T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BULK MALZEMELERİN VE İNCE FİLMLERİN LAZER ABLASYON EŞİK ENERJİ YOĞUNLUKLARININ D-SCAN YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

Sercan BAYIR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler
Anabilim Dalı

Nisan-2018
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BULK MALZEMELERİN VE İNCE FİLMLERİN LAZER ABLASYON EŞİK ENERJİ YOĞUNLUKLARININ D-SCAN YÖNTEMİ İLE BELİRLENMESİ

Sercan BAYIR

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ

2018, 81 Sayfa

Jüri
Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ
Prof. Dr. Bedrettin MERCİMEK
Doç. Dr. Mustafa KOYUNCU

Lazer-malzeme etkileşimi sonucunda ablasyon gerçekleşmesi için lazer ve işlenen malzemenin özelliklerine bağlı olan bir lazer enerji yoğunluğu değerinin aşılması gerekir. Bu değer lazer ablasyon eşik enerji yoğunluğu (F_{th}) olarak tanımlanır. Bu değerin bilinmesi, ablasyon işlemi ile elde edilmesi istenen sonuçlara uygun deneysel parametrelerin seçilmesi için önemlidir. Bu çalışmada bulk haldeki metallerin ve ince filmlerin lazer ablasyon eşik enerji yoğunlukları D-scan yöntemi ile hesaplanmıştır. Her bir metal hedeften PLD tekniği ile üç farklı kalınlıkta ince filmler üretilmiştir. D-scan işlemleri femtosaniye (fs) ve nanosaniye (ns) lazer sistemlerinde farklı dalga boyları ile uygulanmıştır. İki lazer sistemi ile çok sayıdaki malzeme yapısı için elde edilen sonuçlar kendi aralarında ve literatür verileri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu fs lazer sistemi için elde edilen lazer ablasyon eşik değerlerinin uygun değerler olduğu görülmüştür. Ns lazer sistemi ile elde edilen sayısal verilerin ise gerçek F_{th} değerleri olmadığı, yine de eşik enerji yoğunluğu değerlerine benzer özellikler gösterdikleri sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: D-scan, enerji yoğunluğu, eşik, femtosaniye, lazer, nanosaniye, PLD

ABSTRACT

MS THESIS

DETERMINING ABLATION THRESHOLD FLUENCES OF BULK AND THIN FILM MATERIALS USING D-SCAN METHOD

Sercan BAYIR

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF SELÇUK UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN ADVANCED MATERIALS AND NANOTECHNOLOGY

Advisor: Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ

2018, 81 Pages

Jury
Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ
Prof. Dr. Bedrettin MERCİMEK
Doç. Dr. Mustafa KOYUNCU

In order to achieve ablation as the result of the laser-material interaction, it is necessary to exceed a certain laser fluence value that depends on the characteristics of the laser and the workpiece. This value is defined as the ablation threshold fluence (F_{th}). It is important to have F_{th} value to choose experimental parameters that are suitable for the desired results of the ablation process. In this study, F_{th} of bulk metals and thin films are calculated using D-scan method. Thin films are produced in three different thicknesses using PLD technique for each metal target. D-scan processes are applied through different wavelengths in femtosecond and nanosecond laser systems. The gathered results obtained for many material structures are compared to each other and the literature data. The results show that the ablation threshold values obtained by the fs laser pulses are appropriate values. It is also seen that numerical data obtained by the ns laser pulses are not exact F_{th} values though; they show similar characteristics to the threshold values.

Keywords: D-scan, femtosecond, fluence, laser, nanosecond, PLD, threshold

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimimin ilk gününden bu tez çalışmasının tamamlanmasına kadar geçen sürede bilgi ve tecrübeleri ile yol gösteren, yönetiminde bulunduğu laboratuvarların tüm olanaklarından faydalanma imkanı sunan, kendisinin öğrencisi olmaktan mutluluk duyduğum danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ'a tüm yardımları, güveni ve hoşgörüsü için,

Hocamızın danışmanlığında lisansüstü çalışmalarına devam eden, başta Serap Yiğit Gezgin ve Abdullah Kepceoğlu olmak üzere tüm laboratuvar arkadaşlarıma bu süreçte gösterdikleri destek, yardım ve dostlukları için,

Tüm zamanlarda olduğu gibi bu yüksek lisans eğitimim sırasında da her türlü yardımlarını eksik etmeyen ailemin tüm fertlerine özverili destekleri için teşekkür eder, bu süreçte kaybettiğim dedeme Allah'tan rahmet dilerim.

Sercan BAYIR
KONYA-2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **v**

ÖNSÖZ ..... **vi**

İÇİNDEKİLER ..... **vii**

SİMGELER VE KISALTMALAR ..... **ix**

1. GİRİŞ **1**

1.1. Pulslu Lazer-Madde Etkileşiminin Temelleri ve Ablasyon 2
1.2. Tez Çalışmasının Amacı 2

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI **4**

2.1. Liu Yöntemi 4
2.2. D-Scan Yöntemi 5

3. MATERYAL VE YÖNTEM **8**

3.1. Pulslu Lazer Ablasyonu (PLA) 8
3.1.1. Ablasyon oranı 9
3.1.2. Ablasyon işleminde belirleyici parametreler 9
3.1.3. Nanosaniye ve femtosaniye lazer pulsları ile ablasyon mekanizmaları 16
3.2. Pulslu Lazer Depozisyonu (PLD) 18
3.2.1. PLD tekniğinde ince filmin oluşumu 19
3.2.2. PLD tekniğinde ince filmin yapısına etki eden lazer parametreleri 20
3.2.3. PLD tekniğinde ince filmin yapısına etki eden vakum odası parametreleri 21
3.2.4. PLD tekniğinin avantajları ve dezavantajları 23
3.2.5. Bu çalışmada kullanılan PLD sistemi 24
3.3. D-Scan Yönteminin Teorisi 26
3.4. Deney Sistemleri 29
3.4.1. Lazer sistemleri 29
3.4.2. İki boyutlu numune kızağı 31
3.5. Malzemeler 32
3.5.1. Metal hedefler 32
3.5.2. İnce filmlerin PLD tekniği ile üretilmesi 34

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA **41**

4.1. Fs Pulslu Lazer ile Gerçekleştirilen D-Scan Deneyleri 41
4.1.1. Metal hedeflerin fs D-scan deneyleri 41
4.1.2. İnce Filmlerin fs D-scan deneyleri 44
4.2. Nanosaniye Pulslu Lazer ile Gerçekleştirilen D-scan Deneyleri 46
4.2.1. Metal hedeflerin ns D-scan deneyleri 46
4.2.2. İnce filmlerin ns D-scan deneyleri 47

4.3. Tartışma 50
4.3.1. Fs Lazer ile D-scan Sonuçları 50
4.3.2. Nanosaniye Lazer ile D-scan Sonuçları 58

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 61

KAYNAKLAR 63

EKLER 71

EK-1 Gausyen Şiddet Dağılımına Sahip Lazer Pulslarının F_{th} Belirleme Yöntemlerindeki Etkisi 71
EK-2 Metal Hedeflerin fs D-Scan Ablasyon Profili Ölçümleri 73
EK-3 İnce Filmlerin fs D-Scan Ablasyon Profili Ölçümleri 75
EK-4 Metal Hedeflerin ns D-Scan Ablasyon Profili Ölçümleri 78
EK-5 İnce Filmlerin ns D-Scan Ablasyon Profili Ölçümleri 79

ÖZGEÇMİŞ 81

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	:	Lazer spot alanı
c	:	Işık hızı
D	:	Lazer spot çapı
d_{min}	:	Odaklanmış lazer demetinin en küçük çapı
E	:	Lazer puls enerjisi
E_0	:	Lazer puls enerjisi
F	:	Enerji yoğunluğu (fluence)
f	:	Lens odak uzaklığı
F_{th}	:	Lazer ablasyon eşik enerji yoğunluğu
h	:	Planck Sabiti
I	:	Güç yoğunluğu, Şiddet (intensity)
I_{th}	:	Lazer ablasyon eşik şiddeti
N	:	Lazer puls sayısı
P	:	Lazer puls gücü
P_0	:	Lazer puls gücü
t_p	:	Lazer puls süresi
w	:	Lazer demeti yarı çapı
W_A	:	Ablasyon oranı
λ	:	Dalga boyu
ρ	:	D-scan profilinin yarı genişliği
ρ_{max}	:	D-scan profilinin maksimum yarı genişliği
χ	:	ρ_{max}'ın yatay eksendeki konumu
R_r	:	Lazer tekrarlama oranı

Kısaltmalar

Ag	:	Gümüş
Al	:	Alüminyum
Ar	:	Argon
Au	:	Altın
cm	:	Santimetre
CO_2	:	Karbon dioksit
Cr	:	Krom
Cu	:	Bakır
D-scan	:	Diagonal Scan
eV	:	Elektron Volt
fs	:	Femtosaniye
He	:	Helyum
Hz	:	Hertz
In	:	İndiyum
IR	:	Kızılötesi
J	:	Joule
Laser	:	Light amplification by stimulated emission of radiation
LiSAF	:	$LiSrAlF_6$
m	:	Metre
Maser	:	Microwave amplification by stimulated emission of radiation

mJ	:	Milijoule
Mo	:	Molibden
Nb	:	Niyobyum
Ni	:	Nikel
nm	:	Nanometre
ns	:	Nanosaniye
Pd	:	Paladyum
PLA	:	Pulslu lazer ablasyonu
PLD	:	Pulslu lazer depozisyonu
ps	:	Pikosaniye
Pt	:	Platin
Si	:	Silisyum
Sn	:	Kalay
Ta	:	Tantal
Ti	:	Titanyum
UV	:	Morötesi
W	:	Watt
W	:	Tungsten
ZnO	:	Çinko oksit
μm	:	Mikrometre

1. GİRİŞ

Nanoteknoloji, 1 ile 100 nanometre (nm) arasında (en az bir boyutu 100 nm altında) boyutlara sahip madde yapılarının üretilmesi, çeşitli analiz yöntemleri ile davranışlarının kavranması ve bunun sonucunda çeşitli alanlarda uygulanması çalışmalarının tamamını içeren bir bilim dalıdır. Nanoboyutlardaki parçacıklar, bulk haldeki yapılarının karakteristik özelliklerine sahip olmakla beraber, bulk hallerinde rastlanılmayan davranışlar da gösterebilmektedir. Bu sayede fiziksel, kimyasal ve biyolojik süreçler daha yüksek verimlerle gerçekleşmekte, ayrıca bu süreçler için yeni yaklaşımlar ortaya konmaktadır.

Farklı alanlardaki nanoteknoloji araştırmalarının yoğunlaştığı çalışmalardan biri yeni malzeme türlerinin üretilmesidir. Bu çalışmalarda çoğunlukla yarıiletken, polimer ve biyomalzeme teknolojileri ilgi görmektedir. Nanoteknoloji araştırmaları kimya alanında korozyon önleme ve kataliz uygulamalarına, biyoloji ve tıp alanındaki araştırmalar ise teşhis-tedavi ve ilaç uygulamalarına yoğunlaşmıştır. Nanoteknolojideki fiziksel araştırmalarda yarıiletken ve süperiletken malzemelerle ilgili çalışmalar öne çıkmaktadır. Ayrıca, güneş pili, sensör, transistör ve diyot gibi cihazların üretimleri ile ilgili çok sayıda nanoteknolojik çalışmaların yapıldığı bununla beraber, oldukça yaygın bir teknoloji üretimine alt yapı oluşturacak şekilde geliştiği bilinmektedir (Kostoff ve ark., 2008).

Buharlaştırma (Bai ve ark., 1999), saçtırma (Carcia ve ark., 2003), litografi (Haynes ve Van Duyne, 2001), ark deşarjı (Tabrizi ve ark., 2009), piroliz (Mueller ve ark., 2003), plazma (Bica, 1999) ve lazer ablasyon (Amendola ve Meneghetti, 2009) teknikleri, fiziksel yöntemlerin nanoteknolojide yaygın olarak kullanılan bazı örnekleridir. Elde edilmek istenen sonuca uygun olarak, bu yöntemlerden biri seçilebileceği gibi süreç içinde bu yöntemlerin birkaçından da yararlanılmaktadır.

Bu tez çalışması, pulslu lazer ablasyon yöntemini (PLA) temel alan aşamalar içermektedir. Pulslu lazer-madde etkileşiminin temel karakteristikleri ve bu karakteristiklerin bazı uygulamaları incelenmiştir.

1.1. Pulslu Lazer-Madde Etkileşiminin Temelleri ve Ablasyon

Bir malzeme üzerine düşen foton, çeşitli mekanizmalarla etkileşerek enerjisini malzemeye aktarır. Lazer enerjisinin pulslarla aktarılması ile ortaya çıkan yüksek güçlü demetler madde ile etkileştiklerinde, örgü yapısında bozulmalara, iyonlaşmalara ve atomların malzemeden ayrılmalarına neden olmaktadır. Pulslu lazer demetinin gücü kullanılarak bir malzeme üzerinden madde koparma işlemine Pulslu Lazer Ablasyonu (PLA) denir. Bu yöntem, uygun lazer sisteminin ve parametrelerinin seçilmesi sonucunda çok çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır.

Ablasyon işleminin temelinde, lazer ışığının madde tarafından soğrulması yer almaktadır. Dalga boyu, puls enerjisi, puls süresi, tekrarlama oranı, lazer spot alanı gibi lazer parametreleri ile birlikte ilgili dalga boyunda soğurma oranı, iyonlaşma enerjisi, ısıl iletkenlik, yüzey özellikleri gibi hedef malzemenin özellikleri lazerin malzeme tarafından soğrulmasının ve sonrasında ablasyon işleminin hangi mekanizmalarla gerçekleşeceğini belirler.

1.2. Tez Çalışmasının Amacı

Lazer parametrelerinden enerji yoğunluğu (F), genel anlamda puls enerjisinin lazer spot alanına oranı olarak tanımlanır ve lazer pulsunun malzeme ile etkileştiği alanla ilişkilidir. Bu nedenle enerji yoğunluğu, ablasyon çalışmalarında önemli bir parametredir. Bir hedef malzeme üzerinden lazer pulsları ile madde sökülmesi, o malzemeye özgü belirli bir enerji yoğunluğu değerinin üzerinde başlar. Bu değer, lazer ablasyon eşik enerji yoğunluğu olarak tanımlanmaktadır ve bazı ablasyon çalışmalarında dalga boyu ve puls süresi gibi temel lazer parametrelerinden sonra bilinmesi gereken önemli bir parametredir. Bu eşik değere sahip lazer pulslarının etkisi ablasyon ile sonuçlanmaktadır. Eğer daha yüksek enerji uygulanmışsa, aradaki fark ya hedef malzemeye iç enerji olarak ya da koparılan parçacıklara kinetik enerji olarak aktarılmaktadır. Eşik değerin altındaki lazer enerji yoğunlukları kullanıldığı durumda ise ya geçici etkiler oluşturmakta ya da yapı değişimlerine neden olmaktadır. Lazer ablasyon işlemlerinin istenen sonuca yüksek hassasiyetle ulaşabilmesi ve etkilerin istenen şekilde kontrol edilmesi için bu eşik değerin bilinmesi önem taşımaktadır.

Bu tez çalışmasında, altın (Au), alüminyum (Al), bakır (Cu), gümüş (Ag), indiyum (In), kalay (Sn), molibden (Mo), nikel (Ni), paladyum (Pd), platin (Pt), tantal (Ta),

titanyum (Ti), tungsten (W) metal yapılarının ve bu metallerin Puls Lazer Depozisyon (PLD) tekniği ile üretilen üç farklı kalınlıktaki ince filmlerinin lazer ablasyon eşik enerji yoğunluğu değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Malzemelerin ablasyon eşik değerlerinin belirlenmesi için Diagonal Scan (D-scan) yöntemi kullanılmıştır. Çeşitli malzeme türleri ve farklı lazer sistemleri için lazer ablasyon eşik değerlerinin belirleme çalışmalarında Liu (1982) tarafından geliştirilen yöntem, oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. D-scan yönteminin gerçekleştirme adımları, Liu yöntemindeki adımlardan daha pratik olduğu için tercih edilmiştir. Liu'nun yöntemi ileri görüntüleme sistemlerine ihtiyaç duyarken, D-scan yönteminde bir optik mikroskop yeterli olmaktadır (Samad ve Vieira, 2006). Bununla birlikte D-scan yöntemi, lazer ile malzeme yüzeyinin taranmasına dayandığından bu yöntemin ince filmler için kullanılmasını da uygun hale getirmektedir.

Tez çalışmasının deneysel kısmı iki aşamada tamamlanmıştır. İlk aşamada PLD tekniği ile metal hedeflerden ince filmler üretilmiştir. İkinci aşamada bu ince filmlerin ve hedef metallerin lazer ablasyon eşik değerleri belirlenmiştir. Çalışma, lazer ablasyon işleminin nanosaniye (ns) ve femtosaniye (fs) lazer sistemlerinde kullanıldığı yöntemler içermektedir. Bu nedenle lazer ablasyon işlemi ve bu işlemi yönlendiren parametreler açıklanmıştır. Ns ve fs puls genişliklerine sahip lazerlerin madde ile etkileşiminin temel karakterleri üzerinde durulmuş, kullanılan yöntemler, teknik donanım ve malzemeler tanıtılmış daha sonra deneysel süreçler ile ilgili gerekli bilgiler verilerek sonuçlar sunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu bölümde ablasyon eşik değeri belirleme çalışmalarında kullanılan iki yöntem tanıtılmış ve bu yöntemlerle farklı malzemeler üzerinde yapılan çalışma sonuçları sunulmuştur. Bu bölümdeki iki yöntem de lazer demetinin Gausyen şiddet dağılımına sahip olmasını temel almıştır. Gausyen şiddet dağılımına sahip lazer pulslarının bu iki yönteme kazandırdığı özellikler Ek-1'de verilmiştir.

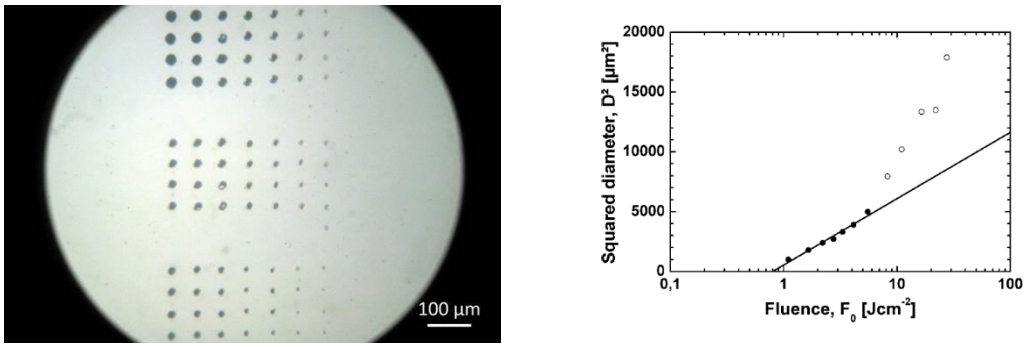
2.1. Liu Yöntemi

Lazer ablasyon eşik enerji yoğunluğu (F_{th}) belirleme çalışmalarında, Liu (1982)'nun Gausyen demetli lazer pulslarının spot boyutlarının belirlenmesi için geliştirdiği yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemin sunulduğu çalışmada tek kristal yapılı silisyum (Si) hedef üzerine gönderilen 532 nm dalga boylu 20 pikosaniye (ps) genişlikli lazer pulslarıyla etkileşen bölgenin amorflaşma ve tekrar kristal yapıya dönüşme enerji yoğunlukları belirlenmiştir (Liu, 1982). Bu yöntemde numune üzerine farklı lazer enerji yoğunlukları düşürülerek ortaya çıkan ablasyon kraterlerinin çapları ve her krateri oluşturan lazer enerji yoğunluğu bir grafik üzerine aktarılmaktadır. Grafik üzerindeki noktalar Gausyen enerji yoğunluğu ifadesinden elde edilen

$$D^2 = 2\omega^2 \ln\left(\frac{F}{F_{th}}\right) \tag{2.1}$$

eşitliği ile fit edilerek birleştirilmektedir. Elde edilen doğrunun yatay ekseni kestiği nokta eşik enerji yoğunluğu olarak ortaya çıkmaktadır.

Şekil 2.1.a'da numune üzerinde oluşturulan kraterlerin bir örneği, Şekil 2.1.b'de ise farklı lazer enerji yoğunlukları ile oluşturulan ablasyon krater çaplarının aktarıldığı grafik örneği verilmiştir. Şekil 2.1.b'deki grafikte, dolu noktalarla belirtilen bölge düşük lazer yoğunluğu şartlarındaki, içi boş yuvarlaklar ise yüksek lazer yoğunluğu şartlarındaki değerlere karşılık gelmektedir. Boş yuvarlakların olduğu bölge fit edilirse, ablasyon işlemi yüksek güç rejiminde gerçekleştirildiğinde elde edilen eşik değeri vermektedir.



(a) (b)

Şekil 2.1. a) Sıfır Hasar Yöntemi için oluşturulan kraterler (Machado ve ark., 2012), **b)** Krater çaplarının karelerinin enerji yoğunluğunun fonksiyonu olarak çizilmiş ve fit edilmiş grafik. (Krüger ve ark., 2003)

Bu yöntemin kullanıldığı bir çalışmada Ti:Safir lazer sistemi ile elde edilen 30 ve 340 fs süreli pulslarla optik filtre olarak kullanılan iki farklı hedefin (Schott BG18 ve BG36) F_{th} değerleri belirlenmiştir. Bu değerler BG18 için 30 fs süreli pulslarla 1.3 J/cm^2, 340 fs süreli pulslarla 2.2 J/cm^2; BG36 için ise 30 fs süreli pulslarla 1.8 J/cm^2, 340 fs süreli pulslarla 5.9 J/cm^2 olarak verilmiştir (Krüger ve ark., 2003).

Bir başka çalışmada, 775 nm dalga boylu 152 fs genişliğindeki pulslar üreten lazer sistemi ile Cu, Ti, niyobyum (Nb) ve paslanmaz çelik folyolar hedef olarak kullanılmış ve ablasyon eşik enerji yoğunlukları sırasıyla 0.58 J/cm^2, 0.28 J/cm^2, 0.19 J/cm^2, 0.21 J/cm^2 olarak elde edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada inkübasyon etkisi olarak bilinen, aynı noktaya gönderilen birden fazla pulsun sonraki pulslar için ablasyon eşiğini düşürmesi olayı da incelenmiş aynı hedef malzemeler için inkübasyon katsayıları 0.87, 0.83, 0.88 ve 0.86 olarak hesaplandığı bildirilmiştir (Mannion ve ark., 2004).

Ps ve ns süreli pulslarla çelik ve Si üzerinde gerçekleştirilen bir çalışmada, 1064 nm ns pulslarla çelik için 2.8 J/cm^2, Si için 4.5 J/cm^2; aynı dalga boyunda ps pulslarla çelik için 4.5 J/cm^2, Si için 2.9 J/cm^2 değerleri elde edilmiştir (Lednev ve ark., 2015).

Liu yöntemi, birçok malzeme türü ve farklı puls süreli lazer sistemleri için uygundur ancak, çok sayıda işlem gerçekleştirilmesi, çok sayıda parametrenin hesaplanması ve ileri görüntüleme tekniklerinin kullanılması gerekmektedir.

2.2. D-Scan Yöntemi

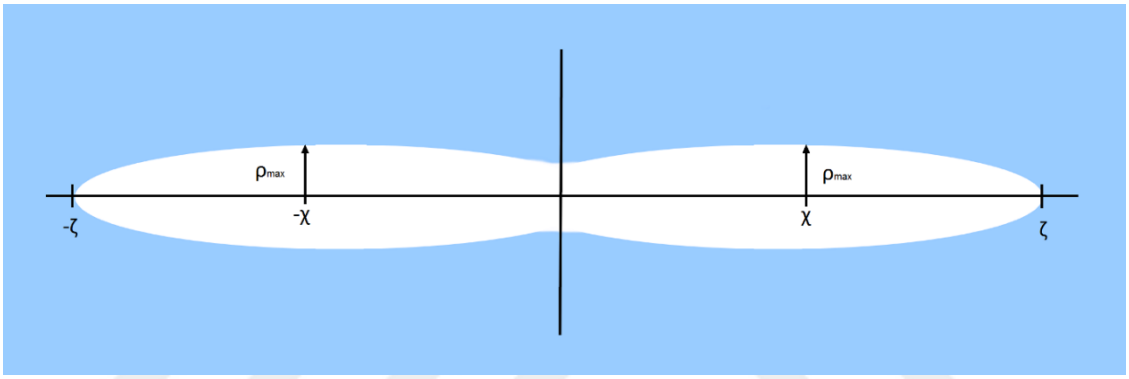
Gausyen profilli pulsların temel alındığı bu yöntemde F_{th} değeri hesaplanacak malzeme, lazer demeti ile çakışacak şekilde iki boyutta hareket ettirilerek numune

üzerinde ortaya çıkan ablasyon profilinin incelenmesine dayalı bir deney sürecine sahiptir. Yöntem, numunenin bu hareketine atfen D-Scan olarak adlandırılmıştır.

İki boyutlu hareketin sonunda hedef üzerinde oluşan lazer aşındırma profili Şekil 2.2'deki gibi ortaya çıkmaktadır. Malzemenin lazer ablasyon eşik enerji yoğunluğu

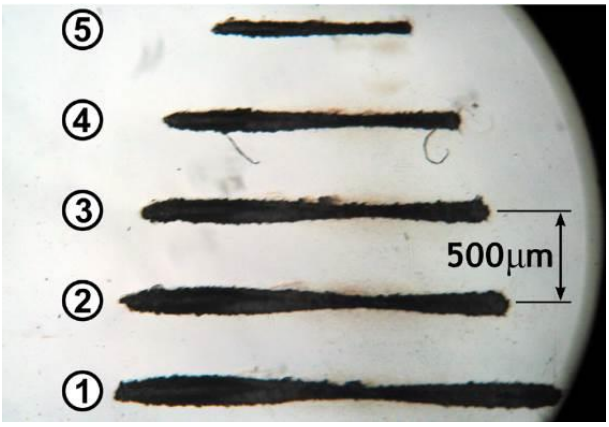
$$F_{th} = 0.117 \left(\frac{E_0}{\rho_{max}}\right) \quad (2.2)$$

denklemi kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada, ρ_{max} profilin en geniş olduğu yerdeki yarı genişlik (Şekil 2.2) ve E_0 kullanılan lazer puls enerjisidir. Bu iki parametrenin bilinmesi F_{th} değerinin hesaplanabilmesi için yeterli olmaktadır.



Şekil 2.2. D-scan yönteminde oluşturulan lazer ablasyon profili

D-scan yönteminin, Liu yöntemi ile uyumlu sonuçlar verdiği aynı çalışma grubu tarafından gösterilmiştir (Elgul ve ark., 2012; Machado ve ark., 2012).



Şekil 2.3. Katkısız LiSAF üzerinde oluşturulan D-scan profilleri (Samad ve ark., 2008)

D-scan yönteminde, kritik bir lazer gücünün üzerindeki pulslar kullanıldığı durumda karakteristik profilin ortaya çıktığı belirtilmiştir (Samad ve Vieira, 2006). Şekil

2.3'teki 5 numaralı profil, kritik lazer gücün altındaki bir lazer gücüyle oluşturulmuştur ve iki kanatlı ablasyon şekli ortaya çıkmamıştır. Tarama sonunda iki kanatlı profil oluşmadığı durumda güç yükseltilerek tekrar deneme yapılması gerekmektedir.

2008 yılında D-scan yöntemi ile yapılan çalışmada 20 ps süreli pulslarla saf ve krom (Cr) katkılı LiSAF ($LiSrAlF_6$) örneklerin ablasyon eşik değerleri belirlenmiştir. Bu çalışmada 830 nm dalga boyunda 1 kHz tekrarlama oranında pulslar üreten lazer sistemi kullanılmıştır. Saf LiSAF numune için ablasyon eşik enerji yoğunluğu 1.61 J/cm^2 olarak hesaplanmıştır. LiSAF numunenin Cr ile katkılanma konsantrasyonu arttıkça bu değerin azaldığı belirtilmiştir (Samad ve ark., 2008).

2010 yılında yapılan bir çalışmada metal Mo malzemenin ablasyon eşik değeri, 778 nm dalga boylu, 30 fs genişliğindeki, 4 kHz tekrarlama oranında, 800 μJ'e kadar enerjili pulslar için ölçülmüştür. Bu çalışma hem vakum ortamında hem de atmosfer ortamında tekrarlanmıştır. Atmosfer basıncında ablasyon eşik enerji yoğunluğu 0.04 J/cm^2 iken vakum ortamında 0.11 J/cm^2 olarak belirlenmiştir. Atmosfer ortamındaki ölçümün daha küçük olması, lazer pulslarının bir kısmının havayı iyonlaştırması veya ablasyon işlemi ile ortaya çıkan plazma formun lazerle etkileşmesi sonucu yüzeyden parçacık koparmasına katkıda bulunması olarak ifade edilmiştir (Samad ve ark., 2010b).

Diş hekimliğinde kullanılan Z100, Z350 ve amalgam malzemeleri üzerinde, 830 nm dalga boylu, 50 fs süreli, 1 kHz tekrarlama oranına sahip fs lazer sisteminde 300-770 μJ aralığında değişen lazer enerjileri ile çalışılmış ve ablasyon eşik enerji yoğunlukları Z100 ve Z350 malzemeleri için 0.35 J/cm^2, amalgam için 0.25 J/cm^2 olduğu belirlenmiştir. Bir malzeme için, (diğer lazer parametrelerinin aynı kalması koşuluyla) lazer sisteminin ürettiği farklı enerjilerdeki pulslarla gerçekleştirilen denemelerin aynı eşik değeri ortaya koyduğu belirtilmiştir (Freitas ve ark., 2010). Bu durum artan puls enerjisinin, malzeme üzerine düşen lazer enerji yoğunluğunu artırmasına ve ortaya çıkan ablasyon profilinin belli bir oranda genişlemesine dayalı olarak gerçekleşmektedir.

Başka bir çalışmada, 785 nm dalga boyunda 100 fs genişliğindeki pulslarla hem Liu yöntemi hem de D-scan yöntemi kullanılarak BK7, safir ve suprasil optik malzemelerin ablasyon eşik değerlerini belirlenerek karşılaştırılmıştır. İki yöntemin birbiri ile uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür (Samad ve ark., 2012).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Pulslu Lazer Ablasyonu (PLA)

Lazer ablasyonu, güçlü lazer pulsları ile hedef yüzeyinden malzeme sökme işlemidir. Hedef malzeme üzerine gönderilen lazer enerjisi önce katı içindeki elektronlara aktarılmaktadır. Lazer ışığının malzeme tarafından soğrulma mekanizmalarına bağlı olarak iyonlaşmalar, bağların zayıflaması ve örgüden kurtulmalar sonucu hedef yüzeyden malzeme sökülmektedir. Lazer şiddetinin doğrudan belirleyici olduğu çeşitli mekanizmalarla elektronlar, iyonlar, atomlar ve daha büyük boyutlardaki parçacık topluluklarını içeren bir plazma bulutu hedeften ayrılmaktadır.

Lazer ablasyon işlemi ile yapılan çalışmalar genel olarak iki grupta incelenebilir. Birinci gruptaki çalışmalar hedef malzeme ve yapıların şekillendirilmesine dayalıdır. İkinci gruptaki çalışmalar ise koparılan türlerin kullanıldığı, plazma üretimi, nanoparçacık ve ince film üretimi gibi çalışmalardır. Sıradan yöntemlerle kolayca veya hiç işlenemeyen malzemelerin yüzey şekillendirilmesinde (Heitz ve ark., 1997), yazıcılar, sensörler gibi cihazlarda mikro boyutta deliklerin delinmesinde, mikro boyutta cihazların, motorların ve sensörlerin bileşenlerinin üretilmesinde, vücut içi kateter yapıların şekillendirilmesinde (Tung ve ark., 2007; Lee ve ark., 2009), mikro ayna gibi mikro optik cihazların üretilmesinde (Böhm ve ark., 2006), yüzey kabartmalı gratinglerin, kademeli geçişli dielektrik maskelerin, metal folyoları ve ince film maskelerin üretiminde (Ihlemann ve ark., 2008), güneş pili üretimi uygulamaları için ince filmlerin mikro işlenmesinde (Bovatsek ve ark., 2010), su tutucu ve su itici yüzey özellikleri kazandırmada (Cheng ve ark., 2004; Groenendijk, 2008), yüzeylerin partiküllerden ve kir tabakalarından temizlenmesinde, yenileme çalışmalarında (Georgiou ve ark., 1998; Pouli ve ark., 2008), işaretleme ve markalamada, sıvı içinde nanoparçacık üretme çalışmalarında (Barcikowski ve ark., 2007) ve PLD yönteminde lazer ablasyon işlemi hem mevcut hem de potansiyel uygulama alanlarına sahiptir.

Lazerle ablasyon işlemi, kullanılan lazer sisteminin parametrelerine ve hedef malzemenin özelliklerine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Bu parametreler ve özellikler ablasyonun gerçekleşme mekanizmalarında ve hızında etkilidir. Bu parametrelerin bilinmesi, elde edilmek istenen sonuçlara uygun deney aşamalarının belirlenmesi, sistemlerin bu özelliklere göre çalıştırılması için oldukça önemli ve gereklidir.

3.1.1. Ablasyon oranı

Ablasyon işleminin verimliliği, ablasyon oranı (W_A) ile tanımlanır. Ablasyon hızı, lazer ışınının karakteristikleri ve işlenen malzemenin özelliklerine bağlıdır. Her bir lazer pulsunun hedef yüzeyinden kopardığı kütle, kalınlık ve hacim miktarları ile belirlenir. Puls başına koparılan kütle miktarı $W_A=\Delta m/N$ [µg/puls], puls başına kaldırılan tabaka kalınlığı $W_A= \Delta h/N$ [µm/puls] ve puls başına ayrılan hacim miktarı $W_A= \Delta V/N$ [μm^3/puls] şeklinde tanımlanmaktadır (Bäuerle, 2011a).

3.1.2. Ablasyon işleminde belirleyici parametreler

Bazı lazer parametreleri ve malzeme özellikleri, ablasyon oranı üzerindeki etkileri nedeniyle ablasyon işleminin istenen yönde gerçekleştirilmesi için kontrol şansı sağlar. Bazıları ise lazer ve malzemenin doğasından kaynaklıdır ve üzerlerinde kontrol şansı yoktur.

Dalga boyu, puls enerjisi, tekrarlama oranı, spot alanı, puls süresi, enerji yoğunluğu, güç yoğunluğu gibi lazer parametreleri ablasyon işleminde etkili olan kontrol edilebilir parametrelerdir. Lazer dalga boyu küçüldükçe ablasyon oranı artmakta (Fabbro ve ark., 1982) bununla birlikte kısa dalga boyları daha küçük parçacıkların yüzeyden ayrılmasına neden olmaktadır (Tsuji ve ark., 2002).

Tekrarlama oranı, lazer sisteminin bir saniyede ürettiği puls sayısıdır. Hedef malzeme üzerinden birim zamanda koparılacak madde miktarı, tekrarlama oranı ile orantılıdır. Ayrıca tekrarlama oranı, ablasyon oranı üzerinde inkübasyon etkisi denen ısıl birikmeler nedeniyle belirleyici bir faktördür. Peş peşe gelecek pulslar arasındaki sürede hedef malzeme ısıl ve elektronik olarak dengeye ulaşamazsa, sonradan gelen pulsların ablasyon gerçekleştirmesi için daha düşük enerji aktarmaları yeterli olmaktadır (Rosenfeld ve ark., 1999).

Malzemenin özellikleri, ablasyon işleminde maddenin lazer ışığına vereceği tepkilerden dolayı belirleyici parametrelerdir. Türü, elektronik yapısı, optik soğurma özellikleri, ısıl iletkenliği, kütle yoğunluğu gibi özellikler, malzemenin kendi doğasından kaynaklanır ve birçoğu her bir malzemeye ait özel durumlardır. Yüksek güçlü lazer pulslarının etkisi ile bu özelliklerin bazılarında değişimler ortaya çıkabilir. Bu durum kullanılan lazer sistemine bağlı olarak malzemenin vereceği tepkilerde farklılıklara neden olmaktadır. Örneğin yüksek güçlü pulslar, dielektriklerin iyonlaşmasını çok hızlı bir

şekilde sağladığı için ultra-hızlı lazer sistemleri ile ablasyon işlemi gerçekleştirilirken malzemenin metal veya dielektrik olmasının önemi kalmamaktadır.

Malzemenin yüzey özellikleri ve yapısı da ablasyon verimi üzerinde etki göstermektedir. İnce filmlerin ablasyon verimleri, üretildikleri malzemenin optik soğurma ve ısı difüzyon derinlikleri ile doğrudan ilişkilidir (Matthias ve ark., 1994). Bu derinliklerden daha düşük ince film kalınlıkları ile ablasyon verimi ters orantılı bir sonuç vermekte, daha yüksek film kalınlıklarında ise ince filmler ablasyon işlemi için bulk malzeme gibi davranmaktadır.

3.1.2.1. Lazer puls süresi

Lazer demetleri, Q-switch ve mode-lock gibi yöntemlerle pulslar halinde yayınlanmaktadır. Puls süresi, lazer enerjisinin soğrulma mekanizmasını ve aktarılan enerjinin malzeme içerisindeki dinamiklerini belirleyen bir parametredir.

10 ps mertebesinden daha kısa pulslar ultra-kısa pulslar olarak tanımlanmaktadır. Bu sınırı, metallerde elektronların iyonlara enerji transferinin 10 ps mertebelerinde gerçekleştirmesi oluşturmaktadır (Bäuerle, 2011b). Bu sınır nedeniyle fs gibi ultra-kısa pulslar enerjilerinin tamamını malzemeye aktardıkları zaman aralığında, hedef ile etkileştikleri bölgeden dışarı enerji aktarımı gerçekleşememektedir. Ayrıca çok yüksek şiddetli lazer pulsları madde ile etkileştiklerinde, çoklu foton soğurma gibi doğrusal olmayan optik olaylara neden olmaktadır.

Ns lazer pulsları gibi kısa pulslarda lazer madde etkileşiminin, ısıl süreçlerin baskınlığında gerçekleştiği kabul edilmektedir. Puls süresi, malzeme içindeki enerji yayılma zaman aralığına göre çok uzundur. Aktarılan enerji, etkileşim bölgesinden daha geniş bir hacme yayılmakta ve ısıdan etkilenen alanlar oluşturarak ablasyon veriminde kayıp gerçekleştirmektedir. Ayrıca puls süresi, lazer pulslarının gücünü belirleyen bir parametredir.

3.1.2.2. Lazer puls enerjisi ve gücü

Herhangi bir lazer kaynağından yayınlanan demet, tek renkli, koherent, paralel ve parlak olma özelliklerine sahiptir. Lazerin şiddetli olması, ışığın yükseltilmesi sonucu çok yüksek sayıda foton oluşturulması ile alakalı bir özelliktir.

Bir fotonun enerjisi (E_f),

$$E_f = \frac{hc}{\lambda} \tag{3.1}$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada h Planck sabiti, c ışığın boşluktaki hızı ve λ ise dalga boyudur. Bu ifadeye göre fotonun enerjisi, h ve c birer sabit olduğundan, dalga boyu ile ters orantılı olarak değişmektedir. Ayrıca belirli bir dalga boyundaki fotonun sahip olduğu enerji yayınlandığı kaynaktan bağımsızdır.

Pulslu lazer sistemleri, çok kısa zaman aralıklarında çok yüksek sayıda foton yayımlayarak bir pulsu oluşturmaktadır. Dolayısıyla bir lazer pulsunun enerjisi, puls içindeki foton sayısıyla doğru orantılı bir büyüklüktür.

Genel anlamda lazer bir enerji kaynağıdır. Ablasyon işleminde gerçekleşen süreçler, lazer kaynağından malzemeye aktarılan enerjinin sonuçlarıdır. Ancak, enerji aktarımından söz edildiği durumda, güç kavramının ifade edilmesi gerekmektedir.

Lazer için güç (P), birim zamanda aktarılan puls enerjisi (E) miktarıdır. Enerji joule [J], zaman saniye [sn] birimlerinde seçildiğinde güç, watt [W] birimindedir.

Pulslu lazerler göz önüne alındığında, pik güç ve ortalama güç olarak iki farklı kavram ortaya çıkmaktadır. Pik güç, tek bir pulsun taşıdığı enerjinin puls süresine (t_p) oranı olarak,

$$P_{pik} = \frac{E}{t_p} \tag{3.2}$$

şeklinde ifade edilir.

Lazer pulsları, çok kısa süreler içinde yayınlanmaktadır ve peş peşe yayınlanan iki puls arasında enerji salımının gerçekleşmediği çok kısa zaman aralıkları vardır. Bir saniye içinde lazer sisteminin tekrarlama oranı (R_r) kadar lazer pulsu yayınlanır. Ortalama güç, 1 sn içinde yayınlanan lazer pulslarının toplam enerjisi ile orantılı bir büyüklüktür ve

$$P_{ort} = E \times R_r \tag{3.3}$$

ifadesi ile tanımlanır.

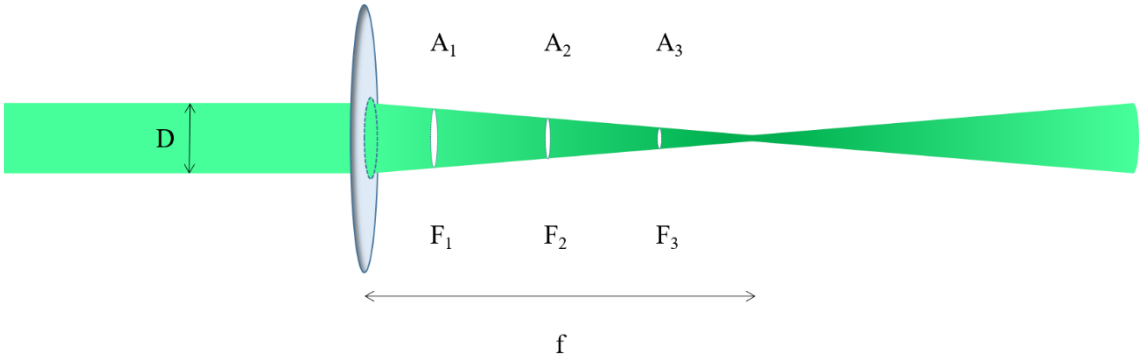
Aynı dalga boyunda ve aynı enerjide pulslar üreten fs ve ns lazer sistemleri karşılaştırıldığında, fs lazer sistemlerinin 10^6 kat daha büyük pik güçler sağlayabileceği görülmektedir. Pik güçler arasındaki mertebe farkı nedeniyle malzemelerin fs ve ns lazer pulslarını soğurma mekanizmaları farklılık göstermektedir. Ayrıca puls süreleri arasındaki büyük fark da soğrulan enerjinin malzeme içindeki yayılma dinamiklerinde değişikliklere yol açmaktadır. Böylece fs ve ns lazer pulsları ile oluşturulan ablasyon işlemi farklı süreçlerle ortaya koymaktadır.

3.1.2.3. Lazer spot alanı, enerji yoğunluğu ve güç yoğunluğu

Lazer sisteminden çıkan lazer demeti, sistemin teknik özelliklerine bağlı bir spot alanına sahiptir. D çapındaki spot alanına sahip λ dalga boyundaki bir Gausyen lazer demeti, f odak uzaklıklı bir lens ile odaklandığında,

$$d_{min} = 2.44 \frac{f\lambda}{D} \tag{3.4}$$

şeklinde ifade edilen d_{min} çapındaki minimum spot alanına odaklanabilmelidir. Ancak bu değer, kırınım olayının sınırladığı teorik bir büyüklüktür. Gerçek lazer spot alanı deneysel yöntemlerle (Liu, 1982) veya çeşitli optik sensörlerle belirlenebilmektedir. Yine de lazer demeti, bir lens aracılığı ile odaklandığında lens ile odak noktası arasında Şekil 3.1'deki gibi daralan bir görüntü sergilemekte, odak noktası civarında minimum spot alanına sahip olmaktadır.



Şekil 3.1. Bir lens ile odaklanan lazer demetinin daralışı ve ortaya çıkan farklı kesit alanları

Lazer demetinin daralması, lens ile odak noktası arasında Şekil 3.1'deki A_1, A_2 ve A_3 gibi farklı büyülüklerde kesit alanlarının ortaya çıkmasını sağlar. Dolayısıyla lazer pulslarının malzeme üzerinde etkileşecekleri bölge, lazer spot alanı ile sınırlanmaktadır. Yani lazer puls enerjisi, spot alanının içinde kalan madde miktarına aktarılmaktadır. Bir lazer sisteminden üretilen her bir puls aynı enerjiye sahip olduğundan, spot alanının daralmasıyla daha az malzeme miktarına daha çok enerji aktarmak mümkün olmaktadır.

Lazer pulsunun, spot alanına bağlı olarak aktardığı enerji miktarının ifade edilmesi için enerji yoğunluğu (F) kavramı kullanılmaktadır. Enerji yoğunluğu, birim alana aktarılan lazer enerjisi olarak tanımlanmakta ve [J/cm^2] biriminde ifade edilmektedir.

Gausyen lazer demetleri için enerji yoğunluğu ifadesi,

$$F = \frac{E}{\pi w^2} \tag{3.5}$$

şeklinde elde edilmektedir, burada w puls demetinin yarı çapıdır.

Odaklanmış lazer demetinin farklı kesit alanlarına sahip olması, enerji yoğunluğunun bu kesit alanlara bağlı olarak değişmesini sağlamaktadır. Şekil 3.1'deki A_1, A_2 ve A_3 kesit alanları azalan bir değişim göstermekte, buna karşılık bu alanlar içinde aynı lazer puls enerjisi bulunduğundan F_1, F_2 ve F_3 artan bir değişim ortaya koymaktadır. Lazer demetinin genişliği odak noktası civarında minimum olduğundan bu bölgede lazer pulsu maksimum enerji yoğunluğuna sahip olmaktadır. Böylece odak noktası civarında lazer pulsunun etkileri oldukça şiddetli şekilde ortaya çıkmaktadır.

Lazer pulsunun ablasyon işlemine yol açıp açmayacağı enerji yoğunluğunun büyüklüğüne bağlıdır. Bir puls enerjisinin büyüklüğü, malzeme yüzeyinde enerji aktardığı alandaki atom veya moleküllerin örgüden kopmalarını ve kinetik enerji kazanarak yüzeyden uzaklaşmalarını sağlayabilecek kadar büyükse ablasyon işlemi gerçekleşmektedir.

Enerji yoğunluğu lazer spot alanının azaltılması ile artırılabildiği gibi, spot alanı sabitken puls enerjisinin artırılması ile de artırılabilir. Bir lens ile odaklanan lazer demetinin daraltılabileceği minimum bir alan söz konusudur. Ayrıca her bir pulsun sahip olduğu enerji pulsun üretildiği lazer sistemin olanaklarına bağlıdır. Lazer spot alanının ve lazer puls enerjisinin kontrolü ile gerekli enerji yoğunlukları elde edilerek ablasyon işleminin istenen yönde gerçekleşmesi sağlanmaktadır.

Puls enerjisi için gerçekleştirilen yaklaşımlar puls gücü için de geçerlidir. Birim alana aktarılan lazer gücü, güç yoğunluğu (I)

$$I = \frac{P}{\pi w^2} \tag{3.6}$$

şeklinde ortaya çıkmaktadır ve bu büyüklük [W/cm^2] biriminde ifade edilmektedir.

3.1.2.4. Lazer ablasyon eşik enerji yoğunluğu

Lazer ile malzeme etkileşmesinden bahsedildiğinde aslında, lazer pulsundaki fotonlarla hedef malzemedeki elektronların etkileşmesi ifade edilmektedir. Ablasyon ile sonuçlanan süreçler, lazer pulsu tarafından enerji kazandırılan elektronların malzeme içindeki dinamiklerinin sonuçlarıdır. Bu dinamiklerin ortaya çıkarak ablasyon işlemini gerçekleştirmesi için birim alana aktarılan lazer puls enerjisinin, yani enerji yoğunluğunun, belli bir büyüklük sınırının üzerinde olması gerekmektedir. Bu sınır değer lazer ablasyon eşik enerji yoğunluğu (F_{th}) olarak tanımlanmaktadır.

F_{th}, işlenen malzemeye özel bir değer olmakla beraber çeşitli parametrelere bağlıdır. Bir malzemenin eşik enerji yoğunluk değerinden bahsedildiğinde, malzemenin türü ve yapısı, lazer puls süresi ve dalga boyu ile beraber bu değerin atmosfer veya vakum ortamlarından hangisinde elde edildiği bildirilmelidir.

Ns pulsları ile ablasyon işleminde ısıl etkileşimlerin baskın mekanizma olması nedeniyle gerçek bir eşik enerji yoğunluğu tanımlanamamaktadır. Ns pulsları ile yapılan çalışmalarda, ablasyon oranının belirgin bir şekilde artmaya başladığı değer ablasyon eşik enerji yoğunluğu olarak kabul edilmektedir (Bäuerle, 2011b). Yine ns lazer sistemi ile ablasyon ısıl süreçlerle gerçekleştiği için ablasyon eşik değerleri ile erime ve kaynama noktaları arasında makul bir ilişki tespit edilebilmektedir (Cabalin ve Laserna, 1998). Metal ve yarıiletkenler ile yapılan deney sonuçlarına göre ns pulslu lazer demetlerinin dalga boyları arttıkça eşik değerin arttığını gösteren çalışmalar mevcuttur (Vladoiu ve ark., 2007).

Fs lazer sisteminde metaller için ablasyon eşiği tanımı şöyle yapılabilir: Metal içindeki elektronlara lazer pulsu ile aktarılan enerjinin, iş fonksiyonunu karşılayacak ve örgü içindeki bağların kopmalarını sağlayacak büyüklükte olması gerekir. Yalıtkanlar için de metallere benzer bir tanım yapılabilir. Ancak önce serbest yük taşıyıcıların

oluşturulması için fazladan bir enerji miktarı gerekir. Bu nedenle yalıtkanların ablasyon eşiklerinin metallere göre bir miktar daha yüksek olması beklenmektedir (Gamaly ve ark., 2002). Yani fs pulsları ile ablasyon işlemi için, gerçek bir ablasyon eşik enerji yoğunluğu tanımlanabilmektedir.

Fs pulsların yüksek güçleri sayesinde malzeme türü ayırt edilmeksizin metalleşme gerçekleştiğinden ablasyon işlemi için bilinmesi gereken tek parametre eşik enerji yoğunluğu olmaktadır (Samad ve Vieira, 2006).

Ultra-kısa pulslarla ablasyon işleminde puls süresi içinde ısı difüzyonunun olmaması malzeme içinde enerjinin sadece ablasyon için kullanılmasını ve daha düşük ablasyon eşik değerin ortaya çıkmasını sağlar (Preuss ve ark., 1994).

Lazer pulsunun sahip olduğu enerji yoğunluğunun ablasyon oranına etkisi, malzemenin F_{th} değeri ile doğrudan ilişkilidir. Lazer puls enerji yoğunluğu arttıkça, aktarılan enerji miktarı daha fazla malzemenin sökülmesine neden olacaktır. Ayrıca eşik değerden çok yüksek enerji yoğunluğuna sahip pulsların kullanılması, ablasyon sonucu ortaya çıkan plazma içinde yüksek enerjili parçacıkların miktarını arttıracaktır.

Ablasyon işlemi ile elde edilmek istenen sonuca ulaşmak için deney parametrelerinin uygun şekilde ayarlanması gerekir. İstenen sonuçlar farklılık gösterebileceğinden belirli parametrelerin ablasyon işlemi için gerekli olduğunu öne sürmek yanlıştır.

Plazma içinde yüksek enerjili parçacıkların bulunması birçok katkılama işleminde istenen bir olaydır (Kim ve ark., 2000). Fakat aynı durum başka bir çalışma da kaplamanın yapısına zarar veren bir sonuç doğurabilmektedir (Ashfold ve ark., 2004).

Mikro işleme gibi çalışmalarda ısıl etkilerin desenlenen şeklin kalitesini bozmaması için eşik değerin üzerindeki enerji yoğunluklarından kaçınmak gerekir (Le Harzic ve ark., 2002). Nanoparçacık üretimi için de elde edilmek istenen parçacık boyutlarına uygun enerji yoğunluklarında çalışılmalıdır (Liu ve ark., 2007).

Güneş pili yapılarında dış kablolar kullanmak yerine tabakaların üretimleri sırasında tabakalar, lazerle mikro işleme sayesinde şekillendirilerek iç bağlantılar oluşturulabilir. Bu tek parça ara bağlantılar fotoakım kayıplarını azaltmaktadır. “Lazer scribing” denen bu işlem, üst üste üretilen tabakaların zarar görmeden işlenmesine dayanır ve ablasyon eşik değerlerinin bilinmesi gerekliliğini gösteren önemli bir uygulamadır (Bartlome ve ark., 2010; Gečys ve ark., 2011; Jiménez-Olarte ve ark., 2015; Moon ve ark., 2015; Yu ve ark., 2015).

Lazer ablasyon işlemi, stokiyometrik özellikleri koruyabilen bir yöntemdir. Stokiyometrinin korunabilmesi için belirli bir eşik enerji yoğunluğu hedef malzemeye aktarılmalıdır. Bu değerin altındaki güçler stokiyometrik yapının bozulmasına, malzemeyi oluşturan bileşenlerin ayrı ayrı ablasyona uğramasına neden olur (Dam ve ark., 1996). Bu tür çalışmalarda da ablasyon eşik değerin bilinmesi istenen malzeme türünün ayrılması için gereklidir.

Restorasyon çalışmalarında lazer pulsları ile yalnızca kirliliğin veya eskimiş cilanın kaldırılması için eşik ablasyon enerji yoğunlukları bilinmelidir. Böylece işlem esere zarar verilmeden tamamlanabilir (Georgiou ve ark., 1998; Pouli ve ark., 2008).

Ablasyona yol açmayacak ablasyon eşik değeri altındaki enerji yoğunluklarıyla çalışarak çeşitli işlemler gerçekleştirilebilmektedir. Ablasyon eşik değerinden daha düşük enerji yoğunluklu pulslar ile malzemenin etkileştiği bölgede gerçekleşen faz geçişleri, kristal yapının bozulup tekrar yapılanmasını böylece yüzeyin nano özellikler kazanmasını sağlamaktadır (Thys ve Desmet, 2011). Bu tür nanoboyutlu yüzey yapılanmaları, malzemenin görünür ve UV bölgedeki soğurganlığını artırarak metal karartma denen işlemi gerçekleştirir. Bu şekillendirmenin fotovoltaik, optoelektronik ve sensör gibi cihazlarda verim artırıcı bir çeşit desenleme işlemi olarak kullanılabileceği önerilmiştir (Ou ve ark., 2016).

3.1.3. Nanosaniye ve femtosaniye lazer pulsları ile ablasyon mekanizmaları

3.1.3.1. Nanosaniye pulsları ile ablasyon

Nanosaniye pulsları ile gerçekleştirilen ablasyon işlemi ısıl, fotofiziksel, fotokimyasal ve mekanik süreçlerle gerçekleşmektedir. Bu süreçler, buharlaşmalara, bağların kopmalarına, ani hacim değişimine bağlı kırılmalara neden olarak ablasyon işleminin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bahsedilen süreçlerle ilgili yaklaşımlar, ns lazer ile ablasyon işlemini açıklamaktadır. Isıl model, ns ve daha uzun süreli lazer pulslarının birçok malzeme türü ile etkileşimini açıklayabilen bir model olduğu için daha çok tercih edilmektedir (Bäuerle, 2011b).

Ns süreli bir puls (10^{-9} s mertebelerinde), malzemeye enerji aktarmaya devam ederken, malzeme içindeki elektronlardan örgüye ısı transferleri (10^{-12} s mertebelerinde) gerçekleşmeye başlamaktadır. Puls enerjisi yeterince yüksek ise lazer etkileşim bölgesinde erime ortaya çıkmaktadır. Puls süresinin devamında katı hedef malzeme

yüzeyinde başlayan buharlaşma, Knudsen tabakası denen bir bölge oluşturmaktadır. Bu tabakada birbirleri ile çarpışan parçacıklar, yüksek enerjilere sahip oldukları için hedef malzemeden çok hızlı bir şekilde ayrılmaktadır.

Nanosaniye lazer ile gerçekleşen ablasyon süreci ısıl süreçler ile açıklandığı durumda, hedef içinde iyonlaşmalar ihmal edilebilmektedir. Ancak hedeften ayrılan malzeme türleri, uzun sürede gelen lazer pulsu ile etkileşerek küçük parçacıkların ve moleküllerin ayrışmasına, nötr atomların iyonlaşmasına böylece plazmanın ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Plazmanın, pulstan enerji soğurmaya devam etmesi ve içindeki türler arasındaki çarpışmalar nedeniyle geri saçılmalar gerçekleşmektedir. Yüksek enerji ile geri saçılan parçacıkların hedefle çarpışmaları sputtering (püskürme) olayına neden olmaktadır. Bu sonuç, ablasyon nedeniyle ortaya çıkan plazmanın içindeki türlerin çeşitliliğini arttırmaktadır. Böylece plazma içinde, hedef malzemenin eriyik ve buhar halleri ile beraber iyonlar, moleküller, damlacıklar, püskürmeler, malzeme topakları gibi bileşenler bulunmaktadır. Uygun deney parametreleri ile plazma içindeki türlerin oranı ayarlanabilmektedir.

3.1.3.2. Femtosaniye pulsları ile ablasyon

Dielektrikler ve yarıiletkenler fs pulslu bir lazer ile ışınlandıklarında önemli miktarda iyonlaşma gerçekleştirerek serbest elektronlar üretirler. Metallerde ise iletim bandında serbest elektronlar mevcuttur. Bu nedenle fs pulslarının yalıtkanlarla ve metallerle olan etkileşimi benzer yollarla gerçekleşir.

Serbest elektronların lazer alanında hızlanmaları sonucunda diğer atomlarla çarpışmaları ile gerçekleşen iyonlaşmalar sayesinde çok sayıda serbest elektron üretilir. Bu şekilde üretilen çığ elektronları, kritik bir yoğunluğu aştıkları zaman örgüdeki iyonlara enerji aktararak yüzeyden kopmalarını sağlarlar (Samad ve ark., 2010a). Ayrıca güçlü iyonlaşmalar nedeniyle örgüdeki pozitif yüklü iyonların sayısının çok artması, yükler arasında itmelere yol açar. Böylece iyonlar Coulomb patlaması denen mekanizma ile de hedeften uzaklaşırlar. Metallerde hedefin geri kalanından gelen elektronlar yük dengesini sağladıkları için metallerde Coulomb patlaması gerçekleşmez.

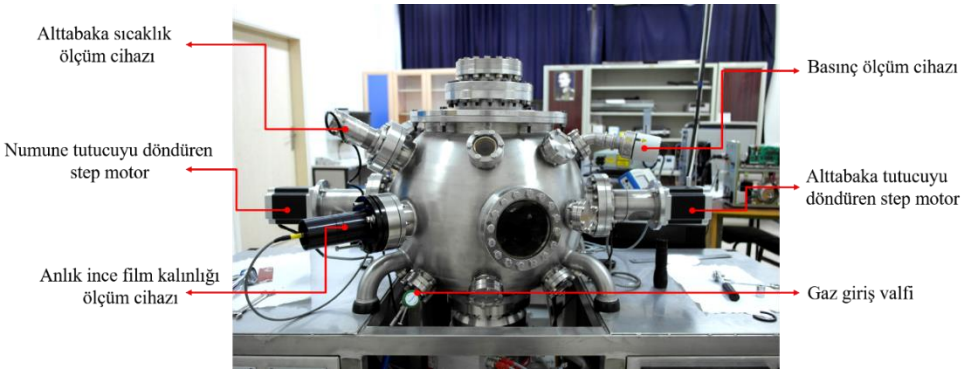
Malzemenin hızlı relaksasyonunun neden olduğu şok dalgaları ve gerilmeler de parçalanmalara neden olur (Salminen, 2013). Bu da hedeften ayrılan türlerin görece büyük boyutlarda olmalarına ve üretilen nanoparçacıklar arasında kümeleşmelerin

oluşmasına neden olabilir. Tek pulsla ablasyon göz önüne alındığında, lazer pulsu ile hedeften koparılan parçacıklar etkileşmediği için büyük boyutlu parçacık kümelerinin oluşması mümkündür.

Aktarılan enerjinin malzeme içinde neden olduğu dinamikler, puls süresinden daha uzun sürelerde gerçekleşmektedir. Bu nedenle ablasyona yol açan süreçler, fs süreli lazer pulsunun enerji aktarımı tamamlandıktan sonra gerçekleşir. Fs lazer pulsları ile çok yüksek güç yoğunluklarında çalışılmadığı takdirde ısıl etkiler gerçekleşmemektedir. Lazer ile malzemenin etkileştiği bölgenin dışında bozulmalar ortaya çıkmadığı için mikro işleme çalışmalarında fs lazerlerin kullanımı avantajlar sağlamaktadır (Feng ve ark., 2005).

3.2. Pulslu Lazer Depozisyonu (PLD)

PLD tekniği, ablasyon olayı sonucunda hedef malzemeden sökülen parçacıkların bir alt tabaka üzerinde biriktirilmesi işlemidir. Bu süreç bir vakum odası içinde gerçekleştirilmektedir. Böylece safsızlıkların ortaya çıkma ihtimali minimize edilir. Vakum odası içinde hedef numunenin ve alttabakanın sabitlendiği tutucular yer almaktadır. Lazer pulslarının sisteme gönderileceği bir pencere ve vakum pompası vakum odasına entegre edilerek PLD işlemlerinin gerçekleştirildiği temel sistem elde edilmektedir. Ayrıca, Şekil 3.2 ile verilen vakum odasının üzerinde hedef numune ve alttabakaların hareketlerini kontrol edilebilir bir şekilde sağlayan step motorlar, anlık ölçüm sistemleri, gaz giriş vanaları, alttabaka ısıtıcı sistemler gibi araçlar da bulunmaktadır.



Şekil 3.2. Bu tez çalışmada kullanılan PLD sistemindeki vakum odası

PLD sistemi, hemen hemen bütün parametreleri kontrol edilme imkanı sunan bir sistemdir ve diğer parametrelerin sabit tutulması halinde her bir parametrenin ince film büyümesi üzerindeki etkisinin ayrı ayrı gözlenebilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece farklı malzeme türleri PLD sisteminde hedef malzeme olarak kullanılabilmekte ve ulaşılmak istenen sonuca uygun yapılar elde edilebilmektedir. Hedef malzemenin stokiyometrisinin alttabaka üzerine aktarılabilmesi, epitaksiyel ve kristal yapıda filmler üretilmesi sayesinde PLD tekniği ile süperiletken ve kompleks malzemelerin ince filmleri üretilebilmektedir (Oboudi ve Mustafa, 2016; Rutt ve ark., 2016). Işık yayan diyotların (LED) (Kim ve ark., 2000), ince film transistörlerin (TFT) (Suresh ve ark., 2007) ve güneş pillerinin (Matsubara ve ark., 2003) üretilmesinde PLD uygun bir yöntem olarak kullanılmaktadır.

3.2.1. PLD tekniğinde ince filmin oluşumu

PLD tekniğinde gerçekleşen olaylar üç grupta incelenmektedir:

1- Lazer-madde etkileşimi, ablasyon
2- Plazma dinamikleri
3- Alttabaka üzerinde çekirdeklenme ve ince film büyümesi.



Şekil 3.3. PLD vakum odasında oluşan plazma genişleyen bir şekilde hedef malzemeden uzaklaşmaktadır

Lazer ablasyon süreci ile sökülen yüksek enerjili parçacıklar hedef malzemeden yüksek kinetik enerjili parçacıklardan oluşan bir plazma halinde uzaklaşır. Şekil 3.3'te

yüksek vakum ortamında Sn metalinin lazer ablasyonu sonucunda oluşan plazmanın görüntüsü verilmektedir. Plazma içinde hedef malzemenin iyonları, atomları ve daha büyük yapılardaki çeşitli türleri bulunabilmektedir. Yeterli kinetik enerjiye sahip bileşenler, hedef numuneden belirli bir uzaklıktaki alttabakaya ulaşırlar. Bu noktada, yine parçacıkların enerjisine bağlı olarak tutunma, gömülme gibi çeşitli yollarla alttabaka üzerinde çekirdeklenmeler başlar. Çekirdeklenmelerin ortaya çıkması ile ince film oluşumunun temelleri atılmış olur. Daha sonra, art arda diğer pulslarla gerçekleştirilen ablasyon süreçleri sonucunda hedeften sökülerek alttabakaya ulaşan parçacıklar alttabaka malzemesi ve kendi türleri ile etkileşerek ince film büyümesini gerçekleştirir.

İnce film büyümesi üç modda gerçekleşir. **Frank-van der Merwe** modunda, iki boyutlu tabakalar üst üste binerek büyümeyi oluşturur. Üç boyutlu adacıkların birikmesi ve daha sonra bunların kendi aralarında birleşmeleri ile gerçekleşen film büyümesi **Volmer-Weber** film büyüme modu olarak bilinmektedir. **Stranski-Krastanov** modunda ise adacıklı ve tabakalı ince film büyümesi bir arada ortaya çıkar. Büyümenin hangi modla gerçekleşeceği, hedef malzeme ile alttabaka malzemesinin özelliklerine ve biriktirme yönteminin yapısına bağlıdır. Metal atomlarının kendi aralarındaki bağlanma enerjisinin, herhangi bir alttabaka ile aralarındaki bağlanma enerjisinden düşük olması sonucunda çoğu metal Volmer-Weber modu ile büyüme gösterir (Axelevitch ve ark., 2012).

3.2.2. PLD tekniğinde ince filmin yapısına etki eden lazer parametreleri

PLD işleminde ince film büyümeye başladıktan sonra, alttabakaya ulaşan toplam madde miktarına bağlı olarak bir ince film kalınlığı ortaya çıkar. Film kalınlığı üzerinde rol oynayan bazı PLD parametrelerinden söz edilebilir. Bunlardan biri hedef malzeme üzerine gönderilen toplam puls sayısıdır. Toplam puls sayısı, PLD ile ince film üretiminde kullanılan lazer sisteminin tekrarlama oranının deney süresine çarpımıdır.

Lazer puls enerjisi ve enerji yoğunluğu ile birlikte hedef malzemenin ablasyon eşik enerji yoğunluğu da ince film kalınlığını belirleyen parametrelerdendir. PLD sistemindeki hedef malzemeye bir lens aracılığıyla odaklanmış bir lazer demetinin enerji yoğunluğu çoğu durumda malzemenin F_{th} değerinin üzerinde olmaktadır. Malzemeye aktarılan fazla enerji, yüzeyden daha fazla malzeme sökülmesini ve sökülen türlerin daha yüksek kinetik enerjilere sahip olmasını sağlamaktadır. Böylece alttabakaya daha fazla sayıda parçacık ulaşması ve film kalınlığının artması gerçekleşmektedir. Ancak

malzemenin ablasyon eşik değerinin çok üzerinde lazer puls enerji yoğunluğu ile çalışılırsa, ablasyon süreci şiddetli bir şekilde gerçekleşerek plazma içinde daha büyük parçacıkların ortaya çıkma oranını artırır. Bu durum vakum odası parametreleri ile kontrol edilebileceği gibi lazer pulslarının dalga boyları ile de kontrol edilebilir.

Daha kısa dalga boylu lazer pulsları için malzemenin F_{th} değeri daha düşük olduğu bilinmektedir. Bu sayede PLD sürecindeki ablasyon işleminde kısa dalga boylu lazer pulsları, daha düşük enerji yoğunluklarının kullanılabilmesini ve daha küçük parçacıkların ortaya çıkmasını sağlamaktadır (Ashfold ve ark., 2004).

3.2.3. PLD tekniğinde ince filmin yapısına etki eden vakum odası parametreleri

PLD sisteminin bileşenleri nedeniyle ortaya çıkan çok sayıda parametre, oluşturulan ince filmin yapısına doğrudan etki etmektedir.

Vakum odası içinde hedef numunenin ve alttabakanın yerleştirildiği tutucular, birbirleriyle uyumlu devirlerde dönecek şekilde tasarlanabilir. Tutucuların dönebilir olması, lazer pulslarının hedef malzeme üzerinde farklı noktalara düşmesini sağlar ve hedef numunenin zarar görmesini engellemekle beraber ablasyon sürecinin homojen bir şekilde ortaya konmasını sağlamaktadır. Alttabakanın döndürülmesi ise oluşan ince filmin daha homojen bir yapıda büyütülebilmesini sağlamaktadır.

Hedef malzeme ile alttabaka arasındaki uzaklık (d), vakum odasındaki tutucuların hareket ettirilebilir şekilde tasarlanması ile sağlanan diğer bir değiştirilebilir parametredir. İstenen morfolojik yapılanmada ince film üretilmesi için d parametresi ayarlanabilmektedir. Ayrıca yine d parametresinin ayarlanması ile farklı kinetik enerjilere sahip parçacıkların alttabakaya ulaşma oranları da kontrol edilebilmektedir.

Hedef malzemenin pulslu lazer ile ablasyonu sonucu ortaya çıkan plazma, hedef malzemenin atom, iyon ve daha büyük yapılardaki türlerini içermektedir. Bu türlerin farklı enerji dağılımlarına sahip bir şekilde ortaya çıkması plazma içinde birçok etkileşimin gerçekleşmesine neden olmaktadır. Sonradan gelen lazer pulslarının etkisi de göz önüne alındığında plazma dinamikleri oldukça kompleks bir şekilde gerçekleşmektedir. Plazma içinde iyonlaşmalar, tekrar birleşmeler, geri saçılmalar, parçalanmalar gibi birçok olay ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak plazma, Şekil 3.3'te görüldüğü gibi genişleyen bir şekilde yayılmaktadır.

PLD vakum odasında bir ortam basıncı sağlanarak plazmanın yayılması ve plazma içindeki parçacıkların enerjileri kontrol edilebilmektedir. Bunun için ortamda

basıncı ayarlanabilen inert bir gaz (Ar, He) varlığından yararlanılmaktadır. Böylece plazma içindeki türlerin kinetik enerjileri, ortam gazı ile çarpışarak kimyasal bozulmalara yol açmadan azaltılabilmektedir.



Şekil 3.4. Çinko Oksit (ZnO) hedef malzemesinin ablasyonu sonucu oluşan plazmanın artan oksijen gaz basıncı içindeki yayılımı

Ortam basıncı inert bir gaz yerine N_2 veya O_2 gibi bir gaz ile sağlanırsa, yüksek enerjili plazma bileşenleri ortam gazıyla reaktif bir şekilde etkileşmektedir. Böylece hedef malzemeden farklı bir kimyasal yapının ince filmleri üretilebilmektedir (Zhao ve ark., 1995). Hedef malzemenin sahip olduğu stokiyometrinin ince filme aktarımının desteklenmesi için de vakum odasında uygun gaz ortamı varlığından yararlanılabilmektedir (Hiramatsu ve ark., 2002).

Şekil 3.4'te vakum odasındaki oksijen gazının artan basıncına karşılık ZnO plazmasında meydana gelen davranış değişikliği görülmektedir. Yüksek vakum şartlarında plazma dar bir yayılım göstererek hedef malzemeden uzaklaşmaktadır. Vakum odasındaki basınç arttırıldıkça, plazma içindeki bileşenler ile ortam gazı arasında gerçekleşen çarpışmalar artmaktadır. Çarpışmalar sonucunda, plazmanın yayılımı genişlemekte ve plazma içindeki türler enerji kaybederek menzilleri azalmaktadır.

Plazma bileşenlerinin kinetik enerjilerinin azaltılması sayesinde, alttabakaya ulaşan yüksek enerjili türlerin film yapısına zarar vermeleri engellenmektedir (Speets ve ark., 2004). Molar kütlesi daha büyük olan bir gaz türü ile ortam basıncı sağlanarak, plazma bileşenlerinin enerji kaybı artırılarak, yavaşlatılmaları veya soğutulmaları gerçekleştirilebilmektedir. (Irissou ve ark., 2004).

İnce film yapısında etkisi olan diğer bir durum, alttabakaya ulaşan türlerin hareketliliğidir. Bu hareketliliğe yol açan sebeplerden biri, parçacıkların alttabaka yüzeyine ulaştıklarında sahip oldukları kinetik ve termal enerjileridir. Yüzey üzerinde hareketliliklerin oluşmasını sağlayan diğer bir sebep ise, deney sürecinde alttabakanın ısıtılması sonucunda, üzerinde biriken parçacıkların hareketlilik kazanmasıdır. Alttabaka

üzerinde biriken türlerin hareketlilikleri, parçacıklar arasında yeni etkileşmelerin ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Böylece film büyüme modları nedeniyle ortaya çıkan yüzey pürüzlülüğü, alttabaka sıcaklığına (Largeanu ve ark., 2011) ve plazma bileşenlerinin enerjilerine (Irissou ve ark., 2004) bağlı bir değişim göstermektedir. PLD tekniği ile epitaksiyel film üretimi sırasında da alttabaka sıcaklığının neden olduğu hareketlilikler, parçacıkların uygun kristal yapılar oluşturmasını sağladığı bilinmektedir (Kim ve ark., 2002).

3.2.4. PLD tekniğinin avantajları ve dezavantajları

Bölüm 3.2.2'de ve Bölüm 3.2.3'te bahsedilen lazer ve vakum odası parametrelerinin etkileri, diğer parametrelerin sabit tutulması ile ortaya çıkan sonuçlardır. İstenen ince film yapısının oluşturulması için, her bir parametrenin uygun şartları sağladığı bir PLD sürecinin tasarlanması gerekmektedir. Böylece bazı parametrelerin ortaya çıkardığı dezavantajlar diğer parametrelerle giderilebilmektedir. Dolayısıyla çok sayıda parametreye bağlılığın olması PLD'nin bir avantajı olarak gösterilebilmektedir. Bu duruma ek olarak PLD sistemi aşağıda ifade edilen önemli avantajlara sahiptir:

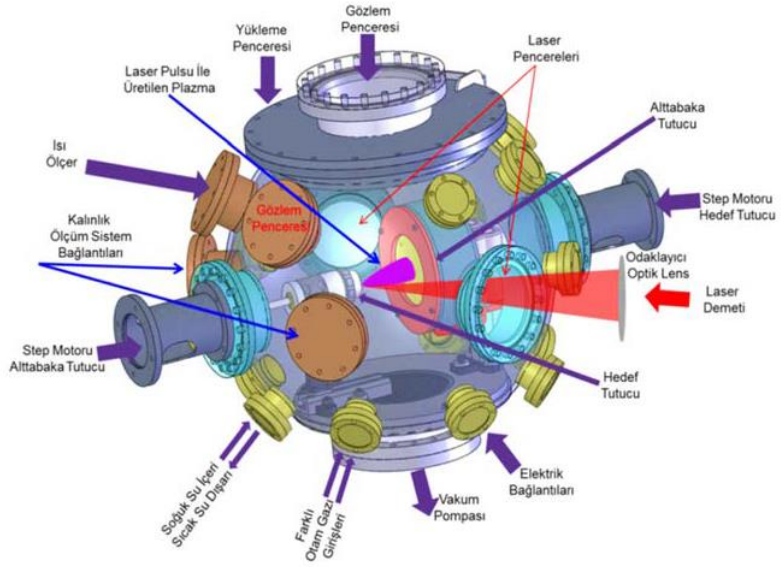
- PLD tekniği, lazer ablasyon işlemine dayanmakta olduğu için farklı malzeme türlerinin ince filmlerinin üretilmesinde kullanılmaktadır. Yine aynı nedenle yüksek erime sıcaklığına sahip malzemelerin depozisyonu kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir.
- Diğer biriktirme yöntemlerine göre, düşük sıcaklıktaki alttabaka üzerine tutunma işlemi gerçekleştirilebildiği için PLD tekniği ile esnek tabanlı cihazların üretilebilmesi mümkündür.
- Uygun lazer enerji yoğunluğu ve ortam gazı sağlanarak hedef malzemenin stokiyometrik özellikleri ince filme aktarılabilir.
- Plazma içindeki bileşenlerin ortam gazı ile reaktif etkileşimi sayesinde hedef malzemeden farklı bir malzeme yapısının ince filmleri üretilebilmektedir.

PLD tekniğinin bazı dezavantajları da bulunmaktadır.

- Yüksek enerjili parçacıklar alttabakaya veya oluşan büyümeye zarar verebilmektedir.
- Plazmanın tek noktadan üretildiği PLD sistemleri geniş yüzey alanlarının kaplanmasında homojenlik problemleri çıkarabilmektedir. Geniş alanların

homojen bir yapıda kaplanabilmesi için PLD sistemi uygun bir şekilde tasarlanmalıdır.

3.2.5. Bu çalışmada kullanılan PLD sistemi



Şekil 3.5. PLD vakum odasının şematik görünümü (Kılıç ve Durmuş, 2016)

PLD sistemi, bir vakum odası ve bunun üzerine monte edilmiş araçlardan oluşmaktadır. Bu sistemin bazı kısımları yerli sanayi altyapısı kullanılarak üretilmiş ve bazı kısımları satın alma yoluyla temin edilmiştir (Kılıç ve Durmuş, 2016).

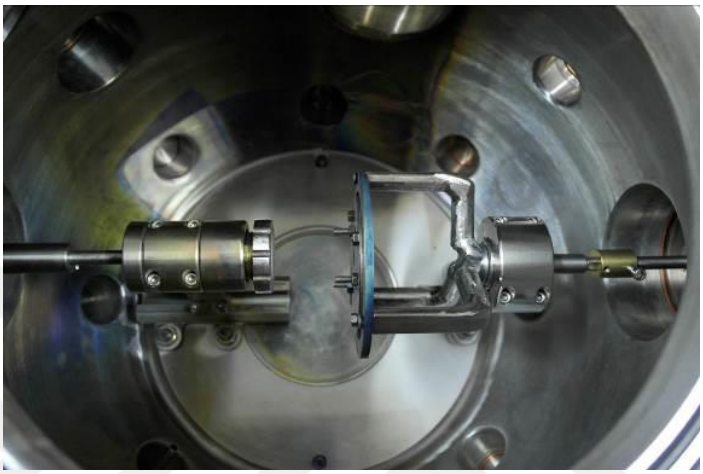
Şekil 3.2'de bir fotoğrafı verilen vakum odası ve bileşenlerinin şematik görünümü Şekil 3.5'te görülmektedir. Vakum odasına bir adet rotary ve bir adet turbomoleküler vakum pompaları entegre edilmiştir. Bunlar aracılığıyla vakum odasının içinde oldukça yüksek vakum şartları (10^{-8} mbar) elde edilebilmektedir. Bu sayede ince film yapısında ortaya çıkabilecek safsızlık ve kirlenmeler engellenmektedir.

Lazer pulslarının hedef üzerine gönderilmesi, PLD sürecinin gözlemlenmesi ve CO_2 lazer girişi vakum odasındaki pencerelerden sağlanmaktadır.

PLD tekniğinde alttabaka sıcaklığının üretilen filmin yapısındaki önemli etkilerini sağlamak amacıyla alttabakanın ısıtılması için CO_2 lazer kullanılmaktadır. Vakum odasının üzerindeki IR sıcaklık ölçüm cihazı (Optris 3MH1-CF3) ile alttabaka sıcaklığının takibi gerçekleştirilmektedir.

PLD süreci sırasında vakum odasında ortam gazının bulunması, plazmanın dinamiklerinin sınırlandırılmasını sağlamaktadır. Ayrıca plazma bileşenleri ile ortam

gazının etkileşmesi ile reaktif biriktirme (Şekil 3.4) yapılabilmektedir. Bu şartları sağlamak üzere vakum odasına gaz girişi, bir valf aracılığıyla kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmektedir. Vakum odasına bağlanmış bir basınç ölçüm cihazıyla, vakum şartları ve gaz basıncı ölçülmektedir. Ayrıca optik yöntemlerle ince film kalınlığının anlık olarak ölçülebildiği bilgisayar kontrolüyle çalışan kalınlık ölçüm sistemi, vakum odasıyla bütünleşik halde bulunmaktadır.



Şekil 3.6. PLD vakum odasının içindeki hedef numune tutucu (solda) ve alttabaka tutucu (sağda)

Şekil 3.6'da gösterilen PLD vakum odasının içindeki hedef numune tutucu ve alttabaka tutucu, bağlı oldukları bağımsız step motorlar tarafından istenen devirlerde döndürülebilmektedir. Bu sayede numune üzerinde farklı noktalardan plazma oluşumu sağlanmaktadır. Bunun sonucunda da plazma yayılımı ve film yapısı homojen bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

Hedef numune tutucu vakum odasının tabanına bağlı kızaklı bir sistem üzerinde taşınmaktadır. Bu kızaklı yapı sayesinde, Şekil 3.6'da görülen duruma göre hedef numune tutucu sağa ve sola hareket ettirilebilmektedir. Böylece hedef numune ile alttabaka arasındaki uzaklık, kontrol edilebilen bir parametre sağlamaktadır.

PLD sistemi, çok yönlü kontrol edilebilir parametreleri sayesinde farklı türlerde hedef ve alttabaka malzemelerinin kullanıldığı birçok araştırma çalışmasına imkan sağlamaktadır. Bu çalışmada PLD sistemi, yüksek saflıktaki hedef metallerden ince filmler üretmek için kullanılmıştır. İnce film üretimi sırasında kullanılan parametreler Bölüm 3.5.2'de detaylandırılmıştır.

3.3. D-Scan Yönteminin Teorisi

D-scan yöntemi, malzemelerin lazer ablasyon eşik enerji yoğunluklarının belirlenmesi için pratik deneysel adımlar içermektedir. Bu yöntemin teorik yaklaşımı, lazer pulslarının Gausyen güç dağılımına sahip olması temeline dayanmaktadır.

P_0 lazer puls gücü, r ve z demetin radyal ve eksen konumları, w(z) demet yarıçapı olmak üzere Gausyen lazer demetinin şiddet dağılım ifadesi:

$$I(r,z) = \frac{2P_0}{\pi w^2(z)} e^{-2\frac{r^2}{w^2(z)}} \tag{3.7}$$

olarak verilmektedir. Odaklanmış lazer demetinde, lazer spot alanının en küçük olduğu demet yarıçapı w_0, z=0 noktasında konumlanmış olsun. Lazer demeti, z=0 noktası üzerine odaklanmış ise demet yarıçapı w(z), bu noktaya göre simetrik olacaktır. z_0 konfokal demet parametresi olmak üzere demet yarıçapı w(z) ifadesi:

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{3.8}$$

biçiminde verilmektedir. Numune üzerindeki ablasyon profilinin yarıçapının ρ(z) ve lazer şiddetinin radyal dağılımı I(r)'nin numune ablasyon eşik değeri I_{th} ile eşit olduğu bir z konumunda Denklem 3.7,

$$I_{th} = \frac{2P_0}{\pi w^2(z)} e^{-2\frac{\rho^2(z)}{w^2(z)}} \tag{3.9}$$

şeklinde yeniden düzenlenmektedir. $0 \leq r \leq \rho$ aralığında şiddet I_{th}'den büyük olacak ve ablasyon gerçekleşecektir. Bu aralığın $r > \rho$ olduğu şartlarda ise lazer demetinin şiddeti artık eşik değerin altında kalacak ve ablasyon gerçekleşmeyecektir. Ablasyona uğrayan alanın yarıçapı, numunenin demete göre konumunun fonksiyonu olarak

belirlenebilmektedir. Bu fonksiyon Denklem 3.9 ifadesinde ρ(z) yalnız bırakılarak elde edilebilir:

$$\rho(z) = \sqrt{\frac{w^2(z)}{2} \ln\left[\frac{2}{\pi w^2(z)} \frac{P_0}{I_{th}}\right]} \tag{3.10}$$

Denklem 3.10 ifadesi türevlenerek ρ(z)'nin maksimum-minimum değerleri ve bunların gerçekleştiği konumlar bulunabilir. Lazer demetinin z=0'a odaklanmasından yani w_0'ın z=0'da konumlanması kabulünden, ρ(z)'nin minimum değeri z=0'da elde edilecektir.

$$\rho_{min} = \rho(z = 0) = w_0 \sqrt{\frac{1}{2} \ln\left(\frac{2}{\pi w_0^2} \frac{P_0}{I_{th}}\right)} \tag{3.11}$$

z=0'a göre simetriden dolayı ρ_{max}'ın konumları $-\chi$ ve $+\chi$ noktalarında olacaktır. Bu noktaları veren ifade:

$$\chi = z_0 \sqrt{\frac{2}{e\pi w_0^2} \frac{P_0}{I_{th}} - 1} \tag{3.12}$$

formunda, $\pm\chi$ noktalarında oluşacak en geniş ablasyon profilinin yarıçapı ρ_{max} ise

$$\rho_{max} = \rho(z = \pm\chi) = \sqrt{\frac{1}{e\pi} \frac{P_0}{I_{th}}} \approx 0.342 \sqrt{\frac{P_0}{I_{th}}} \tag{3.13}$$

formunda ortaya çıkmaktadır. Denklem 3.13'te I_{th} yalnız bırakılarak ablasyon eşik değer ifadesi,

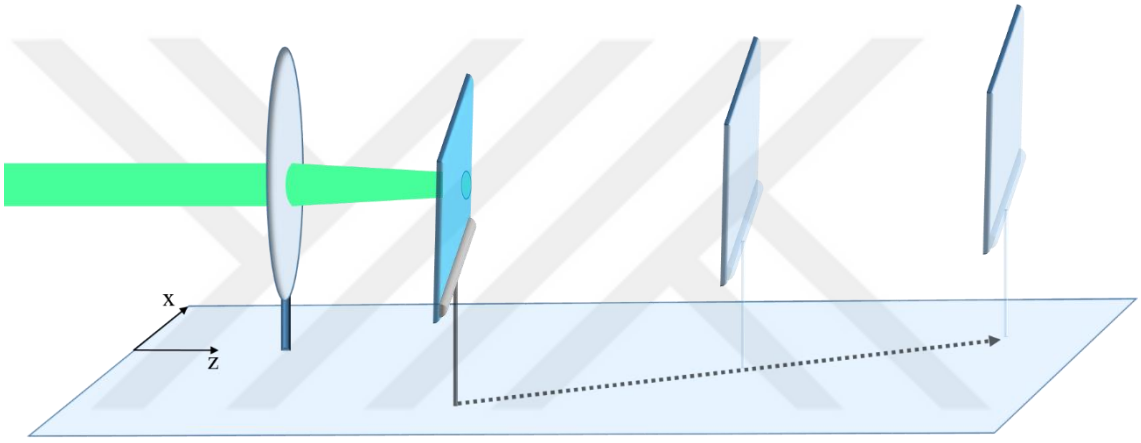
$$I_{th} = \frac{P_0}{e\pi\rho_{max}^2} \approx 0.117 \frac{P_0}{\rho_{max}^2} \tag{3.14}$$

biçiminde elde edilmektedir. Denklem 3.14, ablasyon eşik güç yoğunluğu hesabı için sadece iki parametreye bağlı basit bir ifade vermektedir (Samad ve Vieira, 2006).

Optik güç ile enerji arasındaki ilişki sayesinde Denklem 3.14'ün enerji yoğunluğu cinsinden ifadesi de aynı formda olmaktadır:

$$F_{th} = \frac{E_0}{e\pi\rho_{max}^2} \approx 0.117 \frac{E_0}{\rho_{max}^2} \quad (3.15)$$

Odak uzaklığı f olan bir lens aracılığıyla odaklanan lazer demeti, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi simetrik bir şekilde değişen kesit alanlarına sahiptir. D-scan yönteminin deneysel temelinde, lazer demetinin bu davranışı bulunmaktadır. Bu yöntemde lazer demetinin daralan ve genişleyen kesit alanlarının oluşturduğu farklı enerji yoğunlukları, F_{th} değeri belirlenecek olan malzeme üzerine düşürülerek Şekil 2.2'deki gibi karakteristik bir ablasyon profili ortaya çıkarılmaktadır.



Şekil 3.7. D-scan işleminde numunenin hareket diyagramı

D-scan ablasyon profilinin ortaya çıkması için numune, iki boyutta hareket ettirilir. Şekil 3.7'de bu hareketin diyagramı gösterilmiştir. Lazer demetinin geliş doğrultusu z ekseni üzerinde bulunmaktadır. Bu eksendeki hareket, malzeme üzerine farklı lazer enerji yoğunluklarının düşmesini sağlamaktadır. Şekil 3.7'de x olarak belirtilen diğer eksen, lazer demetinin geliş doğrultusuna dik olan yatay eksendir. Bu eksendeki hareket de, lazer demetinin farklı enerji yoğunluklarının malzemenin farklı noktalarına düşmesini sağlamaktadır.

D-scan işlemi sonucu numune üzerinde ortaya çıkan lazer ablasyon profili, simetrik bir şekle sahiptir. Bu simetri, bir lens ile odaklanan lazer demetinin gösterdiği simetrik davranışla alakalıdır.

Lazer demetinin enerji yoğunluğu, numunenin F_{th} değerine eşit olduğu noktadan itibaren ablasyon profili ortaya çıkmaya başlamaktadır. Bu noktadan sonra profilin genişlemesine, lazer pulsunun enerji yoğunluğunda gerçekleşen artış neden olmaktadır.

Profilin maksimum genişliğe ulaştıktan sonra daralmasının nedeni ise lazer demetinin daralmasıdır. İki kanatlı D-scan profilinin ortasındaki en dar alan, lazer demetinin odaklandığı noktaya denk gelmektedir. Bu noktadan sonra profilde ortaya çıkan genişleme lazer spot alanının artmasından, maksimum genişlikten sonraki daralma ise lazer pulsunun enerji yoğunluğunun spot alanına bağlı olarak azalmasından kaynaklanmaktadır.

3.4. Deney Sistemleri

3.4.1. Lazer sistemleri

Lazer sistemleri hem D-scan işlemleri için hem de PLD tekniği ile ince filmlerin üretilmesinde kullanılmıştır. Ns ve fs lazer sistemleri, Gausyen güç dağılımına sahip pulslar sağlamaktadır.

3.4.1.1. Nanosaniye lazer sistemi

Bu çalışmada ince filmlerin PLD tekniği ile üretilmesi aşamasında, Minilite II Q-anahtarlamalı Nd:YAG lazer sistemi kullanılmıştır. Ayrıca ns süreli pulslarla gerçekleştirilen D-scan işlemlerinde de bu sistem lazer kaynağı olarak kullanılmıştır.



(a) (b)

Şekil 3.8. Minilite II lazer sistemi a) Lazerin üretildiği ünite b) Güç ve kontrol ünitesi

Lazer sistemi, 1064 nm temel dalga boyunda, 5 ns süreli lazer pulsları üretmektedir. Şekil 3.8'de bu lazer sistemini oluşturan iki kısım görülmektedir. Şekil 3.8-a'daki lazer demetinin üretildiği kısım içinde, bulunan kristaller aracılığıyla 1064 nm dalga boyunun harmonikleri elde edilebilmektedir. Bu yöntemle lazer sisteminin

üretebildiği lazer dalga boyları ve bu dalga boylarının maksimum puls enerjileri, Çizelge 3.1'de verilmiştir.

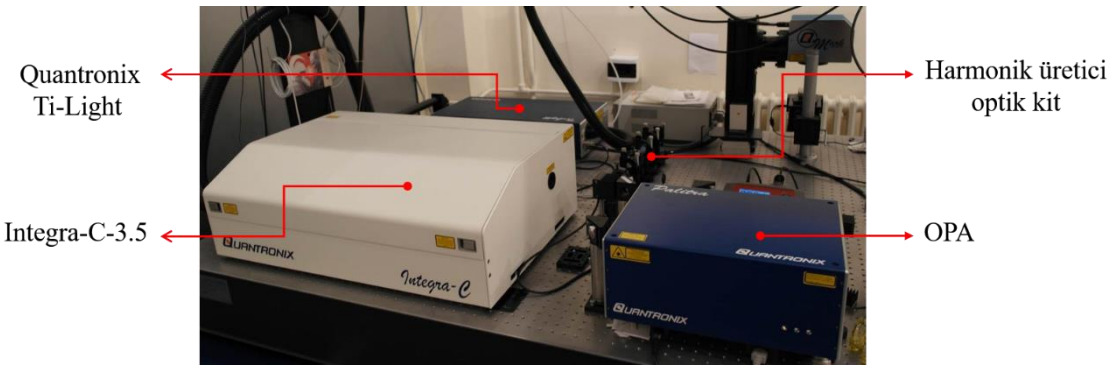
Çizelge 3.1. Minilite II lazer sisteminin ürettiği lazer dalga boyları ve maksimum puls enerjileri

Dalga boyu (nm)	Puls enerjisi (max.)	Puls genişliği	Tekrarlama Oranı
1064 nm (Temel)	50 mJ	5 ns	1-15 Hz
532 nm (2. Harmonik)	25 mJ	5 ns	1-15 Hz
355 nm (3. Harmonik)	8 mJ	5 ns	1-15 Hz
266 nm (4. Harmonik)	4 mJ	5 ns	1-15 Hz

Lazerin üretildiği ünitede bulunan sönümlendirici ile puls enerjileri kontrol edilebilmektedir. Şekil 3.8-b'deki kontrol ünitesinden, lazer siteminin tekrarlama oranı 1 ile 15 Hz arasında ayarlanabilmektedir. Bu lazerin ürettiği lazer demet çapı 3 mm'dir.

3.4.1.2. Femtosaniye lazer sistemleri

Bu çalışmada D-scan işlemleri, Quantronix Ti-Light lazer sistemi ile pompalanan Quantronix Integra-C-3.5 lazer yükselticiden elde edilen pulslar ile gerçekleştirilmiştir. D-scan işlemlerinde kullanılan pulsların genel parametreleri 800 nm temel dalga boyu, 90 fs puls süresi ve 1 kHz tekrarlama oranı şeklindedir.



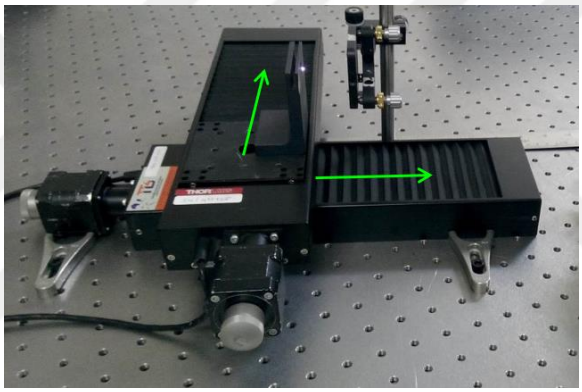
Şekil 3.9. Fs lazer sistemleri

D-scan işlemlerinde kullanılan diğer lazer dalga boyları (400 ve 266 nm) harmonik üretici bir optik kit sayesinde elde edilmiştir. Ayrıca, Quantronix Palitra-FS UV-3 Rev-A optik parametrik yükseltici (OPA) ile 230 nm ile 2,700 nm dalga boyları arasında lazer pulsları üretilebilmektedir. Şekil 3.8'de bu sistemlerin optik masa üzerindeki yerleşimleri görülmektedir.

Integra-C-3.5 ile 3,5 mJ puls enerjisi elde edilebilmektedir. D-scan işlemleri sırasında enerjinin ayarlanması için harici bir optik sönümlendirici kullanılmıştır.

3.4.2. İki boyutlu numune kızağı

D-scan işleminde numunenin iki boyuttaki hareketini sağlamak için, 150 mm'lik menzile sahip iki adet doğrusal stage (Thorlabs NRT150) birleştirilerek Şekil 3.8'de gösterilen bir platform oluşturulmuştur. Her bir kızak bilgisayar kontrolü sayesinde mikrometre hassaslıkta konumlandırılabilmektedir. İki platformun eşzamanlı hareketini sağlamak, platformların hızlarını ve ivmelenmelerini tek bir ekrandan kontrol etmek için ayrıca bir bilgisayar kodu oluşturulmuştur.



Şekil 3.10. İki boyutlu numune kızağı

Şekil 3.10'da altta görülen kızak, lazer demet ekseni boyunca hareketi sağlamaktadır. Buna dik doğrultudaki hareketi ise üstteki kızak gerçekleştirmektedir. F_{th} değeri belirlenecek olan numune, üstteki kızağa sabitlenen bir numune tutucuya yerleştirilmektedir. İki kızağın kendi doğrultularındaki eşzamanlı ve eşit hızlı hareketleri sonucunda, numunenin yer değiştirmesi diyagonal bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu şekilde, numunenin D-scan işlemi için gerekli olan iki boyutta hareket sağlanmaktadır.

3.5. Malzemeler

3.5.1. Metal hedefler

Metal hedeflerden Ag, In, Sn, Mo, Ni, Ta, Ti ve W, Kurt J. Lesker firmasından temin edilmiştir. Bu metal hedeflerin çapları yaklaşık 2.54 cm (1 inç) ve yükseklikleri yaklaşık 0.635 cm (0.250 inç)'dir.

Al, Cu, Pd ve Pt hedefler Goodwill Metal firmasından temin edilmiş olup yaklaşık 2.54 cm (1 inç) çap ve sırasıyla 3, 3, 1 ve 1 mm kalınlıklarına sahiptir.

Au hedef malzeme, Alfa Aesar firmasından temin edilmiş 0.5x25x25 mm boyutlarında bir ürünüdür. Bu ürünlerin saflıkları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Metal hedeflerin saflık yüzdeleri

Hedef Metal	Saflık (%)	Hedef Metal	Saflık (%)
Au	99.95	Ni	99.9
Al	99.99	Pd	99.99
Cu	99.99	Pt	99.95
Ag	99.99	Ta	99.95
In	99.998	Ti	99.995
Sn	99.998	W	99.95
Mo	99.95		

Bu çalışmada kullanılan metal malzemeler, nanoboyutlarda gösterdikleri davranışları nedeniyle ince film teknolojilerinde ve diğer nanoteknoloji uygulamalarında saf, katkılı, alaşım veya bileşik hallerde yaygın olarak kullanım alanı bulmaktadır. Bu hedef malzemelerden üretilen nanoparçacıkların ve metalik ince filmlerin bazı kullanım alanları aşağıda özetlenmiştir.

Altın nanoparçacıklar, sahip oldukları yüksek kimyasal kararlılık ve iyi iletkenlik özellikleri ile nanoteknolojide yaygın olarak kullanılmaktadır. Diğer metallere göre daha güçlü yüzey plasmon rezonans (SPR) özellikleri göstermesi, altın nanoparçacıkların nanoteknolojideki kullanım alanlarını genişletmektedir. SPR olayının, parçacık şekli (Eustis ve El-Sayed, 2006) ve boyutu (Huang ve El-Sayed, 2010) ile kontrol edilebilmesi sayesinde fotovoltaik cihazların geliştirilmesi (Gezgin ve ark., 2016) ve çeşitli sensörlerin üretilmesi (Homola ve ark., 1999) için altın nanoyapılardan yararlanılmaktadır. Bunun yanında katalizör (Thompson, 2007) ve iletkenlik elemanı olarak da (Gholamkhass ve ark., 2012) altın nanoyapılardan faydalanılmaktadır.

Alüminyum nanoparçacıklar da nanoboyutlarda gösterdikleri özellikler sayesinde çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. Roket yakıt katkısı olarak (Meda ve ark., 2007) ve şeffaf iletken oksit yapılarda optik geçirgenlik ve elektriksel iletkenlik artırıcı olarak (Kim ve ark., 2000) kullanılması alüminyum nanoparçacıkların farklı uygulama alanlarına örnek gösterilebilir.

Bakırın yüksek ısı iletkenliğine sahip olması sayesinde nanoparçacıkları soğutucu sıvılarda katkı olarak (Choi ve Eastman, 1995; Eastman ve ark., 2001) kullanılabilmektedir. Ayrıca bakır nanoparçacıklar antimikrobik özellikler göstermektedir (Scholz ve ark., 2005; Ruparelia ve ark., 2008). Nanoboyutlarda bakırdan katalizör olarak da yararlanılmaktadır (Ojha ve ark., 2017). Yine bakırın da SPR özelliğine sahip olduğu, bazı uygulamalarda gümüş ve altın yerine kullanılabileceği belirtilmiştir (Chan ve ark., 2007).

Gümüş nanoparçacıklar da güçlü SPR etkisi oluşturmaktadır. Bu etki nanoparçacıkların büyüklük ve şekillerine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır (Alonso ve ark., 2009). Nanoteknolojide gümüş kullanımının önemli bir bölümü SPR etkisinin sağladığı üretim imkanlarına (Haes ve Van Duyne, 2002) ve verim artışına (Pillai ve ark., 2007) dayanmaktadır. Gümüş nanoparçacıkların antimikrobik özellik göstermesi (Agnihotri ve ark., 2014) bu yönde uygulamaların ortaya çıkmasını sağlamıştır (Kocourek ve ark., 2013).

İndiyum, düşük erime sıcaklığına sahip yumuşak bir metaldir. Yarıiletken teknolojisinde galyuma safsızlık olarak katkılanmasıyla p tip yarıiletken elde etmek için kullanılmaktadır. İndiyumun alaşım, bileşik ve seramik yapıları saf metaline göre çok daha geniş uygulama alanlarına sahiptir. İndiyum kalay oksit, belirli bir kalınlığa kadar görünür bölge dalga boyları için şeffaf olmasıyla ekran, led, fotovoltaik teknolojilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kalayın indiyum ile oluşturdukları ITO yapısı nanoteknolojide yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca düşük sıcaklıklarda işlem gerektiren organik ince film transistör, organik güneş pili veya LED uygulamalarında düşük maliyetli iletken mürekkep olarak kalayın kullanılabileceği önerilmiştir (Yun Hwan ve ark., 2011). Nanoyapılı kalay ile üretilen hidrojen ve azot dioksit sensörlerinin, uygun maliyetleri sayesinde ticari olarak yaygın şekilde kullanılabileceği bildirilmiştir (Partridge ve ark., 2008).

Molibden, CIGS temelli güneş pillerinde yüksek iletkenliği ve inert oluşu ile uygun bir iletim katmanı olarak kullanılmaktadır (Jingxue ve ark., 2016). Oksitleri ve diğer bazı bileşikleri nanoteknolojide daha yaygın olarak yer almaktadır.

Nikel, iletkenlik (Mai ve ark., 2012) ve kataliz özellikleri (Wang ve ark., 2009) sayesinde, nanoteknolojide çeşitli uygulama alanlarına sahiptir.

Paladyum, hidrojene karşı gösterdiği adsorpsiyon özelliği sayesinde (Salcedo ve ark., 2011), hidrojene duyarlı optik sensörlerde (Zhao ve ark., 2006) ve yarı iletken sensörlerde (Salomonsson ve ark., 2005), yakıt hücrelerinde (Zhu ve ark., 2005) kullanılmaktadır.

Platin nano yapılar hakkındaki çalışmalar kataliz işlemlerine ve sensör cihazlarına yoğunlaşmıştır. Platin katalitik özellikleri nedeniyle petrol rafinasyonunda kullanılmaya 1900'lerin ortasında başlanmış (Curry, 1957), günümüzde temel katalizör olarak başka malzemeler kullanılsa da kataliz verimini artırıcı olarak platin nanoparçacıklar kullanılmaktadır (Velichkina ve ark., 2008). Nanoboyutta platin yapıları, yakıt hücrelerinde ve bazı sensörlerde yer almaktadır (Chen ve Holt-Hindle, 2010).

Tantal, ince film yapılı kondansatörlerin (Baker, 1972) ve yarıiletken devrelerin geliştirilmesi için (Catania ve ark., 1992) uzun süredir üzerinde çalışılan bir malzemedir (Ferreira ve ark., 2017). Bu çalışmalar daha saf halde ve istenen yapıda tantal ince filmleri oluşturmaya odaklanmıştır. Tantalın biyo-uyumluluğu, tıbbi implantlarda düşük maliyetli kaplama olarak (Shiri ve ark., 2018), yine implantlarda doğrudan ve alaşım olarak (Maccauro ve ark., 2009) tantaldan yararlanmayı mümkün kılmaktadır.

Titanyum nanoyapılarının oksitlenmeye yatkın oluşu (Vahid Mohammadi ve Halali, 2014), titanyum oksitlerinin çok daha geniş uygulama alanlarına sahip olmasına (Chen ve Mao, 2007) yol açmaktadır.

Tungsten, silikon yüzeylerde iyi tutunabildiği (Melliar-Smith ve ark., 1974) ve 16 nm'den daha düşük boyutlarda bakırdan daha düşük direnç gösterebildiği için (Choi ve Barmak, 2017) yarıiletken teknolojisinde ilgi çekmektedir.

3.5.2. İnce filmlerin PLD tekniği ile üretilmesi

Bu tez çalışmasında ince filmler, PLD yöntemi ile cam alttabakalar üzerine biriktirilmiştir. Bunun için Isolab markasının "Economy Quality" olarak tanımladığı lam ürünleri kullanılmıştır. Bu lamlar yaklaşık 7.62x2.54 cm (3x1 inç) ebatlarındadır.

Fs ve ns lazer sistemleriyle gerçekleştirilen D-scan deneylerinde birbirleriyle özdeş iki ayrı ince film kullanılabilmesi için PLD sisteminin etkin kaplama yaptığı alandan faydalanarak, bir deney sürecinde aynı özelliklere sahip iki ince film elde

edilmiştir. Bunun için bu lamlar cam kesme elması ile yaklaşık 1.5x2.54 cm boyutlarında kesilmiştir.

Kesilen lam parçaları önce musluk suyu, deterjan ve sünger aracılığı ile yıkanıp durulanmıştır. Bu parçalar kurumadan saf su ile tekrar durulanmış, önce aseton içinde sonra izopropil alkol içinde ultrasonik banyoda on beşer dakika süreyle tutulmuştur. Cam alttabakalar PLD deneylerinde kullanılma sıraları gelene kadar izopropil alkol içinde saklanmıştır. Kullanılmak üzere izopropil alkol içerisinden çıkarılan cam parçaları, üzerlerine basınçlı azot gazı üfletilmek sureti ile kurutularak PLD sistemindeki alttabaka tutucularına yerleştirilmeye hazır hale getirilmiştir.

Cam alttabaka, kenarlarından birkaç milimetre kapatılacak şekilde kapton bant ile numune tutucuya sabitlenmiştir. Hedef tutucu parçaya metal hedef yerleştirildikten sonra vakum odası kapatılmış, vakum pompaları çalıştırılarak vakum odası basıncının 10^{-7} mbar arka plan basıncına inmesi beklenmiştir. Vakum şartları sağlandığında hedef tutucu dakikada 70, alttabaka tutucu dakikada 60 devir gerçekleştirecek şekilde döndürülmeye başlanmıştır. Daha sonra lazer pulsları hedef numuneye gönderilerek ince filmin üretilmesi işlemi başlatılmıştır.

Lazer dalga boyu, deney süresi, vakum odası ortam basıncı gibi PLD parametreleri sabit tutulup, 3 farklı lazer puls enerjisi ile her metal numuneden üç farklı ince film üretilmiştir. Sabit tutulan parametreler Çizelge 3.3'te belirtilmiştir.

Çizelge 3.3. İnce filmlerin üretimi sırasında sabit tutulan PLD parametreleri

Lazer dalga boyu	1064 nm
Lazer puls süresi	5 ns
Lazer tekrarlama oranı	10 Hz
Merceğin odak uzaklığı	40 cm
Hedef ile alttabaka arası uzaklık	5 cm
Vakum odası basıncı	~10^{-7} mbar
Deney süresi	60 dakika
Deney ortam sıcaklığı	~23°C

Çalışmanın bu kısmında, farklı lazer puls enerjileri (dolayısıyla farklı enerji yoğunlukları) kullanılarak farklı kalınlıklarda metal ince filmlerin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle lazer puls enerjileri 50, 40 ve 25 mJ olarak belirlenmiştir.

Continuum marka Minilite II model lazer sisteminin temel 1064 nm dalga boyunda ürettiği en yüksek puls enerjisi 50 mJ'dür. Bu nedenle her metalin en kalın ince filminin bu enerji ile elde edilen olması beklenerek en yüksek enerji 50 mJ seçilmiştir.

Üretilen ince filmlerin D-scan çalışmasında gözle veya basit mikroskopla görülebilir olması gerektiğinden, kullanılacak minimum enerji büyüklüğü için bir alt sınır seçmek gerekmiştir. Bu alt sınırın hem gözle görülür bir ince film oluşturacak kadar yüksek hem de üretilecek diğer ince filmlerle kalınlık kıyaslaması yapılacak kadar düşük olması amaçlanmıştır. Bu nedenle PLD sisteminde daha önce yapılan çalışmalar göz önünde bulundurularak en küçük lazer puls enerjisi 25 mJ olarak seçilmiştir. Bu iki uç değer arasında ve ince film kalınlık karşılaştırması yapılabilecek bir değer olarak 40 mJ seçilmiştir.

Biriktirme işleminin ilk puls ile başlamasından 60 dakika, yani hedef üzerine 36,000 puls gönderildikten sonra lazer sistemi durdurularak ince film üretimi tamamlanmıştır. Rotary ve turbo moleküler pompalar durdurularak vakum odasının atmosfer basıncına çıkması beklenmiş, daha sonra vakum odası açılarak ince filmler çıkarılmıştır.

İnce filmler, üretildikleri metalin element simgesi ve PLD sürecinde kullanılan puls enerjilerine göre kodlanmış ve alttabakada kapton bandın kapattığı kaplanmamış kısımları üzerine kodları yazılarak tanımlanmıştır. Çizelge 3.4'te ince filmlerin kodları listelenmiştir. İnce filmler sonraki işlemlere kadar kapalı petri kaplarında tutulmuştur.

Çizelge 3.4. İnce filmlerin üretildikleri hedef metale göre kodları

	Lazer puls enerjisi (mJ)				Lazer puls enerjisi (mJ)		
Metal	50	40	25	Metal	50	40	25
Altın	Au1	Au2	Au3	Nikel	Ni1	Ni2	Ni3
Alüminyum	Al1	Al2	Al3	Paladyum	Pd1	Pd2	Pd3
Bakır	Cu1	Cu2	Cu3	Platin	Pt1	Pt2	Pt3
Gümüş	Ag1	Ag2	Ag3	Tantal	Ta1	Ta2	Ta3
İndiyum	In1	In2	In3	Titanyum	Ti1	Ti2	Ti3
Kalay	Sn1	Sn2	Sn3	Tungsten	W1	W2	W3
Molibden	Mo1	Mo2	Mo3				

Şekil 3.11'de hazırlanan ince filmlerin fotoğraf görüntüleri verilmiştir. Her bir filmin üretiminde diğer parametreler aynı tutulmasına karşın hedef metal malzemelerin özelliklerine bağlı olarak ince filmlerin özelliklerinin farklılıklar gösterdiği tespit edilmiştir. En yüksek puls enerjisinde bile alüminyum ince filmlerle görünür bir kaplama gerçekleştirilememişken, buna karşın indiyum ve kalayın neredeyse tüm filmleri opaktır. Bakır, molibden, tantal ve tungstenden 25 mJ puls enerjileri ile üretilen filmlerde gözle ayırt edilemeyen kaplamalar gerçekleşmiştir. Bu bahsedilenler haricindeki ince filmlerde, kısmi geçirgen ayna benzeri yapılar ortaya çıkmıştır.



Şekil 3.11. PLD ile üretilen ince filmlerin fotoğrafları

3.5.2.1. İnce filmlerin kalınlıklarının karşılaştırılması

İnce filmlerin kalınlık ölçümleri profilometri yöntemi ile gerçekleştirilmiş ve Çizelge 3.5'te verilmiştir. Beklendiği gibi ince filmlerin üretimi sırasında kullanılan puls enerjileri ile ince filmlerin kalınlıkları arasında ilişki olduğu tespit edilmiştir. Artan puls enerjisi (dolayısıyla enerji yoğunluğu), film kalınlıklarının (kaplama hızının) artmasını sağlamıştır.

Metallerin element simgelerinin yanında 1 kodu bulunan ince filmler 50 mJ enerjili pulslarla üretilmiştir ve her bir metal için en kalın filmler bu puls enerjisinde elde edilmiştir. 2 ile kodlanan filmler 40 mJ puls enerjileri ile üretilmiş ve ara kalınlıktaki film kaplamaları bu değerde ortaya çıkmıştır. 25 mJ ile gerçekleştirilen biriktirme işlemlerinde metal hedeflerin en düşük kalınlıktaki filmleri bu puls enerjisinde üretilenlerdir.

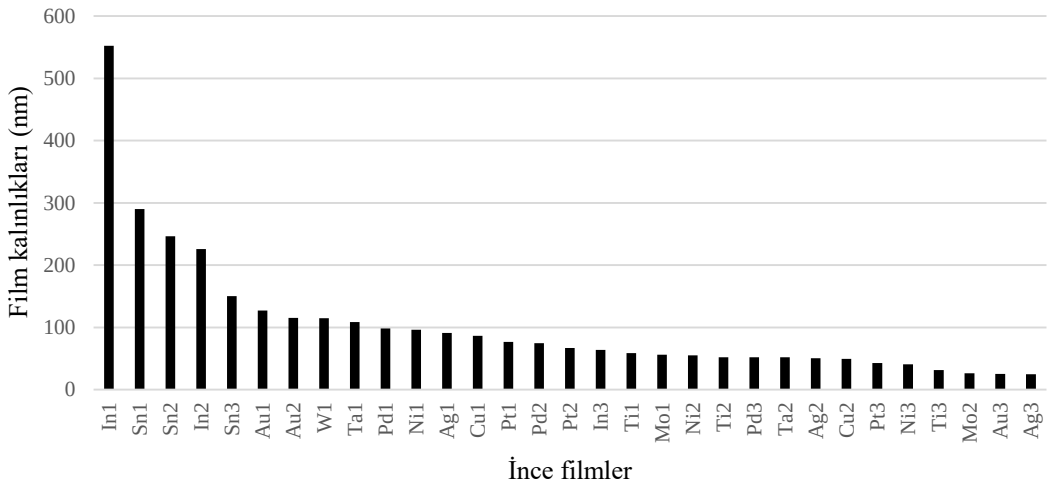
Altın, indiyum, kalay, platin ve titanyum için kullanılan puls enerjisine bağlı olarak 1 ve 2 kodlu ince film kalınlıklarının birbirlerine daha yakın olduğu gözlemlenmiştir. Gümüş ve nikel ince filmlerin kalınlıkları arasındaki fark 2 ve 3 kodlu olanlar için daha düşüktür. Paladyum ince filmleri için ise kalınlık dağılımı yakın

aralıklardadır. Gözle görünmeyen kaplama oluşan ince filmlerde kalınlık ölçümü gerçekleştirilememiştir. Bu nedenle tüm bakır, molibden, tantal ve tungsten ince filmlerinin kalınlıkları arasında karşılaştırma yapılamamaktadır.

Çizelge 3.5. İnce filmlerin kalınlıkları

İnce film	Kalınlık (nm)	İnce film	Kalınlık (nm)
Au1	127.13	Ni1	96.10
Au2	115.53	Ni2	55.30
Au3	25.55	Ni3	40.90
Cu1	86.43	Pd1	98.50
Cu2	49.67	Pd2	74.90
Ag1	91.20	Pd3	51.83
Ag2	50.30	Pt1	76.80
Ag3	24.70	Pt2	66.75
In1	552.47	Pt3	42.90
In2	225.70	Ta1	108.57
In3	64.03	Ta2	51.83
Sn1	289.95	Ti1	58.63
Sn2	246.30	Ti2	52.20
Sn3	150.07	Ti3	31.50
Mo1	56.43	W1	114.63
Mo2	26.60		

Çizelge 3.6. İnce filmlerin kalınlıklarına göre sıralanışı



Çizelge 3.6'da vakum odası basıncı, lazer dalga boyu, deney süresi gibi parametreler sabit tutularak farklı lazer puls enerjileri ile 13 metalden elde edilen ince filmler kalınlıklarına göre sıralanmış bir şekilde görülmektedir. In1 kodlu ince film tüm ince filmler arasında en yüksek kalınlığa sahip olarak elde edilmiştir. İkinci en yüksek

kalınlıktaki film ise Sn1 olarak tespit edilmiştir. In ve Sn, bu çalışmada kullanılan metaller arasında en düşük erime noktalarına sahip olan malzemelerdir. Yine indiyum, bu metaller arasında en düşük kaynama noktasına sahiptir. Kalay ise indiyum, gümüş ve alüminyumdan sonraki en düşük kaynama noktasına sahip metaldir. İndiyum ve kalay filmlerin 50 mJ ile üretilen ince filmlerinin diğerlerine göre daha kalın olarak elde edilmesi, ns lazer pulsları ile ablasyon sürecinin ısıl mekanizmaların baskınlığında gerçekleşmesinin bir göstergesi olarak yorumlanabilir.

Nanosaniye gibi kısa süreli lazer pulslarında F_{th} değerinin, erime ve kaynama noktası ile orantılı ortaya çıkması (Cabalin ve Laserna, 1998), düşük faz değişim noktalarına sahip malzemelerde ablasyon oranını arttırarak film kalınlıklarını doğrudan etkileyen bir sonuç oluşturmaktadır. Bu yaklaşımla, yüksek erime ve kaynama noktalarına sahip tantal ve tungsten metallerinden üretilen 1 kodlu filmlerin, 1 kodlu filmler arasında en düşük kalınlığa sahip olması beklenmektedir. Ancak Ta1 ve W1 filmlerinin kalınlık sıralamasındaki yerleri göz önüne alındığında ortaya çıkan tutarsızlık iki şekilde açıklanabilir. Bu açıklamalardan birincisi, PLD tekniğinde plazma ve film büyüme dinamikleri gibi değişkenlerin bulunması nedeniyle ablasyon verimi, film kalınlığı üzerinde doğrudan etkili olmamaktadır (Bäuerle, 2011c). Diğer açıklama ise ns lazer pulsları ile ortaya çıkan ablasyon işleminin sadece ısıl süreçlerle gerçekleşmemesidir (Bäuerle, 2011b).

İnce filmlerin üretiminde, aynı dalga boylu lazer pulsları aynı odak uzaklıklı mercekle hedefler üzerine gönderildiğinden puls enerjisi için yapılan yorumlar, pulsların enerji yoğunlukları için de geçerli olacaktır. Böylece alüminyum hariç, diğer gözle ayırt edilemeyen filmlerin oluşma nedenleri de açıklanabilir. Alüminyum ince filmlerinden 1 ve 2 kodlu olanlar gözle fark edilmesi zor olan beyazımsı şeffaf kaplamalardan oluşmaktadır. Bu durum alüminyuma has bir durumdur (Kim ve ark., 2000).

İnce filmlerin UV-VIS soğurma spektrometre ölçümlerinde gözle görünmeyen filmlerin alttabakadan daha yüksek soğurma özelliklerine sahip oldukları belirlenmiştir. Yani gözle tespit edilememelerine rağmen Al3, Cu3, Mo3, Ta3, W2 ve W3 kodlu ince filmlerde birikme gerçekleşmiştir. Bahsedilen filmlerin görünür bir kaplamaya sahip olmamaları, PLD sürecinde 1 ve 2 (tungsten için 1) kodlu olan filmlere göre daha az malzeme miktarının alttabaka üzerine ulaşabilmesi ve tutunabilmesi ile alakalıdır. Bunun nedeninin, 25 mJ puls enerjisinin (tungsten için 40 mJ enerjisinin de) hedefler üzerine odaklanması ile elde edilen enerji yoğunluğunun, ablasyon eşik değerlerinin çok az üzerinde olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Böylece 1 ve 2 kodlu filmlerdekine göre

ablasyon verimi ve hedeften ayrılan parçacıkların kinetik enerjileri azalmış sonuç olarak alttabakaya daha az parçacık ulaşmıştır.

In metalinden üretilen ince filmlerin kalınlıkları göz önüne alındığında, In1 ve In2 ince film kalınlıkları birbirlerine yakın değerlerde ortaya çıktığı tespit edilmiştir. In3 ise, In1 ve In2 ile kıyaslandığında oldukça düşük kalınlığa sahiptir. Bu durum 50 ve 40 mJ puls enerjilerinin odaklanması ile oluşan enerji yoğunluğunun indiyum metalinin F_{th} değerinden oldukça yüksek, 25 mJ puls enerjisinin oluşturduğu enerji yoğunluğunun ise indiyumun F_{th} değerine daha yakın olması ile açıklanabilir. In1 filminin üretilme sürecinde indiyum metalinden daha fazla malzeme koparılmış ve bunların büyük bir oranı alttabakaya ulaşarak ince filmin oluşumuna katılmıştır.

Dalga boyu azaldıkça lazer-madde etkileşiminin daha verimli oluştuğu bilinmektedir (Fabbro ve ark., 1982). Dolayısıyla daha düşük ablasyon eşik değerleri ortaya çıkmaktadır. Bu yaklaşımla PLD deneyleri için 532 nm dalga boyunun kullanılması planlanmıştır. 532 nm lazer dalga boyu ile gerçekleştirilen bir kaç ince film üretme çalışmasında en kalın olması beklenen filmlerin görünür olmaması nedeniyle PLD ile ince film üretiminde 1064 nm ile çalışılmıştır. Bunun nedeni, kullanılan lazer sisteminde 532 nm dalga boyları, temel 1064 nm dalga boyunun ikinci harmoniği olarak üretildiği için 532 nm dalga boyunda elde edilebilen en büyük enerji ve enerji yoğunluğu 1064 nm'de kullanılanın yarısında kalmasıdır. D-scan yönteminde kullanılabilecek daha fazla sayıda görünür film üretme amacıyla PLD sürecinde 1064 nm dalga boylu lazer pulsları kullanılmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

D-scan yöntemi ile ablasyon eşik değerlerinin belirlenmesi iki adımda tamamlanmıştır. İlk adımda, fs lazer sistemi kullanılarak numuneler üzerinde karakteristik D-scan profilleri oluşturulmuştur. İkinci adımda bu profillerin genişlik ölçümleri ile ρ_{max}, hesaplamalar sonucunda malzemelerin F_{th} değerleri belirlenmiştir.

Fs lazer sistemi ile elde edilen sonuçlara ek olarak D-scan işlemleri aynı malzemeler için ns lazer sistemi ile de tekrarlanarak ortaya çıkan sonuçların gözlenmesine dair deneysel bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

4.1. Fs Pulslu Lazer ile Gerçekleştirilen D-Scan Deneyleri

Fs lazer sistemi ile yapılan D-scan işlemlerinde 800, 400 ve 266 nm dalga boylu lazer pulsları kullanılmıştır. Lazer sisteminden elde edilen pulslar, 90 fs puls genişliğine ve 1 kHz tekrarlama oranına sahiptir. Lazer demeti 5 cm odak uzaklıklı bir lens aracılığıyla odaklanmıştır.

D-scan işlemleri sırasında kullanılan lazer güçlerinin istenen ablasyon şeklini oluşturması için belli bir kritik değerin üzerinde olması gerekmektedir (Samad ve Vieira, 2006). Ayrıca yüksek puls güçleri, profilin kanat uzunluklarının artmasına neden olmaktadır. Dar bir alanda çalışıldığı için kanat uzunluklarının bu alana sığdırılması gerektiğinden lazer güç yüksekliğinin uygun bir değere ayarlanması gerekir. Kullanılan lazer puls güçleri deneme yoluyla seçilmiştir. Eğer o malzemede uygun ablasyon şekli elde edilememişse mevcut güç artırılmış, numune dışına taşan profil elde edilmişse güç azaltılmıştır. Güç ayarı için bir optik güç düşürücü kullanılmıştır.

4.1.1. Metal hedeflerin fs D-scan deneyleri

Metal hedefler üzerinde 800, 400 ve 266 nm dalga boylarındaki lazer pulsları ile ayrı ayrı D-scan profilleri oluşturulmuştur. Bu dalga boylarında hedefler üzerinde kullanılan lazer puls güçleri, detektör aracılığıyla ölçülerek tespit edilmiştir ve Çizelge 4.1'de listelenmiştir.

Bu aşamadan sonra, oluşturulan D-scan ablasyon şekillerinin ölçümleri yapılmıştır. Bunun için Olympus BX53 mikroskobundan ve bu mikroskobun

yazılımından yararlanılmıştır. Bazı durumlarda ölçümlerin kontrolü gerektiğinde ImageJ yazılımı da kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. Metal hedeflerin fs D-scan deneylerinde kullanılan lazer dalga boylarındaki puls güçleri

Metal	266 nm dalga boyunda lazer gücü (mW)	400 nm dalga boyunda lazer gücü (mW)	800 nm dalga boyunda lazer gücü (mW)
Altın	80	50	25
Alüminyum	80	50	15
Bakır	80	50	20
Gümüş	90	50	25
İndiyum	90	100	30
Kalay	90	50	25
Molibden	50	50	50
Nikel	50	20	10
Paladyum	80	50	20
Platin	80	50	20
Tantal	90	100	25
Titanyum	90	50	25
Tungsten	70	100	50

D-scan profillerinin kanat genişliklerinin en büyük olduğu yerlerin tam ölçümü mikrometre (μm) biriminde alınmış, bu değerlerden hesaplanan yarı genişlikler santimetre (cm) birimine çevrilmiştir. Elde edilen bu değerler Ek-2'de verilmektedir.



(a) **(b)**

Şekil 4.1. D-scan ablasyon profilinde ortaya çıkan simetri bozulması a) uygun, b) kusurlu profil kanadı

Oluşturulan D-scan ablasyon şekillerinin teorik olarak simetrik bir görüntü oluşturmaları gerekmektedir. Bazı ölçümlerde bu durum sağlanmasına rağmen birçoğunda aksi yönde durumlar ortaya çıkmıştır. D-scan profilinde simetri bozukluğunun ortaya çıktığı bir örnek Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekil 4.1'deki görüntüler, Pt1 ince filminin 400 nm dalga boyundaki lazer pulsları ile taranmasıyla oluşan bir ablasyon profilinin iki kanadıdır. Şekil 4.1.a'da uygun bir şekilde ortaya çıkan

D-scan profil kanadı görülmektedir. Bu kanadın maksimum genişliği 85.52 μm olarak ölçülmüştür. Şekil 4.1-b'de ise daha dar bir kanat (58.14 μm) ortaya çıktığı ve simetrinin bozulduğu görülmektedir.

D-scan ablasyon profilindeki simetri bozulmalarının, hep aynı taraftaki kanatta, odak noktasından uzaklaşan lazer demetinin oluşturduğu ablasyon alanında gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu bozulmaların sebebi, odaklanmış yüksek güçlü lazerin hava ve hedef malzemeden çıkan plazma türleri ile etkileşmesi olduğu söylenebilir. Bu etkileşmeler nedeniyle lazer pulsunun sahip olduğu enerjide kayıplar gerçekleşmektedir. Bunun sonucunda da numune üzerinde oluşan ablasyon şekli daha düşük bir enerji yoğunluğu ile üretilmektedir. Sonuç olarak D-scan profillerinin ölçümlerinde mercek ile odak noktası arasında gerçekleşen kanadın ölçülmesi doğru sonuçları vermektedir. Ek-2'deki değerler bu durum göz önüne alınarak belirlenmiştir.

Aynı lazer dalga boyu ve lazer gücü ile aynı numune üzerindeki farklı alanlarda yapılan birden çok D-scan taramalarının ölçümlerinde bazı sapmalar tespit edilmiştir. Bu sapmalara yol açabilecek faktörlerin lazer sisteminin ürettiği pulslar arasında kararlılığının bozulması, harmonikler oluşurken ortaya çıkan sapmalar, hava ile etkileşim nedeniyle puls gücünde oluşan sapmalar, malzeme yüzeyinde yerel yapı farkları olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.2. Metal hedeflerin 90 fs puls süresi için ablasyon eşik değerleri

Metal	λ = 266 nm F_{th} (J/cm^2)		λ = 400 nm F_{th} (J/cm^2)		λ = 800 F_{th} (J/cm^2)	
Altın	1.04	±0.04	0.71	±0.02	0.85	±0.04
Alüminyum	0.82	±0.10	1.24	±0.26	6.79	±0.21
Bakır	0.66	±0.05	1.14	±0.16	0.90	±0.00
Gümüş	0.86	±0.10	0.99	±0.02	1.08	±0.06
İndiyum	1.03	±0.05	1.30	±0.22	1.56	±0.08
Kalay	0.63	±0.02	0.57	±0.06	0.73	-
Molibden	0.85	±0.04	1.92	±0.45	2.34	±0.16
Nikel	0.62	±0.08	0.22	±0.02	1.27	±0.49
Paladyum	0.78	±0.10	0.37	±0.06	2.15	±0.40
Platin	1.28	±0.09	1.74	±0.13	3.66	±0.13
Tantal	0.91	±0.07	1.82	±0.12	0.66	±0.10
Titanyum	0.57	±0.02	0.43	±0.02	0.44	±0.02
Tungsten	2.10	±0.46	1.82	±0.57	3.59	±1.04

Çizelge 4.1'de verilen güçler, detektörle tespit edilen ortalama lazer güçleridir. Bu değerler Denklem 3.3'teki bağıntı kullanılarak enerji birimine çevrilmiştir. Elde edilen puls enerjisi büyüklükleri, Ek-2'deki ρ_{max} değerleri ile Denklem 3.15'te kullanılarak, bulk haldeki metal malzemelerin F_{th} değerleri hesaplanmıştır. Böylece hesaplanan eşik

değerleri literatürde daha yaygın kullanılan enerji yoğunluğu birimi [J/cm^2] cinsinden elde edilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.2'de verilmiştir.

4.1.2. İnce Filmlerin fs D-scan deneyleri

İnce filmlerin D-scan deneylerinde 90 fs süreli 1 kHz tekrarlama oranına sahip lazer pulslarının 800, 400 ve 266 nm dalga boyları ile ayrı ayrı çalışılmıştır. Bu aşamada kullanılan lazer güçleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Al1, Al2, Al3, Cu3, Mo3, Ta3, W2 ve W3 şeklinde kodlanan filmler, gözle ayırt edilebilir olmadığından çalışmanın bu kısmında yer almamıştır.

Çizelge 4.3. İnce filmlerin fs D-scan deneylerinde kullanılan puls güçleri

İnce film	λ=266nm lazer gücü (mW)	λ=400nm lazer gücü (mW)	λ=800nm lazer gücü (mW)	İnce film	λ=266nm lazer gücü (mW)	λ=400nm lazer gücü (mW)	λ=800nm lazer gücü (mW)
Au1	30	15	30	Ni1	40	30	30
Au2	30	15	30	Ni2	50	30	30
Au3	30	10	30	Ni3	50	30	30
Cu1	30	15	30	Pd1	20	15	30
Cu2	20	15	30	Pd2	30	15	30
Ag1	50	15	15	Pd3	30	15	30
Ag2	30	15	15	Pt1	30	15	30
Ag3	30	15	20	Pt2	30	15	30
In1	50	50	30	Pt3	30	15	30
In2	50	50	30	Ta1	30	15	30
In3	50	50	30	Ta2	30	15	30
Sn1	20	15	25	Ti1	50	30	30
Sn2	20	15	25	Ti2	50	30	30
Sn3	20	15	25	Ti3	50	30	30
Mo1	50	30	30	W1	50	15	30
Mo2	50	30	30				

İnce filmlerin D-scan ablasyon işlemleri tamamlandıktan sonra oluşturulan profillerin genişlik ölçümleri yapılmıştır. Bu aşamadaki adımlar metal hedefler üzerinde oluşturulan D-scan profillerin genişlik ölçümleri ile aynı yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Kullanılan mikroskobun teknik özellikleri sayesinde metal hedeflerin D-scan profillerinin ölçümleri sırasında ortaya çıkan aydınlatma problemleri ile ince filmlerin ölçümlerinde karşılaşılmamıştır.

Metal hedeflerdeki D-scan ablasyon profillerindeki simetri bozukluklarına ince filmlerde de rastlanılmıştır (Şekil 4.1). Bu simetri bozulmaları da metal hedeflerde ortaya çıkanlar gibi profillerin odak noktasından uzaklaşan lazer demetlerinin oluşturduğu

kanatta ortaya çıkmıştır. Bu nedenle o bölgedeki ablasyon profillerinin ölçümleri kullanılmamıştır.

İnce filmler üzerinde her bir lazer dalga boyundaki lazer puls güçleriyle birden çok sayıda D-scan profili oluşturulmuştur. İnce filmlerin D-scan profillerinin ölçülen tam genişlikleri [μm] biriminde, bunların yarısına eşit olan ρ_{max} değerleri [cm] biriminde olmak üzere Ek-3 ile verilmiştir. Çizelge 4.3'te sunulan ortalama lazer güç değerleri, puls enerjisine çevrilmiş halde Denklem 3.3 ile, ince filmler için hesaplanan ablasyon eşik değerleri Çizelge 4.4'te listelenmiştir.

Çizelge 4.4. İnce filmlerin 90 fs puls süresi için ablasyon eşik değerleri

İnce Film	λ = 266 nm F_{th} (J/cm^2)		λ = 400 nm F_{th} (J/cm^2)		λ = 800 nm F_{th} (J/cm^2)	
Au1	0.168	±0.003	0.037	±0.002	0.157	±0.004
Au2	0.048	±0.001	0.042	±0.002	0.109	±0.003
Au3	0.027	±0.001	0.034	±0.002	0.033	±0.000
Cu1	0.037	±0.003	0.059	±0.005	0.066	±0.002
Cu2	0.039	±0.003	0.057	±0.001	0.067	±0.006
Ag1	0.241	±0.008	0.033	±0.000	0.033	±0.001
Ag2	0.153	±0.002	0.023	±0.000	0.143	±0.003
Ag3	0.154	±0.004	0.026	±0.000	0.128	±0.000
In1	0.486	±0.016	0.176	±0.005	0.082	±0.003
In2	0.215	±0.011	0.178	±0.004	0.086	±0.003
In3	0.205	±0.012	0.220	±0.011	0.191	±0.013
Sn1	0.174	±0.011	0.102	±0.014	0.100	±0.003
Sn2	0.089	±0.004	0.102	±0.004	0.061	±0.000
Sn3	0.082	±0.008	0.050	±0.001	0.049	±0.000
Mo1	0.064	±0.003	0.077	±0.004	0.074	±0.003
Mo2	0.050	±0.000	0.042	±0.001	0.052	±0.002
Ni1	0.581	±0.041	0.191	±0.019	0.223	±0.003
Ni2	0.114	±0.004	0.099	±0.003	0.129	±0.01
Ni3	0.074	±0.006	0.060	±0.001	0.047	±0.002
Pd1	0.169	±0.006	0.142	±0.007	0.161	±0.006
Pd2	0.114	±0.013	0.055	±0.003	0.110	±0.004
Pd3	0.022	±0.001	0.033	±0.008	0.044	±0.001
Pt1	0.135	±0.010	0.084	±0.025	0.144	±0.018
Pt2	0.166	±0.007	0.106	±0.007	0.081	±0.006
Pt3	0.013	±0.000	0.022	±0.0000	0.024	±0.000
Ta1	0.709	±0.12	0.147	±0.004	0.696	±0.003
Ta2	0.197	±0.016	0.060	±0.001	0.147	±0.001
Ti1	0.265	±0.02	0.284	±0.043	0.478	±0.04
Ti2	0.275	±0.007	0.274	±0.018	0.436	±0.022
Ti3	0.126	±0.008	0.189	±0.015	0.127	±0.007
W1	0.056	±0.003	0.063	±0.002	0.043	±0.000

4.2. Nanosaniye Pulslu Lazer ile Gerçekleştirilen D-scan Deneyleri

D-scan yöntemi Gausyen profilli ultra-kısa hızlı pulslar için geçerli olduğu, bu yöntemle ortaya çıkan iki kanatlı ablasyon şeklinin daha uzun atımlarla aktarılan lazer enerjileri ile meydana gelecek ısıl etkiler nedeniyle sağlıklı sonuç vermeyebileceği bildirilmiştir (Samad ve Vieira, 2006). Bunun yanında D-scan yöntemi, lazer pulslarının Gausyen güç dağılımına sahip olmasını teorik temel olarak almaktadır. Bu aşamada D-scan deneyleri Gausyen profile sahip bir ns lazer sistemi ile gerçekleştirilerek, ortaya çıkacak sonuçların incelenmesi için bir çalışma yapılmıştır.

Bulk haldeki metal malzemeler ve ince filmler için gerçekleştirilen D-scan işlemleri, tekrarlama oranı 15 Hz, puls süresi 5 ns olan lazer pulsları kullanılarak, 1064, 532, 355 ve 266 nm dalga boyları için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Lazer demetleri 3.8 cm odak uzaklıklı bir lens aracılığıyla odaklanmıştır.

D-scan taraması sonucunda ortaya çıkan ablasyon profillerinin ölçümleri, fs lazer ile gerçekleştirilen yöntemlerle yapılmıştır.

4.2.1. Metal hedeflerin ns D-scan deneyleri

Lazer demeti hedef malzemeler üzerine 3.8 cm odak uzaklığına sahip bir lens ile odaklanmıştır. Metal hedefler üzerine gönderilen lazer puls enerjileri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Metal hedeflerin ns D-scan deneylerinde kullanılan puls enerjileri

Metal	266 nm dalga boyunda lazer enerjisi (μJ)	355 nm dalga boyunda lazer enerjisi (μJ)	532 nm dalga boyunda lazer enerjisi (μJ)	1064 nm dalga boyunda lazer enerjisi (μJ)
Altın	27	53	78	500
Alüminyum	42	53	63	215
Bakır	46	50	66	333
Gümüş	27	52	64	333
İndiyum	33	60	70	204
Kalay	33	56	93	205
Molibden	51	56	67	87
Nikel	48	53	53	203
Paladyum	32	52	45	303
Platin	37	54	54	235
Tantal	50	53	64	208
Titanyum	26	57	67	210
Tungsten	50	57	71	203

Çizelge 4.5'teki puls enerjileri ile ilgili hedef metaller üzerinde oluşturulan D-scan profillerinin ölçülen tam genişlikleri ve bunlardan hesaplanan ρ_{max} yarı genişlikleri Ek-4'te listelenmiştir. D-scan yönteminde 5 ns puls genişlikli lazer kullanılarak elde edilen parametreler, Denklem 3.15'te uygulanarak [J/cm^2] biriminde hesaplanan büyüklükler olası ablasyon eşik yoğunluğu değerleri olarak Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

Çizelge 4.6. Metal hedeflerin 5 ns puls süresi için F_{th} değerleri

Metal	λ = 266 nm F_{th} (J/cm^2)	λ = 355 nm F_{th} (J/cm^2)	λ = 532 nm F_{th} (J/cm^2)	λ = 1064 nm F_{th} (J/cm^2)
Altın	0.34	0.59	0.71	1.99
Alüminyum	0.55	0.83	0.64	1.55
Bakır	0.50	0.59	1.01	1.93
Gümüş	0.13	0.33	0.73	2.58
İndiyum	0.10	0.23	0.37	0.43
Kalay	0.11	0.30	0.45	0.53
Molibden	0.23	0.27	0.27	0.27
Nikel	0.10	0.13	0.22	1.30
Paladyum	0.47	0.62	0.65	2.13
Platin	0.41	0.40	0.47	1.56
Tantal	0.71	0.42	0.30	0.60
Titanyum	0.20	0.38	0.51	0.95
Tungsten	0.11	0.22	0.30	0.87

4.2.2. İnce filmlerin ns D-scan deneyleri

Lazer puls enerjileri detektör aracılığıyla ölçülerek kaydedilmiş ve Çizelge 4.7'de listelenmiştir. Bu puls enerjileri kullanılarak elde edilen karakteristik D-scan ablasyon profillerinin en geniş olduğu bölgelerin tam genişlikleri ölçülerek [µm] biriminde, bunların yarısına eşit olan ρ_{max} büyüklükleri hesaplanarak [cm] biriminde Ek-5'te verilmiştir. Çizelge 4.7 ve Ek-5'teki değerlerle ns lazer pulslarının farklı dalga boyları için Denklem 3.15'ten elde edilen sonuçlar Çizelge 4.8'de lazer ablasyon eşik enerji yoğunlukları olarak verilmiştir. Al1, Al2, Al3, Cu3, Mo3, Ta3, W2 ve W3 kodlu ince filmler görünür kaplamaya sahip olmadıkları için bu aşamada kullanılmamıştır.

Çizelge 4.7. İnce filmlerin ns D-scan deneylerinde kullanılan puls enerjileri

İnce Film	λ = 266 nm E (μJ)	λ = 355 nm E (μJ)	λ = 532 nm E (μJ)	λ = 1064 nm E (μJ)
Au1	33	16	52	150
Au2	33	13	51	150
Au3	33	13	51	150
Cu1	33	13	56	110
Cu2	33	54	55	160
Ag1	30	53	54	159
Ag2	30	53	53	98
Ag3	30	55	58	97
In1	27	55	58	134
In2	27	55	60	133
In3	27	55	50	131
Sn1	30	30	50	130
Sn2	30	30	50	130
Sn3	30	30	50	131
Mo1	27	55	50	134
Mo2	27	55	50	134
Ni1	25	58	50	348
Ni2	25	58	50	208
Ni3	25	58	50	134
Pd1	25	62	160	310
Pd2	25	62	89	150
Pd3	25	64	54	150
Pt1	25	64	52	500
Pt2	25	62	52	100
Pt3	25	62	53	103
Ta1	30	53	52	253
Ta2	30	53	52	156
Ti1	25	55	50	133
Ti2	25	55	50	132
Ti3	25	55	50	133
W1	37	53	56	156

Çizelge 4.8. İnce filmlerin 5 ns puls süresi için ablasyon eşik değerleri

İnce film	λ = 266 nm F_{th} (J/cm^2)	λ = 355 nm F_{th} (J/cm^2)	λ = 532 nm F_{th} (J/cm^2)	λ = 1064 nm F_{th} (J/cm^2)
Au1	0.024	0.018	0.055	0.431
Au2	0.023	0.032	0.051	0.295
Au3	0.035	0.031	0.063	0.085
Cu1	0.059	0.036	0.129	0.161
Cu2	0.176	0.333	0.194	0.234
Ag1	0.037	0.084	0.063	0.108
Ag2	0.038	0.100	0.037	0.459
Ag3	0.058	0.164	0.082	0.901
In1	0.080	0.199	0.216	0.402
In2	0.048	0.327	0.175	0.191
In3	0.064	0.185	0.119	0.174
Sn1	0.033	0.054	0.061	0.197
Sn2	0.076	0.088	0.111	0.320
Sn3	0.031	0.075	0.114	0.111
Mo1	0.107	0.245	0.148	0.360
Mo2	0.113	0.176	0.174	0.208
Ni1	0.100	0.251	0.238	0.465
Ni2	0.085	0.188	0.171	0.204
Ni3	0.067	0.112	0.102	0.151
Pd1	0.069	0.142	0.232	0.506
Pd2	0.038	0.096	0.136	0.152
Pd3	0.029	0.055	0.043	0.085
Pt1	0.069	0.205	0.199	0.669
Pt2	0.043	0.065	0.117	0.197
Pt3	0.053	0.075	0.053	0.096
Ta1	0.084	0.159	0.171	0.280
Ta2	0.115	0.252	0.218	0.379
Ti1	0.154	0.284	0.333	0.603
Ti2	0.173	0.234	0.263	0.537
Ti3	0.106	0.217	0.195	0.356
W1	0.096	0.110	0.157	0.216

4.3. Tartışma

Metal hedeflerin ve bunlardan üretilen ince filmlerin fs ve ns lazer pulsları ile lazer ablasyon eşik değerleri D-scan yöntemi ile hesaplanarak ilgili bölümlerde çizelgeler ile verilmektedir. Bu kısımda elde edilen sonuçlar hakkında bazı karşılaştırmalar ve yorumlar yapılmıştır. Ayrıca çalışmanın uygulamalı adımları hakkında bazı ek bilgiler verilmiştir.

4.3.1. Fs Lazer ile D-scan Sonuçları

Fs lazer sistemi ile yapılan D-scan çalışmaları 90 fs genişliğe sahip lazer sistemi tarafından üretilen 800 nm temel dalga boyunda ve optik kit aracılığıyla üretilen 2. ve 3. harmonikleri 400 ve 266 nm kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Eşik değerlerin hesaplanması için seçilen D-scan yöntemi, karakteristik ablasyon profilinin maksimum genişliğinin yarısını ve işlem sırasında kullanılan lazer puls gücünün veya enerjisinin Denklem 3.15'te kullanılmasına dayalıdır. Lazer puls enerjileri detektörler aracılığıyla belirlenerek kaydedilmiş ve ilgili bölümlerde çizelgeler halinde verilmiştir. Bu değerler ölçülürken lazer enerjilerindeki anlık sapmalar ihmal edilmiştir. Bunun sonucunda hesaplanan F_{th} değerlerindeki hata payları D-scan ablasyon şeklinin ρ_{max} büyüklüklerinin ölçümlerinden kaynaklanmaktadır. Çizelgelerde verilen F_{th} değerleri, her bir ρ_{max} ile o ablasyon taramasının gerçekleştirildiği lazer enerjilerinden hesaplanan eşik değerlerin ortalamaları olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan her bir değere göre standart sapma F_{th} değerindeki hata payı olarak verilmiştir.

4.3.1.1. Metal hedeflerin hesaplanan F_{th} değerlerinin karşılaştırılması

Çizelge 4.2'den Çizelge 4.9'a aktarılan verilere göre alüminyum, gümüş, indiyum, molibden ve platin hedefler için 266, 400 ve 800 nm dalga boylu lazer pulsları için hesaplanan F_{th} değerleri, dalga boyunun artışına bağlı olarak orantılı bir artış göstermiştir. Bu sayılan metal hedeflerin lazer dalga boylarına göre F_{th} değerlerinde meydana gelen değişim teorik varsayımlar ve deneysel bazı sonuçlarla paralellik taşır. Gamaly ve arkadaşları, lazer dalga boyu ile F_{th} arasında doğru orantılı bir bağlılık olduğunu göstermişlerdir (Gamaly ve ark., 2002). Tungsten hedefin bu çalışmada elde edilen ablasyon eşik değerleri yüksek hata payları göz önüne alınarak

değerlendirildiğinde yine teorik yaklaşıma uygunluk gösteren, dalga boyunun artışı ile artan sonuçlar vermektedir.

Çizelge 4.9. Alüminyum, gümüş, indiyum, molibden, platinin ve tungstenin F_{th} değerleri

Metal	λ = 266 nm F_{th} (J/cm^2)	λ = 400 nm F_{th} (J/cm^2)	λ = 800 F_{th} (J/cm^2)
Alüminyum	0.82	1.24	6.79
Gümüş	0.84	0.91	1.08
İndiyum	1.03	1.3	1.56
Molibden	0.85	1.92	2.34
Platin	1.28	1.74	3.66
Tungsten	2.1	1.82	3.59

Sn, Ni ve Pd hedeflerin eşik değerleri 266 ve 800 nm veya 400 ile 800 nm dalga boylarına göre incelendiğinde dalga boyuyla beraber artış gösterdiği gözlemlenmektedir. Ancak bu metallerin 400 nm ile elde edilen sonuçları 266 nm dalga boylarına göre düşüş göstermiştir. Au için hesaplanan F_{th} değerleri arasında en yüksek değer 266 nm dalga boylu pulslarla elde edilmiştir. 400 nm ile 800 nm dalga boyları için sırasıyla 0.71 ve 0.85 J/cm^2 hesaplanmıştır ve bunlar kendi aralarında lazer dalga boyunun artışıyla F_{th} değerinde artış ortaya çıkmasını öngören teorik yaklaşıma uyan bir görüntü çizmektedir.

Cu hedefin 266 ve 800 nm lazer dalga boylarındaki ablasyon eşikleri incelendiğinde bu iki dalga boyu arasındaki değişime uygun bir artış görülmekle birlikte 400 nm için elde edilen F_{th} değerinde sapma görülmektedir. 266 nm ile 400 nm dalga boylu lazer pulsları ile Ta hedef için hesaplanan F_{th} değerleri teorik yaklaşıma uygun artış ortaya koyarken 800 nm için hesaplanan 0.66 J/cm^2 değeri diğer ikisinden daha düşük bir sonuç vermiştir. Ti için elde edilen sonuçlar 400 ve 800 nm için neredeyse aynı değerde iken, 266 nm dalga boyu için bunlardan yüksek bir değer olarak belirlenmiştir.

4.3.1.2. Literatürde rapor edilmiş F_{th} verileri ile karşılaştırma

Çizelge 4.2'de verilen metal hedeflerin ablasyon eşikleri ile ilgili karşılaştırma yapmak için literatür araştırması yapılmıştır. Au, Al, Cu, Ag ve Ni metallerinin ablasyon eşik değerleri ile ilgili çok sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Bu aşamada bazı malzemeler için yapılan farklı çalışmalardan ulaşılan ablasyon eşik değerleri arasında 5 kata kadar farklar olduğu görülmüştür (Mannion ve ark., 2004). Bu duruma yol açan bazı nedenler bulunmaktadır. Dalga boyu ve puls süresi gibi parametre farklılıkları bunlardan biridir. Gamaly ve arkadaşlarının 2002 yılında yaptıkları çalışmada 780 nm dalga boylu 5 fs puls

süreli lazer pulsları ile Cu metalinin ablasyon eşik değeri 0.5 J/cm^2 hesaplanmışken, Le Harzic ve arkadaşları 800 nm dalga boyundaki 120 fs genişliğe sahip lazer pulsları ile 1.7 J/cm^2 elde etmiştirler (Gamaly ve ark., 2002; Le Harzic ve ark., 2005).

Literatürdeki F_{th} değerleri arasındaki farklara neden olan bir diğer unsur, aynı puls süresine sahip düşük ve yüksek şiddetli pulsların aynı malzeme üzerinde farklı ablasyon oranları ortaya çıkarmasına dayanmaktadır. Lazer şiddetinin artışı ile ablasyon oranının artışı tamamen doğrusal olarak gerçekleşmemektedir. Bu durum Liu Yöntemi ile ablasyon eşik değer belirleme çalışmalarında ablasyon krater çaplarının, lazer enerji yoğunluğunun fonksiyonu olarak aktarıldığı grafikte net olarak görülebilmektedir (Şekil 2.1-b). Böylece lazer enerji yoğunluğu büyüklüğüne bağlı olan iki ablasyon rejimi ortaya çıkmaktadır (Byskov-Nielsen ve ark., 2010). Birbirleri ile karşılaştırıldığında düşük lazer enerji yoğunluğu rejiminde düşük, yüksek lazer enerji yoğunluğu rejiminde yüksek eşik değerler ve bunlar arasında birkaç kat fark ortaya çıkabilmektedir (Furusawa ve ark., 1999).

Literatürden elde edilen eşik değerler arasında büyük farklar ortaya çıkmasına neden olan bir diğer sebep de kullanılan yöntemle alakalıdır. Liu'nun yönteminde ablasyon deliklerinin çaplarına veya derinliklerine bağlı olarak hesaplanan F_{th} değerleri arasında 1-2 kat oran farkı olduğu görülmektedir (Mannion ve ark., 2004). Ablasyon işleminin vakum ortamında gerçekleştirilmesi (Preuss ve ark., 1995), F_{th} değerlerinin daha düşük olmasına yol açan son bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır.

Teorik olarak hesaplanan eşik değerlerinin deneysel olarak elde edilen değerlerle örtüşmediği, oran olarak birkaç kat farklı sonuçlar veya dalga boyu değişimi ile orantılı değişim göstermeyen sonuçlar da bildirilmiştir. 248 nm dalga boylu 0.5 ps genişliğe sahip pulslarla Au metali için teorik olarak hesaplanan F_{th} değeri 0.078 J/cm^2, deneysel yollarla 0.21 J/cm^2, In metali için teorik olarak 0.069 J/cm^2 hesaplanan F_{th} değeri deneysel olarak 0.125 J/cm^2, W metalinin teorik olarak eşik enerji yoğunluğu için hesaplanan 0.127 J/cm^2 değeri deney sonucunda 0.4 J/cm^2 olarak elde edilmiştir (Preuss ve ark., 1995).

Teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki farkların teorik yapı oluşturulurken yapılan bazı kabullerden ve yaklaşım yöntemlerinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Ayrıca metallerin ablasyon eşik değerleri hakkında yapılan literatür araştırmasında karşılaşılan bir başka durum, %25'lik oran farklarına sahip değerlerin birbiri ile kabul edilebilir bir ilişki içinde olduklarının değerlendirilmesidir (Spiro ve ark., 2012).

Au metal hedef için bu çalışmada 800 nm dalga boyu ile elde edilen 0.85 J/cm^2 değeri, literatürde 785 nm dalga boylu 130 fs süreli lazer pulsları ile elde edilen 0.86 J/cm^2 (Shaheen ve ark., 2014) değeri ile örtüşmektedir. 400 nm dalga boylu lazer için bulduğumuz 0.71 J/cm^2 eşik değeri dalga boyu kısaldıkça F_{th} değerinde gerçekleşmesi beklenen azalmaya uyumlu sonuç vermektedir.

Al için eşik değerleri 266 nm dalga boyunda 0.82 J/cm^2, 400 nm dalga boyunda 1.24 J/cm^2, 800 nm dalga boyunda 6.79 J/cm^2 hesaplanmıştır (Çizelge 4.2). Değerlerdeki değişim, lazer dalga boyunun artışı ile ablasyon eşik değerindeki artış beklentisini karşılamaktadır. 266 ve 400 nm için F_{th} sonuçları, 6 ps süreli 355 nm dalga boylu lazer pulslarıyla yapılan çalışmada elde edilen 0.93 J/cm^2 değeri (Spiro ve ark., 2012) ile karşılaştırıldığında dalga boyu ve puls süreleri değişimlerinin etkisi göz önüne alınarak uyumluluk içinde oldukları değerlendirilebilir. 6.79 J/cm^2 değerinde bir hatalı durum olduğu kabul edilebilir. Diğer iki eşik değerlerine göre gösterdiği artış oldukça yüksektir. 800 nm ile yapılan diğer çalışmalardaki 1.0 J/cm^2 (Le Harzic ve ark., 2005), 0.5 J/cm^2 (Colombier ve ark., 2005) değerleriyle karşılaştırıldığında da oldukça yüksek kalmaktadır.

5-150 fs arasındaki farklı süreli lazer pulslarının 775, 780 ve 800 nm dalga boyları kullanılarak gerçekleştirilen Cu için elde edilen F_{th} değerlerinde, 0.5 J/cm^2 (Gamaly ve ark., 2002), 0.74 ve 3.19 J/cm^2 (Mannion ve ark., 2004), 1.7 J/cm^2 (Byskov-Nielsen, 2010) ve 3 J/cm^2 (Colombier ve ark., 2005) şeklinde oldukça farklılık gösteren sonuçlar gözlemlenmiştir. Bu çalışmada bakırın farklı dalga boyları ile elde edilen ablasyon eşik enerji yoğunluklarının verilen örnek çalışmalardaki aralıklarda yer alması nedeniyle kabul edilebilir sonuçlar oldukları değerlendirilebilir.

Ag için Çizelge 4.2'de verilen eşik değerleri, lazer dalga boylarının değişimine göre uyumluluk göstermektedir. Gümüş metali üzerinde yakın dalga boyu ve puls süreleri kullanılarak yapılan ablasyon eşik değeri belirleme çalışmalarında aralarında birkaç kat fark bulunan 0.39 J/cm^2 (Furusawa ve ark., 1999) ve 1.5 J/cm^2 (Byskov-Nielsen, 2010) gibi sonuçlarla karşılaşılmıştır. Elde ettiğimiz sonuçlar literatürden ulaşılan değerlerin oluşturduğu aralıkta yer almaktadır.

Literatür karşılaştırmasında, çokça çalışıldığı görülen bir diğer metal nikeldir. Ultra kısa puls süreleri ile ve çeşitli dalga boylarında yapılan çalışmalarda Ni için 0.05 J/cm^2 (Nedialkov ve ark., 2007), 0.085 J/cm^2 (Preuss ve ark., 1995), 1.47 J/cm^2 (Spiro ve ark., 2012) gibi farklı F_{th} değerleri rapor edilmiştir. Spiro ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği 6 ps puls süreli lazer ile üç farklı dalga boyunun F_{th} üzerindeki etkisinin

gösterildiği çalışmada, ara değerdeki dalga boyunda en yüksek F_{th} elde edilmiştir (Spiro ve ark., 2012). Karşılaştırılan sonuçlara göre elde ettiğimiz Ni metal hedefin ablasyon eşik değerleri 266 ve 800 nm için literatürden elde edilen verilerle uyumluluk göstermektedir. 400 nm dalga boyu bu çalışmada kullanılan ara dalga boyu değeridir ve bunun için elde ettiğimiz F_{th} değeri, dalga boyunun artışına bağlı olarak ortaya çıkması beklenen eşik değer artışına aykırılık göstermektedir.

Mo metal hedefin bu çalışmada hesaplanan eşik değerleri 266, 400 ve 800 nm dalga boyları için 0.85, 1.92 ve 2.34 J/cm^2 olarak belirlenmiştir. Bunlar dalga boyu ile artış göstermeleri nedeniyle kendi aralarında uyumluluğa sahiptirler. Mo metali ile D-scan yöntemi kullanılarak 778 nm dalga boyu ve 30 fs süreli lazer pulsları ile hava ve vakum ortamında gerçekleştirilen çalışmalarda sırasıyla 0.04 ve 0.11 J/cm^2 eşik değerlerin elde edildiği rapor edilmiştir (Samad ve ark., 2010b). Bahsedilen bu çalışma vakum ve hava ortamında F_{th} değişimini gösteren bir çalışma olmakla beraber Çizelge 4.2'deki molibdenin eşik değerleri ile oran ve mertebe farklılıkları göstermektedir. Bu farklılıkların başlıca nedeninin lazer parametrelerindeki farklılıklar olduğu söylenebilir.

4.3.1.3. Literatür karşılaştırması hakkında değerlendirme

Literatürden elde edilen F_{th} değerleri arasındaki çeşitlilik, bu değerin beklendiği gibi evrensel sonuçlar vermediği fikrini doğurmuştur. Aynı deneysel parametreler ve aynı yöntemle farklı gruplar tarafından gerçekleştirilen sonuçlarda büyük farklar da ortaya çıkmış, kabul edilebilir ilişkiler de gözlemlenmiş ve bunlarla beraber tam örtüşme durumuna birkaç örnekte rastlanmıştır.

Deneysel süreçlerin yüksek hassasiyette gerçekleştirildiği kabul edilirse bu duruma yol açan en önemli nedenin, kullanılan hedefin aynı madde olmasına rağmen çeşitli şartlardan kaynaklanan farklı yapı ve yüzey özelliklerine sahip olması şeklinde değerlendirilebilmektedir. Malzemelerin ultra kısa pulslarla ablasyon eşik değerlerinin, o malzemenin iş fonksiyonu ile orantılılık göstermesi (Hashida ve ark., 2016) farklı çalışmalardaki F_{th} değerlerindeki küçük sapmaların, yapı farklılıkları ile açıklanması için örnek olarak sunulabilir.

Aynı parametreler ve yöntemlerle elde edilen eşik değerlerinin aralarındaki daha büyük farkları açıklayabilmek için birkaç neden sıralanabilir. Bunlardan biri hedeflerin yüzey özellikleridir. Yüksek şiddetli lazer pulsları için ortaya çıkan soğurma mekanizmaları nedeniyle malzemenin yansıtma yoluyla lazer gücünde kayba uğraması

beklenmemektedir. Ancak farklı ablasyon süreçlerinde farklı malzeme yüzey özellikleri ablasyon oranını etkileyerek eşik değer hesaplamalarında tutarsızlıklara neden olabilecektir.

Literatür ve bu çalışmadaki F_{th} değerlerinde sapmaya neden olan diğer bir sebep, ablasyon mekanizmasının çalıştırıldığı geometridir. Lazerin malzeme üzerine geliş açısı plazma ile etkileşimine yol açabilmektedir. Plazma ile etkileşen lazer pulsları güç kaybetmesine ve kullanılan lazer gücüne göre gerçekleşmesi gerekenden daha düşük ablasyon verimlerine ulaşılmasına yol açarak F_{th} değerlerinde sapmalara yol açabilmektedir (Singh ve Viatella, 1994).

D-scan yönteminde ablasyon profilinin, diğer yöntemlerde ablasyon kraterlerinin ölçümlerindeki hassasiyet farklılıkları da F_{th} sonuçlarındaki sapmaların önemli sebeplerindendir. D-scan yöntemi için Denklem 3.15'te ρ_{max} değerinin karesi ile hesap yapılması, karakteristik şeklin birkaç mikrometre farklı ölçülmesi ile 1.5-2 kat oran farkına sahip F_{th} değerlerinin ortaya çıkmasına yol açmaktadır.

Sonuç olarak, lazer ve malzeme ile ilgili tüm parametreler özdeş olmadıkça belirlenen her bir eşik değer o çalışmaya özgü sonuçlar vermektedir.

4.3.1.4. İnce filmlerin hesaplanan F_{th} değerlerinin karşılaştırılması

İnce filmlerin karakteristiklerini belirleyen çok fazla parametre bulunması sebebiyle, bu çalışmada ince filmler için hesaplanan lazer ablasyon eşik enerji yoğunlukları kendi aralarında ve bulk haldeki hedeflerinin F_{th} değerleri ile karşılaştırılmıştır.

İnce filmler için hesaplanan F_{th} değerlerinin büyük bir kısmı, bulk haldeki metallerin F_{th} değerlerine göre daha düşük elde edilmiştir. İnce filmler için bu durum tahmin edilen bir sonuçtur.

Çizelge 4.10. Eşit veya çok yakın F_{th} değerine sahip ince filmler

İnce Film	λ = 266 nm F_{th} (J/cm^2)	λ = 400 nm F_{th} (J/cm^2)	λ = 800 nm F_{th} (J/cm^2)
Cu1	0.037	0.059	0.066
Cu2	0.039	0.057	0.067
Ag2	0.153	0.023	0.143
Ag3	0.154	0.026	0.128
Sn1	0.174	0.102	0.1
Sn2	0.089	0.102	0.061
Sn3	0.082	0.05	0.049
Ti1	0.265	0.284	0.478
Ti2	0.275	0.274	0.436

Veriler detaylı incelendiğinde ilginç görülen bir durum ortaya çıkmaktadır. Bazı metallerin farklı kalınlıklardaki ince filmlerinin, aynı dalga boylu pulslar için eşit veya eşit denebilecek büyüklükteki ablasyon eşik değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu değerler Çizelge 4.10'da genel bir özet olarak verilmektedir. 1 ve 2 kodlu Cu filmleri, 2 ve 3 kodlu Ag filmleri, 1 ve 2 kodlu Ti filmleri 266, 400 ve 800 nm dalga boyları için eşit F_{th} değerleri vermiştir. 2 ve 3 kodlu Sn filmleri 266 nm'de, 1 ve 2 kodlu Sn filmleri 400 nm'deki lazer pulslarında eşit F_{th} değerleri göstermektedir. Bu durum "Kalınlığı, optik nüfuz derinliğinden fazla olan filmlerde F_{th} değeri kalınlığa bağlı değildir." ifadesi ile açıklanmaktadır (Preuss ve ark., 1994).

2 ve 3 kodlu In filmleri 266 nm'de, 1 ve 2 kodlu In filmleri 400 ve 800 nm'de eşit ve eşite yakın değerlerle ablasyona uğramaya başlamakta olduğu tespit edilmiştir. Au ince filmlerin tümü 400 nm, Pt ince filmlerinin 1 ve 2 kodlu olanları 266 ve 400 nm, 1 ve 2 kodlu Pd ince filmleri 266 ve 800 nm, 1 ve 2 kodlu Mo ince filmleri 266, 400 ve 800 nm dalga boylu lazer pulslarında eşit veya denk sayılabilecek eşik değerlere sahip olduğu hesaplanmıştır.

Preuss ve arkadaşlarının yaptığı açıklamaya uymayan ince film ve dalga boyu ikililerinde kalınlık arttıkça F_{th} değerlerinin arttığı görülmektedir. Au ince filmlerin hepsinin 266 ve 800 nm, Sn ve Pt ince filmlerinin hepsinin 800 nm, Ni ve Ta ince filmlerin tümünün 266, 400 ve 800 nm dalga boylarındaki lazer pulsları için eşik değerlerinin kalınlıkla beraber arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

Ni metal hedefi için 266 nm dalga boyunda 0.62 J/cm^2 ve 400 nm dalga boyunda 0.22 J/cm^2 olarak hesaplanan eşik değerleri ile Ni1 ince filminin aynı dalga boylarında sırasıyla 0.581 ve 0.191 J/cm^2 eşik değerleri birbirlerine oldukça yakındır. Bu filmin kalınlığı yaklaşık 96 nm olarak belirlenmiştir ve Şekil 3.11'de görülebileceği üzere yarı geçirgen görünüşe sahiptir.

Ta metali ile 1 kodlu Ta ince filmin 266 ve 800 nm dalga boylarındaki F_{th} değerleri arasında da ilginç bir durum vardır. 266 nm dalga boyunda metal hedefin 0.91 J/cm^2, Ta1 filminin 0.709 J/cm^2 ablasyon eşik değerleri elde edilmiştir. İlginç nokta Ta1 filminin 800 nm'deki ablasyon eşik değeri 0.696 J/cm^2 metal hedefin aynı dalga boyundaki eşik değeri 0.65 J/cm^2'den yüksek çıkmıştır. Bu filmin kalınlığı yaklaşık 108 nm'dir ve yarı şeffaf bir görüntüdedir.

1 ve 2 kodlu Ti ince filmleri için 266 ve 400 nm lazer pulslarında metalin eşik değerinin yaklaşık yarısına sahip oldukları gözlemlenmiştir. Ti1 ince filminin 800 nm dalga boyu için 0.478 J/cm^2 değeri ile metal hedefin aynı dalga boyundaki 0.44 J/cm^2 eşik

değerinden biraz daha yüksektir. Ti1 ve Ti2 filmlerinin kalınlıkları sırasıyla yaklaşık 58 ve 52 nm olarak belirlenmiştir.

Bazı ince filmlerin metal hedefleri ile çok yakın veya onlardan daha yüksek eşik değere sahip olması, üstelik bu ince filmlerden daha kalın olanlarda benzer özellikler görülmemesi ilginç bir durum ortaya çıkarmıştır. Metal hedeflerin mikroskopla yapılan fs D-scan profil ölçümleri sırasında, oluşturulan ablasyonun çok yüzeysel kaldığı, metallerin yüzeylerinde var olan çizik ve oyuklar yok edilmeden, yüzeyin pürüzlü yapısı üzerinde çok hafif bir ablasyon gerçekleştiği görülmüştür. Bu durum ultra hızlı pulsların görece düşük ablasyon oranına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Eğer metal hedef ile ince filmlerinin yapı ve yüzey özellikleri birbirleri ile benzerlik gösteriyorsa, yani metal hedefin yüzeyinde ince film kaplamasının benzeri bir yapı varsa metal malzeme ile ince filminin F_{th} değerleri aynı olacaktır.

PLD ile hedef malzemenin kristal yapısı alttabakaya aktarılabilmektedir. Ancak bunun için alttabakanın ısıtılarak üzerine tutunan parçacıkların hareketliliklerinin artırılması ya da ek olarak alttabakanın tek kristal yapıya sahip olması gerekmektedir (Muth ve ark., 1999). Bu çalışmada ince filmler üretilirken kristal yapının aktarılması amaçlanmamıştır. Üretilen ince filmlerin çoklu kristal yapıda olması beklenmektedir. Bulk metal hedef ile ince filmlerin eşit F_{th} değerlerine sahip olması için yapılan açıklama geçerli ise ince filmleri ile aynı eşik değere sahip olan hedef metallerin çoklu kristal yapıda olduğu ve bunların hedef malzeme içinde gösterdiği oransal dağılımın ince filmlere aktarıldığı söylenebilir. Bu ifade yalnızca bir yorumdur ve kesin sonuç için kristalografik analizlerin yapılması gerekir.

W ince filmlerinden yalnızca 1 kodlu numune D-scan işlemlerinde kullanılabilmiştir. Metal hedef için hesaplanan birkaç J/cm^2'lik eşik enerji yoğunluklarına karşılık W1 filmin oldukça düşük F_{th} değerleri vardır.

Ag1 filmi üzerinde 800 nm dalga boyundaki lazer pulsları ile 15 μJ lazer puls enerjisi ile elde edilen F_{th} değeri Çizelge 4.4'te 0.033 J/cm^2 olarak verilmiştir. Bu film üzerinde aynı dalga boyunda 5 μJ ile yapılan D-scan işlemi sonucunda 0.027 J/cm^2 eşik değer belirlenmiştir. Bu iki değer birbiri ile kabul edilebilir bir denklik göstermektedir ve aynı malzemenin aynı dalga boyundaki eşik değerin üzerindeki farklı lazer şiddetlerine vereceği tepkinin özdeş olduğunun bir göstergesidir.

Sonuç olarak, fs lazer sistemi ile metal hedefler ve ince filmler üzerinde gerçekleştirilen D-scan işlemleri sonucunda elde edilen lazer ablasyon eşik enerji yoğunlukları, teorik yaklaşımlara ve literatürden ulaşılan verilere uygunluk göstermiştir.

Ortaya çıkan bazı sapmaların çeşitli sebepleri vardır. Ablasyon eşiği belirleme deneylerindeki lazer parametreleri ve malzeme özelliklerinin çok sayıda değişken ortaya çıkarması nedeniyle elde edilen F_{th} değerleri deneye özgü sonuçlar vermektedir. Bu değişkenler birbirlerine yaklaştıkça, F_{th} değerleri de yakınlaşan değerlerde ortaya çıkmaktadır.

4.3.2. Nanosaniye Lazer ile D-scan Sonuçları

Lazer güç dağılımının Gausyen özellikte olması üzerine kurulan D-scan yönteminin Gausyen güç dağılımına sahip ns süreli pulslarla uygulandığında da hedef malzeme üzerinde benzer geometrik ablasyon şeklinin oluşabileceği öngörülmektedir. Fs lazer pulsları ile gerçekleştirilen diyagonal tarama işlemi ns lazer pulsları ile tekrarlandığında numune üzerinde karakteristik D-scan şeklinin ortaya çıktığı görülmüştür.

Simetrik D-scan ablasyon profilleri hem metal hedeflerde hem de ince filmlerde elde edilmiştir. Ancak metal hedeflerde ve ince filmlerde oluşturulan şekillerde, odak noktası civarında ısıdan etkilenmiş oldukça geniş alanlar ortaya çıkmıştır. Metal hedeflerin bazılarında karakteristik D-scan ablasyon şekillerinin kanat kısımları ince bir çizgi şeklindeki ısıdan etkilenmiş alanla sınırlanmıştır. Bazı metal hedeflerde ise ablasyon şeklinin kanat kısımları oldukça geniş ısıdan etkilenmiş alanla çevrelenmiştir. İnce filmlerde odaklanmış lazerin oluşturduğu en dar ablasyon bölgesi yakınlarında çok geniş ısı etkili alanlar ortaya çıkmışsa da ρ_{max} ölçümlerinin yapıldığı bölgelerin kenarlarında ablasyondan başka etki gözlemlenmemiştir.

Ek-4'te verilen metal hedefler için ρ_{max} değerleri, ısıdan etkilenmiş alanın sınırladığı ablasyon bölgelerinden elde edilmiştir. İnce filmlerde ise ablasyon şeklinin en geniş olduğu alanların ölçümlerinden ρ_{max} değerleri hesaplanmıştır. Her bir şeklin oluşturulduğu puls enerjileri ile Denklem 3.15 ifadesine göre yapılan hesaplar sonucu elde edilen değerler Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.8'de F_{th} olarak verilmiştir.

266 nm dalga boyu hem fs hem de ns D-scan işlemlerinde kullanılmıştır. İki farklı lazer sisteminden elde edilen 266 nm dalga boylu lazer pulsları kullanılarak hesaplanan F_{th} değerleri karşılaştırıldığında ns ile ortaya çıkan F_{th} değerlerinin, fs ile elde edilenlerden daha düşük oldukları görülmektedir. Bir malzemenin F_{th} değeri, ultra hızlı pulslarda daha uzun pulslara göre oldukça düşük bir değerde ortaya çıkması beklenmektedir (Krüger ve Kautek, 1999). Ayrıca 266, 532 ve 1064 nm dalga boylarına sahip 5 ns genişlikli lazer

pulslarıyla yapılan bir çalışmada (Cabalin ve Laserna, 1998) Al, Cu, Ag, Mo, Ni ve W için hesaplanan eşik değerler ile karşılaştırıldığında bu çalışmada D-scan yönteminde aynı lazer parametrelerini kullanarak hesapladığımız değerler oldukça düşük kalmaktadır. Bu iki karşılaştırmaya göre ns D-scan deneyleri ile elde edilen F_{th} değerlerinin gerçek lazer ablasyon eşik değerleri olmadığı kabul edilmiştir.

Ns lazer pulsları ile ablasyon işleminde eşik değerlerin erime ve kaynama noktaları ile makul bir ilişki içinde olmaları beklenmektedir (Cabalin ve Laserna, 1998). Bu ilişki In ve Sn metal hedefleri için elde edilen sonuçlarda ortaya çıkmıştır. Yüksek erime ve kaynama sıcaklıklarına sahip Mo, Ta ve W için ns lazer ile yapılan D-scan işlemleri sonucunda elde edilen eşik değerler diğer metallere göre düşük değerlere sahiptir ve faz değişim noktaları ile ortaya çıkması beklenen bağlılık gerçekleşmemiştir.

Bunların yanında Mo ve Ta hariç diğer metaller, ns lazer ile gerçekleştirilen D-scan işlemlerinde artış gösteren dalga boylarına karşılık artan F_{th} değerleri göstermiştir.

İnce filmlerin D-scan sonuçları değerlendirilirken elde edilen F_{th} değerlerinin film kalınlığı ile orantılı şekilde artması (Cabalin ve Laserna, 1998) ve bir noktada ise bulk metal ile aynı sonucu vermesi gerekir (Bäuerle, 2011b). Dalga boyunun artması ile D-scan sonuçlarının aynı filmler için artması gerekmektedir (Vladoiu ve ark., 2007).

Ni, Pd ve Pt ince filmlerinin F_{th} değerleri, D-scan işlemi gerçekleştirilen tüm dalga boylarında kalınlığın artması ile artış göstermiştir. In, Ti, Mo1 ve Mo2 filmleri sırasıyla 266 nm, 355 nm, 266 ve 532 nm hariç diğer dalga boylarında, kalınlıkla orantılı olarak artış gösteren F_{th} değerlerine sahiptir.

Tüm Au ve Sn ince filmleri ile Pd1, Pd2, Pt3, Ta1, Ti1, Ti2 ve W1 filmleri lazer dalga boyunun artışı ile artan F_{th} sonuçları sağlamıştır. Diğer ince filmlerde ara değerlerde sapmalara rastlanmakla beraber 266 nm ile 1064 nm dalga boyuna geçişte D-scan yöntemi ile hesaplanan F_{th} değerleri artış göstermiştir.

In ince filmlerinin hepsi tüm dalga boylarında, Mo1 266 ve 1064 nm dalga boylarında, Ni1 266 ve 532 nm dalga boylarında bulk metalleri ile aynı veya birbirlerine çok yakın F_{th} değerlerine sahiptir. Mo1 1064 nm, Ni1 355 nm, Ti1 ise tüm dalga boylarında bulk hedefleri ile karşılaştırılabilir F_{th} değerleri vermiştir. Bunlara benzer durum fs D-scan deneylerinde Ni, Ta ve Ti için ortaya çıkmıştır. Bu durum metal hedefin yüzey yapısı ile ince filmlerin yapılarındaki benzerlikler ve ablasyon oranları ile optik nüfuz derinliğine bağlı olarak değerlendirilmiştir. Ns D-scan deneylerinde ortaya çıkan benzerlikler fs sistemindekine benzer şekilde açıklanmaktadır.

Rung ve arkadaşları optik soğurma derinliğine yakın film kalınlıklarında ablasyon eşiğinin minimum olduğunu, termal difüzyon derinliğinden daha kalın filmlerin ise ablasyon eşik değerlerinin sabit kaldığını belirtmişlerdir (Rung ve ark., 2014). Başka bir çalışmada bu durum, film kalınlığı termal difüzyon derinliğine ulaşana kadar ablasyon eşik değerinin film kalınlığı ile orantılı arttığı, bu kalınlıktan sonra ise eşik değerin kalınlıktan bağımsız hale geldiği şeklinde açıklanmıştır (Matthias ve ark., 1994).

İnce filmler PLD yöntemi ile 1064 nm dalga boyundaki ns lazer pulsları ile üretilmiştir. Metaller üzerinde yapılan D-scan çalışmasında elde edilen sonuçlar, ince filmlerin kalınlıkları (Çizelge 3.6) ile karşılaştırıldığında bazıları ilişkili sonuçlar kurulabildiği görülmektedir.

En yüksek kalınlıktaki filmlerin sırasıyla In1 ve Sn1 olduğu ve In ile Sn için bu dalga boyunda en düşük F_{th} değerleri verdiği görülmektedir. Ta ve W ince filmleri sonraki dördüncü ve beşinci en yüksek kalınlığa sahip filmlerdir ve bunların 1064 nm için D-scan ile hesaplanan F_{th} değerleri bu sonuçla uyumlu sayılabilir.

En kalın filmler arasındaki Ni1 film kalınlığı ile metal hedefi için hesaplanan F_{th} değeri ile yüksek kalınlık-düşük F_{th} kıyaslamasında sapma yaratmaktadır. En düşük kalınlığa sahip Ag3 ve Au3 filmlerinin metalleri için D-scan ile hesaplanan 1064 nm dalga boyuna ait F_{th} değerleri uyumluluk göstermektedir. Ag3 filmi yaklaşık 25 nm'dir ve gümüş için F_{th} 2.72 J/cm^2 hesaplanmıştır. Au3 filmi yaklaşık 25.5 nm kalınlıktadır ve altın metali için ns mertebesindeki F_{th} değeri, 2.57 J/cm^2'dir. Bunlar görünür kaplamaya sahip olan filmlerle yapılan karşılaştırmalardır. Cu3, Mo3, Ta3, W2 ve W3 filmlerin kalınlıklarının Ag3'ten daha düşük kalınlıklara sahip olacakları varsayılarak karşılaştırma yapıldığında ilişkili bir durumdan bahsedilememektedir.

Ns lazer sistemi ile gerçekleştirilen D-scan sonuçlarıyla ilgili yapılan değerlendirmelerle, hesaplanan F_{th} değerlerinin ablasyon eşik enerji yoğunlukları olmadığı sonucuna varılabilir. Ancak yapılan karşılaştırmalardaki tutarlı sonuçlar bu değerlerin anlamsız büyüklükler olmadığını da göstermektedir. Bu değerler, gerçekleştirilen ablasyon işleminin sayısal bir parametresi olarak tanımlanabilir.

Sonuç olarak D-scan yönteminin ns lazer sisteminde ablasyon eşik değeri belirlemek için uygun bir yöntem olmadığı söylenebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, metal yapıların (Au, Al, Cu, Ag, In, Sn, Mo, Ni, Pd, Pt, Ta, Ti, W) ve bu metallerin PLD ile üretilen üç farklı kalınlıktaki ince filmlerinin lazer ablasyon eşik değerlerinin D-scan yöntemi ile belirlenmesi gerçekleştirilmiştir.

PLD tekniğinde, ns lazer sisteminden elde edilen üç farklı lazer puls enerjisi kullanılarak, her bir metalden üçer tane ince film üretilmiştir. Üretilen tüm ince filmlerin, puls enerjisi ile doğru orantılı değişen film kalınlıklarına sahip oldukları gösterilmiştir.

Metal hedef numunelerin ve üretilen ince filmlerin lazer ablasyon eşik enerji yoğunlukları, fs lazer sisteminde 266, 400 ve 800 nm dalga boylu lazer pulsları için belirlenmiştir. Metal hedefler için elde edilen F_{th} değerleri literatür verileri ile karşılaştırılmış, tutarsızlık ortaya çıkan sonuçlar yorumlanmış ve uygulanabilir sonuçlar elde edildiği değerlendirilmiştir.

İnce filmlerin özelliklerini belirleyen çok sayıda parametre olduğundan bu yapıların F_{th} değerleri ile literatürden ulaşılacak ince film F_{th} değerleri arasında karşılaştırma yapılmamıştır. Bu değerler ince filmlerin kendi aralarında ve bulk haldeki yapıları ile karşılaştırılmış, ortaya çıkan sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu yapılar için elde edilen verilerin de uygulanabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Böylece D-scan yönteminin bulk malzemelerle olduğu kadar ince filmlerle de uygulanabilecek bir yöntem olduğu gösterilmiştir.

D-scan yöntemi, lazer pulslarının Gausyen güç dağılımına sahip olmasını teorik temel olarak almaktadır. Bu yaklaşımla, D-scan işlemleri metal yapılar ve ince filmler için Gausyen pulslar üreten ns lazer sistemi ile de uygulanmıştır. Bu çalışmada ns lazer sisteminin 1064, 532, 355 ve 266 nm dalga boyları kullanılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar fs lazer sistemi ile elde edilen F_{th} değerleri ile karşılaştırıldığında, ns lazer pulsları ile D-scan yönteminin gerçek F_{th} değerlerini ortaya koymadığı gözlenmiştir.

Ns lazer sistemi için elde edilen sayısal sonuçların kendi aralarında uyumlu sonuçlar ortaya koyduğu ve bazı şartlarda F_{th} benzeri karakter gösterdiği gözlemlenmiştir.

D-scan yönteminde ns lazer pulslarının kullanılması, metal hedefler ve ince filmlerde D-scan ablasyon şekillerinin oluşmasını sağlamıştır. Metal hedeflerin çoğunda bu karakteristik şekil ısıdan etkilenmiş bölgelerin sınırlandırdığı bir ablasyon bölgesi olarak ortaya çıkmıştır.

İnce filmlerde ρ_{max} civarında bariz bir ısıdan etkilenmiş bölge gözlemlenmemiştir. Bu durum, bu bölgeleri oluşturan lazer enerji yoğunluğunun daha düşük olasından

kaynaklanmış olabilir. Hem metal hedeflerde hem de ince filmlerde lazerin tam odaklandığı noktaların oluşturduğu ablasyon alanında, ısıdan etkilenmiş geniş bölgeler gözlemlenmiştir. Bu alana gelen lazer enerji yoğunluğunun çok yüksek olması, lazer-malzeme etkileşiminin gerçekleştiği bölgenin dışına ısı yayılımına dolayısıyla ısıdan etkilenmiş geniş bölgelerin ortaya çıkmasına yol açmıştır.

Tüm bu sonuçlar çerçevesinde, uygulaması pratik bir yöntem olan D-scan, fs lazer ablasyonu temel alan sistematik çalışmalardan önce numunenin lazer pulslarıyla etkileşim karakterizasyonunu belirlemek amacıyla kullanılabilir.

KAYNAKLAR

Agnihotri, S., Mukherji, S. ve Mukherji, S., 2014, Size-controlled silver nanoparticles synthesized over the range 5-100 nm using the same protocol and their antibacterial efficacy, *RSC Advances*, 4 (8), 3974-3983.

Alonso, J., Diamant, R., Castillo, P., Acosta–García, M., Batina, N. ve Haro-Poniatowski, E., 2009, Thin films of silver nanoparticles deposited in vacuum by pulsed laser ablation using a YAG: Nd laser, *Applied Surface Science*, 255 (9), 4933-4937.

Amendola, V. ve Meneghetti, M., 2009, Laser ablation synthesis in solution and size manipulation of noble metal nanoparticles, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 11 (20), 3805-3821.

Ashfold, M. N., Claeyssens, F., Fuge, G. M. ve Henley, S. J., 2004, Pulsed laser ablation and deposition of thin films, *Chemical society reviews*, 33 (1), 23-31.

Axelevitch, A., Gorenstein, B. ve Golan, G., 2012, Investigation of optical transmission in thin metal films, *Physics Procedia*, 32, 1-13.

Bai, Z. G., Yu, D. P., Zhang, H. Z., Ding, Y., Wang, Y. P., Gai, X. Z., Hang, Q. L., Xiong, G. C. ve Feng, S. Q., 1999, Nano-scale GeO2 wires synthesized by physical evaporation, *Chemical Physics Letters*, 303 (3), 311-314.

Baker, P. N., 1972, Preparation and properties of tantalum thin films, *Thin Solid Films*, 14 (1), 3-25.

Barcikowski, S., Menéndez-Manjón, A., Chichkov, B., Brikas, M. ve Račiukaitis, G., 2007, Generation of nanoparticle colloids by picosecond and femtosecond laser ablations in liquid flow, *Applied Physics Letters*, 91 (8), 083113.

Bartlome, R., Strahm, B., Sinquin, Y., Feltrin, A. ve Ballif, C., 2010, Laser applications in thin-film photovoltaics, *Applied Physics B*, 100 (2), 427-436.

Bäuerle, D., 2011a, Laser Processing and Chemistry, Springer Berlin Heidelberg, p.

Bäuerle, D., 2011b, Nanosecond-Laser Ablation, In: Laser Processing and Chemistry, Eds, *Berlin, Heidelberg*: Springer Berlin Heidelberg, p. 237-278.

Bäuerle, D., 2011c, Thin-Film Formation by Pulsed-Laser Deposition and Laser-Induced Evaporation, In: Laser Processing and Chemistry, Eds, *Berlin, Heidelberg*: Springer Berlin Heidelberg, p. 489-531.

Bica, I., 1999, Nanoparticle production by plasma, *Materials Science and Engineering: B*, 68 (1), 5-9.

Bovatsek, J., Tamhankar, A., Patel, R., Bulgakova, N. ve Bonse, J., 2010, Thin film removal mechanisms in ns-laser processing of photovoltaic materials, *Thin Solid Films*, 518 (10), 2897-2904.

Böhm, H., Gigan, S., Blaser, F., Zeilinger, A., Aspelmeyer, M., Langer, G., Bäuerle, D., Hertzberg, J. ve Schwab, K., 2006, High reflectivity high-Q micromechanical Bragg mirror, *Applied Physics Letters*, 89 (22), 223101.

Burger, L., 2016, Novel implementation of a phase-only spatial light modulator for laser beam shaping, *Stellenbosch: Stellenbosch University*.

Byskov-Nielsen, J., 2010, Short-pulse laser ablation of metals: Fundamentals and applications for micro-mechanical interlocking, *University of Aarhus*.

Byskov-Nielsen, J., Savolainen, J.-M., Christensen, M. S. ve Balling, P., 2010, Ultra-short pulse laser ablation of metals: threshold fluence, incubation coefficient and ablation rates, *Applied Physics A*, 101 (1), 97-101.

Cabalin, L. ve Laserna, J., 1998, Experimental determination of laser induced breakdown thresholds of metals under nanosecond Q-switched laser operation, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 53 (5), 723-730.

Carcia, P., McLean, R., Reilly, M. ve Nunes Jr, G., 2003, Transparent ZnO thin-film transistor fabricated by rf magnetron sputtering, *Applied Physics Letters*, 82 (7), 1117-1119.

Catania, P., Doyle, J. P. ve Cuomo, J. J., 1992, Low resistivity body-centered cubic tantalum thin films as diffusion barriers between copper and silicon, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 10 (5), 3318-3321.

Chan, G. H., Zhao, J., Hicks, E. M., Schatz, G. C. ve Van Duyne, R. P., 2007, Plasmonic properties of copper nanoparticles fabricated by nanosphere lithography, *Nano Letters*, 7 (7), 1947-1952.

Chen, A. ve Holt-Hindle, P., 2010, Platinum-Based Nanostructured Materials: Synthesis, Properties, and Applications, *Chemical reviews*, 110 (6), 3767-3804.

Chen, X. ve Mao, S. S., 2007, Titanium dioxide nanomaterials: synthesis, properties, modifications, and applications, *Chemical reviews*, 107 (7), 2891-2959.

Cheng, J.-Y., Wei, C.-W., Hsu, K.-H. ve Young, T.-H., 2004, Direct-write laser micromachining and universal surface modification of PMMA for device development, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 99 (1), 186-196.

Choi, D. ve Barmak, K., 2017, On the potential of tungsten as next-generation semiconductor interconnects, *Electronic Materials Letters*, 13 (5), 449-456.

Choi, S. U. ve Eastman, J. A., 1995, Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, *Argonne National Lab., IL (United States)*.

Colombier, J. P., Combis, P., Bonneau, F., Le Harzic, R. ve Audouard, E., 2005, Hydrodynamic simulations of metal ablation by femtosecond laser irradiation, *Physical Review B*, 71 (16), 165406.

Curry, S., 1957, Platinum catalysts in petroleum refining, *Platinum Metals Rev*, 1 (2), 3843.

Dam, B., Rector, J., Johansson, J., Kars, S. ve Griessen, R., 1996, Stoichiometric transfer of complex oxides by pulsed laser deposition, *Applied Surface Science*, 96, 679-684.

Eastman, J. A., Choi, S., Li, S., Yu, W. ve Thompson, L., 2001, Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, *Applied Physics Letters*, 78 (6), 718-720.

Elgul, R., Matiolli, L., Vieira Junior, N. D. ve de, W., 2012, Ultrashort Laser Pulses Machining.

Eustis, S. ve El-Sayed, M. A., 2006, Why gold nanoparticles are more precious than pretty gold: noble metal surface plasmon resonance and its enhancement of the radiative and nonradiative properties of nanocrystals of different shapes, *Chemical society reviews*, 35 (3), 209-217.

Fabbro, R., Fabre, E., Amiranoff, F., Garban-Labaune, C., Virmont, J., Weinfeld, M. ve Max, C. E., 1982, Laser-wavelength dependence of mass-ablation rate and heat-flux inhibition in laser-produced plasmas, *Physical Review A*, 26 (4), 2289-2292.

Feng, Q., Picard, Y. N., Liu, H., Yalisove, S. M., Mourou, G. ve Pollock, T. M., 2005, Femtosecond laser micromachining of a single-crystal superalloy, *Scripta Materialia*, 53 (5), 511-516.

Ferreira, F., Sousa, C., Cavaleiro, A., Anders, A. ve Oliveira, J., 2017, Phase tailoring of tantalum thin films deposited in deep oscillation magnetron sputtering mode, *Surface and Coatings Technology*, 314, 97-104.

Freitas, A. Z., Freschi, L. R., Samad, R. E., Zezell, D. M., Gouw-Soares, S. C. ve Vieira, N. D., 2010, Determination of ablation threshold for composite resins and

amalgam irradiated with femtosecond laser pulses, *Laser Physics Letters*, 7 (3), 236-241.

Furusawa, K., Takahashi, K., Kumagai, H., Midorikawa, K. ve Obara, M., 1999, Ablation characteristics of Au, Ag, and Cu metals using a femtosecond Ti:sapphire laser, *Applied Physics A*, 69 (1), S359-S366.

Gamaly, E. G., Rode, A. V., Luther-Davies, B. ve Tikhonchuk, V. T., 2002, Ablation of solids by femtosecond lasers: Ablation mechanism and ablation thresholds for metals and dielectrics, *Physics of plasmas*, 9 (3), 949-957.

Gečys, P., Račiukaitis, G., Miltenis, E., Braun, A. ve Ragnow, S., 2011, Scribing of thin-film solar cells with picosecond laser pulses, *Physics Procedia*, 12, 141-148.

Georgiou, S., Zafiropulos, V., Anglos, D., Balas, C., Tornari, V. ve Fotakis, C., 1998, Excimer laser restoration of painted artworks: procedures, mechanisms and effects, *Applied Surface Science*, 127, 738-745.

Gezgin, S. Y., Kılıç, H. Ş., Kepceoğlu, A., Bayır, S., Nalbantoğlu, İ. E. ve Toprak, A., 2016, Plasmonic tuning of gold doped thin films for layers of photovoltaic devices, *AIP Conference Proceedings*, 1722, 200013.

Gholamkhass, B., Kiasari, N. M. ve Servati, P., 2012, An efficient inverted organic solar cell with improved ZnO and gold contact layers, *Organic Electronics*, 13 (6), 945-953.

Groenendijk, M., 2008, Fabrication of super hydrophobic surfaces by fs laser pulses, *Laser Technik Journal*, 5 (3), 44-47.

Haes, A. J. ve Van Duyne, R. P., 2002, A nanoscale optical biosensor: sensitivity and selectivity of an approach based on the localized surface plasmon resonance spectroscopy of triangular silver nanoparticles, *Journal of the American Chemical Society*, 124 (35), 10596-10604.

Hashida, M., Miyasaka, Y., Nishii, T., Shimizu, M., Inoue, S. ve Sakabe, S., 2016, Threshold Fluence for Femtosecond Laser Nanoablation for Metals, *Electronics and Communications in Japan*, 99 (10), 88-95.

Haynes, C. L. ve Van Duyne, R. P., 2001, Nanosphere lithography: a versatile nanofabrication tool for studies of size-dependent nanoparticle optics, ACS Publications.

Heitz, J., Pedarnig, J., Bäuerle, D. ve Petzow, G., 1997, Excimer-laser ablation and micro-patterning of ceramic Si3N4, *Applied Physics A*, 65 (3), 259-261.

Hiramatsu, H., Ohta, H., Hirano, M. ve Hosono, H., 2002, Heteroepitaxial growth of single-phase zinc blende ZnS films on transparent substrates by pulsed laser deposition under H2S atmosphere, *Solid State Communications*, 124 (10), 411-415.

Homola, J., Yee, S. S. ve Gauglitz, G., 1999, Surface plasmon resonance sensors, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 54 (1-2), 3-15.

Huang, X. ve El-Sayed, M. A., 2010, Gold nanoparticles: Optical properties and implementations in cancer diagnosis and photothermal therapy, *Journal of Advanced Research*, 1 (1), 13-28.

Ihlemann, J., Békési, J., Klein-Wiele, J.-H. ve Simon, P., 2008, Processing of dielectric optical coatings by nanosecond and femtosecond UV Laser Ablation, *Laser Chemistry*, 2008.

Irissou, E., Le Drogoff, B., Chaker, M., Trudeau, M. ve Guay, D., 2004, Nanostructured gold thin films prepared by pulsed laser deposition, *Journal of materials research*, 19 (3), 950-958.

Jiménez-Olarte, D., Vigil-Galán, O., de la Rosa, J., Seuret-Jiménez, D. ve Contreras-Puente, G., 2015, Laser scribing of fluorine doped tin oxide for serial

interconnection of CdS/CdTe solar cells, *Revista mexicana de fisica*, 61 (3), 160-165.

Jingxue, F., Zhao, W., Wei, W., Ye, Y., Lin, Z., Xin, W., Ruijiang, H., Hui, S. ve Chen, M. Z. Q., 2016, Preparation and optimization of a molybdenum electrode for CIGS solar cells, *AIP Advances*, 6 (11), 115210.

Kılıç, H. Ş. ve Durmuş, H., 2016, Yeni bir puls laser depozisyon (PLD) sistemi tasarımı, üretimi ve uygulamaları, *Selçuk-Teknik Dergisi*, 15 (1), 24-43.

Kim, H.-Y., Choi, W.-S., Ji, S.-Y., Shin, Y.-G., Jeon, J.-W., Ahn, S. ve Cho, S.-H., 2018, Morphologies of femtosecond laser ablation of ITO thin films using gaussian or quasi-flat top beams for OLED repair, *Applied Physics A*, 124 (2), 123.

Kim, H., Pique, A., Horwitz, J., Murata, H., Kafafi, Z., Gilmore, C. ve Chrisey, D., 2000, Effect of aluminum doping on zinc oxide thin films grown by pulsed laser deposition for organic light-emitting devices, *Thin Solid Films*, 377, 798-802.

Kim, H., Horwitz, J. S., Qadri, S. B. ve Chrisey, D. B., 2002, Epitaxial growth of Al-doped ZnO thin films grown by pulsed laser deposition, *Thin Solid Films*, 420-421, 107-111.

Kocourek, T., Jelinek, M., Miksovsky, J., Jurek, K. ve Kopecek, J., 2013, Silver-Doped Layers of Implants Prepared by Pulsed Laser Deposition, *Journal of Computer and Communications*, 1 (07), 59.

Kostoff, R. N., Koytcheff, R. G. ve Lau, C. G., 2008, Structure of the nanoscience and nanotechnology applications literature, *The Journal of Technology Transfer*, 33 (5), 472-484.

Krüger, J. ve Kautek, W., 1999, The femtosecond pulse laser: a new tool for micromachining, *LASER PHYSICS-LAWRENCE-*, 9, 30-40.

Krüger, J., Lenzner, M., Martin, S., Lenner, M., Spielmann, C., Fiedler, A. ve Kautek, W., 2003, Single- and multi-pulse femtosecond laser ablation of optical filter materials, *Applied Surface Science*, 208-209, 233-237.

Largeanu, A., Pompilian, G., Galusca, D., Agop, M. ve Gurlui, S., 2011, Pulsed laser deposition of NI thin films on metallic substrate, *UPB Sci. Bull., Series A*, 73 (3), 196-202.

Le Harzic, R., Huot, N., Audouard, E., Jonin, C., Laporte, P., Valette, S., Fraczkiewicz, A. ve Fortunier, R., 2002, Comparison of heat-affected zones due to nanosecond and femtosecond laser pulses using transmission electronic microscopy, *Applied Physics Letters*, 80 (21), 3886-3888.

Le Harzic, R., Breitling, D., Weikert, M., Sommer, S., Föhl, C., Valette, S., Donnet, C., Audouard, E. ve Dausinger, F., 2005, Pulse width and energy influence on laser micromachining of metals in a range of 100fs to 5ps, *Applied Surface Science*, 249 (1), 322-331.

Lednev, V., Filippov, M., Bunkin, A. ve Pershin, S., 2015, Laser ablation comparison by picosecond pulses train and nanosecond pulse, *Laser Physics Letters*, 12 (12), 126001.

Lee, K. K., Munce, N. R., Shoa, T., Charron, L. G., Wright, G. A., Madden, J. D. ve Yang, V. X., 2009, Fabrication and characterization of laser-micromachined polypyrrole-based artificial muscle actuated catheters, *Sensors and Actuators A: Physical*, 153 (2), 230-236.

Liu, B., Hu, Z., Che, Y., Chen, Y. ve Pan, X., 2007, Nanoparticle generation in ultrafast pulsed laser ablation of nickel, *Applied Physics Letters*, 90 (4), 044103.

Liu, J., 1982, Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes, *Optics letters*, 7 (5), 196-198.

Maccauro, G., Iommetti, P. R., Muratori, F., Raffaelli, L., Manicone, P. F. ve Fabbriciani, C., 2009, An overview about biomedical applications of micron and nano size tantalum, *Recent patents on biotechnology*, 3 (3), 157-165.

Machado, L. M., Samad, R. E., de Rossi, W. ve Vieira Junior, N. D., 2012, D-Scan measurement of ablation threshold incubation effects for ultrashort laser pulses, *Opt Express*, 20 (4), 4114-4123.

Mai, Y. J., Tu, J. P., Gu, C. D. ve Wang, X. L., 2012, Graphene anchored with nickel nanoparticles as a high-performance anode material for lithium ion batteries, *Journal of Power Sources*, 209, 1-6.

Mannion, P. T., Magee, J., Coyne, E., O'Connor, G. M. ve Glynn, T. J., 2004, The effect of damage accumulation behaviour on ablation thresholds and damage morphology in ultrafast laser micro-machining of common metals in air, *Applied Surface Science*, 233 (1), 275-287.

Matsubara, K., Fons, P., Iwata, K., Yamada, A., Sakurai, K., Tampo, H. ve Niki, S., 2003, ZnO transparent conducting films deposited by pulsed laser deposition for solar cell applications, *Thin Solid Films*, 431, 369-372.

Matthias, E., Reichling, M., Siegel, J., Käding, O., Petzoldt, S., Skurk, H., Bizenberger, P. ve Neske, E., 1994, The influence of thermal diffusion on laser ablation of metal films, *Applied Physics A*, 58 (2), 129-136.

Meda, L., Marra, G., Galfetti, L., Severini, F. ve De Luca, L., 2007, Nano-aluminum as energetic material for rocket propellants, *Materials Science and Engineering: C*, 27 (5), 1393-1396.

Melliar-Smith, C., Adams, A., Kaiser, R. ve Kushner, R., 1974, Chemically vapor deposited tungsten for semiconductor metallizations, *Journal of The Electrochemical Society*, 121 (2), 298-303.

Moon, S.-J., Yum, J.-H., Lofgren, L., Walter, A., Sansonnens, L., Benkhaira, M., Nicolay, S., Bailat, J. ve Ballif, C., 2015, Laser-scribing patterning for the production of organometallic halide perovskite solar modules, *Photovoltaics, IEEE Journal of*, 5 (4), 1087-1092.

Mueller, R., Mädler, L. ve Pratsinis, S. E., 2003, Nanoparticle synthesis at high production rates by flame spray pyrolysis, *Chemical Engineering Science*, 58 (10), 1969-1976.

Muth, J., Kolbas, R., Sharma, A., Oktyabrsky, S. ve Narayan, J., 1999, Excitonic structure and absorption coefficient measurements of ZnO single crystal epitaxial films deposited by pulsed laser deposition, *Journal of applied physics*, 85 (11), 7884-7887.

Nedialkov, N., Atanasov, P., Amoruso, S., Bruzzese, R. ve Wang, X., 2007, Laser ablation of metals by femtosecond pulses: Theoretical and experimental study, *Applied Surface Science*, 253 (19), 7761-7766.

Oboudi, S. F. ve Mustafa, M. Q., 2016, Synthesis and Characterization of Ag Nanoparticles Addition on BPSCCO Superconducting Thin Films, *Advances in Nanoparticles*, 5 (01), 75.

Ojha, N. K., Zyryanov, G. V., Majee, A., Charushin, V. N., Chupakhin, O. N. ve Santra, S., 2017, Copper nanoparticles as inexpensive and efficient catalyst: A valuable contribution in organic synthesis, *Coordination Chemistry Reviews*, 353, 1-57.

Ou, Z., Huang, M. ve Zhao, F., 2016, The fluence threshold of femtosecond laser blackening of metals: The effect of laser-induced ripples, *Optics & Laser Technology*, 79, 79-87.

Partridge, J. G., Field, M. R., Peng, J. L., Sadek, A. Z., Kalantar-zadeh, K., Plessis, J. D. ve McCulloch, D. G., 2008, Nanostructured SnO 2 films prepared from

evaporated Sn and their application as gas sensors, *Nanotechnology*, 19 (12), 125504.

Pillai, S., Catchpole, K., Trupke, T. ve Green, M., 2007, Surface plasmon enhanced silicon solar cells, *Journal of applied physics*, 101 (9), 093105.

Pouli, P., Paun, I.-A., Bounos, G., Georgiou, S. ve Fotakis, C., 2008, The potential of UV femtosecond laser ablation for varnish removal in the restoration of painted works of art, *Applied Surface Science*, 254 (21), 6875-6879.

Preuss, S., Matthias, E. ve Stuke, M., 1994, Sub-picosecond UV-laser ablation of Ni films, *Applied Physics A*, 59 (1), 79-82.

Preuss, S., Demchuk, A. ve Stuke, M., 1995, Sub-picosecond UV laser ablation of metals, *Applied Physics A*, 61 (1), 33-37.

Rosenfeld, A., Lorenz, M., Stoian, R. ve Ashkenasi, D., 1999, Ultrashort-laser-pulse damage threshold of transparent materials and the role of incubation, *Applied Physics A*, 69 (1), S373-S376.

Rung, S., Christiansen, A. ve Hellmann, R., 2014, Influence of film thickness on laser ablation threshold of transparent conducting oxide thin-films, *Applied Surface Science*, 305, 347-351.

Ruparelia, J. P., Chatterjee, A. K., Duttagupta, S. P. ve Mukherji, S., 2008, Strain specificity in antimicrobial activity of silver and copper nanoparticles, *Acta biomaterialia*, 4 (3), 707-716.

Rutt, A., Schneider, T., Kirchhoff, L., Hofacker, F., Hessler, A., Svistunova, O., Kruglov, V., Dietrich, R. ve Usoskin, A., 2016, Ultrahigh-speed pulsed laser deposition of YBCO layer in processing of long HTS coated conductors, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26 (3), 1-4.

Salcedo, K. L., Rodríguez, C. A., Perez, F. A. ve Riascos, H., 2011, Morphological Study Of Palladium Thin Films Deposited By Sputtering, *Journal of Physics: Conference Series*, 274 (1), 012120.

Salminen, T., 2013, Production of Nanomaterials by pulsed laser ablation, *Tampereen teknillinen yliopisto. Julkaisu-Tampere University of Technology. Publication; 1121*.

Salomonsson, A., Eriksson, M. ve Dannetun, H., 2005, Hydrogen interaction with platinum and palladium metal–insulator–semiconductor devices, *Journal of applied physics*, 98 (1), 014505.

Samad, R., Courrol, L., Vieira, N. ve Baldochi, S., 2010a, Ultrashort laser pulses applications, INTECH Open Access Publisher, p.

Samad, R. E. ve Vieira, N. D., 2006, Geometrical method for determining the surface damage threshold for femtosecond laser pulses, *Laser Physics*, 16 (2), 336-339.

Samad, R. E., Baldochi, S. L. ve Vieira Jr, N. D., 2008, Diagonal scan measurement of Cr: LiSAF 20 ps ablation threshold, *Applied optics*, 47 (7), 920-924.

Samad, R. E., Vidal, J. T., de Rossi, W. ve Vieira, N. D., 2010b, Determination of Molybdenum Ablation Threshold for Ultrashort Laser Pulses in Atmosphere and Vacuum Using the Diagonal Scan Technique, *Latin America Optics and Photonics Conference*, ThD3.

Samad, R. E., Machado, L. M., de Rossi, W. ve Vieira, N. D., 2012, D-Scan Measurement of the Ablation Threshold and Incubation Parameter of Optical Materials in the Ultrafast Regime, *Latin America Optics and Photonics Conference*, Sao Sebastiao, LT2A.1.

Scholz, J., Nocke, G., Hollstein, F. ve Weissbach, A., 2005, Investigations on fabrics coated with precious metals using the magnetron sputter technique with regard to

their anti-microbial properties, *Surface and Coatings Technology*, 192 (2), 252-256.

Shaheen, M., Gagnon, J. ve Fryer, B., 2014, Femtosecond laser ablation behavior of gold, crystalline silicon, and fused silica: a comparative study, *Laser Physics*, 24 (10), 106102.

Shiri, S., Zhang, C., Odeshi, A. ve Yang, Q., 2018, Growth and characterization of tantalum multilayer thin films on CoCrMo alloy for orthopedic implant applications, *Thin Solid Films*, 645, 405-408.

Singh, R. K. ve Viatella, J., 1994, Estimation of plasma absorption effects during pulsed laser ablation of high-critical-temperature superconductors, *Journal of applied physics*, 75 (2), 1204-1206.

Speets, E. A., Ravoo, B. J., Roesthuis, F. J., Vroegindeweij, F., Blank, D. H. ve Reinhoudt, D. N., 2004, Fabrication of arrays of gold islands on self-assembled monolayers using pulsed laser deposition through nanosieves, *Nano Letters*, 4 (5), 841-844.

Spiro, A., Lowe, M. ve Pasmanik, G., 2012, Drilling rate of five metals with picosecond laser pulses at 355, 532, and 1064 nm, *Applied Physics A*, 107 (4), 801-808.

Suresh, A., Wellenius, P., Dhawan, A. ve Muth, J., 2007, Room temperature pulsed laser deposited indium gallium zinc oxide channel based transparent thin film transistors, *Applied Physics Letters*, 90 (12), 123512.

Tabrizi, N. S., Ullmann, M., Vons, V., Lafont, U. ve Schmidt-Ott, A., 2009, Generation of nanoparticles by spark discharge, *Journal of Nanoparticle Research*, 11 (2), 315.

Thompson, D. T., 2007, Using gold nanoparticles for catalysis, *Nano Today*, 2 (4), 40-43.

Thys, M. ve Desmet, E., 2011, Laser beams: theory, properties and applications, Nova Science Publ., p.

Tsuji, T., Iryo, K., Watanabe, N. ve Tsuji, M., 2002, Preparation of silver nanoparticles by laser ablation in solution: influence of laser wavelength on particle size, *Applied Surface Science*, 202 (1), 80-85.

Tung, A. T., Park, B.-H., Niemeyer, G. ve Liang, D. H., 2007, Laser-machined shape memory alloy actuators for active catheters, *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 12 (4), 439-446.

Vahid Mohammadi, A. ve Halali, M., 2014, Synthesis and characterization of pure metallic titanium nanoparticles by an electromagnetic levitation melting gas condensation method, *RSC Advances*, 4 (14), 7104-7108.

Velichkina, L. M., Pestryakov, A. N., Vosmerikov, A. V., Tuzovskaya, I. V., Bogdanchikova, N. E., Avalos, M., Farias, M. ve Tiznado, H., 2008, Catalytic activity in the hydrocarbon conversion of systems containing platinum, nickel, iron, and zinc nanoparticles (communication 2), *Petroleum Chemistry*, 48 (5), 355-359.

Vladoiu, I., Stafe, M. ve Popescu, I. M., 2007, The influence of spot diameter, fluence and wavelength of the nanosecond laser pulses on the ablation rate of aluminum, *UNIVERSITY POLITEHNICA OF BUCHAREST SCIENTIFIC BULLETIN-SERIES A-APPLIED MATHEMATICS AND PHYSICS*, 69 (3), 81-87.

Wang, A., Yin, H., Lu, H., Xue, J., Ren, M. ve Jiang, T., 2009, Catalytic activity of nickel nanoparticles in hydrogenation of p-nitrophenol to p-aminophenol, *Catalysis Communications*, 10 (15), 2060-2064.

Yu, X., Ma, J. ve Lei, S., 2015, Femtosecond laser scribing of Mo thin film on flexible substrate using axicon focused beam, *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 349-355.

Yun Hwan, J., Inyu, J., Chung Seok, C., Inyoung, K. ve Hyuck Mo, L., 2011, Synthesis and characterization of low temperature Sn nanoparticles for the fabrication of highly conductive ink, *Nanotechnology*, 22 (22), 225701.

Zhao, X. A., Ong, C., Tsang, Y., Wong, Y., Chan, P. ve Choy, C., 1995, Reactive pulsed laser deposition of CN x films, *Applied Physics Letters*, 66 (20), 2652-2654.

Zhao, Z., Carpenter, M., Xia, H. ve Welch, D., 2006, All-optical hydrogen sensor based on a high alloy content palladium thin film, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 113 (1), 532-538.

Zhu, Y., Khan, Z. ve Masel, R. I., 2005, The behavior of palladium catalysts in direct formic acid fuel cells, *Journal of Power Sources*, 139 (1), 15-20.

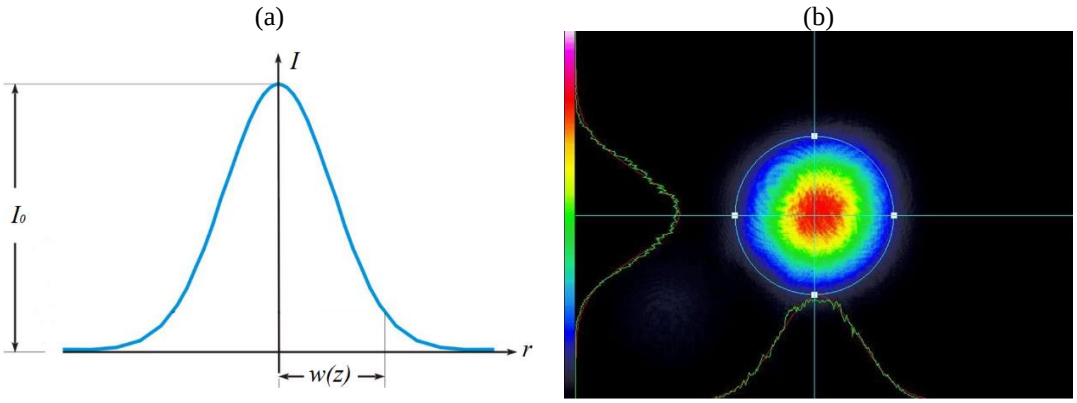
EKLER

EK-1 Gausyen Şiddet Dağılımına Sahip Lazer Pulslarının F_{th} Belirleme Yöntemlerindeki Etkisi

Gausyen şiddet dağılımına sahip bir lazer pulsunun şiddeti (I), P_0 lazer puls gücü, r ve z demetin radyal ve eksen konumları, w(z) demet yarıçapı olmak üzere

$$I(r,z) = \frac{2P_0}{\pi w^2(z)} e^{-2\frac{r^2}{w^2(z)}} \quad (1)$$

şeklinde verilmektedir. Bu ifadeye göre bir lazer demetinin kesit alanındaki şiddet dağılımı Şekil 1-a'daki gibi olmaktadır. Gausyen şiddet dağılımına sahip bir lazer pulsunun spot alanı içinde sahip olduğu şiddet, spot alanının ortalarında yoğunlaşmakta ve kenarlara gidildikçe Denklem 1'deki ifadeye göre azalmaktadır. Bu durum ise Şekil 1-b'de görselleştirilmiştir. Kırmızı bölge şiddet dağılımının en yüksek olduğu bölgeyi göstermektedir ve siyah ile gösterilen alanlara gidildikçe lazer şiddeti azalma sergilemektedir.



Şekil 1. a) Gausyen lazer demetinin şiddet dağılımı (Burger, 2016) **b)** Gausyen demet profilinin CCD kamera görüntüsü (Kim ve ark., 2018)

Bir malzemenin lazer ablasyon eşik enerji yoğunluğu belirleme tekniklerinden biri olan Liu yönteminde, malzeme üzerine aynı spot alanına sahip lazer demetinin farklı lazer enerji yoğunlukları kullanılarak ablasyon kraterleri oluşturulmaktadır. Lazer pulslarının enerji yoğunluğu arttıkça, lazer spot alanı içindeki enerji (dolayısıyla güç ve şiddet) dağılımında da artış gözlenmektedir. Bu artışa bağlı olarak lazer spot alanının daha büyük

bir oranı ablasyon sürecinin gerçekleşmesini sağlayabilmekte ve sonuç olarak ablasyon krater çaplarında büyüme ortaya çıkmaktadır.

D-scan yönteminde odaklanmış bir lazer demetinin odak noktasına yaklaştıkça daralan lazer spot alanının farklı enerji yoğunlukları üretmesinden yararlanılmaktadır. Hedef numune bu farklı spot alanlarından geçirilerek tek bir deney hamlesinde farklı lazer enerji yoğunlukları ile etkileşmektedir ve sonuçta numune üzerinde bu yönteme özgü bir ablasyon şekli ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.2'de bir şeması verilen D-scan ablasyon profilinde iki kanadın kesiştiği orta bölge bir lens aracılığıyla odaklanmış lazer demetinin oluşturduğu ablasyon alanıdır. Orta noktadan ρ_{max}'ın ortaya çıktığı $-\chi$ ve $+\chi$ noktalarına gidildikçe ablasyon profilinin sınırını lazer spot alanı belirlemektedir. χ noktasından ve ζ noktasına gidildikçe lazer nokta alanında artış gerçekleşmekte ve lazer enerji yoğunluğu azalmaktadır. Bunun sonucunda Gausyen şiddet dağılımına sahip lazer spot alanı içinde ablasyon gerçekleştirebilen bölge küçülmekte ve ablasyon profili daralmaktadır. ζ noktasında genişleyen lazer spot alanının oluşturduğu enerji yoğunluğu lazer ablasyon eşik değerinin altında kalmakta ve bu noktadan sonra artık malzeme üzerinde ablasyon işlemi gerçekleşmeyerek D-scan profili sonlanmaktadır.

EK-2 Metal Hedeflerin fs D-Scan Ablasyon Profili Ölçümleri

	λ = 266 nm		λ = 400 nm		λ = 800 nm	
Hedef	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)
Altın	58.06	0.0029030	57.41	0.0028705	35.98	0.001799
	61.40	0.0030700	57.44	0.0028720	37.57	0.001879
	59.47	0.0029735	55.47	0.0027735	38.07	0.001904
	60.15	0.0030075	58.82	0.0029410		
	60.75	0.0030375				
Alüminyum	65.68	0.0032840	38.25	0.0019125	10.02	0.0005010
	72.80	0.0036400	45.32	0.0022660	10.33	0.0005165
	69.88	0.0034940	48.59	0.0024295		
	62.49	0.0031245				
	55.84	0.0027920				
Bakır	75.71	0.0037860	47.44	0.002372	32.28	0.0016140
	70.84	0.0035420	47.87	0.002394	32.25	0.0016125
	75.12	0.0037560	41.33	0.002067		
	78.90	0.0039450				
	77.88	0.0038940				
Gümüş	77.03	0.0038520	50.20	0.002510	33.65	0.001683
	68.03	0.0034020	55.90	0.002795	33.65	0.001683
	66.75	0.0033380	50.09	0.002505	32.89	0.001645
			51.55	0.002578	31.50	0.001575
			39.74	0.001987		
İndiyum	127.48	0.006374	104.86	0.005243	58.14	0.002907
	122.59	0.006130	127.39	0.006370	59.68	0.002984
	127.39	0.006370	124.17	0.006209	59.66	0.002983
	130.61	0.006531	124.16	0.006208	62.90	0.003145
	130.62	0.006531			59.68	0.002984
Kalay	80.46	0.004023	61.27	0.003064	39.99	0.002
	82.89	0.004145	60.63	0.003032		
			69.09	0.003455		
			65.26	0.003263		
Molibden	53.73	0.002687	29.67	0.001484	30.97	0.001549
	52.44	0.002622	35.48	0.001774	30.97	0.001549
	52.39	0.002620	37.09	0.001855	30.97	0.001549
	50.51	0.002526	39.99	0.002000	33.55	0.001678
	53.14	0.002657				
Nikel	54.86	0.002743	69.36	0.003468	28.50	0.001425
	65.17	0.003259	66.11	0.003306	20.16	0.001008
	61.31	0.003066	69.36	0.003468	18.16	0.000908
	61.92	0.003096	61.36	0.003068	15.53	0.000777
	63.21	0.003161	61.47	0.003074		
Paladyum	61.92	0.003096	69.81	0.003491	20.04	0.001002
	71.00	0.003550	78.82	0.003941	25.19	0.001260
	71.50	0.003575	84.74	0.004237	19.45	0.000973
	71.59	0.003580	82.86	0.004143	20.04	0.001002
	70.95	0.003548	82.76	0.004138		
Platin	55.41	0.002771	34.88	0.001744	16.14	0.000807
	55.41	0.002771	36.91	0.001846	16.18	0.000809
	50.63	0.002532	38.25	0.001913	16.14	0.000807
	53.82	0.002691			15.53	0.000777
	55.41	0.002771				

Hedef	λ = 266 nm		λ = 400 nm		λ = 800 nm	
	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)
Tantal	70.95	0.003548	49.99	0.002500	47.16	0.002358
	65.14	0.003257	53.24	0.002662	41.97	0.002099
	67.73	0.003387	49.09	0.002455	38.14	0.001907
	70.31	0.003516	58.06	0.002903	40.04	0.002002
	65.14	0.003257			44.73	0.002237
					40.76	0.002038
Titanyum	85.38	0.004269	73.44	0.003672	51.41	0.002571
	85.30	0.004265	74.08	0.003704	50.26	0.002513
	87.87	0.004394	74.58	0.003729	52.58	0.002629
	84.74	0.004237	70.88	0.003544	53.77	0.002689
	83.94	0.004197	74.65	0.003733	50.62	0.002531
	86.62	0.004331				
	87.27	0.004364				
	87.16	0.004358				
Tungsten	37.90	0.001895	39.37	0.001969	21.29	0.001065
	32.93	0.001647	57.46	0.002873	29.67	0.001484
	42.35	0.002118	52.31	0.002616	24.51	0.001226
	41.70	0.002085	54.86	0.002743	29.67	0.001484
	42.72	0.002136	49.68	0.002484		

EK-3 İnce Filmlerin fs D-Scan Ablasyon Profili Ölçümleri

İnce Film	λ = 266 nm		λ = 400 nm		λ = 800 nm	
	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)
Au1	90.30	0.004515	135.49	0.0067745	93.89	0.0046945
	91.97	0.0045985	140.37	0.0070185	95.74	0.004787
	91.93	0.0045965	132.26	0.006613	92.92	0.004646
			140.37	0.0070185	94.53	0.0047265
			140.37	0.0070185	95.40	0.004770
Au2	169.44	0.008472	130.65	0.0065325	116.31	0.0058155
	169.38	0.008469	132.22	0.006611	112.01	0.0056005
	172.73	0.0086365	129.04	0.006452	114.02	0.005701
	174.27	0.0087135	132.23	0.0066115	111.08	0.005554
	170.96	0.008548	122.72	0.006136	113.44	0.005672
Au3	225.84	0.011292	114.77	0.0057385	203.95	0.0101975
	237.04	0.011852	111.37	0.0055685	206.03	0.0103015
	225.80	0.01129	122.72	0.006136	202.49	0.0101245
			119.50	0.005975	207.16	0.010358
			116.50	0.005825		
Cu1	208.16	0.010408	116.10	0.005805	145.45	0.0072725
	194.89	0.0097445	104.61	0.0052305	144.09	0.0072045
	199.20	0.00996	104.81	0.0052405	144.09	0.0072045
	185.88	0.009294	109.70	0.005485	148.78	0.007439
	186.29	0.0093145				
Cu2	151.92	0.007596	111.27	0.005564	146.87	0.007344
	158.59	0.00793	112.92	0.005646	155.64	0.007782
	155.25	0.007763	109.66	0.005483	140.30	0.007015
			109.65	0.005483	137.10	0.006855
			109.70	0.005485		
Ag1	99.79	0.0049895	146.42	0.007321	145.7	0.007285
	96.77	0.0048385	146.42	0.007321	140.74	0.007037
	99.79	0.0049895	144.48	0.007224	143.96	0.007198
	99.78	0.004989	145.77	0.0072885	148.78	0.007439
	96.34	0.004817	146.45	0.0073225	148.56	0.007428
Ag2	95.19	0.0047595	174.19	0.0087095	71.02	0.003551
	96.80	0.00484	172.55	0.0086275	69.34	0.003467
	95.15	0.0047575	172.54	0.008627	70.97	0.0035485
			170.92	0.008546	69.41	0.0034705
			174.16	0.008708	69.41	0.0034705
Ag3	95.19	0.0047595	161.32	0.008066	85.46	0.004273
	93.58	0.004679	161.28	0.008064	85.48	0.004274
	95.14	0.004757	161.25	0.0080625	85.48	0.004274
	96.87	0.0048435	166.12	0.008306		
	96.76	0.004838	164.51	0.0082255		
In1	67.72	0.003386	114.49	0.0057245	135.54	0.006777
	69.36	0.003468	116.10	0.005805	127.75	0.0063875
	70.97	0.0035485	117.76	0.005888	132.38	0.006619
	69.41	0.0034705	113.06	0.005653	131.86	0.006593
					128.57	0.0064285
In2	100.02	0.005001	116.13	0.0058065	129.01	0.0064505
	105.64	0.005282	112.87	0.0056435	127.39	0.0063695
	106.44	0.005322	114.57	0.0057285	124.17	0.0062085
	106.47	0.0053235	116.10	0.005805	127.39	0.0063695
	103.2	0.00516	112.92	0.005646	130.62	0.006531

İnce Film	λ = 266 nm		λ = 400 nm		λ = 800 nm	
	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)
In3	103.21	0.0051605	101.59	0.0050795	85.52	0.004276
	106.53	0.0053265	106.44	0.005322	87.31	0.0043655
	107.45	0.0053725	99.97	0.0049985	88.82	0.004441
	104.97	0.0052485	104.80	0.00524	81.03	0.0040515
	112.43	0.0056215				
Sn1	74.19	0.0037095	88.70	0.004435	108.23	0.0054115
	77.47	0.0038735	87.13	0.0043565	111.37	0.0055685
	71.11	0.0035555	75.86	0.003793	105.12	0.005256
	70.97	0.0035485	80.64	0.004032	108.09	0.0054045
	72.63	0.0036315			108.09	0.0054045
Sn2	104.92	0.005246	85.48	0.004274	138.76	0.006938
	105.12	0.005256	80.64	0.004032	138.76	0.006938
	103.31	0.0051655	83.99	0.0041995	138.76	0.006938
	100.18	0.005009	82.25	0.0041125	137.21	0.0068605
	100.09	0.0050045	82.24	0.004112	138.82	0.006941
Sn3	103.51	0.0051755	119.60	0.00598	154.88	0.007744
	102.05	0.0051025	116.38	0.005819	154.81	0.0077405
	103.65	0.0051825	119.50	0.005975	154.81	0.0077405
	109.95	0.0054975	116.20	0.00581	154.81	0.0077405
	116.20	0.00581	118.25	0.0059125	153.20	0.00766
Mo1	187.98	0.009399	130.62	0.006531	136.68	0.006834
	192.07	0.0096035	132.31	0.0066155	140.29	0.0070145
	194.38	0.009719	138.71	0.0069355	140.3	0.007015
	196.04	0.009802	135.49	0.0067745	132.23	0.0066115
	185.47	0.0092735	137.63	0.0068815	137.07	0.0068535
Mo2	217.84	0.010892	180.72	0.009036	165.26	0.008263
	216.08	0.010804	179.05	0.0089525	161.90	0.008095
			187.05	0.0093525	164.98	0.008249
			185.50	0.009275	160.16	0.008008
			185.44	0.009272	168.33	0.0084165
Ni1	56.46	0.002823	88.70	0.004435	80.64	0.004032
	58.07	0.0029035	82.25	0.0041125	79.03	0.0039515
	53.24	0.002662	82.23	0.0041115	79.03	0.0039515
	58.07	0.0029035	93.52	0.004676	79.16	0.003958
	58.07	0.0029035	82.25	0.0041125	79.16	0.003958
Ni2	143.66	0.007183	117.71	0.0058855	103.51	0.0051755
	144.09	0.0072045	120.94	0.006047	100.09	0.0050045
	145.56	0.007278	117.72	0.005886	108.23	0.0054115
	139.01	0.0069505			100.18	0.005009
	145.45	0.0072725			109.70	0.005485
Ni3	191.89	0.0095945	153.22	0.007661	169.38	0.008469
	177.37	0.0088685	154.80	0.00774	167.77	0.0083885
	177.40	0.00887	151.58	0.007579	175.88	0.008794
	172.57	0.0086285	153.20	0.00766	169.34	0.008467
	170.93	0.0085465	154.80	0.00774	179.17	0.0089585
Pd1	75.86	0.003793	70.97	0.0035485	90.36	0.004518
	72.59	0.0036295	67.80	0.00339	93.65	0.0046825
	74.17	0.0037085	69.34	0.003467	93.65	0.0046825
	75.79	0.0037895	70.97	0.0035485	93.65	0.0046825
	74.17	0.0037085	72.58	0.003629	95.26	0.004763
Pd2	106.44	0.005322	117.72	0.005886	114.56	0.005728
	103.21	0.0051605	112.92	0.005646	114.50	0.005725
	108.05	0.0054025	108.05	0.0054025	114.53	0.0057265
	119.42	0.005971	114.67	0.0057335	111.31	0.0055655
	117.72	0.005886	111.26	0.005563	109.66	0.005483

İnce Film	λ = 266 nm		λ = 400 nm		λ = 800 nm	
	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)
Pd3	268.07	0.0134035	117.99	0.0058995	178.11	0.0089055
	256.80	0.01284	147.30	0.007365	176.50	0.008825
	254.96	0.012748	148.43	0.0074215	181.63	0.0090815
	241.90	0.012095	154.83	0.0077415	179.86	0.008993
	241.92	0.012096	158.16	0.007908	179.57	0.0089785
Pt1	104.86	0.005243	74.25	0.0037125	96.96	0.004848
	106.44	0.005322	98.38	0.004919	92.04	0.004602
	103.20	0.00516	106.87	0.0053435	95.26	0.004763
	98.36	0.004918	85.52	0.004276	101.79	0.0050895
	96.76	0.004838			108.23	0.0054115
Pt2	90.82	0.004541	78.22	0.003911	129.16	0.006458
	91.00	0.00455	78.00	0.0039	135.60	0.00678
	89.05	0.0044525	82.80	0.00414	140.44	0.007022
	94.20	0.00471	84.41	0.0042205	126.03	0.0063015
	94.20	0.00471	82.80	0.00414	127.64	0.006382
Pt3	323.66	0.016183	178.99	0.0089495	235.87	0.0117935
	334.66	0.016733	180.61	0.0090305	237.39	0.0118695
	325.01	0.0162505	177.44	0.008872	239.19	0.0119595
	321.57	0.0160785	174.16	0.008708	245.63	0.0122815
	322.06	0.016103			240.70	0.012035
Ta1	38.72	0.001936	69.67	0.0034835	45.19	0.0022595
	43.22	0.002161	69.03	0.0034515	45.15	0.0022575
	45.81	0.0022905	70.32	0.003516	45.80	0.00229
	49.02	0.002451	68.37	0.0034185	45.15	0.0022575
	45.80	0.00229	67.73	0.0033865	43.22	0.002161
Ta2	82.52	0.004126	110.86	0.005543	94.94	0.004747
	89.12	0.004456	107.71	0.0053855	101.15	0.0050575
	79.27	0.0039635	107.71	0.0053855	103.20	0.00516
	87.46	0.004373	107.81	0.0053905	94.94	0.004747
	84.16	0.004208	107.71	0.0053855	94.98	0.004749
Ti1	101.64	0.005082	72.72	0.003636	51.6	0.00258
	92.04	0.004602	67.74	0.003387	51.63	0.0025815
	91.97	0.0045985	69.41	0.0034705	56.44	0.002822
	93.58	0.004679	62.91	0.0031455	54.82	0.002741
	90.53	0.0045265	79.08	0.003954	56.44	0.002822
Ti2	93.56	0.004678	72.72	0.003636	56.64	0.002832
	91.97	0.0045985	75.86	0.003793	56.46	0.002823
	93.54	0.004677	70.95	0.0035475	54.85	0.0027425
	91.91	0.0045955	69.36	0.003468	56.33	0.0028165
	90.43	0.0045215	69.34	0.003467	59.38	0.002969
Ti3	138.71	0.0069355	82.24	0.004112	104.21	0.0052105
	132.27	0.0066135	88.69	0.0044345	101.57	0.0050785
	143.55	0.0071775	90.43	0.0045215	104.21	0.0052105
	133.96	0.006698	87.21	0.0043605	109.65	0.0054825
	133.12	0.006656	82.38	0.004119	106.947	0.00534735
W1	210.65	0.0105325	108.23	0.0054115	181.06	0.009053
	210.72	0.010536	108.34	0.005417	179.86	0.008993
	198.99	0.0099495	103.40	0.00517	181.63	0.0090815
	200.60	0.01003	104.92	0.005246	182.21	0.0091105
	200.37	0.0100185	105.01	0.0052505	183.81	0.0091905

EK-4 Metal Hedeflerin ns D-Scan Ablasyon Profili Ölçümleri

Metal	λ = 266 nm		λ = 355 nm		λ = 532 nm		λ = 1064 nm	
	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)
Altın	60.04	0.003002	64.76	0.003238	72.27	0.003614	72.25	0.003613
	62.04	0.003102	64.82	0.003241	71.60	0.00358	76.76	0.003838
Alüminyum	63.21	0.003161	52.89	0.002645	67.74	0.003387	79.03	0.003952
	56.76	0.002838	56.76	0.002838	67.72	0.003386	82.25	0.004113
Bakır	66.49	0.003325	61.76	0.003088	55.46	0.002773	89.77	0.004489
	64.55	0.003228	63.95	0.003198	55.67	0.002784	89.80	0.00449
Gümüş	96.75	0.004838	83.85	0.004193	63.22	0.003161	77.67	0.003884
	96.75	0.004838	87.09	0.004355	64.82	0.003241		
İndiyum	124.26	0.006213	109.76	0.005488	95.14	0.004757	151.65	0.007583
	121.03	0.006052	109.70	0.005485	93.58	0.004679	146.82	0.007341
Kalay	120.64	0.006032	92.27	0.004614	94.64	0.004732	134.31	0.006716
	117.45	0.005873	94.02	0.004701	101.01	0.005051	135.92	0.006796
Molibden	101.60	0.00508	98.69	0.004935	106.42	0.005321	122.72	0.006136
	100.09	0.005005	98.84	0.004942	108.05	0.005403	121.03	0.006052
Nikel	148.90	0.007445	137.67	0.006884	106.62	0.005331	85.46	0.004273
	154.03	0.007702	141.04	0.007052	106.73	0.005337	85.52	0.004276
Paladyum	55.37	0.002769	60.66	0.003033	56.35	0.002818	79.28	0.003964
	58.07	0.002904	64.58	0.003229	57.64	0.002882	83.99	0.0042
Platin	64.58	0.003229	79.08	0.003954	74.19	0.00371	85.71	0.004286
	66.11	0.003306	79.28	0.003964	72.63	0.003632	82.38	0.004119
Tantal	56.53	0.002827	77.55	0.003878	99.01	0.004951	128.40	0.00642
	58.25	0.002913	75.80	0.00379	100.18	0.005009	126.43	0.006322
Titanyum	77.55	0.003878	82.38	0.004119	77.42	0.003871	100.09	0.005005
	79.16	0.003958	84.24	0.004212	79.03	0.003952	103.25	0.005163
Tungsten	147.30	0.007365	112.92	0.005646	109.95	0.005498	103.65	0.005183
	147.06	0.007353	109.76	0.005488	102.05	0.005103	105.01	0.005251

EK-5 İnce Filmlerin ns D-Scan Ablasyon Profili Ölçümleri

İnce Film	λ = 266 nm		λ = 355 nm		λ = 532 nm		λ = 1064 nm	
	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)
Au1	253.21	0.01266	205.02	0.01025	212.85	0.01064	127.64	0.00638
	253.17	0.01266			206.4	0.01032	127.48	0.00637
Au2	261.3	0.01307	138.82	0.00694	219.32	0.01097	156.82	0.00784
	259.66	0.01298	135.54	0.00678	211.26	0.01056	151.79	0.00759
	262.88	0.01314						
Au3	209.65	0.01048	138.68	0.00693	193.53	0.00968	287.68	0.01438
	208.04	0.0104	141.9	0.0071	196.73	0.00984		
Cu1	161.26	0.00806	130.61	0.00653	143.59	0.00718	177.44	0.00887
	162.93	0.00815			141.9	0.0071	180.72	0.00904
Cu2	95.19	0.00476	87.13	0.00436	116.11	0.00581	180.66	0.00903
	92.04	0.0046			114.5	0.00573	177.4	0.00887
Ag1	196.89	0.00984	174.22	0.00871	200.01	0.01	262.84	0.01314
	192.06	0.0096	169.32	0.00847	201.62	0.01008		
Ag2	190.30	0.00952	158.06	0.0079	258.28	0.01291	99.99	0.005
	193.53	0.00968	156.41	0.00782			96.75	0.00484
Ag3	156.55	0.00783	125.94	0.0063	179.25	0.00896	70.97	0.00355
	154.93	0.00775	124.33	0.00622	184.08	0.0092		
In1	114.67	0.00573	111.37	0.00557	121.11	0.00606	125.77	0.00629
	137.15	0.00686	116.20	0.00581	103.31	0.00517	124.16	0.00621
In2	166.21	0.00831	92.04	0.0046	124.33	0.00622	180.61	0.00903
	159.70	0.00799	85.52	0.00428	129.09	0.00645	180.66	0.00903
In3	137.10	0.00686	119.50	0.00598	143.52	0.00718	188.67	0.00943
	143.59	0.00718	116.14	0.00581	137.10	0.00686	187.05	0.00935
Sn1	209.68	0.01048	161.28	0.00806	193.50	0.00968	175.88	0.00879
	203.28	0.01016			198.34	0.00992		
Sn2	135.54	0.00678	125.79	0.00629	146.75	0.00734	137.06	0.00685
	137.07	0.00685	127.4	0.00637	143.55	0.00718	138.68	0.00693
Sn3	216.08	0.0108	137.15	0.00686	143.51	0.00718	235.42	0.01177
	212.9	0.01065	137.07	0.00685	143.55	0.00718	235.43	0.01177
Mo1	108.09	0.0054	104.92	0.00525	129.16	0.00646	131.25	0.00656
	109.66	0.00548	99.99	0.005	122.65	0.00613	132.71	0.00664
Mo2	104.82	0.00524	122.59	0.00613	119.32	0.00597	172.73	0.00864
	106.47	0.00532	119.32	0.00597	112.89	0.00564	174.42	0.00872
Ni1	108.05	0.0054	104.86	0.00524	99.99	0.005	188.69	0.00943
	108.34	0.00542	103.21	0.00516	98.38	0.00492	185.47	0.00927
Ni2	114.59	0.00573	121.03	0.00605	114.67	0.00573	217.69	0.01088
	119.5	0.00598	119.42	0.00597	119.42	0.00597	219.31	0.01097
Ni3	124.33	0.00622	158.16	0.00791	150.1	0.00751	204.79	0.01024
	140.44	0.00702	153.26	0.00766	153.26	0.00766	203.2	0.01016
Pd1	132.22	0.00661	145.13	0.00726	180.6	0.00903	169.31	0.00847
	127.39	0.00637	140.29	0.00701	178.99	0.00895		
Pd2	177.38	0.00887	169.38	0.00847	180.66	0.00903	211.63	0.01058
	175.79	0.00879	179.02	0.00895	169.32	0.00847	217.9	0.0109
Pd3	203.49	0.01017	232.25	0.01161	244.13	0.01221	303.58	0.01518
	201.79	0.01009	233.86	0.01169	238.74	0.01194	272.59	0.01363
	200.05	0.01						

İnce Film	λ = 266 nm		λ = 355 nm		λ = 532 nm		λ = 1064 nm	
	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)	Tam genişlik (μm)	ρ_{max} (cm)
Pt1	130.61	0.00653	120.94	0.00605	111.27	0.00556	187.05	0.00935
	130.62	0.00653	120.95	0.00605	109.66	0.00548	187.11	0.00936
Pt2	162.93	0.00815	211.24	0.01056	146.75	0.00734	140.29	0.00701
	167.82	0.00839	211.24	0.01056	141.98	0.0071	167.71	0.00839
Pt3	146.82	0.00734	195.11	0.00976	219.35	0.01097	222.52	0.01113
	149.97	0.0075	198.36	0.00992	212.95	0.01065	225.76	0.01129
Ta1	129.01	0.00645	124.2	0.00621	119.37	0.00597	204.89	0.01024
	129.04	0.00645	125.82	0.00629	119.32	0.00597	206.5	0.01033
Ta2	112.98	0.00565	98.42	0.00492	106.47	0.00532	140.3	0.00702
	108.05	0.0054	100.09	0.005	104.86	0.00524	137.15	0.00686
Ti1	87.09	0.00435	93.52	0.00468	85.46	0.00427	100.03	0.005
	87.09	0.00435	96.75	0.00484	82.24	0.00411	103.25	0.00516
Ti2	82.25	0.00411	103.2	0.00516	95.15	0.00476	106.44	0.00532
	82.3	0.00412	106.44	0.00532	93.54	0.00468	108.09	0.0054
Ti3	108.05	0.0054	109.65	0.00548	109.66	0.00548	130.7	0.00654
	101.6	0.00508	108.04	0.0054	109.66	0.00548	133.92	0.0067
W1	127.39	0.00637	153.22	0.00766	129.01	0.00645	184.01	0.0092
	141.91	0.0071	146.77	0.00734	129.01	0.00645	184.00	0.0092

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı	**:**	Sercan Bayır
Uyruğu	**:**	T.C.
Doğum Yeri ve Tarihi	**:**	İzmir 12 Temmuz 1985
Telefon	**:**	0 555 499 1246
Faks	**:**	
e-mail	**:**	sercanbyr@gmail.com

EĞİTİM

Derece		**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lise	:	İzmir Atatürk Lisesi, Konak, İzmir	2003
Üniversite	:	Ege Üniversitesi, Bornova, İzmir	2013
Yüksek Lisans	:	Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	-
Doktora	:		

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

Bayır S., Kılıç H.Ş., Kepceoğlu A., Nalbantoğlu İ.E., Yiğit Gezgin S., Gündoğdu Y., (2015), Balkan Physıcal Union, 9th International Physics Conference, *"Ablation threshold fluence determinatıon of PLD deposited thin films and bulk targets using D-scan method"*, İstanbul, Türkiye.

Bayır S., Kılıç H.Ş., Kepceoğlu A., Nalbantoğlu İ.E., Gündoğdu Y., Yiğit Gezgin S., Toprak A., (2015), Balkan Physical Union, 9th International Physics Conference, *"Plasmonic effects on the nonlinear optical properties of gold thin films"*, İstanbul, Türkiye.

Gezgin, S. Y., Kılıç, H. Ş., Kepceoğlu, A., Bayır, S., Nalbantoğlu, İ. E. ve Toprak, A., 2016, Plasmonic tuning of gold doped thin films for layers of photovoltaic devices, *AIP Conference Proceedings*, 1722, 200013.