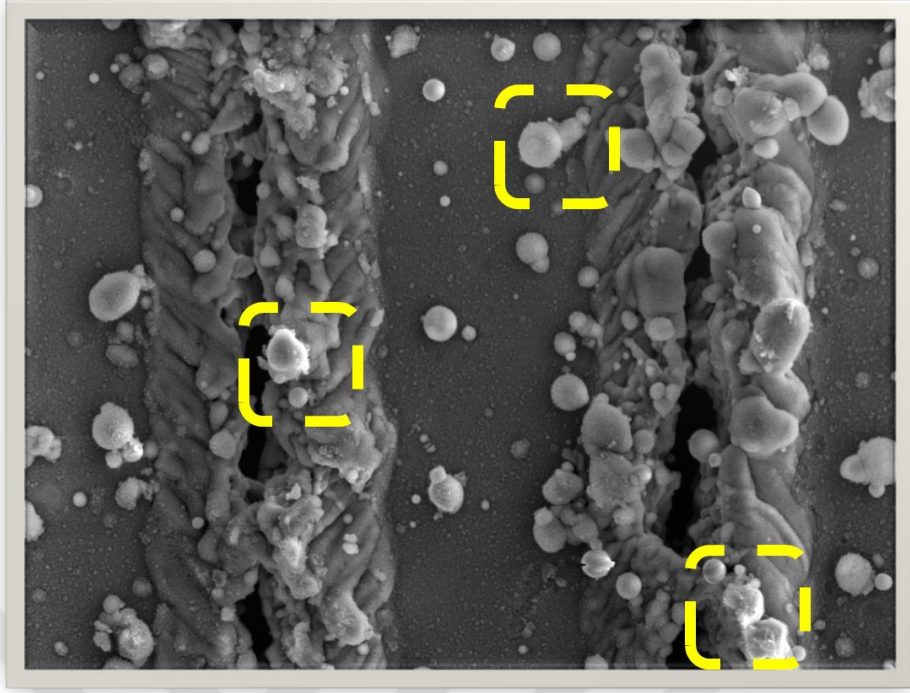


Şekil 4-19 PN 33 numaralı örneğin SEM görüntüsü

Tablo 4-15 PN33 numaralı örneğin dokulandırma parametreleri

Örnekler	Tarama Hızı (mm/s)	Atım	Tekrar	Frekansı	Güç (W)	Dokulandırma Yönelimi	Çakışma Oranları
PN33	2000	40			20	0 + 90	0

Şekilden de görüldüğü gibi lazer atımları arasındaki mesafe $50 \mu\text{m}$ 'ye yakın olmakla birlikte, iki dokulandırma doğrultusu arasındaki mesafe $80 \mu\text{m}$ 'ye yakındır. Çakışma neredeyse hiç yok gibidir. Çift doğrultuda dokulandırılmış bir örnek olmasından dolayı, doğrultulardan biri lazer ile bir diğer doğrultudan daha önce işlendiği için, altta kalmıştır.



Şekil 4-19 PN1 numaralı örneğin 750x büyütülmüş SEM görüntüsü

Şekil 4.20’de tekrar PN1 numaralı örneğin SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntüden de görüldüğü gibi, nanosaniye atımlı lazer ile dokulandırılan yüzeyde ısıl etkileşimden dolayı oluşan, yüzey kusurları söz konusudur. Bu kusurların bazıları kesikli kareler ile belirtilmiştir. Bu kusurların bazılarının parlaklığı daha fazladır. Bu da yansımının artmasına sebep oldukları yorumunu mümkün kılar.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, n tipi (100) kristal yönelimine sahip bir silisyum dilim yüzeyinde, MOPA mimarili 1064 nm merkez dalgaboyuna sahip bir fiber lazer ile kristal yönelimine dik ve paralel olmak üzere iki doğrultuda ve tek doğrultuda lazer ablasyon yöntemi ile yüzey dokulandırması yapılmıştır. Yapılan dokulandırma, dokulandırma doğrultuları arasında 80 µm mesafe olacak şekilde, kendini tekrar eden bir yapıda ve malzeme yüzeyinden ablasyon ile madde uzaklaştırılmasıyla sağlandığı için terslenmiş piramit geometrilili yapılar şeklinde gerçekleşmiştir. Bu dokulandırmanın yapıldığı lazer parametreleri, atım tekrar oranı 40 – 100 kHz aralığında, tarama hızı 5 ile 2000 mm/s aralığında ve ortalama gücü 10 ile 20 W aralığında değiştirilmiştir. Gönderilen lazer atımlarının süreleri değiştirilmemiştir. Sunulan SEM görüntülerinde de hem malzeme üzerindeki lazer atım odağının, hem dokulandırma doğrultuları arasındaki mesafenin ölçümü yapılmış ve teorik olarak hesaplanan bu uzunlukların, malzeme üzerindeki düşümleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Dokulandırılmış örneklerin yansıma tayfı FT-Spektrometre ile ölçülmüş ve bu ölçüm sırasında referans olarak, alüminyumla kaplanmış bir ayna kullanılmıştır. Bu tez kapsamı dışında aynanın yansıma tayfı daha önce ölçülmüştür. Bu değerlerin kullanılması sonucunda, kullanılan dedektörün yüzey alanı ile tayfsal tepki değerlerinin teorik olarak hesaplanması ve FT-Spektrometre ölçüm düzeneği ile elde edilen interferogramın analizleri sonucunda, dokulandırılmış örneklerin yansıma tayfı ortaya çıkartılmıştır. Daha sonra SEM görüntüleri ve yansıma değerleri analizleri sonucunda, öngörülen uygun lazer parametreleri ile ikinci bir dokulandırma işlemi 12 mm çapa sahip küçük alanlara yapılmıştır. Bu örneklerin yansıma tayfı optik geçirgenlik ölçüm düzeneğinde ölçülmüştür. Hem FT-Spektrometre hem de optik geçirgenlik ölçüm düzeneğinde, Michelson interferometresinden kaynaklanan ve yansıma ölçüm düzeneğinde oluşabilecek harmonik oluşumlarının yok edilmesi ve dolayısıyla daha düzgün sonuçların elde edilmesi için uzun geçirmeli, kısa geçirmeli ve bant geçirmeli optik filtreler kullanılmıştır. Yapılan tüm bu ölçümlerin ve analizlerin sonucunda, dokulandırılmış örneklerin atım çakışma oranına ve doğrudan olmasa da çakışma oranına etki eden parametrelerden, en çok atım tekrar hızına bağlı olduğu görülmüş ve bu yansıma tayf değerlerinde %10'un altındaki yansıma değerlerine kadar inilmiş, %3'lük yansıma değerine ulaşılmıştır.

Daha sonra, ikinci silisyum dilimde yapılan dokulandırılmış örneklerin üzerine ısı buharlaştırma yöntemi ile alüminyum kontak atılmıştır. FT-Spektrometre sisteminde

soğurma katsayısı ölçüm düzeneği ile, örneklerin soğurma katsayısı ölçülmüştür. Hem referans ölçümü için kullanılan fotodedektörlerin yalın halleriyle fotoakım ölçülürken hem de örneklerin fotoakımları ölçülürken Michelson interferometresinden kaynaklanan harmonik oluşumlarının yok edilmesi ve dolayısıyla daha düzgün sonuçların elde edilmesi için uzun geçirmeli, kısa geçirmeli ve bant geçirmeli optik filtreler tekrar kullanılmıştır. Yapılan soğurma katsayısı tayfi ölçüm işlemlerinin neticesinde, kullanılan örneklerin, lazer ile dokulandırma parametrelerinden özellikle çakışma oranına göre değişiklik gösterdiği görülmüştür. Yaklaşık %98 atım çakışma oranlarında işlenen örneklerin soğurma katsayısı tayfında, 538 nm merkez dalgaboyunda yaklaşık 50 nm yarı genişliğinde (full width half maximum) bir tepenin bulunduğunu gösteren ve 1070 nm civarlarında bir başka tepe olduğu gözlenmiştir. Çakışma oranı %80 ila %70 arasında olup da dokulandırma yapılan örneklerin ise soğurma katsayısı tayf aralığının 450 ila 1100 nm aralığında sürekli, neredeyse dalgaboyundan bağımsız bir tayfa sahip olduğu görülmüştür.

Bütün bu işlemlerin ardından ikinci silisyum dilim ile hazırlanan örneklerle, PECVD sistemi ile N_2 ve SiH_4 gazlarının 2 sccm ve 8 sccm oranlarında karışımı içerisinde, $350^\circ C$ 'de RF plazması ile yüzey pasivasyonu yapılmıştır. Pasivasyonu yapılmış örneklerin soğurma verileri incelenmiş ancak, deney sürecinde gazların karışımında meydana gelen bir sorun nedeniyle başarılı bir yüzey pasivasyonu işleminin yapılmadığının düşünülmesiyle birlikte, verimli bir şekilde fotoakım ölçümü yapılamamıştır. Dolayısıyla veriler ve tartışma bölümünde, yüzey pasivasyonu yapılmış örneklerin sonuçları verilmemiştir.

Üçüncü silisyum dilim ile yapılan denemede ise, %94 ila %99 atım çakışma oranıyla örnekler dokulandırılmış ve üzerlerine yeni yapılan maske ile örneklerle ızgara geometrisinde alüminyum kontaklar atılmış ve FT-Spektrometre ile soğurma katsayısı tayfi ölçülmüştür. Sonuçta, 900 nm'den başlayıp uzun dalga boylarına uzanan bir soğurma tayfinin olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak yapılan dokulandırma işlemlerinin neticesinde, örneklerin yansıma değerlerinin azaldığı gözlemlenmiş ve soğurma tayflarının spesifik bölgelerde oluşturulabilmesi ile ilgili fikirler edinilmiştir. Aynı zamanda bu dokulandırma işleminin, silisyumun yasak enerji aralığı için sınır bir bölgelere yakın olan 1064 nm dalga boyunda çalışan bir fiber lazer ile yapılabilirliği gösterilmiştir. Tez kapsamında Bölüm 2.6.'da da belirtildiği gibi, literatürde rastlanan bir dokulandırma çalışmasında, 50 W ortalama güce sahip, 15 kHz atım tekrar frekansı, 10 μm odak çaplı ve 50 mm/s tarama hızlı Nd:YAG

lazer ile yapılan bir dokulandırmanın ardından KOH çözeltisi ile yapılan 80 µm'lik aşındırılmayla elde edilen verilerde en iyi yansıma değeri % 5'lere indiği rapor edilmiştir [69]. Aynı şekilde silisyum dilim yüzeyinde fotolitografi yöntemi ile 4 µm derinlikte oyuklar açıldığı ve bu oyukların yüzeyleri 0.8 µm ve 5 µm aralıklar ile 40, 80 ve 160 s boyunca kuru plazma aşındırma tekniğiyle aşındırıldığı çalışmada en iyi yansıma değeri, 800-1000 nm'lerde %10'lara inmiştir [97]. Bu çalışmalar ile basit bir karşılaştırma yaparsak, yaptığımız dokulandırma yöntemiyle herhangi bir aşındırmaya gerek kalmadan, lazer atım çakışma oranlarını optimize ederek, %3'lere kadar düşük yansıma değerleri elde edilebilmiştir.

Tüm bu deneylerin ve sonuçların ışığında, soğurma katsayısı ile elde ettiğimiz kendine özgü soğurma bölgelerine sahip örneklerin, KOH çözeltisi ile aşındırılması sonucunda, özellikle elektriksel ölçümlerin daha etkin yorumlanması mümkün olabilecektir. Aynı zamanda yeni örneklerin yüzeylerine kontakların daha dikkatlice atılması ve bu örneklerin, kontakları korunarak yeni bir pasivasyon işleminden geçmesiyle, daha verimli soğurma katsayısı verileri elde edilebilir. Bunun yanında, daha önceki lazer işleme deneyimlerinden yola çıkarak, pikosaniye ya da femtosaniye lazerle dokulandırma aracılığıyla, yüzeyin aşırı ısıtılmadan lazerle etkileşimi sağlanarak, yüzey kusurlarının azaltılarak işlenebileceği düşünülmektedir. Bu önerilerin hepsi, daha sonra yürütülecek çalışmalara konu olabilecektir. Bu tezden elde edilebilecek sonuçlar, başka çalışmalar için temel başlangıç noktası olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Czochralski J., A new method for the measurement of crystallisation rate of metals, Journal of Physical Chemistry, 92 219-221, **1918**
- [2] Ericsson J., Nonlinear Circuit Device Utilizing Germanium, United States Patent, No. 2,530,110, **1950**
- [3] S.R Wenham, M.A. Green, M.E. Watt, R.Corkish, Applied Phovoltaics Second Edition, Earthscan, 1 -2, **2007**
- [4] S.R Wenham, M.A. Green, M.E. Watt, R.Corkish, Applied Phovoltaics Second Edition , Earthscan, 38-40, **2007**
- [5] S.M Sze, M.K.Lee Semiconductors devices physics and technology 3rd, Wiley, 83 – 122, **2010**
- [6] Kaustuv D., Soma R., Dr. Anup M., Utpal G., Review on different front surface modification of both n+-p-p+and p+-n-n+C- Si solar cell, Si solar cell, Materialstoday: Proceedings, 4, 12698-12707, **2017**
- [7] Ujwol P., Vladislav J., Henning K., Philipp O., Helmut S, Dietmar K., Plasmonic effects in amorphous silicon thin film solar cells with metal back contacts, Optics Express, 20, 6340-6347, **2012**
- [8] Jia Z., Ching M., Zongfu Y., Shanhui Y., Yi C., Nanodome solar cells with efficient light management and self-cleaning, Nano Letters, 10, 1979-1984, **2010**
- [9] Ulrich W. P., Etienne M., Bart F., Reinhard C., Uwe R., Design of nanostructured plasmonic back contacts for thin-film silicon solar cells, Optics Express, 19, A1219-A1230, **2011**
- [10] Vivian E., Marc A. V., Hongbo B. T. L., Ewold V., Robert J. W., Ruud E. I. S., Harry A. A., Albert P., Light trapping in ultrathin plasmonic solar cells, Optics Express, 18, A237-A245, **2010**
- [11] Zhou D., Biswas R., Photonic crystal enhanced light-trapping in thin film solar cells, Journal of Applied Physics, 103, **2008**

- [12] Jäger, K., Fischer, M., Van Swaaij, Zeman, M., A scattering model for nano-textured interfaces and its application in opto-electrical simulations of thin-film silicon solar cells, *Journal of Applied Physics*, 111, **2012**
- [13] Bittkau, K, Hoffmann, A, Carius, R, Improvement of light trapping in thin-film silicon solar cells by combining periodic and random interfaces, *Canadian Journal of Physics*, 92, 888-891, **2014**
- [14] Aswin H., Taweewat K., Ihsanul A. Y., Shinsuke M., Makoto K., ZnO films with very high haze value for use as front transparent conductive oxide films in thin-film silicon solar cells, *Applied Physics Express*, 3, **2010**
- [15] Michael B., Jürgen H., Melanie S., Gunnar S., Helmut S., Bernd R., Matthias W., The effect of front ZnO:Al surface texture and optical transparency on efficient light trapping in silicon thin-film solar cells, *Journal of Applied Physics*, 101, **2007**
- [16] Corsin B., Ching M., Karin S., Jordi E., Franz H., Mathieu C., Mathieu B., Matthieu D., Duncan T. L. Alexander, Mar C., Yi C., Christophe B., Light trapping in solar cells: Can periodic beat random, *ACS Nano*, 6, 2790-279, **2012**
- [17] Hitoshi S., Kimihiko S., Nana H., Michio K., Relationship between the cell thickness and the optimum period of textured back reflectors in thin-film microcrystalline silicon solar cells, *Applied Physics Letters*, 102, **2013**
- [18] Konagai M., Present status and future prospects of silicon thin-film solar cells *Japanese Journal of Applied Physics*, 50, **2011**
- [19] M.F. Abdullah, M.A. Alghoul, Hameed N., Nilofar A., Shideh A., B. Yatim, K. Sopian, Research and development efforts on texturization to reduce the optical losses at front surface of silicon solar cell, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 380-398, **2016**
- [20] Y.Yang, M.A.Green, A.Ho-Baillie, H.Kampwerth, S.Pillai, H.Mehrvarz, Characterization of 2-D reflection pattern from textured front surfaces of silicon solar cells, 115, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 115, 42-51, **2013**
- [21] Marta L., Aldrin A., Joan V., Growth and Properties of ZnO:Al on Textured Glass for Thin Film Solar Cells, *International Journal of Photoenergy*, 2014, 10, **2014**

- [22] Wendi Z., Eerke B., Janine W., Hilde S., Joachim Ki., Aad G., Jürgen H., Rough glass by 3d texture transfer for silicon thin film solar cells, *Physica Status Solidi C* 7, 1120-1123, **2010**
- [23] A. W. Snyder, J Love, *Opt. Waveguide Theory*, **1983**
- [24] Heel, Van A. C. S., A new method of transporting optical images without aberrations. *Nature*, 173, **1954**.
- [25] Snitzer E., Po H., Hâkimi F., Tumminelli R., B. C. McCollum, Double clad offset core Nd fiber laser, *Optical Fiber Sensors Topical Meeting*, paper PD 5, **1988**.
- [26] M. Vanecek, A. Poruba, Fourier-transform photocurrent spectroscopy of microcrystalline silicon for solar cells, *Applied Physics Letters*, 80, 719, **2002**
- [27] https://www.physicsoftheuniverse.com/topics_relativity_light.html, 24 Eylül 2018'te erişildi.
- [28] John C. L., *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, Elsevier, United Kingdom, 397–401, **2016**
- [29] F.L.Pedrotti, Leno M. Pedrotti, Leno S. Pedrotti, *Introduction to optics third edition*, 1- 12, **2006**
- [30] F.L.Pedrotti, Leno M. Pedrotti, Leno S. Pedrotti, *Introduction to optics third edition*, 131-145, **2006**
- [31] <https://plus.google.com/114666298777945569647>, 24 Eylül 2018'de erişildi.
- [32] Katsunari O., *Wave Theory of Optical Waveguides*, Elsevier, United States of America, 1-12, **2006**
- [33] A. Tünnermann, T. Schreiber, J. Limper, Fiber lasers and amplifiers: an ultrafast performance evolution, *Applied optics*, 49, F71-F78, **2010**
- [34] J. Day, S.Senthilarasu, T. K. Mallick, Improving Spectral Modification For Applications İn Solar Cells: A Review, *Renewable Energy*, 132, 186-205, **2019**

- [35] S. Mondal, A. Soman, A. Antony, Optimization and fabrication of rear surface passivated c-si solar cells on 156 cm² area with local point contacts made by microsecond-pulsed laser firing, Solar Energy, 158, 360-366, **2017**
- [36] K. Himeno, Basics and features of high-power fiber laser, Fujikura technical Review, **2015**
- [37] M. Oh, J. Yi, Measurement of the absorption coefficient of yb-doped fibers by a side light analysis, Department of physics, Yeungnam university, 67, 409-503, **2017**
- [38] R. Paschotta, Pulsed Lasers, Fiber-coupled Diode Lasers, https://www.rp-photonics.com/fiber_coupled_diode_lasers.html 24 Eylül 2018'de erişildi.
- [39] Kuniharu H. Pulse shape tuning for 1064 nm nanosecond mopa fibre laser, Procedia engineering, 123-126, **2016**
- [40] R. Paschotta, Rare-earth-doped fibers, https://www.rp-photonics.com/rare_earth_doped_fibers.html 24 Eylül 2018'de erişildi.
- [41] K. Zhanga, A. N. Kleitb, A. Nieto, An economics strategy for criticality – Application to rare earth element Yttrium in new lighting technology and its sustainable availability, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 77, 899-915, **2017**
- [42] R. Paschotta, Pulsed Lasers, https://www.rp-photonics.com/pulsed_lasers.html 24 Eylül 2018'de erişildi.
- [43] Ngwe Z., Keith M., Sara B., Abraham V., Teng K., Kean F., Matthew S., Evan F., Andrew B., Polyimide for silicon solar cells with double-sided textured pyramids, Solar energy materials and solar cells, 183, 200-204, **2018**
- [44] Francois Brygo, Dutouquet, F. Le Guern, R. Oltra, A. Semerok, J.M. Weulersse, Laser fluence, repetition rate and pulse duration effects on paint ablation, Applied surface science, 252, 2131-2138, **2006**
- [45] Anonime, What is M2, ophir 227, **2011**
- [46] X. Luo · P. Chen · Y. Wang, Power content M²-values smaller than one, Applied physics, 181-185, **2009**

- [47] R. Paschotta, M^2 Factor, https://www.rp-photonics.com/m2_factor.html 24 Eylül 2018'de erişildi.
- [48] Emmett L. Fundamentals of fiber optics, 2-8, **1993**
- [49] Amirreza F., Farshid M., Ghainia Jamshid S., Effects of pulse duration and overlapping factor on melting ratio in preplaced pulsed Nd:YAG laser cladding, Optics and lasers in engineering, 51, 69-76, **2013**
- [50] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Bohr.html>, 24 Eylül 2018'de erişildi.
- [51] NanoMARK fiber lazer markalama sistemleri ve flast nano fiber lazer kaynakları, <https://www.fiberlast.com.tr/nanomark-lazer-markalama-sistemleri/> 24 Eylül 2018'de erişildi.
- [52] S.O. Kasap, Optoelectronics an Photonics: Principles and Practices 2nd edition prentice hall, **2013**
- [53] Xiaowan D., Rui J., Guoyu S., Hengchao S., Ke T., Chao Z., Pengfei Z., Zhi J., Xinyu L. The influence of surface structure on diffusion and passivation in multicrystalline silicon solar cells textured by metal assisted chemical etching (MACE) method, Solar energy materials and solar cells, 186, 42-49, **2018**
- [54] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/pn-junctions/types-of-recombination>, 24 Eylül 2018'de erişildi.
- [55] A.K. Asundi, P. Rastogi, Optics and Lasers in Engineering, 69-76, **2013**
- [56] Electrons and holes in a semiconductor, https://people.eecs.berkeley.edu/~hu/Chenming-Hu_ch1.pdf, 24 Eylül 2018'de erişildi.
- [57] B.Mark, An Introduction to Atoms Mark Bishop ,69-94, **2007**
- [58] Jenkins, J, Basic Principles of Electronics, 2, 33-37, **1971**
- [59] S.M Sze, M.K.Lee, Semiconductors devices physics and technology 3rd, Wiley 100, **2010**

- [60] Anonim, Energy Bands in Solids, 51-52
- [61] Gerrit H., Mario B., Klaus S., Tobias W., Marcel L., Alexander L., Investigation of ablation mechanisms for selective laser ablation of silicon nitride layers, Energy procedia, 8, 592-597, **2011**
- [62] Emre Yağcı, Bülent Öktem, Y. Ozan Aydın, Koray Eken, F. Ömer Ilday, Nanosaniye atımlı fiber lazerle renkli markalama, <https://www.fiberlast.com.tr/fiber-lazerle-renkli-markalama/> 24 Eylül 2018'de erişildi.
- [63] Andres C., Yimao W., Di Y., Christian S., Thomas A., Xinyu Z., Jie C., James B., Carrier population control and surface passivation in solar cells, Solar energy materials and solar cells, 184, 38-47, **2018**
- [64] MIT OpenCourseWare, Lecture 18: The P-N junction, MIT materials and science engineering, 1-16, **2013**
- [65] Bilgen S., Structuring of surface for light management in monocrystalline si solar cells, a thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of Middle east technical university, 24-26, **2015**
- [66] Chih-Hung H., Jia-Ren W., Yen-Tien L., Dennis J. Flood , Andrew R. Barrond, Lung-Chien C., Fabrication and characteristics of black silicon for solar cell applications: An overview, Materials Science in Semiconductor Processing, 2-17, **2014**
- [67] Kontermann, S. Gimpel, T., Baumann, A. L., Guenther, K. M., Schade, W., Laser processed black silicon for photovoltaic applications, Energy procedia, 27, 390-395, **2012**
- [68] Campbell, P., Green, M. High performance light trapping textures for monocrystalline silicon solar cells, Solar energy materials, 65, 369-375, **2001**
- [69] J. D. Hylton, A. R. Burgers, W. C. Sinke Absorption in thin textured silicon wafers, Netherlands energy research foundation, Solar energy conference, 1-2, **1997**
- [70] Stuart R. Wenham, Martin A. Green, Laser grooved solar cell, United states patent, **1983**

- [71] Fath P, Borst P, Zechner C, Bucher E, Willeke G, Nayaranan S. Progress in a novel high-throughput mechanical texturization technology for highly efficient multicrystalline silicon solar cells, *Solar energy materials and solar cells* 48, 229-236, **1997**;
- [72] Gee JM, Schubert WK, Tardy HL, Hund TD, Robinson G. The effect of encapsulation on the reflectance of photovoltaic modules using textured multicrystalline-silicon solar cells, *IEEE Photovolt Spec Conf.* 1555–1558, **1994**
- [73] Abubaker H.Hamad, Effects of Different Laser Pulse Regimes (Nanosecond, Picosecond and Femtosecond) on the Ablation of Materials for Production of Nanoparticles in Liquid Solution, *In tech*, 305-325, **2016**
- [74] John F. Ready, *LIA Handbook of Laser Materials Processing*, Laser Institute of America, 182-183, **2001**
- [75] Dobrzanski LA, Drygala A. Surface texturing of multicrystalline silicon solar cells, *Achievements in materials and manufacturing engineering*, 31, 77–82, **2008**
- [76] John F. Ready, *LIA Handbook of laser materials processin*, Laser institute of america, 167-207, **2001**
- [77] Photovoltaics Report. Fraunhofer ISE; **2015**.
- [78] Introduction to fourier transform infrared spectrometry, *Renewable and sustainable energy reviews*, 50, 1-8, **2015**
- [79] Holovski J., Fourier transform photocurrent spectroscopy on non-crystalline semiconductors, *In tech open*, 257-282, **2011**
- [80] Duley, W.W., *Laser processing and analysis of materials*, Plenum press, New york, **1983**
- [81] Mark F., *Optical Properties of Solids*, Oxford, 5, **2001**
- [82] Mark F., *Optical Properties of Solids*, Oxford, 1, **2001**
- [83] Tauc J., Grigorovici R., Vancu A., Optical properties and electronic structure of amorphous germanium, *Physica Status Solidi B*, 15, 627-637, **1966**

- [84] Carslaw, H.S., Conduction of heat in solids, Oxford University Press, **1959**.
- [85] Charlene W. Billings, John T., Lazerler İşlenmiş ışığın teknolojisi ve kullanımı, Tubitak Popüler Bilim Kitapları, 57-61, **2011**
- [86] Charlene W. Billings, John T., Lazerler İşlenmiş ışığın teknolojisi ve kullanımı, Tubitak Popüler Bilim Kitapları, 75-90, **2011**
- [87] S.O. Kasap, Optoelectronics an Photonics: Principles and Practices, prentice hall 7-15, **1966**
- [88] R. Paschotta, Master Oscillator Power Amplifier, https://www.rp-photonics.com/master_oscillator_power_amplifier.html, 24 Eylül 2018'de erişildi.
- [89] Saito Y, Kosuge T., Honeycomb-textured structures on crystalline silicon surfaces for solar cells by spontaneous dry etching with chlorine trifluoride gas, Solar energy materials and solar cells, 91, 1800-1804, **2007**
- [90] Gangopadhyay U., Dhungel SK., Basu PK., Dutta SK., Saha H., Yi J., Comparative study of different approaches of multicrystalline silicon texturing for solar cell fabrication, Solar energy materials and solar cells, 91, 285-289, **2007**
- [91] Vazsonyi E., Ducso C., Pekker A., Characterization of the anisotropic etching of silicon in two-component alkaline solution, Journal of micromechanics and microengineering, **2007**
- [92] S. Binetti, Alessia L.D., Andrea R., Beat J., Beat N., Chiara B., Cesare F., D. Scorticati, Luca L., Sergio P., Picosecond laser texturization of mc-Silicon for photovoltaics: a comparison between 1064nm, 532nm and 355nm radiation wavelengths, Applied Surface Science, 371, **2016**
- [93] Chichkov, B.N., C. Momma, S. Nolte, F. von Alvensleben and A. Tünnermann, Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids, Applied physics, 109-115, **1996**
- [94] Momma, C., B.N. Chichkov, S. Nolte, F. von Alvensleben, A. Tünnermann, H. Welling and B. Wellegehausen, Short-pulse laser ablation of solid targets, Optics communications, 134-142, **1996**

- [95] L.A. Dobrzański, A. Drygała, Laser texturization in technology of multicrystalline silicon solar cells, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 29, 7-14, **2008**
- [96] Luke P. J., Keith R. M., Recombination at textured silicon surfaces passivated with silicon dioxide, Journal of applied physics, 105, **2009**
- [97] Hayriye Serra Altınoluk, Light Trapping Micro And Nanostructure Fabricated By Top Down Approaches For Solar Cell Applications, A Thesis Submitted To The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University, **2016**
- [98] Dirk-Holger Neuhaus, Adolf Munzer, Industrial silicon wafer solar cells, Advances in optoelectronics, 2007, **2007**
- [99] M. H. Çolpan, Lazer gücünün fonksiyonu olarak lazer yüzey işleme üzerine bir çalışma, Selçuk üniversitesi fen bilimleri enstitüsü fizik anabilim dalı, **2008**

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Volkan Türker

Doğum Yeri : Fatih

Medeni Hali : Bekar

E-posta : volkanfiz@hotmail.com

Adresi : Toki Yaprıcık Konutları, 6.Bölge, b1, 19 /37 ETİMESGUT /
ANKARA - Yaprıcık

Eğitim

Lise : Üsküdar Ahmet Keleşoğlu Anadolu Lisesi

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği
Bölümü

Yüksek Lisans : Hacettepe Üniversitesi Fen Fakültesi Temiz Tükenmez Enerjiler
Anabilim Dalı

Yabancı Dil ve Düzeyi

- İngilizce (iyi)

İş Deneyimi

- FiberLAST A.Ş. 2016 -

Deneyim Alanları

-

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

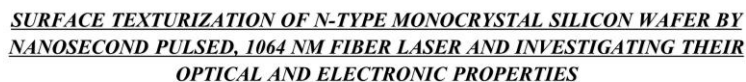
-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

-

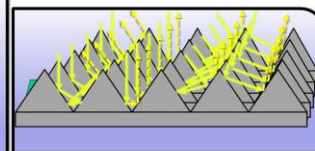
Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

- PVCON 2018, Poster Sunumu, Odtü Fizik Bölümü, 4-6 Temmuz 2018, Ankara



* Hacettepe University, Department of Renewable Energies, Beytepe, 06800 Ankara, Turkey
 † FiberLAST, Ltd., 06531, Ankara, Turkey,
 ‡ Hacettepe University, Physics Engineering Department, 06800, Ankara, Turkey

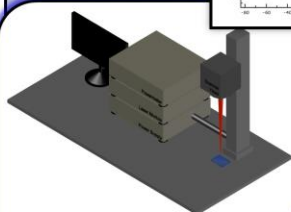
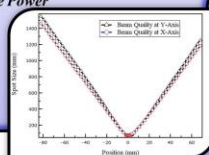
- ✧ *Solar cells are one of the most important energy source in renewable energies.*
- ✧ *Reflection on back and front surfaces of solar cells is one of the biggest problem for efficiency.*
- ✧ *Light trapping could prevent reflection loss for solar cell.*
- ✧ *For inverse pyramid texturisation, laser ablation is usable method*
- ✧ *With MOPA Fiberlaser, frequency and pulse width could be change independently and beam quality near refractive index*



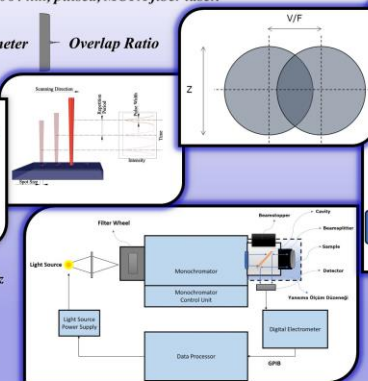
- ❖ To prevent the reflection loss and better absorption spectra on solar cell surfaces with texturisation by 1064nm nanosecond laser.
- ❖ To investigate the electrical and optical properties of texturised silicon wafer by using FTPS system.

❖ **Material Prossesing: Silicon wafer texturisation with 1064 nm, pulsed, MOPA fiber laser.**

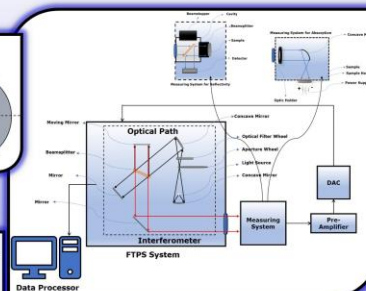
- ❖ **Changeable Frequency**
- ❖ **Changeable Scan Speed**
- ❖ **Changeable Average Power**
- ❖ **Process Direction**
- ❖ **Pulse Width**
- ❖ **M²**



- ❖ 40 kHz- 100 kHz
- ❖ 20 W
- ❖ 200 ns
- ❖ 1mm/s -10m/s
- ❖ 50 μ m
- ❖ $M^2 = 1.2$



❖ **Reflection Coefficient Measuring:** Reflection spectra was measured by optical transmission system.



❖ **Absorption Coefficient Measuring:** Absorption spectra was measured by FTPS system.

❖ **Reflection Coefficient Measuring:** Reflection spectra was measured by FTIR system.

❖ *Fast data processing between 350 nm – 2200 nm*

❖ On one sided and two sided pattern on silicon processing, reflection spectrum data by using optical transmission system.

❖ On one sided patern on silicon processing, reflection spectrum data by using FTIR system.

We have shown that,

- As overlap ratio increase on one sided texturised samples, reflection spectrum of material will be decreased and also for two sided texturised samples reflection spectrum will be increased oppositely
- As overlap ratio is nearly more than %98, absorption spectrum of samples have some specific region between 440 nm and 560 nm.
- For all experiment we have done by laser texturisation by 1064 nm laser, we have managed that reflection of silicon was decreased and absorption was increased.

REFERENCES

- [illegible]



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
TEMİZ TÜKENMEZ ENERJİLER ANA BİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 26/ 09./ 2018

Tez Başlığı / Konusu: Nano Saniye Atımlı 1064 nm Fiber Lazer ile Yüzey Dokulandırmasının Tek Kristal Silisyumun Optik Yansıma ve Soğurmasına Etkisi

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 73 sayfalık kısmına ilişkin, 26 / 09 / 2018 tarihinde ~~şahsım~~/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 1 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar dâhil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Tarih ve İmza

28.09.2018

Adı Soyadı: Volkan Türker
Öğrenci No: N14221275
Anabilim Dalı: Temiz Tükenmez Enerjiler
Programı: Yüksek Lisans
Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Doç. Dr. Arın Başçiftçi
(Unvan, Ad Soyad, İmza)