

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**LAZER AŞINDIRMA PARAMETRELERİNİN DEĞİŞİMİ İLE GÜMÜŞ
NANO PARÇACIK ÜRETİMİNİN OPTİK SINIRLAMAYA ETKİSİ**

Irmak GÜRSOY

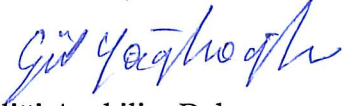
FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2018**

Her hakkı saklıdır

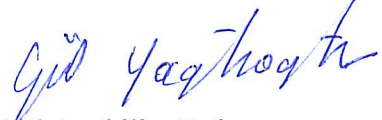
TEZ ONAY SAYFASI


Irmak GÜRSOY tarafından hazırlanan “Lazer Aşındırma Parametrelerinin Değişimi ile Gümüş Nano parçacık Üretiminin Optik Sınırlamaya Etkisi” adlı tez çalışması 10/5/2018 tarihinde jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. H. Gül YAĞLIOĞLU 
Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri:

Başkan : Prof. Dr. Mustafa HAYVALI 
Ankara Üniversitesi, Kimya Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. H. Gül YAĞLIOĞLU 
Ankara Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Yrd. Doç. Dr. Bülend ORTAÇ 
Bilkent Üniversitesi, Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Atila YETİŞEMİYEN
Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin tam ve doğru olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

10.05.2018



Irmak GÜRSOY

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LAZER AŞINDIRMA PARAMETRELERİNİN DEĞİŞİMİ İLE GÜMÜŞ NANO PARÇACIK ÜRETİMİNİN OPTİK SINIRLAMAYA ETKİSİ

Irmak GÜRSOY

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. H. Gül YAĞLIOĞLU

Bu tez çalışmasında, lazer aşındırma tekniği ile üretilen gümüş nano parçacıklarının (AgNP) doğrusal olmayan optik sınırlama özellikleri araştırılmıştır. Giriş akısı, üretim süresi gibi lazer aşındırma parametrelerinin optik sınırlama özellikleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Açık yarıklı z-tarama tekniği, üretilen AgNP'lerin optik sınırlama özelliklerini araştırmak için kullanılmıştır. Malzemenin hazırlanması sırasında Nd:YAG lazerinin ikinci harmoniği olan 532 nm dalga boylu, 4 ns darbe süreli ve 10 Hz tekrarlama frekansına sahip lazer kaynağı kullanılmıştır. Lazer aşındırma tekniğinde giriş akı değerleri 477 J/cm^2 , 637 J/cm^2 ve 796 J/cm^2 olarak seçilmiştir, aşındırma süreleri 1 saat ve 1.5 saat olarak belirlenmiştir. Giriş gücü ve aşındırma süresinin arttırılmasının, daha iyi optik sınırlama performansının göstergesi olan optik sınırlama akısı eşik değerinin (F_{th}) düşmesine neden olduğu bulunmuştur. En iyi optik sınırlayıcı performans 796 J/cm^2 giriş akısı ve 1.5 saat aşındırma süresi için ($F_{th}=0.79 \text{ J/cm}^2$) elde edilmiştir.

May 2018, 63 sayfa

Anahtar Kelimeler: Doğrusal Olmayan Optik, Gümüş Nano parçacık, Optik Sınırlama

ABSTRACT

Master Thesis

THE EFFECT OF CHANGING LASER ABLATION PARAMETERS ON OPTICAL LIMITING OF SILVER NANOPARTICLES PRODUCTION

Irmak GÜR SOY

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. H. Gül YAĞLIOĞLU

In this thesis, nonlinear optical limiting properties of silver nanoparticles (AgNP) produced by laser ablation technique were investigated. The effects of laser ablation parameters, such as input fluence and production time, on the optical limiting properties were determined. Open aperture z-scan technique was used to investigate the optical limiting properties of produced AgNP. During the preparation of the material, the second harmonic of the Nd: YAG laser with 532 nm wavelength, 4 ns pulse duration and 10 Hz repetition rate was used. In the laser ablation technique, input fluence values were selected as 477 J/cm², 637 J/cm² and 796 J/cm², and ablation time was determined as 1 hour and 1.5 hours. It was found that increasing input power and ablation time caused optical limiting fluence threshold value (F_{th}) to decrease, which is the indication of better optical limiting performance. The best optical limiting performance was achieved ($F_{th}=0.79$ J/cm²) for 796 J/cm² input fluence and 1.5 hour ablation time.

May 2018, 63 pages

Key Words: Nonlinear Optics, Silver Nanoparticle, Optical Limiting

TEŐEKKÖR

İlk olarak beni yetiőtiren, her koşulda yanımda olup bana destek çıkan aileme, daha sonra çalışmalarımda bana yol gōsteren ve yardımını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. H. Göl YAĞLIOĞLU'na (Ankara Öniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı), Optik Malzemeler Araştırma Grubumuzdaki tÖm arkadaşlarıma, tecrÖbesiyle çalışmalarıma destek veren Sayın Betöl KÖÖKÖZ'e teőekkÖrlerimi sunarım.

Irmak GÖRSOY
Ankara, Mayıs 2018

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGE DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	5
2.1 Doğrusal Optik	5
2.1.1 Doğrusal soğurma	5
2.1.2 Doğrusal saçılma	6
2.2 Doğrusal Olmayan Optik	8
2.2.1 Doğrusal olmayan soğurma.....	9
2.2.2 Doyurulabilir soğurma	9
2.2.3 Doğrusal olmayan saçılma.....	10
2.3 Optik Sınırlama	10
2.3.1 Doğrusal olmayan soğurmaya bağlı optik sınırlama	12
2.3.2 Doğrusal olmayan saçılmaya bağlı optik sınırlama	13
3. MALZEME SEÇİMİ VE ÜRETİMİ	15
3.1 Gümüş Nano parçacıkların Optik Sınırlama Özellikleri	15
3.2 Lazer Aşındırma Tekniği ile Gümüş Nano parçacık Üretimi.....	19
3.2.1 Gauss profiline sahip ışın demeti	22
3.2.2 Demet genişliği ve knife-edge (bıçak kenarı) ölçümü	24
4. DENEYLER ve KULLANILAN EKİPMANLAR.....	28
4.1 Deneylerde Kullanılan Ekipmanlar.....	28
4.1.1 UV-VIS spektrometresi	28
4.1.2 Lazer kaynağı	29
4.1.3 Motorlu kızak	29
4.1.4 Algılayıcılar.....	30
4.1.5 Boxcar	31
4.1.6 Osiloskop.....	31
4.1.7 Optik bileşenler	32

4.2 Deneyleler	34
4.2.1 Lazer aşındırma yöntemi ile nano parçacık üretimi.....	34
4.2.2 Demet yarıçapının ve demet akısının ölçülmesi	35
4.2.3 Üretilen nano parçacıkların boyut analizleri	36
4.2.4 Z-tarama düzeneği	41
4.2.5 Açık yarık z-tarama düzeneği	42
5. BULGULAR	46
6. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	55
6.1 Soğurma Spektrumlarının Değerlendirilmesi	55
6.2 Akı Değişimine Bağlı Olarak Maksimum Optik Soğurma Dalga Boyunun Değerlendirilmesi.....	56
6.3 Lazer Aşındırma Süresine Bağlı Olarak Optik Sınırlama Özelliğinin Değerlendirilmesi	57
KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ.....	63

SİMGELER DİZİNİ

$\chi^{(1)}$	Birinci dereceden doğrusal olmayan alınganlık
$\chi^{(2)}$	İkinci dereceden doğrusal olmayan alınganlık
$\chi^{(3)}$	Üçüncü dereceden doğrusal olmayan alınganlık
χ	Elektriksel alınganlık
ϵ_0	Boş uzayın geçirgenliği
α	Doğrusal soğurma katsayısı (Linear absorption coefficient)
α_0	Doğrusal alınganlık
n	Kırılma indisi
n_0	Şiddetten bağımsız doğrusal kırılma indisi
n_2	Şiddete bağlı doğrusal kırılma indisi
β	Doğrusal olmayan soğurma katsayısı
λ	Dalga boyu
ω_x	x doğrultusundaki $1/e^2$ yarıçap değeri
ω_y	y doğrultusundaki $1/e^2$ yarıçap değeri
ω_0	Gausyen dalganın en küçük spot yarıçapı
q	Karmaşık yarıçap
μm	Mikrometre
Ag	Gümüş
AgNP	Gümüş nano parçacık (Silver nanoparticle)
Ag ₂ S	Gümüş sülfat (Silver sulfide)
Ag ₂ O	Gümüş oksit (Silver oxide)
ArF	Argon florür (Argon fluoride)
C	Karbon
CdS	Kadmiyum sülfat (Cadmium Sulfate)
CO ₂	Karbondioksit
d	Işığın geçtiği ortam kalınlığı
DMSO	Dimetil Sülfoksit
E	Optik dalganın elektrik alanı
F _{th}	Optik sınırlama akısı eşik değeri (optical limiting fluence threshold)

I	Geçen ışığın şiddeti
I_0	Gelen ışığın şiddeti
I_s	Doyuma ulaşma şiddeti
MHz	Megahertz
mL	Mililitre
mM	Milimolar
mJ	Milijul
mm	Milimetre
Nd:YAG	Neodim Doped Yttrium Aluminum Garnet
ns	Nano saniye
nm	Nanometre
P	Elektrik Kutuplanma Vektörü
$R(z)$	Dalga cephesinin eğrilik yarıçapı
THF	Tetrahidrofur
U	Dalganın elektrik alan genliği
W	Watt
XeCl	Ksenon Klorid (xenon chloride)
z_{waist}	Işın demetinin en küçük çapa sahip olduğu mesafe

Kısaltmalar

AFM	Atomik kuvvet mikroskobu (Atomic force microscope)
CBS	Karbon siyahı süspansiyon (Carbon black suspension)
CW	Sürekli dalga (Continuous wave)
HRTEM	Yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobu
Hz	Hertz
ND	Neutral Density
SEM	Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
SPR	Yüzey plazmon rezonans (Surface Plasmon Resonance)
THF	Tetrahidrofur
TEM	Geçirimli elektron mikroskobu (Transmissive electron microscope)
UV-VIS	Ultraviyole ve görünür
XRD	X-ışınları difraksiyonu (X-ray diffraction)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Lambert-Beer yasası	5
Şekil 2.2 Rayleigh (sol) ve Mie (sağ) saçılması.....	7
Şekil 2.3 Elastik ve elastik olmayan saçılma	7
Şekil 2.4 Kutuplanma ve elektrik alan arasındaki ilişki.....	9
Şekil 2.5 Optik sınırlama özelliği gösteren malzeme.....	11
Şekil 3.1 Metal nano parçacıkların yüzey plazmonlarını gösteren şematik gösterimi (Çağlayan 2014)	15
Şekil 3.2 Işığın madde içerisindeki doğrusal soğurması (http://www.sigmaaldrich.com 2018a)	16
Şekil 3.3 Tuzlu su ilavesi ile kararsızlaştırılan gümüş nano parçacık çözeltisinin optik tepkisi (http://www.sigmaaldrich.com 2018a)	17
Şekil 3.4 Lazer aşındırma denemelerine ait şematik gösterim (http://www.understanding nano.com 2007)	20
Şekil 3.5 Lazer aşındırma süreci	21
Şekil 3.6 Lazer-malzeme etkileşimi.....	21
Şekil 3.7 Işığın ω_0 noktasından sonraki hiperbolik dağılımı (https://commons.wikimedia.org 2009a)	23
Şekil 3.8 Gauss profiline sahip dalganın normalize yarıçap-bağıl şiddet grafiği	24
Şekil 3.9 Knife-edge ölçüm tekniği	25
Şekil 4.1 UV-VIS soğurma spektrometresi.....	28
Şekil 4.2 Lazer kaynağı.....	29
Şekil 4.3 Motorlu kızak.....	30
Şekil 4.4 Silikon dedektör	30
Şekil 4.5 DET36A dedektörünün dalga boyuna bağlı tepkisellik grafiği	31
Şekil 4.6 Boxcar	31
Şekil 4.7 Osiloskop ile gözlenen lazer ışını ve oluşturulan kare kapı sinyali	32
Şekil 4.8 Soğurucu ND filtreler	33
Şekil 4.9 Lazer aşındırma tekniği test düzeneği.....	34
Şekil 4.10 Bıçak kenarı test düzeneği	36
Şekil 4.11 TEM cihazı.....	37
Şekil 4.12 SEM cihazı.....	38
Şekil 4.13 Bir saat 477 J/cm^2 akı değeri için alınan TEM görüntüsü (AgNP boyutu: 40 nm)	39

Şekil 4.14 Bir saat 637 J/cm^2 akı değeri için alınan TEM görüntüsü (AgNP boyutu: 30 nm)	39
Şekil 4.15 Bir saat 796 J/cm^2 akı değeri için alınan TEM görüntüsü (AgNP boyutu: 25 nm)	40
Şekil 4.16 Bir buçuk saat 477 J/cm^2 için alınan TEM görüntüsü (AgNP boyutu: 22 nm)	40
Şekil 4.17 Bir buçuk saat 637 J/cm^2 için alınan TEM görüntüsü (AgNP boyutu: 20 nm)	41
Şekil 4.18 Bir buçuk saat 796 J/cm^2 akı değeri için alınan TEM görüntüsü (AgNP boyutu: 15 nm)	41
Şekil 4.19 Açık yarık z-tarama düzeneği	42
Şekil 4.20 Z-tarama deney düzeneğinin kurulumu	43
Şekil 4.21 Doğrusal olmayan soğurma etkisi	44
Şekil 4.22 Doyurulabilir soğurma etkisi	44
Şekil 4.23 Normalize geçirgenlik giriş enerji akısı grafiği	45
Şekil 5.1 Lazer aşındırma tekniğiyle AgNP üretimi	46
Şekil 5.2 Gümüş nano parçacıkların süre ve güce bağlı soğurma değerleri (1.5 mL su)	47
Şekil 5.3 Piko saniye lazeri kullanılarak üretilen nano parçacıkların dalga boyuna bağlı soğurma grafiği (1.7 mJ, 532 nm, 2 mL su)	47
Şekil 5.4 Femto saniye lazeri kullanılarak üretilen nano parçacıkların dalga boyuna bağlı soğurma grafiği (2.5 mJ, 532 nm, 2 mL su)	48
Şekil 5.5 955 J/cm^2 akı değerinde yapılan yanmış AgNP görüntüsü	49
Şekil 5.6 Dalga boyu soğurma grafiği	50
Şekil 5.7 Aynı akı (477 J/cm^2) değeri ve farklı süreler için mesafeye bağlı normalize geçirgenlik grafiği	52
Şekil 5.8 Aynı akı (637 J/cm^2) değeri ve farklı süreler için mesafeye bağlı normalize geçirgenlik grafiği	52
Şekil 5.9 Aynı akı (796 J/cm^2) ve farklı süreler için mesafeye bağlı normalize geçirgenlik grafiği	53
Şekil 5.10 Açık yarık z-tarama grafiği (z'ye bağlı normalize geçirgenlik)	53
Şekil 5.11 Akıya bağlı normalize geçirgenlik grafiği	54
Şekil 6.1 Akıya bağlı geçirgenlik grafiği	58

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 4.1 532 nm Nd:YAG lazer aynasının özellikleri	33
Çizelge 4.2 Farklı akı ve süreye bağlı olarak nano parçacık boyut analizi.....	38
Çizelge 5.1 Lazer aşındırma tekniği ve z-tarama tekniğindeki odak çapı değerleri	49
Çizelge 5.2 Lazer aşındırma süresi ve akıya bağlı olarak soğurma değerleri.....	50
Çizelge 5.3 Parçacık boyutuna bağlı dalga boyu aralığının belirlenmesi	51
Çizelge 6.1 Farklı akı ve süreler için soğurmaya bağlı dalga boyu ilişkisi.....	56
Çizelge 6.2 Süreye bağlı soğurma değerleri	57



1. GİRİŞ

Optik, ışığın temel özelliklerini ve ışığın maddeler ile etkileşimini inceleyen bir bilim dalıdır. Optiğin, optik anahtarlama, optik algılayıcılar, optik sınırlama vb. birçok uygulama alanı vardır. Bu uygulamalardan bazıları doğrusal olmayan optik prensibine dayalı olarak çalışır. Doğrusal olmayan optik, lazer ışığı gibi şiddetli bir ışık kaynağının kullanımı ile maddelerin optik özelliklerinin değiştirilmesi ve bu sayede meydana gelen olayların incelenmesidir. Doğrusal olmayan optikte şiddete bağlı soğurma, kırılma, saçılma vb. optik olaylar incelenebilir. Malzemelerin doğrusal olmayan soğurma ve kırılma tepkileri açık yarık z-tarama yöntemi ile araştırılabilmektedir (Yin vd. 2000).

Karşı tedbir amaçlı kullanılan lazerler ya da görüntüleyici sistemlerin karanlıkta görmesini sağlamak için kullanılan ışık kaynakları, algılayıcı sistemlerin doyuma ulaşmasına ya da zarar görmesine neden olmaktadır. Bu sistemleri yüksek enerjiden korumanın yolları vardır. Bunlar, belirli dalga boyunu soğuran/geçiren filtreler, enerjinin bir kesrini soğuran filtreler ve kapaklardır. Belirli bir dalga boyunu geçiren ya da soğuran filtreler karşı taraftan gelen tehditin dalga boyunun bilinmesi durumunda kullanılabilirdiğinden tercih edilmemektedir. Soğurucu filtreler, sistemin içerisine giren ışığın gücünün filtrelenmesi için kullanılır. Sistem için tehdit oluşturan kaynak ile birlikte sisteme giren ve görüntü oluşumunu sağlayan tüm ışığın şiddetini azalttığından kullanımı tercih edilmemektedir. Bu nedenle en etkili yol gelen ışığın şiddetine bağlı olarak doğrusal olmayan soğurma veya saçılma özelliği gösteren optik sınırlayıcı filtrelerin kullanılmasıdır (Miller vd. 1999).

Bu tez çalışmasının amacı laboratuvar imkanlarını kullanarak farklı boyutlarda nano parçacık üretimi ve üretilen nano parçacıkların optik sınırlama özelliklerinin incelenmesidir. Literatürde optik sınırlayıcı özellik gösteren çeşitli malzemeler mevcuttur. Örneğin organik malzemeler hızlı tepki veren optik sınırlama özellikleri ile bilinirler (He vd. 1995, Wang vd. 2010). Ancak yüksek akı değerlerinde zarar gördüğünden kullanımı tercih edilmemektedir. Optik sınırlayıcı özellik gösteren diğer malzemeler, nano-parçacıklar (platinyum, germanyum, alüminyum, altın, gümüş gibi), yapısında karbon olan malzemeler, fullerenler ve karbon nanotüpleridir. Fullerenler ve

karbon nanotüpler yüksek akı değerlerine dayanabilmektedirler ancak maliyetleri fazladır. Bu nedenle maliyeti etkin bulunan nano parçacık (Ag) kullanımı tercih edilmiştir.

Gao vd. (2007), ürettikleri altın nano parçacıkların boyutuna bağlı olarak optik sınırlama etkisini araştırmışlardır. Bunun için yapılan deneyde 532 nm darbeli nano saniye lazeri kullanılmıştır. Yaptıkları araştırmalar optik sınırlama özelliğinin parçacık büyüklüğüne bağlı olduğunu ancak tekdüze artmadığı göstermiştir. Deneyler 15 nm, 25 nm, 50 nm ve 70 nm değerleri için yapılmış ve altın nano parçacıklar için optik sınırlama özelliğinin 25 nm’de en fazla olduğu görülmüştür.

Qu vd. (2002), platinyum nano parçacık üretimi için solüsyon olarak metanol kullanmış ve üretilen solüsyonun optik sınırlama özelliğine bakmışlardır. Deneylerde 532 nm darbeli nano saniye lazeri kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar platinyum plakası kullanılarak metanol içerisinde üretilen nano parçacıkların optik sınırlama özelliğinin yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Sonuçlar hem teorik hem de deneysel olarak değerlendirilmiştir.

Chen vd. (2007), karbon nano parçacıkları lazer aşındırma yöntemiyle üreterek optik sınırlama özelliklerini incelemişlerdir. Üretilen nano parçacıkların analizi Raman spektroskopisi, UV-VIS spektroskopisi ve elektron mikroskopuyla yapılmıştır. Deneylerde 532 nm dalga boylu ve 7 ns darbe genişliğine sahip Nd:YAG lazer kaynağı kullanılmıştır. Amaç, nano parçacık büyüklüğü ve lazerin tekrarlama frekansının optik sınırlama üzerindeki etkisini incelemektir. Deney sonucunda solüsyon olarak tetrahidrofur (THF) kullanılması durumunda üretilen nano parçacık boyutunun suya oranla daha küçük olduğu gözlemlenmiştir.

Aleali vd. (2011), dimetil sülfoksit (DMSO) solüsyonunda, gümüş sülfat nano parçacıklarının üretimiyle ilgili olarak çalışma yapmışlardır. Deneylerde 532 nm dalga boylu nano saniye darbeli lazer kullanılmıştır. Dedektör önüne konulan yarık çapına bağlı olarak optik sınırlama performansları incelenmiştir. Üretilen nano parçacıklara TEM ölçüm cihazıyla bakılmış ve boyutlarının 3 nm civarında olduğu gözlemlenmiştir.

UV-VIS spektroskopisi sonuçlarına göre, hazırlanan solüsyonun 2 hafta boyunca kararlı bir şekilde kalabildiği gözlemlenmiştir. Optik sınırlamaya katkısı olan mekanizmalar, doğrusal olmayan soğurma, saçılma ve kırılmadır. Açık yarık z-tarama düzeneğinde malzemenin iki foton soğurma katsayısı belirlenirken, kapalı yarık z-tarama düzeneğinde kırılma indisinin pozitif olduğu görülmüştür.

Jia vd. (2005), 532 nm dalga boylu nano saniye darbeli lazer kullanarak $Cd_xAg_{(1-x)}S$ yarıiletken nano parçacıklarını üretmişlerdir. Optik sınırlama performansının artmasında doğrusal olmayan soğurma ve saçılma mekanizmalarının etkili olduğunu belirtmişlerdir. Üretilen CdS nano parçacıklarının boyutları 2-9 nm çapında olup, parçacık boyutu arttıkça optik sınırlama özellikleri de artış göstermiştir. CdS yüzeyine Ag_2S ince filminin kaplanmasıyla bu performansın artırılacağı gözlemlenmiştir.

Eslamifar vd. (2012), 532 nm dalga boylu, 18 ns darbe süreli lazer kaynağı kullanarak nano parçacık üretmişlerdir ve ürettikleri nano parçacıkların termo-optik özelliklerini CW lazer kaynağı kullanarak incelemişlerdir. Deneylerde solüsyon olarak saf su kullanılmıştır. Üretilen solüsyonun analizi soğurma spektrumu ve TEM yardımıyla yapılmıştır. Malzemenin doğrusal olmayan optik özellikleri düşük güçlü CW lazer kaynağı kullanılarak kapalı yarık z-tarama tekniğiyle incelenmiş, doğrusal olmayan kırılma indisi ve termo-optik katsayılar hesaplanmıştır. Üretilen altın nano parçacıkların şekline bağlı olarak sınırlama özelliği değiştirilebilmiştir. Metal nano parçacıkların fotonik uygulamaların geliştirilmesinde önemli rol oynayabileceği sonucu çıkarılmıştır.

Tyurnina vd. (2013), lazer aşındırma tekniğiyle gümüş nano parçacıkların üretilebilmesi için üretim parametrelerini değiştirmişlerdir. Bu parametreler akı, gümüş plaka üzerindeki su seviyesi, lazer aşındırma süresi ve gümüş plakanın yüzey pürüzlülüğüdür. Yapılan çalışmada bu parametre değişimlerinin soğurma ve dalga boyuna etkisi araştırılmıştır. Aşındırma süresi arttıkça ve akı azaldıkça nano parçacık büyüklüğü küçülmekte, gümüş plaka üzerindeki su seviyesi azaldıkça nano parçacık sayısı artmaktadır. Gümüş nano parçacık üzerindeki yüzey pürüzlülüğü de yansımaları ve yüzeyden koparılabilecek nano parçacık sayısını etkileyeceğinden üretim öncesinde yüzeyin

parlatılması gerektiği belirtilmiştir. Ancak, bu çalışmada üretilen nano parçacıkların optik sınırlama özellikleri incelenmemiştir.

Yukarıda özetlenen ve literatürde mevcut olan çalışmalarda farklı nano malzemeler için üretim yöntemine bağlı olarak doğrusal soğurma özellikleri araştırılmıştır. Ancak gümüş nano parçacıkların lazer aşındırma yöntemi üretim parametrelerinin optik sınırlama üzerindeki etkisi ile ilgili çok az çalışma yapılmıştır. Bu tez çalışmasının amacı, gümüş nano parçacıklarının lazer aşındırma tekniği ile üretim parametreleri ve optik sınırlama performansı arasındaki bağlantıyı kurabilmektir.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Doğrusal Optik

Doğrusal optik düşük şiddet bölgelerinde ışığın madde ile etkileşmesini inceleyen bilimdir. Yansıma, kırılma ve soğurma gibi özellikler şiddetten bağımsızdır. Doğrusal optikte elektrik kutuplanma vektörü (\mathbf{P}), uygulanan optik dalganın elektrik alanı (\mathbf{E}) ile doğrusal olarak değişmektedir. Kutuplanma vektörü,

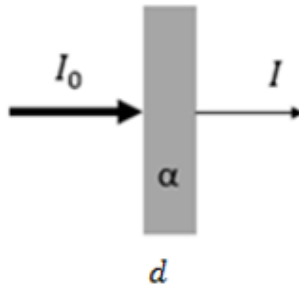
$$= \varepsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E}$$

bağıntısı ile ifade edilir ve \mathbf{P} , \mathbf{E} ile doğrusal olarak değişmektedir. Burada $\chi^{(1)}$ ortamın birinci dereceden elektriksel alinganlığı ve ε_0 boş uzayın geçirgenliğidir.

2.1.1 Doğrusal soğurma

Kalınlığı d olan saydam bir ortam üzerine enerjisi, herhangi bir uyarılmış seviye ile taban seviyesi arasındaki enerji farkı kadar bir ışık demeti gönderildiğinde, malzeme ışık demetinden enerji alarak uyarılmış duruma geçer. Buna doğrusal soğurma denir.

Geçen ışığın şiddetinin (I), gelen ışığın şiddetine (I_0) bağılılığı Lambert-Beer yasası ile verilir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Lambert-Beer yasası

Lambert-Beer yasası:

$$I = I_0 e^{-\alpha d}$$

ifadesiyle gösterilir. Burada, d ışığın geçtiği ortamın kalınlığı, α ise doğrusal soğurma katsayısıdır.

2.1.2 Doğrusal saçılma

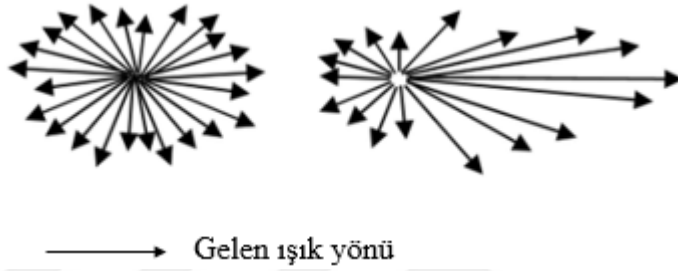
Işık boşlukta giderken aynı c hızıyla yayılmasına karşılık, maddeden geçerken hızı dalga boyuna bağlı olarak değişir. Kırılma indisi, dalga boyunun bir fonksiyonudur. Böyle ortamlarda ışık saçılma olayını gösterir. Örneğin beyaz ışık, birden fazla dalga boyundaki ışığın birleşiminden meydana gelmiştir. Beyaz ışık prizmadan geçerken ışığın saçılması kırılma indisine bağlı olarak değişir, kırılma indisi de dalga boyuyla bağlantılı olduğundan kırmızı ışık ($\lambda=640\text{nm}$) en az saçılırken, mor ışık ($\lambda=450\text{ nm}$) en fazla saçılmaya uğrayacaktır.

Ortamdaki taneciklerin büyüklüğüne bağlı olarak, saçılan ışığın şiddeti değişir. Tanecikler kolloidal büyüklükteyse bu saçılma çok fazla olup durum gözle görülebilir hale gelir.

Işının dalga boyundan daha küçük dalga boylu taneciklerin neden olduğu saçılmaya “Rayleigh Saçılması” denir. Şiddeti, tanecik büyüklüğüne, polarize olabilmesine ve ışının dalga boyunun dördüncü kuvvetinin tersine bağlıdır. Bu nedenle kısa dalga boyları uzun dalga boylarına göre daha fazla saçılma eğilimine sahiptirler. Saçılan fotonların enerjisinde değişim olmadığından dolayı saçılma türü elastiktir. Gelen fotonun enerjisi atomu bir üst seviyeye çıkartmak için yetmemektedir (Miles vd. 2001).

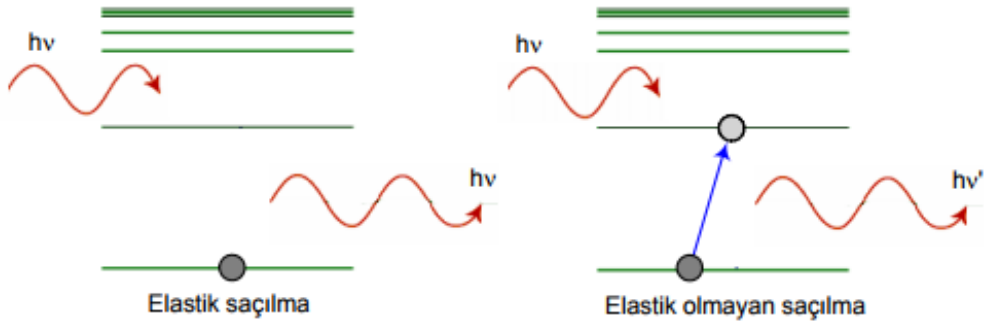
Altın, gümüş vb metal nano parçacıkların ışıkla olan etkileşimini açıklamak için Gustav Mie'nin kolloidal altın parçacıkların renkleriyle ilgili yayınladığı çalışmanın önemi vardır (Horvath 2009). Mie yaptığı bu çalışmada küçük ve küre biçimindeki parçacıkların saçılımını hesaplamak için Maxwell'in elektromanyetik teorisini

kullanmıştır. İlk ölçüm sonuçlarında nano parçacık boyutuna bağlı olarak hazırlanan solüsyonun renginin değiştiğini görmüştür. Bu duruma sonraki aşamalarda yüzey plazmon rezonans adı verilmiştir. Homojen ve izotropik küreler tarafından gerçekleştirilen saçılım Mie'nin teorisi olarak adlandırılrsa da ondan önce Alfred Clebsch, Ludvig Lorenz ve Peter Debye'de bu konu üzerinde çalışmalar yapmıştır (Miles vd. 2001). Bu nedenle bu teori Lorenz-Mie teorisi, Lorenz-Mie-Debye teorsisi olarak da bilinmektedir.



Şekil 2.2 Rayleigh (sol) ve Mie (sağ) saçılması

Raman saçılmasında ise saçılan ışının frekansında değişiklik olabilmektedir. Bu durum enerji seviyesi değişiminden kaynaklanmaktadır. Çünkü gelen foton atomun uyarılması için yeterli enerjiye sahiptir. Bu nedenle de Raman saçılması da elastik olmayan saçılmaya örnek olarak verilebilmektedir. Şekil 2.3'de elastik ve elastik olmayan saçılmaya bağlı olarak seviyeler arasındaki enerji geçişleri gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Elastik ve elastik olmayan saçılma

2.2 Doğrusal Olmayan Optik

Doğrusal olmayan optik yüksek şiddetli lazer ışınlarının malzeme ile etkileşmesini inceleyen bir bilim dalıdır. Doğrusal optikte (düşük şiddetlerde) malzemelerin kırılma, yansıma ve soğurma gibi optik özellikleri şiddete bağlı değilken, doğrusal olmayan optikte (yüksek şiddetlerde) bu özellikler şiddete bağlıdır.

Doğrusal olmayan optik maddenin olmadığı (boş uzayda) ortamda gözlenmez. Bir maddeye elektrik alanı E olan bir ışın geldiğinde, ışının madde üzerinde oluşturduğu kutuplanma vektörü aşağıdaki ifade ile verilir:

$$P = \varepsilon_0 \chi^{(1)} E + \varepsilon_0 \chi^{(2)} EE + \varepsilon_0 \chi^{(3)} EEE$$

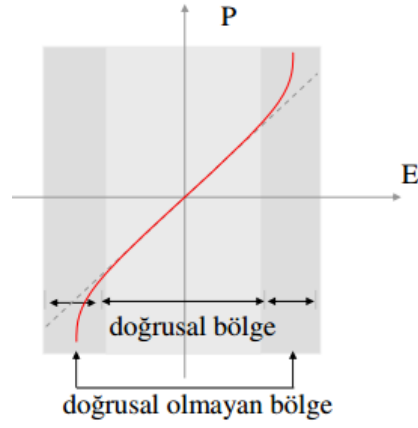
ifadesiyle gösterilir. Bu ifadeye $\chi^{(1)}$ birinci dereceden doğrusal olmayan alınganlık ve $\chi^{(2)}$ ikinci ve $\chi^{(3)}$ ise üçüncü dereceden doğrusal olmayan alınganlıktır.

Doğrusal olmayan optikte malzemenin kırılma indisi sabit değil, gelen ışının şiddetine aşağıdaki ifade ile bağlıdır.

$$n(I) = n_0 + n_2(I) \cdot I$$

Burada n_0 şiddetten bağımsız doğrusal kırılma indisi ve $n_2(I)$ şiddete bağlı doğrusal olmayan kırılma indisidir.

Şekil 2.4 elektrik alana bağlı olarak değişen kutuplanma vektörü grafiğini göstermektedir. Normal ışık şiddetlerinde $\chi^{(2)}$ ve $\chi^{(3)}$ alınganlık değerleri ihmal edilirken, Şekil 2.4'de gösterilen doğrusal bölge geçerli olmaktadır. Ancak yüksek şiddete sahip ışık kaynaklarının olması durumunda normal şiddette ihmal edilen alınganlık katsayıları da dahil edilir ve şekil 2.4'de görüldüğü gibi doğrusal olmayan bölgeler gözlemlenir.



Şekil 2.4 Kutuplanma ve elektrik alan arasındaki ilişki

2.2.1 Doğrusal olmayan soğurma

Malzeme üzerine yüksek şiddetli bir ışık gönderildiğinde malzemede değişiklikler meydana gelmektedir. Bunun için yüksek şiddette lazerler kullanılmaktadır. Yüksek şiddetli lazer ışını malzemede soğurmaya neden olabilmektedir. Malzeme taban durumuna inmeden art arda gelen ardışık fotonlarla malzemede birden fazla foton soğurması meydana gelebilir. Bu olaya iki foton soğurması (TPA) adı verilir.

İki foton soğurması olduğu durumda malzeme üzerinde ilerleyen ışığın şiddetinin $I(z)$ aldığı z yolu ile değişimi :

$$\frac{dI(z)}{dz} = -\alpha_0 I(z) - \beta(I)I^2(z)$$

ifadesi ile gösterilir. Burada α_0 doğrusal soğurma katsayısını belirtirken, $\beta(I)$ ise şiddete bağlı doğrusal olmayan soğurma katsayısını belirtmektedir.

2.2.2 Doyurulabilir soğurma

Bazı malzemeler, şiddetin artması durumuna bağlı olarak soğurma katsayısının azalması, geçirgenliğin artması özelliğine sahiptirler. Bu malzemelere doyurulabilir

soğurucu adı verilir. Bu malzemelerde, şiddetli lazer ışığına maruz bırakılan malzemenin ölçülen soğurma katsayısının (α) gelen lazer ışığının şiddetine (I) bağılılığı:

$$\alpha(I) = \frac{\alpha_0}{1 + I/I_s}$$

ifadesiyle gösterilir. Burada α_0 doğrusal alınganlığı, I_s ise malzemenin doyuma ulaşma şiddetidir.

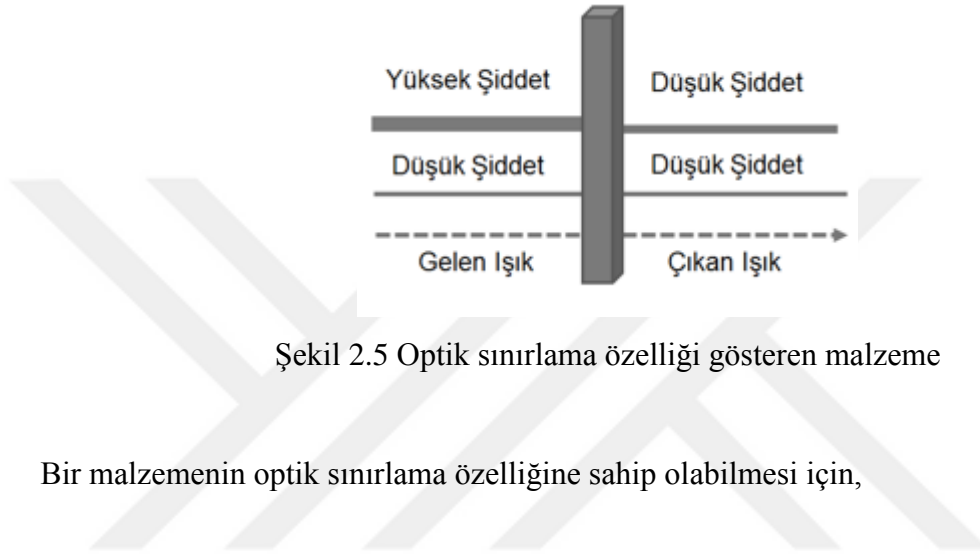
2.2.3 Doğrusal olmayan saçılma

Özellikle nano saniye darbeleri lazerler kullanıldığında, malzeme lazer ışığını soğurur ve malzeme sıcaklığında hızlı bir artış gözlemlenir. Teorik analizler, malzemenin doğrusal olmayan davranışlar sergilediğini ortaya koyar. Soğurulan lazer enerjisi termal etkilerden kaynaklı kırılma indisi değişimine neden olarak saçılma etkisi yaratır (Aleali ve Masour 2010).

2.3 Optik Sınırlama

Yüksek güçlü lazerlerin çeşitli uygulamalarda kullanımının artması ile birlikte doğrusal olmayan malzemelere olan ilgi de artmıştır. Özellikle, bu malzemelerin pasif optik sınırlayıcı olarak insan gözünü ve algılayıcıları korumada kullanımları yani optik sınırlama özellikleri oldukça önemli hale gelmiştir. Geçmiş yıllarda yapılan çalışmalarda organik boyaların optik sınırlama özellikleri oldukça fazla çalışılmıştır (Dagani 1996, Sun ve Riggs 2010). Ancak, organik boyaların optik sınırlamaya olan tepkisi hızlı olmasına rağmen, yüksek enerjilerdeki ve ısıl etkilere maruz kaldıklarındaki dayanıklılıkları oldukça azdır. Bu nedenle ısı etkisi oluşturma potansiyeline sahip, özellikle CW veya büyük darbe süresine sahip (ns) lazerlerin optik sınırlanması için organik malzemeler uygun değildir. Bu malzemelerin yüksek akı değerlerinde zarar görmesi, sistem performansını olumsuz yönde etkileyecektir.

İdeal optik sınırlayıcı malzemeler, düşük güçte doğrusal davranış gösterirken, yüksek güçte gelen ışığın şiddeti ile artan saçılma veya soğurma göstererek algılayıcıya gelen ışığı bloklayan veya sınırlayan bir mekanizmaya sahip olmalıdırlar. Şekil 2.5’de de görüldüğü gibi optik sınırlama özelliği gösteren malzeme düşük şiddetlerde geçirgen özellik gösterirken, yüksek şiddetlerde ışığı sınırlayarak, çıkan ışık şiddetinin azaltılmasını sağlamaktadır.



Şekil 2.5 Optik sınırlama özelliği gösteren malzeme

Bir malzemenin optik sınırlama özelliğine sahip olabilmesi için,

- Yüksek doğrusal geçirgenliğe,
- Düşük sınırlayıcı eşik değerine,
- Hızlı tepki süresine,
- Geniş bir spektrumda çalışabilme kabiliyetine,
- Hasar eşik değerinin yüksek olmasına

gerek duyulmaktadır. Optik sınırlama, yüksek şiddetli ışığın varlığında mümkün olabilmektedir. Doğrusal olmayan optik olaylar da şiddete bağlıdır. Dolayısıyla, RSA, TPA, doğrusal olmayan kırılma ve saçılma olayları optik sınırlamaya neden olan temel mekanizmalar olarak kullanılabilirler. Bunlar haricinde termal etkiden dolayı oluşan kırılma indisi değişimi de optik sınırlamaya katkı sağlayabilir (Kürüm 2008).

2.3.1 Doğrusal olmayan soğurmaya bağlı optik sınırlama

Rashidian vd. (2015), optik sınırlamaya etki eden önemli mekanizmalardan birinin doğrusal olmayan soğurma olduğunu deneysel olarak açığa çıkartmışlardır. Malzeme yüzeyindeki serbest elektronların belli dalga boyundaki ışık tarafından uyarılması sonucunda salınımına uğraması SPR olarak tanımlanmaktadır. Çalışmada nanometallerin büyüklük, şekil, malzeme ve konsantrasyonuna bağlı olarak yüzey plazmon rezonansına (SPR) etkisi araştırılmıştır. Deneyle altın ve gümüş nano parçacıklar üzerinde yapılmış, lazer gücü, diyafram açıklığı, konsantrasyon ve büyüklüğe bağlı olarak optik sınırlama üzerindeki etkileri çalışılmıştır.

Doğrusal olmayan soğurma etkisi araştırılırken, diyafram açıklığı ya da pinhole kullanmaya gerek yoktur. Bu mekanizmalarda giren ışık şiddeti arttıkça, doğrusal olmayan soğurmaya bağlı geçirgenlik azalmaktadır. Bunu etkileyen iki temel mekanizma vardır. Bunlar RSA ve TPA'dır. TPA mekanizmasının kullanılması, doğrusal soğurma kaybının ihmal edilebilecek seviyede az olması, hızlı tepki ve iletilen sinyalin yüksek ışın kalitesi gibi sebeplerden dolayı tercih edilmektedir. TPA mekanizması yalnızca optik sınırlama için değil, optik güç dengelemesi, optik atım şekillendirme vb uygulamalar için de kullanılmaktadır.

Doğrusal olmayan saçılmaya bağlı optik sınırlama özellikleri çalışılırken diyafram açıklığı (yarık) kullanılmaktadır. Yapılan çalışmada optik sınırlama etkisine bakabilmek için 4 farklı yarık tipi kullanılmıştır. Bunlar 0.25 mm, 0.4 mm, 1.5 mm ve 2 mm'dir. Yarıklar dedektörün önüne konulmuş ve monitörden geçen enerjiler gözlemlenmiştir. Sonuç olarak diyafram büyüklüğü küçüldükçe, geçen enerjinin azaldığı gözlemlenmiştir. Altın ve gümüş nano parçacık konsantrasyonu arttıkça, optik sınırlama eşiği azalmaktadır. Yüksek nano parçacık konsantrasyonunda metal nano parçacıklardan doğrusal olmayan saçılma etkisi artmakta ve optik sınırlamaya katkı sağlamaktadır. Nano parçacık büyüklüğünün artması, SPR etkisinin artmasına neden olmuştur (Rashidian vd. 2015).

Sürekli dalga ve nano saniye darbeleri yüksek güçlü lazerler, malzemeler üzerinde ısı artışına sebep olurlar. Malzemenin ısınması ve buna bağlı olarak zarar görmesi istenmediğiden bu tür lazerler kullanıldığında soğurmaya bağlı optik sınırlama yönteminin kullanılması uygun değildir. Bu nedenle saçılmaya bağlı optik sınırlama yönteminin kullanılması tercih edilmektedir.

2.3.2 Doğrusal olmayan saçılmaya bağlı optik sınırlama

Doğrusal olmayan etkiler yüksek şiddetli ışığın varlığında ortaya çıkmaktadır. Aleali vd. (2010), gümüş nano parçacıkların optik sınırlama üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kullanılan lazerin darbe genişliği 15 ns'dir. Nano parçacık üretimi için lazer aşındırma tekniği kullanılmıştır. Üretim sırasında malzeme üzerine odaklanan ışın demetinin çapı 140 μm 'dir. Dedektörden önce konulan yarığın değişiminin optik sınırlama üzerine etkileri incelenmiştir. Üretilen naoparçacıkların ortalama büyüklükleri 9 nm civarındadır. Z-tarama deneyleri 532 nm dalgaboylu nano saniye lazeriyle yapılmış ve termal etkilerin önlenmesi için tekrarlama frekansı 1 Hz olarak seçilmiştir. Yarık boyutunun farklılığına bağlı olarak dedektörde okunan güç değerleri farklılık göstermektedir. Çünkü, artan güçle birlikte doğrusal olmayan saçılma etkisi meydana gelmekte ve yarıktan geçen ışın demeti miktarı azalmaktadır. Yapılan deneyler sonucunda doğrusal olmayan soğurma etkisine bağlı olarak malzemedeki doğrusal olmayan saçılma etkisinin meydana geldiği ve optik sınırlama özelliğini arttırdığı görülmüştür.

Gao vd. (2003), yaptığı çalışmada, C_{60} türevini içeren gümüş nano parçacıkların optik sınırlama özelliğiyle ilgili olarak çalışmalar yapmıştır. Kullanılan lazerin darbe genişliği 8 ns, dalga boyu ise 532 nm'dir. Solüsyon olarak kloroform kullanılmıştır. Yapılan deneylerin temeli doğrusal olmayan soğurma özelliğine bağlıdır. Nano parçacık konsantrasyonu arttıkça, nano parçacıklar yüksek şiddette saçılma etkisi göstermiş ve optik sınırlama etkisi artmıştır.

Bu tez çalışmasının amacı, CW ve ns darbeleri lazerler için optik sınırlama özelliği gösteren bir malzeme seçerek, optik sınırlama özelliklerini araştırmaktır. Optik

sınırlama işlemi sırasında malzemenin ısınarak zarar görmemesi için, saçılmaya bağlı optik sınırlama mekanizması temel mekanizma olarak kullanılacaktır. Literatürde yapılan ve yukarıda özetlenen çalışmalar göz önüne alındığında, maliyet etkinliği ve yüksek optik sınırlama performansı nedeniyle bu tez çalışmasında gümüş nano parçacıklar tercih edilmiştir. Gümüş nano parçacıkları laboratuvarımızda üretebilmek için de lazer aşındırma yöntemi seçilmiştir. Gümüş nano parçacıkların üretimi ve optik sınırlama özellikleri bir sonraki bölümde açıklanmıştır.

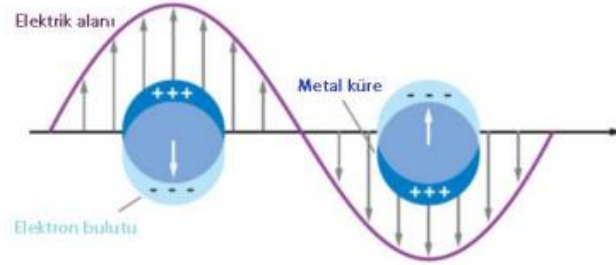


3. MALZEME SEÇİMİ VE ÜRETİMİ

3.1 Gümüş Nano parçacıkların Optik Sınırlama Özellikleri

Gümüş nano parçacıklar (AgNP) benzersiz fiziksel, kimyasal, elektriksel ve termal özelliklerinden dolayı optik, elektronik vb pek çok alanda kullanılmaktadır.

Gümüş nano parçacıklar, ışığı soğurma ve saçmada oldukça etkilidirler. Parçacıkların şekline ve boyutuna bağlı olarak farklı renk alırlar. Gümüş nano parçacıkların ışıkla olan etkileşimi, metal yüzeyi üzerindeki iletken elektronların belli dalga boyunda ışık tarafından uyarılarak kolektif bir salınımına uğramaları sonucunda oluşur. Bu durum yüzey plazmon rezonansı (SPR) olarak bilinir. SPR, bir parçacığın sahip olduğu elektronlarının, parçacığa gelen ışığın uyarılması ile kolektif şekilde salınımıyla mümkün olur. Metallerin yüzeyindeki serbest elektron bulutu, elektron plazması olarak adlandırılmakta ve şekil 3.1’de görüldüğü şekilde gerçekleşen salınımlar ise plazmon olarak adlandırılmaktadır.

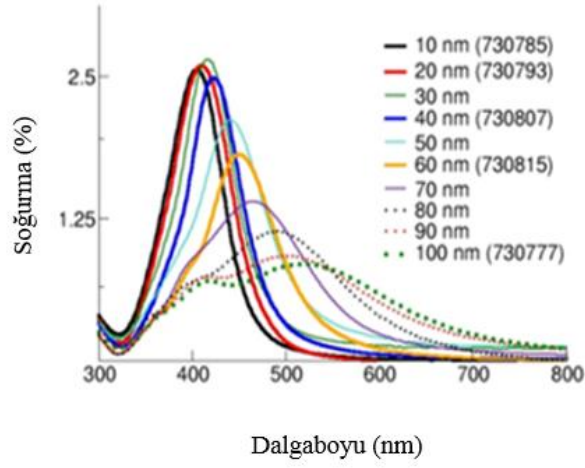


Şekil 3.1 Metal nano parçacıkların yüzey plazmonlarını gösteren şematik gösterimi (Çağlayan 2014)

Yüzey plazmonlarının salınımı nano parçacıkların ışıkla olan ilişkisini, dolayısıyla da rengini belirlemektedir. Atomik ya da moleküler haldeki durumun aksine metal nano parçacıklar yüzey plazmon rezonanslarından dolayı yüksek soğurma ve saçma bandına sahiptirler. Boyutları 2 nm civarında olan çok küçük parçacıklarda saçılma soğurmanın yanında ihmal edilebilecek düzeyde iken, 1 µm civarındaki büyük parçacıklarda soğurma saçılmanın yanında ihmal edilebilecek düzeyde kalmaktadır. Yüzey plazmon

rezonansı dalga boyu, nano parçacık boyutu, şekli ve türleri değiştirilerek ayarlanabilmektedir (Çağlayan 2014).

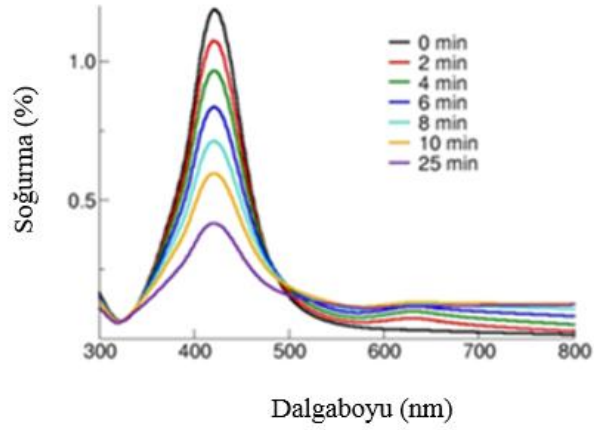
Lazer ışınının malzeme üzerindeki çapına bağlı olarak üretilen nano parçacıkların soğurma grafikleri sigma-aldrich firmasının üretim sonuçlarına göre yaptıkları analiz çalışmalarından elde edilmiş ve ve grafik şekil 3.2’de verilmektedir .



Şekil 3.2 Işığın madde içerisindeki doğrusal soğurması (<http://www.sigmaaldrich.com> 2018a)

Görüldüğü gibi çap arttıkça tepe dalga boyu daha uzun dalga boylarına doğru kaymış ve genişlemiştir. 80 nm’den daha büyük çaplarda, ikinci zirve birinci zirveden daha kısa bir dalga boyunda görünür hale gelmiştir. Pik dalga boyu, pik genişliği ve ikincil rezonansların etkisi nano parçacıkların boyut ve şekli hakkında bilgi verir. Buna ek olarak UV-VIS spektroskopisi kullanılarak nano parçacıkların zaman içindeki değişimi incelenir.

Gümüş nano parçacıkların topaklanma durumu olduğunda, bu sistem bireysel parçacıklardan farklı bir SPR’ye sahiptir. Çok parçacıklı olması durumunda, plazmon rezonansı tek bir nano parçacığın rezonansından daha uzun dalga boyuna (kırmızı) kayabilir. Bu durumda kızılötesi bölgede yoğunluk artışı gözlemlenebilir. Şekil 3.3’te tuzlu su ilavesi ile karıştırılan gümüş nano parçacık çözeltisinin optik tepkisi görülmektedir (<http://www.sigmaaldrich.com> 2018a).



Şekil 3.3 Tuzlu su ilavesi ile kararsızlaştırılan gümüş nano parçacık çözeltisinin optik tepkisi (<http://www.sigmaaldrich.com> 2018a)

Sonuç olarak gümüş nano parçacıkların UV-VIS spektrum grafiği nano parçacıklarda topaklanma olup olmadığının bilgisini de vermektedir. Bu da gümüş nano parçacıklarla yapılan deneysel çalışmalar için oldukça önem taşımakta ve malzeme tayini için kolaylık sağlamaktadır.

Literatürde yüksek şiddetli lazer ışınları sebebiyle zarar gören optik algılayıcılar ve insan gözünü korumaya yönelik olarak çalışmalar yapılmıştır. Nano parçacıklar bu amaç için kullanılacak önemli malzeme gruplarından birisidir. Yapı ve büyüklüklerine bağlı olarak optik özellikleri değişebilmektedir. Bunu test edebilmek için farklı boyutlarda ve şekillerde üretilmiş olan gümüş nano parçacıklar ile çalışmalar yapılmıştır (Ong vd. 2004, Hajiesmaeilbaigi vd. 2005, Eberle vd. 2012, Muller vd. 2013).

Eberle vd. (2012), doğrusal olmayan geçirgenlik ve saçılma mekanizmalarını anlamak için gümüş nano parçacıklar üzerine çalışmışlardır. Deneylerinde 532 nm ve 1064 nm dalga boylu darbeli lazerleri kullanmışlar ve sonuçları incelemişlerdir. Kullanılan lazerin darbe genişliği 3 ns ve tekrarlama frekansı 3 Hz'dir. 532 nm için ölçülen demet çapı 4 µm iken, 1064 nm için bu değer 8 µm'dir. Deneyde farklı akı değerleri için açılma saçılma dağılımı incelenmiştir. Optik sınırlama eşik değerinin dalga boyundan bağımsız

olduğu gözlemlenmiş ve en iyi sonuçlara nano parçacık şeklinin küresel olduğu durumda ulaşılmıştır.

Muller vd. (2013), yaptıkları çalışmada farklı boyut ve şekillerdeki gümüş nano parçacıkların optik sınırlama üzerindeki etkisini araştırmışlar ve sonuçları CBS (carbon black suspension) ile karşılaştırmışlardır. Deneylede Nd: YAG lazeri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda küçük nano parçacık boyutlarında sınırlama etkisinin yüksek olduğu görölmüştür.

Ong vd. (2004), optik sınırlayıcı malzeme olarak yine gümüş nano parçacıkları seçmişlerdir. Lazer aşındırma tekniğiyle gümüş nano parçacık üretmişler ve optik sınırlama özelliklerine hem solüsyon hem de film üzerinde bakmışlardır. Deneylede 532 nm Nd: YAG lazeri kullanılmıştır. Seçilen lazerin darbe genişliği 7 ns, tekrarlama frekansı 7 Hz' dir. Ortalama güç değeri 15.6 mJ olup, aşındırma tekniği sırasında kullanılan çap değeri 1.5 mm'dir. Gümüş plaka üzerine 25 mm odak uzunluklu bir mercek ile ışın demeti odaklanmıştır. Solüsyon olarak 2.5 mM sodyum bis (2-etil heksil) sülfosüksinat kullanılmıştır. Film için saf su yerine 10 mL THF kullanılmıştır. Solüsyon ve film sonuçları karşılaştırıldığında, solüsyondaki nano parçacık sayısı daha fazla olduğundan optik sınırlama performansının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir .

Hajiesmaeilbaigi vd. (2005), lazer aşındırma ve fragmentasyon tekniklerini kullanarak gümüş nano parçacık üretimiyle ilgili çalışma yapmışlardır. Darbeli Nd:YAG lazer sistemi kullanılmış olup, lazerin tekrarlama frekansı 5 Hz ve darbe genişliği 20 ns'dir. Dalga boyu olarak 1064 nm ve 532 nm lazer kaynakları kullanılmıştır. Solüsyon olarak herhangi bir kimyasal kullanılmamış, saf su ile deneyler yapılmıştır. Sonuçlara UV-VIS spektrometresi ve TEM ölçüm cihazıyla bakılmıştır. Üretilen nano parçacıkların ortalama boyutu 8.5 nm civarındadır. Deneylede akı ve süre etkisi çalışılmıştır. Hem 532 nm hem de 1064 nm dalga boylu lazer ışık kaynağında üretilen nano parçacıklara bakıldığında parçacık boyutuna bağlı olarak dalga boyunda kayma gözlemlenmiştir .

Boutinguiza vd. (2015), CW ve darbeli lazer kullanılmasının gümüş nano parçacık üretimine etkilerini araştırmışlardır. Nano parçacıkların özellikleri XRD, TEM ve

HRTEM elektron mikroskobu ve UV/VIS spektrometresiyle incelenmiştir. Sonucunda CW lazer kaynağı kullanıldığı durumda üretilen nano parçacık boyutunun daha büyük olduğu bulunmuştur.

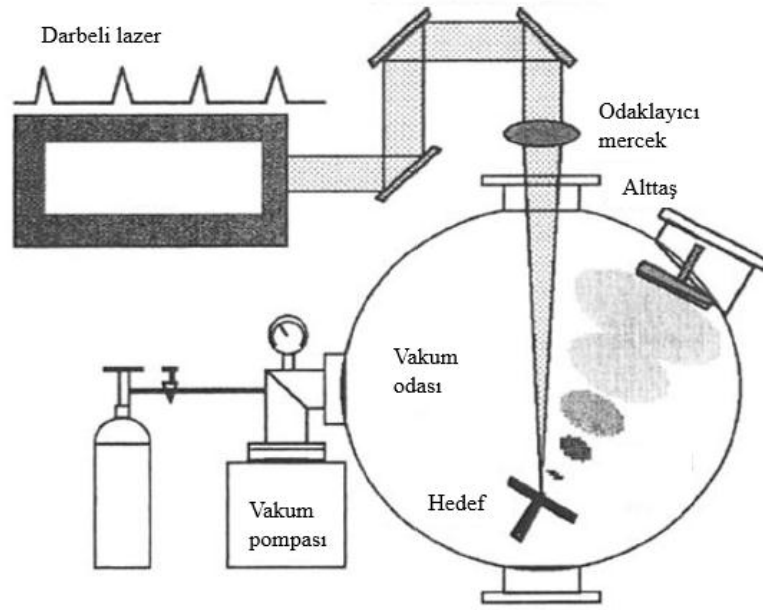
Gümüş nano parçacıklar ile yapılan çalışmalar incelendiğinde üretim için çoğunlukla lazer aşındırma metodunun tercih edildiği gözlemlenmiştir. Hem bu nedenle, hem de laboratuvar imkanlarımız bu üretim yöntemine elverişli olduğu için bu tez çalışmasında gümüş nano parçacık üretimi için lazer aşındırma tekniği seçilmiştir.

3.2 Lazer Aşındırma Tekniği ile Gümüş Nano parçacık Üretimi

Nano parçacıkların üretilmesinde farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar gaz faz yoğunlaşma metodu, lazer aşındırma metodu, kimyasal buhar yoğunlaştırma metodu ve mekanik alaşımlama metodudur.

Sıvı içerisine yerleştirilen metal plaka üzerine darbeli ya da sürekli lazer kaynağı kullanılarak yapılan lazer aşındırma tekniği, nano parçacık üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknik kolay ve hızlı üretim olanağı sağlayabilmektedir. Bu sayede baz metal, yarı iletken, manyetik nano parçacıklar ile alaşım halinde veya çekirdek-kabuk şeklinde olan nano yapılar üretilmektedir.

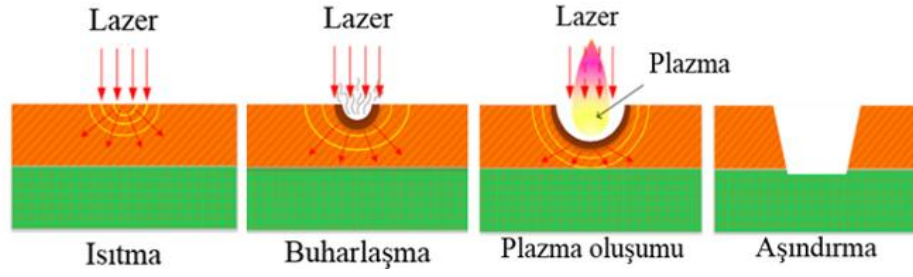
Lazer aşındırma tekniği ile ilgili ilk denemeler 1963 yılının başlarında başlamış olsa da, 1990'ların ortalarına doğru nano malzemeleri sentezlemek için lazer aşındırma yöntemi asıl olarak kullanılmaya başlanmıştır (<http://www.understandingnano.com> 2007). Lazer aşındırma terimi yoğun lazer darbesi ile yüzeyde oluşturulan dengesiz buhar/plazma koşullarını vurgulamak için kullanılır. Lazer aşındırmanın ilk denemelerine ait şematik gösterim Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4 Lazer aşındırma denemelerine ait şematik gösterim (<http://www.understandingnano.com> 2007)

Deneyde darbeli lazer (CO₂ lazer, Nd-YAG lazer, ArF ya da XeCl lazer) ve vakum odası olmak üzere 2 temel kısım bulunmaktadır. Lazer ışınının yüksek gücü, hedefin yüzeyinde büyük ışık emilimine neden olur ve malzemenin sıcaklığı artar. Hedefin yüzeyindeki malzeme buharlaşır ve buharlaşan malzemeler kimyasal reaksiyon olmaksızın kümelenir ve parçacık halinde yoğunlaşır. Bazı durumlarda buharlaşan malzeme yeni malzemeler oluşturabilmek üzere sisteme verilen reaktanlarla reaksiyona girer. Yoğunlaştırılmış parçacık ya bir alt kademe üzerine biriktirilir ya da bir cam elyaf ağından oluşan bir filtre sistemi ile toplanır. Ardından toplanan nano partikül, damla kaplama (drop-coating) ya da baskı (screen-printing) yöntemi ile kaplanabilir (<http://www.understandingnano.com> 2007).

Lazer aşındırma tekniği, lazer kaynağının numune üzerine odaklanması neticesinde yüzeyle etkileşmeye giren fotonların yüzeyden nano parçacık sökme işlemidir. Lazer aşındırma süreci Şekil 3.5’de gösterilmiştir.

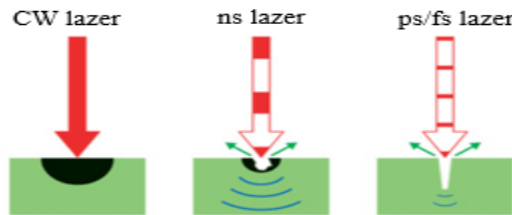


Şekil 3.5 Lazer aşındırma süreci

Lazer aşındırma süreci tek veya çok fotonla uyarılma işlemiyle başlamaktadır. Bu enerji ani bir şekilde ısıya dönüşmektedir. Isıdaki artış malzemenin sahip olduğu optik özellikleri ve soğurulan lazer gücünü değiştirmektedir. Malzemede ısı artışı erimeye ya da aşındırmaya sebep olmaktadır. Malzeme yüzeyine gelen foton enerjisi yeterince büyükse, bu durum bağ kırılmasına neden olabilir, bunun sonucunda da atom, molekül ya da parçalar yüzeyden sökülebilir. Düşük akı değerlerinde malzeme lazer enerjisi ile ısıtılır, buharlaştırılır ya da süblimleştirilir. Yüksek akı değerlerinde ise plazma oluşumu sağlanır.

Lazer-malzeme etkileşimi temelde iki yöntemle açıklanabilir. Bunlar, sürekli ışına ile malzeme işleme ve kısa darbeli lazerlerle malzeme işlemedir. Sürekli ışına ile malzeme işleme sırasında amaç malzemenin ısıtılması ya da eritilmesidir. Diğer yöntemde ise anlık olarak oluşturulan çok yüksek güçler sayesinde malzemenin eritilerek ya da parçalanarak değil plazma ortamının oluşturularak moleküler bağların kopması temeline dayanır. Oluşturulan plazma yapıları hedef materyale, ortamın özelliklerine ve lazer koşullarına bağlıdır.

Farklı lazer çeşitleri için lazer-malzeme etkileşimi şekil 3.6'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Lazer-malzeme etkileşimi

Soldan sağa doğru sürekli dalga (CW), nano saniye (ns) ve piko/femto saniye lazerlerini göstermektedir. Şekilde gözülen siyah bölge ısıdan etkilenmiş alanı göstermektedir. Mavi çizgiler ise lazer darbesi ile yaratılan şok dalgalarını göstermektedir. CW lazer kaynaklarında ısıdan etkilenmiş alan fazlayken, ns lazerlerinde bu bölge daha azalmaktadır. Fs ve ps lazerlerinde ise malzeme yüzeyden buharlaşma yoluyla uzaklaştırılmaktadır.

Yuan vd. (2005), gümüş nano parçacıkların üretimi için lazer aşındırma tekniğini kullanmışlardır. Deneyde solüsyon olarak saf su kullanılmıştır. Gümüş nano parçacıkların su kullanılarak lazer aşındırma tekniğiyle üretilmesi sırasında nano parçacıkların topaklandığı görülmüştür. Kristallerin ve topaklanan gümüş nano parçacıkların kararlılığının Ag₂O ve Ag'ye bağlı olarak farklılık gösterdiği belirtilmiştir.

Lazer aşındırma tekniği ile nano parçacık üretiminin en önemli parametrelerinden birisi lazerin örnek üzerindeki akısının belirlenmesidir. Bunun için de odaklanan Gauss demetinin odak çapının belirlenmesi gerekmektedir. Gauss demetinin özellikleri ve demet çapının ölçülme yöntemi aşağıda özetlenmiştir.

3.2.1 Gauss profiline sahip ışın demeti

Z doğrultusunda ilerleyen Gauss dalga aşağıdaki denklem kullanılarak tanımlanır.

$$E = U_0 e^{i(kz - \omega t)} \frac{e^{ikr^2/2q}}{q}, \quad q = z - z_{waist} - iz_R$$

Burada verilen E , dalganın elektrik alan genliği, q karmaşık yarıçap, z_{waist} ışın demetinin en küçük çapa sahip olduğu mesafe ve Z_R Rayleigh aralığı olarak verilir.

Enerji dağılımındaki z mesafesinde ve z_R Rayleigh aralığındaki spot büyüklüğü:

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{z^2}{z_R^2}}, \quad z_R = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}$$

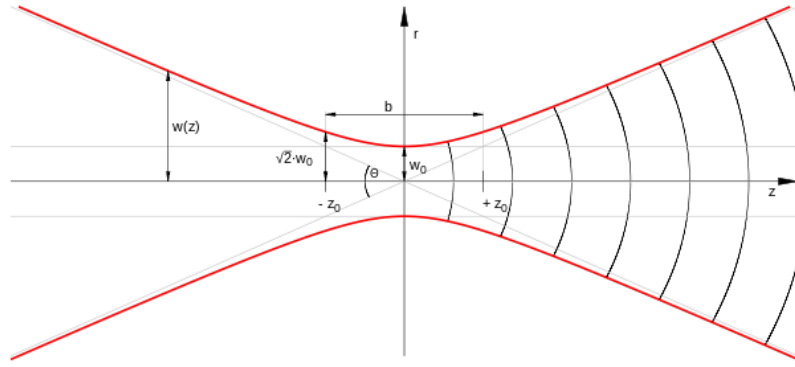
ifadesiyle verilir. Dalga cephesinin eğrilik yarıçapı $R(z)$;

$$R(z) = z + \frac{z_R^2}{z}$$

ifadesiyle verilir. Faz faktörü;

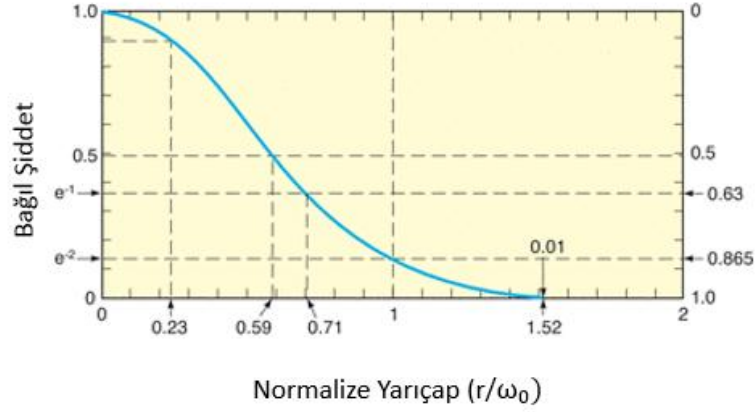
$$\alpha(z) = \tan^{-1}\left(\frac{z}{z_R}\right)$$

ifadesiyle verilir. Bu durumda $z=0$ noktasında Gauss dalga en dar spot çapına sahip olmaktadır. Bu da şekilde gösterilen ω_0 'a karşılık gelir. ω_0 noktasından uzaklaştıkça ışın hiperbolik şekilde dağılır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Işının ω_0 noktasından sonraki hiperbolik dağılımı (<https://commons.wikimedia.org> 2009a)

Gauss profiline sahip dalganın temel moduna göre lazer ışını yarıçapı $1/e$ güç noktasında göre hesaplanabilmektedir. Burada $e=2.71828$ değerine eşittir. Bu durumda $1/e$ ışın çapı değeri, lazer ışınının toplamdaki enerjisinin % 63'ünü içermektedir. $1/e^2$ yarıçapındaki enerji dağılımı aşağıdaki denklemlerle verilir. Gauss profiline sahip dalga için $1/e^2$ çapı ışının toplam enerjisinin % 86.5'ini içermektedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Gauss profiline sahip dalğanın normalize yarıçap-bağıl şiddet grafiği (https://www.rp-photonics.com 2009b)

Sapma açısı:

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{\omega(z)}{z} = \frac{\lambda}{\pi\omega_0}$$

ifadesiyle tanımlanır. ω_0 'ın bulunduğu noktada dalga cephesi, sonsuz bir eğrilik yarıçapına sahiptir. ω_0 'dan uzaklaştıkça dalga cephesi kavisli olmaya başlar. Rayleigh aralığı ω_0 değerinin sabit kaldığı mesafe olarak tanımlanır (http://massey.dur.ac.uk 2012).

Akı değeri:

$$\begin{aligned} F \text{ (J/cm}^2\text{)} &= Q \text{ (lazer darbe enerjisi (J)) / etkili odak noktası alanı (cm}^2\text{)} \\ &= Q / \pi\omega(z)^2 \end{aligned}$$

ifadesiyle tanımlanır.

3.2.2 Demet genişliği ve knife-edge (bıçak kenarı) ölçümü

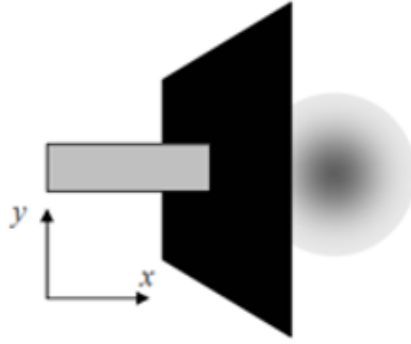
Gauss profiline sahip bir dalğanın z doğrultusunda ilerlediği durumda dağılım profili:

$$I(x, y) = I_0 e^{-2x^2/\omega_x^2} e^{-2y^2/\omega_y^2}$$

ifadesiyle verilir. Buradaki ω_x ve ω_y ışın demetinin x ve y doğrultusundaki $1/e^2$ yarıçap değerleridir. I_0 ise tepe yoğunluğunu verir. Işın demetinin toplam gücü:

$$P_{TOT} = I_0 \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2x^2/\omega_x^2} dx \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-2y^2/\omega_y^2} dy = \frac{\pi}{2} I_0 \omega_x \omega_y$$

ifadesiyle verilir. Demet yarıçapı Knife-Edge (bıçak kenarı) tekniği ile ölçülür. Bıçak kenarı ölçüm tekniğinin şematik gösterimi şekil 3.9'de gösterilmektedir.



Şekil 3.9 Knife-edge ölçüm tekniği (<http://massey.dur.ac.uk> 2012)

Bu teknikte kullanılan bıçağın x-ekseninde (Şekil 3.9) hareket ettirildiği düşünülürse, geçen güç:

$$\begin{aligned} P(X) &= \\ &= P_{TOT} - I_0 \int_{-\infty}^{+x} e^{-\frac{2x^2}{\omega_x^2}} dx \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{2y^2}{\omega_y^2}} dy \\ &= P_{TOT} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} I_0 \omega_y \int_{-\infty}^{+x} e^{-\frac{2x^2}{\omega_x^2}} dx \\ &= P_{TOT} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} I_0 \omega_y \left[\int_{-\infty}^0 e^{-2x^2/\omega_x^2} dx + \int_0^x e^{-2x^2/\omega_x^2} dx \right] \\ &= P_{TOT} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} I_0 \omega_y \left[\sqrt{\frac{\pi}{8}} \omega_x + \int_0^x e^{-2x^2/\omega_x^2} dx \right] \\ &= \frac{P_{TOT}}{2} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} I_0 \omega_y \int_0^x e^{-2x^2/\omega_x^2} dx \end{aligned}$$

ifadesiyle verilir. Denklemde $u^2 = \frac{2x^2}{\omega_x^2}$ eşitliğini kullanırsak, $dx = \omega_x du / \sqrt{2}$ olur. İntegral sınırlarını değiştirilirse,

$$\begin{aligned} P(X) &= \frac{P_{TOT}}{2} - \sqrt{\frac{\pi}{2}} I_0 \omega_y \int_0^{\frac{\sqrt{2}X}{\omega_x}} e^{-u^2} \frac{\omega_x}{\sqrt{2}} dx \\ &= \frac{P_{TOT}}{2} - \frac{\pi}{4} I_0 \omega_y \omega_x \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{\sqrt{2}X}{\omega_x}} e^{-u^2} du \end{aligned}$$

olur. Hata fonksiyonunun standart tanımı kullanılırsa toplam güç:

$$P(X) = \frac{P_{TOT}}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2}X}{\omega_x} \right) \right]$$

ifadesiyle verilir. Data fit edilirse denklem:

$$P_{ölçülen} = \frac{P1}{2} \left[1 \pm \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2}(X - P2)}{P3} \right) \right]$$

halini alır. Burada P1 gücü, P3 Gauss demetin $1/e^2$ yarıçapını gösterir. Aradaki \pm işareti bıçağın \pm yönündeki hareketine göre değişmektedir.

Öncelikle bıçak konulmadığı zamanki toplam güç (% 100) dedektör kullanılarak ölçülür. Daha sonra bıçak çıkış gücünü % 10 ve % 90 kesecek şekilde ayarlanır ve bu pozisyonlar X_{10} ve X_{90} olarak kaydedilir. Aradaki mesafe $X_{10}-X_{90}$ olarak verilir. Gücün % 10 olduğu durumda denklem:

$$0.1P_{TOT} = \frac{P_{TOT}}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2}X_{10}}{\omega_x} \right) \right]$$

ifadesiyle gösterilir. Denklem düzenlenirse:

$$\operatorname{erf} \left(\frac{\sqrt{2}X_{10}}{\omega_x} \right) = 0.8$$

halini alır. Gauss olasılığı kullanılırsa denklem:

$$P(t_{10}) = 0.9$$

$$\frac{\sqrt{2}X_{10}}{\omega_x} = \frac{t_{10}}{\sqrt{2}}$$

İfadesiyle gösterilir. Standart olasılık tablosu kullanılırsa denklem:

$$t_{10} = 1.28$$

$$x_{10} = 0.64\omega_x$$

halini alır. Gauss fonksiyonunun simetrik dağılımından dolayı bulunan denklem 2 ile çarpılarak ışın demeti çapı:

$$X_{10-90} = 2 \times 0.64\omega_x = 1.28\omega_x$$

olarak bulunur. Benzer bir hesaplama X_{80} ve X_{20} için de yapılabilmektedir ancak % 90-% 10 metodu hata fonksiyonunun azami değişme bölgesinin sınırlarında kaldığı için bu noktalar kullanılmaktadır (<http://massey.dur.ac.uk> 2012).

4. DENEYLER ve KULLANILAN EKİPMANLAR

4.1 Deneylerde Kullanılan Ekipmanlar

Tez çalışması için kullanılan ekipmanlar, UV-VIS spektrometresi, lazer kaynağı, motorlu kızak, algılayıcı, boxcar, osiloskop ve z-tarama düzeneğidir.

4.1.1 UV-VIS spektrometresi

Madde ile ışın arasındaki etkileşmeyi incelemeye soğurma spektrometresi kullanılmaktadır. Spektrometre, bir örnekteki atom, molekül ya da iyonların enerji geçişleri sırasında soğurulan ya da yayılan elektromanyetik ışımının ölçülmesi ve yorumlanmasıdır.

Maddenin ışığı soğurmasını incelemek için kullanılan düzeneğe “soğurma spektrometresi” denir. Spektrometrenin temel bileşenleri ışık kaynağı, dalga boyu seçici, örnek kabı ve algılayıcıdır. Bu tür spektrometrelerde UV ve görünür ışık kaynakları kullanılır. 100-400 nm arasında UV, 400-800 nm arasında görünür ışık kaynağı kullanılır. Işık kayağından çıkan ışık, yarıktan geçer ve demet bölücüye gelir. Burada ışık iki parçaya bölünür. Referans ve örnek kuvvetlerine ayrı ayrı gönderilir. Kuvvetlerden çıkıp algılayıcıya gelen ışığın şiddeti ile elde edilen veriler dalga boyuna göre soğurma spektrum grafiğini verir.



Şekil 4.1 UV-VIS soğurma spektrometresi

4.1.2 Lazer kaynağı

Malzemelerin doğrusal olmayan optik özelliklerini incelemek için nano saniye, piko saniye, femto saniye gibi bir lazer kaynağına ihtiyaç duyulmaktadır. Lazer aşındırma tekniğiyle gümüş nano parçacık elde etme ve sonuçların z-tarama test deneyinde yorumlanabilmesi için tezin amacına uygun olarak nano saniye lazer kaynağı tercih edilmiştir. Kullanılan lazerin dalga boyu 532 nm, çıkış gücü 2 W, tekrarlama frekansı 10 Hz ve atım süresi 4 ns'dir.



Şekil 4.2 Lazer kaynağı

4.1.3 Motorlu kızak

Z-tarama deneyi, yatay bir düzlemde örneğin hareket ettirilerek konuma bağlı şiddet değişimi karşısında malzemenin gösterdiği doğrusal olmayan tepkiyi incelemeye olanak sağlayan bir tekniktir. Bu hareketin yatay konumda kullanılabilmesine sağlayan mekanizma motorlu kızaktır. Kullanılan cihazın adım aralığı 1 μm 'dir. İncelenecek olan örnek düzeneğe yerleştirilir ve yatay (z) eksen boyunca hareket ettirilmesi kızak sayesinde sağlanmış olur. Mikrometre hassasiyetinde olan bu düzlemin hareketi bilgisayar kontrollü olarak gerçekteşebilmektedir. Bir ara yüz kartı sayesinde programda belirtilen süre ve uzunlukta hareket ettirilip sinyalin algılanması ve bu hareketi belirlenen sayıda tekrar etmesi sağlanmaktadır.



Şekil 4.3 Motorlu kızak

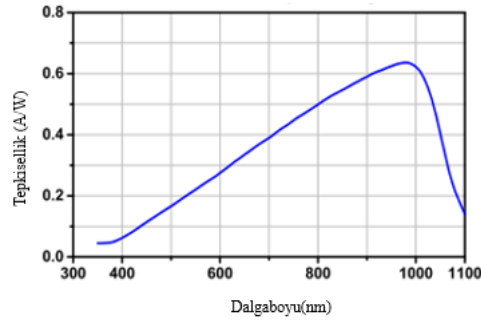
4.1.4 Algılayıcılar

Yüksek şiddetteki lazer ışınına maruz bırakılan saydam malzemeden geçen bir lazer demetinin içerdiği bilgileri algılamak için silikon algılayıcılar kullanılmaktadır. Silikon algılayıcılar yüksek tepki süresine (14 ns) sahip olup üzerine düşen fotonları algılayarak elektriksel bilgiyi analog olarak Boxcar ismi verilen arayüze gönderir. Z-tarama deney düzeneğinde kullanılan algılayıcının doyuma ulaşmaması için, düzenekte kullanılan güç değerine bağlı olarak soğurucu nd (neutral density) filtrelerin kullanılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 4.4 Silikon dedektör (https://www.thorlabs.com 2017a)

Kullanılan algılayıcının dalga boyuna bağlı tepkisellik grafiği şekil 4.5' verilmektedir. DET36A dedektörü, 1000 nm civarında maksimum tepkiselliğe sahiptir.



Şekil 4.5 DET36A dedektörünün dalga boyuna bağlı tepkisellik grafiği
(<https://www.thorlabs.com> 2017b)

4.1.5 Boxcar

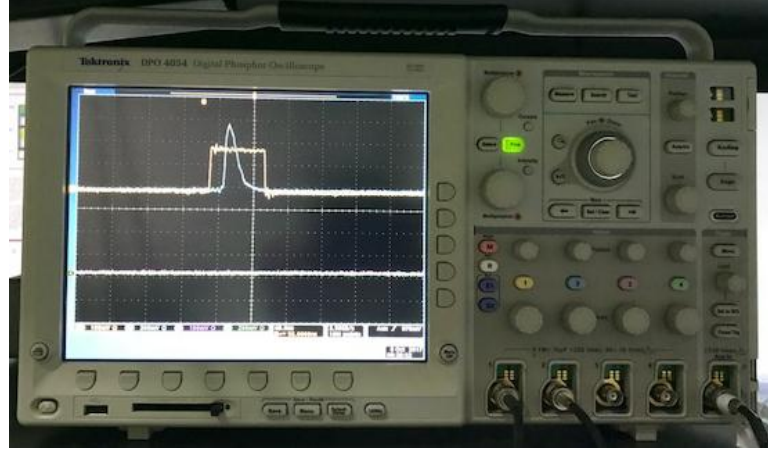
Algılayıcıdan alınan analog sinyaller Boxcar isimli sisteme gönderilir. Boxcar'ın Z-tarama deneyindeki temel görevi algılayıcıdan gelen analog sinyali lazerden tetiklenerek belirlenen zaman aralığında alıp, gürültüyü azaltmak için ortalamasını aldıktan sonra dijital sinyale çevirerek bir ara yüzle bilgisayar ortamına aktarmaktır.



Şekil 4.6 Boxcar

4.1.6 Osiloskop

500 MHz'lik osiloskop, algılayıcıya gelen sinyali gözlemlemeye yarar. Aynı zamanda algılayıcıya gelen sinyallerin genliğinin kontrolü ve algılayıcının doyuma ulaşmış olup olmadığını da osiloskop yardımıyla yapılmaktadır.



Şekil 4.7 Osiloskop ile gözlenen lazer ışını ve oluşturulan kare kapı sinyali

4.1.7 Optik bileşenler

Z-tarama deneyinde kullanılan lazer demeti doğrudan malzeme üzerine gönderilmez, bunun nedeni lazer kaynağından çıkan demetin gücünün yüksek olmasıdır. Lazer demetinin doğrudan gönderilmesi durumunda malzeme zarar görüp, kullanılamaz hale gelebilir. Malzemeyi incelemek için yüksek güçteki lazer ışını yeterli olan bir güce indirmek amaçlanır. Bunun için de ışın demeti gücünü azaltacak prizmalar ve soğurucu ND filtreler kullanılır. Hem z-tarama deney düzeneğinde hem de lazer aşındırma tekniğinde kullanılan prizmalar ve ND filtreler sayesinde hem güç azaltılabilir hem de uygun geometride optik yol ortamı oluşturulup, ayarlanabilir mekanizmalar sayesinde hizalama yapılabilir.

Kullanılan ND filtrelerin geçirgenlik oranları kullanılmak istenilen güce bağlı olarak arttırılıp, azaltılabilmektedir.



Şekil 4.8 Soğurucu ND filtreler

Optik yolun yönlendirilebilmesi için ise deney düzeneğinde aynalara ihtiyaç duyulmaktadır. Sistemde kullanılan lazerin dalga boyu 532 nm olduğundan aynaların yansıtıcılıkları bu dalga boyunda en fazla olmalıdır. Aksi halde lazer kaynağından istenilen verim elde edilemez, aynalar yansıtmadığı oranda gücü soğurur bu da aynaların zarar görmesine neden olabilir. Bu nedenle seçilen aynaların yansıtıcılık değerleri $\geq \% 99.5$ mertebesindedir. Sistemde kullanılan aynaların özellikleri çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 532 nm Nd:YAG lazer aynasının özellikleri
(<https://www.edmundoptics.com/optics/optical-mirrors/laser-line-mirror/#specs>)

Malzemesi	Fused Silika
Geliş Açısı (derece)	45
Çap (mm)	25
Kalınlık (mm)	6
Tasarım dalga boyu (nm)	532
Yansıtıcılık	$R_{abs} \geq \% 99.8$ (510-560 nm)
Hasar eşik değeri (darbeli lazer kaynağı için)	$20 \text{ J/cm}^2 @ 20 \text{ ns}$

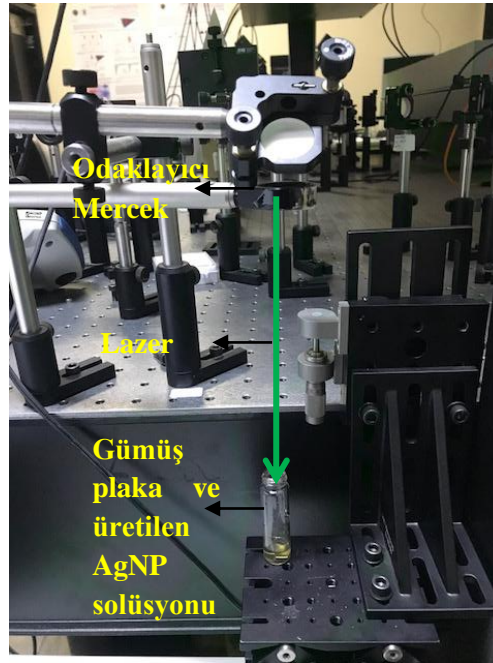
Z-tarama test düzeneği kullanılırken örneğe gelen lazer ışın demetinin örnek üzerine odaklanması gerekmektedir. Bunun için ince kenarlı mercekler kullanılır. Z-tarama deney düzeneğinde kullanılan ince kenarlı merceğin odak uzunluğu 200 mm'dir.

Aynaların tersine kullanılan ince kenarlı merceklerin geçirgenliğinin maksimum düzeyde olması istendiğinden merceğin her iki yüzeyinde de kullanılan dalga boyuna uygun geri yansıtmayı önleyici kaplamaların olması tercih edilmiştir. Bu sayede amaç geçirgenliği arttırabilmektir.

4.2 Deneyler

4.2.1 Lazer aşındırma yöntemi ile nano parçacık üretimi

Bu tez kapsamında kullanılan ve laboratuvarımızda kurduğumuz lazer aşındırma düzeneği şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.9 Lazer aşındırma tekniği test düzeneği

Amaç odaklayıcı merceğe gelen lazer ışını, metal plaka üzerinde odaklayarak nano parçacık üretilebilmesini sağlamaktır. Sıvı içerisine yerleştirilen gümüş plaka konumunun tayin edilebilmesi için Bölüm 3.2.2’de anlatılan bıçak kenarı yöntemi kullanılmıştır.

Lazerin malzeme üzerinde etki ettiği derinlik ve yüzeyden koparılan malzeme miktarı, lazer darbesine, akı, güç, malzemenin optik özelliklerine, dalga boyuna, lazerin odaktaki çapına , süreye ve darbe genişliğine bağlıdır. Tez kapsamında akı ve süre etkisine bağlı olarak optik sınırlama değişimi üzerine çalışılmıştır.

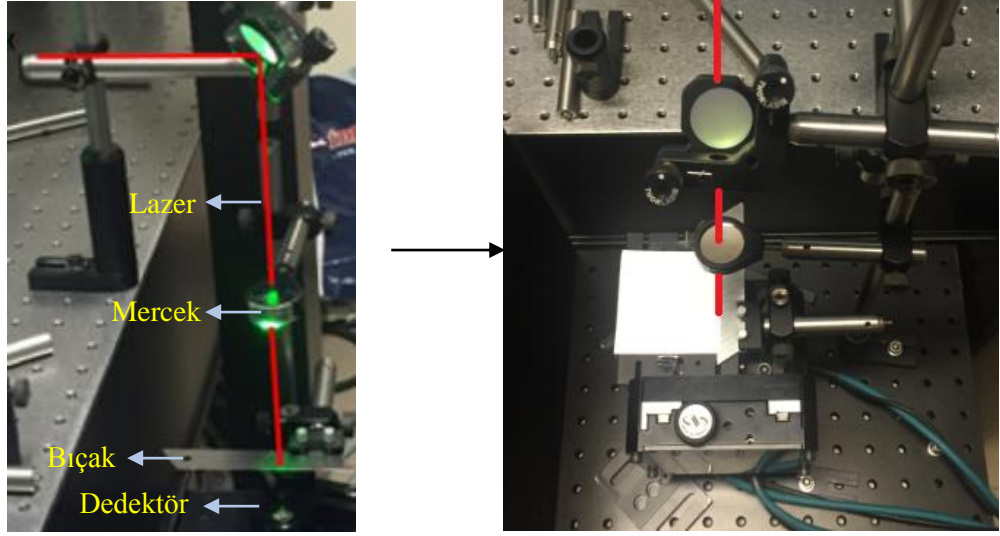
Lazer aşındırma yöntemi metal yüzeyinden malzemenin kontrollü bir şekilde çıkartılması temeline dayanır. Bu nedenle uygulanması basit ve maliyeti uygun bir yöntemdir. Uygulama alanına bağlı olarak darbeli ya da sürekli lazer kaynağı kullanılabilir. Laboratuvar ortamındaki olanakların kullanılabilmesi için gümüş nano parçacık üretilmesi sırasında darbeli lazer kaynağı kullanılmıştır. Bu sayede malzeme üzerinde küçük ve derin delikler açılabilmiş ve nano parçacık üretimi gerçekleştirilebilmiştir.

Lazer aşındırma tekniğiyle gümüş nano parçacık üretimi sırasında üç farklı akı değeri uygulanmıştır. Bunlar 477 J/cm^2 , 637 J/cm^2 ve 796 J/cm^2 ’dir. Her bir akı değeri için de 1 ve 1.5 saat olmak üzere farklı sürelerde üretim yapılmıştır. Amaç değişen akı ve süre değerine bağlı olarak malzemedeki oluşan sınırlama etkisini tayin edebilmektir.

4.2.2 Demet yarıçapının ve demet akısının ölçülmesi

Demet akısının ölçülebilmesi için hem lazer aşındırma tekniğinde gümüş plaka üzerine düşen hem de z-tarama deney düzeneğinde örnek üzerine düşen lazer demetinin odak çapının bilinmesi gerekmektedir.

Lazer aşındırma tekniğinde kullanılan bıçak kenarı test düzeneği Şekil 4.10’da gösterilmektedir.



Şekil 4.10 Bıçak kenarı test düzeneği

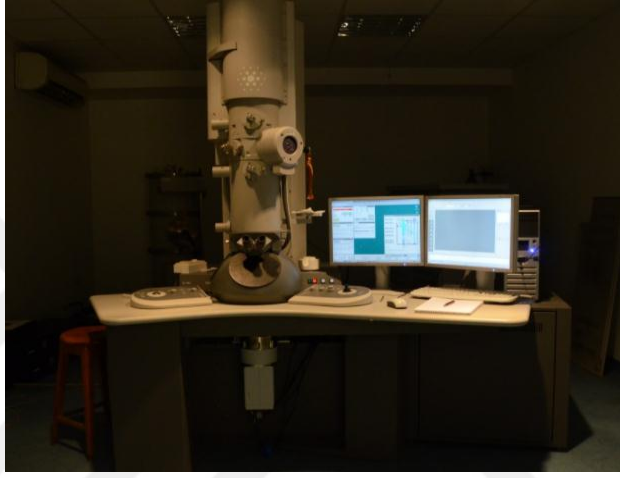
Lazer aşındırma tekniğinde önemli olan sıvı içerisindeki metal plakanın konulacağı konumun belirlenebilmesidir aksi halde nano parçacık üretimi gerçekleştirilemez. Bu teknikte amaç akıyı arttırabilmektir bu nedenle sıvı içerisine yerleştirilen metal plaka lazer demetinin odak noktasına konulmalıdır.

Bıçak kenarı tekniğinde lazer aşındırma yöntemine ek olarak bıçak ve dedektör kullanılır. Gelen lazer ışığının enerjisi Nd filtreler sayesinde azaltılmalıdır, aksi halde yüksek akıdan dolayı bıçağın kenarı yanmakta ve ölçülen çap değeri olması gerekenden daha büyük çıkmaktadır. Bıçak ışın demetinin % 10'unu ve % 90'ını kesecek şekilde ayarlandıktan sonra Bölüm 3.2.1'de verilen formüller kullanılarak odaktaki çap değeri hesaplanır.

4.2.3 Üretilen nano parçacıkların boyut analizleri

Metal nano parçacıkların boyutu ve şekli geçirimli elektron mikroskobu (TEM), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ya da atomik kuvvet mikroskobu (AFM) gibi cihazlarla ölçülebilmektedir.

TEM, optik mikroskop ile aynı temel ilkelere bağlı olarak çalışır ancak ışık yerine elektronlar kullanılır. Malzemenin mikro yapısal ve kristal yapılarının incelenmesinde kullanılırlar. Hazırlanan numune üzerine gönderilen elektron demetiyle malzemenin özellikleri tayin edilebilir, cisim içinden geçirilen yüksek enerjili elektronların görüntülenmesi prensibine dayalı olarak çalışır. Sistem içerisinde bulunan kameradan alınan görüntüler, iki boyutlu ve siyah-beyazdır. Birkaç angstrom (10^{-10} m) ya da nm (10^{-9} m) ölçeğindeki cisimleri TEM yardımıyla görüntüleyebilmek mümkündür.



şekil 4.11 TEM cihazı

SEM, temel olarak elektronların malzeme yüzeyinde gönderilmesi sonucu oluşan etkileşmelerden yararlanılması esasına dayanır. Elektronların enerjisi 200-300 eV'dan 100 keV değerine kadar değişebilmektedir. SEM cihazlarında görüntü oluşumu, elektron demetinin incelenen örneğin yüzeyi ile yaptığı fiziksel etkileşmeler (elastik, elastik olmayan çarpışmalar vb) sonucunda ortaya çıkan sinyallerin toplanarak incelenmesi prensibine göre çalışmaktadır. SEM cihazında bulunan algılayıcılardan gelen sinyaller bilgisayara verilerek görüntüler elde edilmektedir. Ayırım gücü, odak derinliği, görüntü ve analizi birleştirebilme özelliği dolayısıyla pek çok malzeme için kullanılması tercih edilmektedir. Büyütme gücü oldukça fazladır ve çoğunlukla kaplama yüzeylerinin karakterizasyonunda kullanılması tercih edilmektedir.



Şekil 4.12 SEM cihazı

AFM’de ise bireysel nano parçacıklar ve parçacık grupları görüntülenip, 3D olarak parçacıkların görüntülenmesine olanak sağlar. Bu yöntemler haricinde gümüş nano parçacıkların çözelti içerisindeki spektral yapıları analiz edilerek fiziksel özellikleri hakkında bilgi sahibi olunabilir.

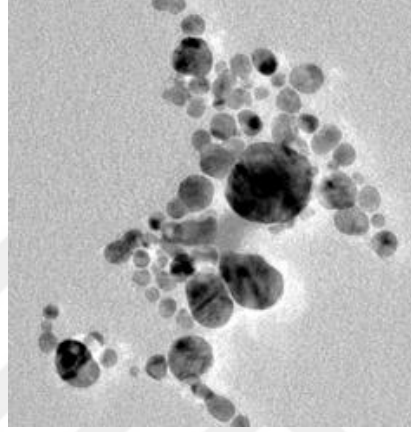
Gümüş nano parçacıkların boyut analizi aşamasında Ankara Üniversitesi Nükleer Bilimler Enstitüsü’nde bulunan TEM ölçüm cihazından faydalanılmıştır. Farklı güç/akı ve süre değerleri için alınan sonuçlar çizelge 4.2’de verilmektedir.

Çizelge 4.2 Farklı akı ve süreye bağlı olarak nano parçacık boyut analizi

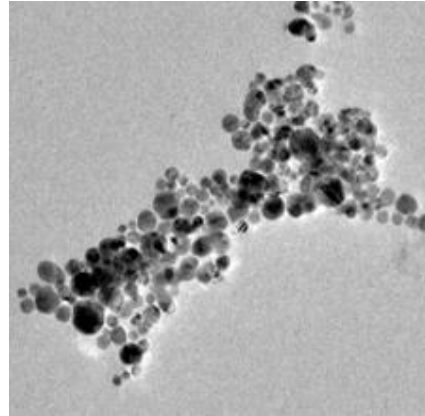
Süre	1 saat		
Akı değerleri (J/cm ²)*	477 J/cm ² (30 mW)	637 J/cm ² (40 mW)	796 J/cm ² (50 mW)
AgNP’lerin TEM ölçüm sonuçları (ortalama parçacık büyüklüğü)	40 nm	30 nm	25 nm
Süre	1.5 saat		
Akı değerleri (J/cm ²)*	477 J/cm ² (30 mW)	637 J/cm ² (40 mW)	796 J/cm ² (50 mW)
AgNP’lerin TEM ölçüm sonuçları (ortalama parçacık büyüklüğü)	22 nm	20 nm	15 nm

Çizelge 4.2’de ki akı değerleri hesaplanırken, demet çapı bıçak kenarı yöntemiyle ölçülen 40 µm değerine göre bulunmuştur. Lazerin tekrarlama frekansı 10 Hz olarak alınmıştır. Akı değeri arttıkça parçacık boyunun küçüldüğü görülmektedir.

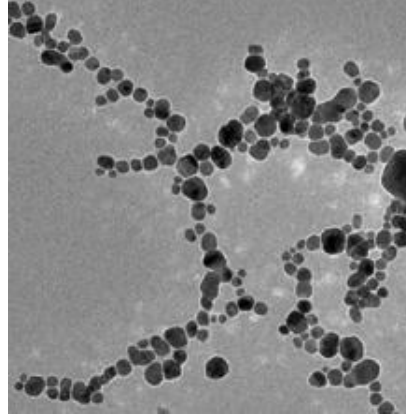
Bir saat 477 J/cm², 637 J/cm² ve 796 J/cm² akı değerleri için alınan TEM görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.13 Bir saat 477 J/cm² akı değeri için alınan TEM görüntüsü
(AgNP boyutu: 40 nm)



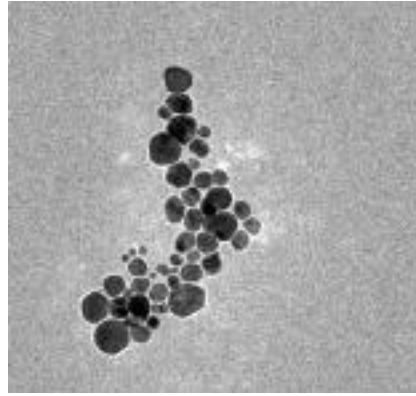
Şekil 4.14 Bir saat 637 J/cm² akı değeri için alınan TEM görüntüsü
(AgNP boyutu: 30 nm)



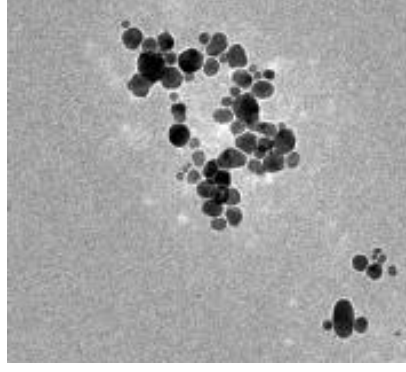
Şekil 4.15 Bir saat 796 J/cm^2 akı değeri için alınan TEM görüntüsü
(AgNP boyutu: 25 nm)

Şekil 4.13-4.15'e bakıldığında uygulanan akı arttıkça nano parçacık boyutunun küçüldüğü ve sayılarının arttığı görülmektedir.

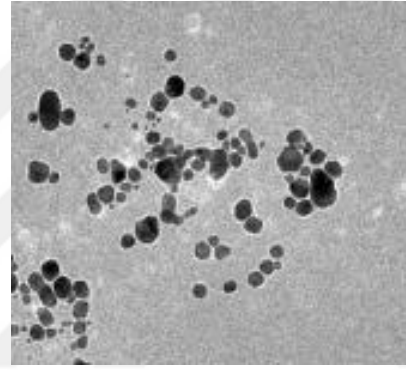
Bir buçuk saat 477 J/cm^2 , 637 J/cm^2 ve 796 J/cm^2 akı değerleri için alınan TEM görüntüleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.16 Bir buçuk saat 477 J/cm^2 için alınan TEM görüntüsü
(AgNP boyutu: 22 nm)



Şekil 4.17 Bir buçuk saat 637 J/cm^2 için alınan TEM görüntüsü
(AgNP boyutu: 20 nm)



Şekil 4.18 Bir buçuk saat 796 J/cm^2 akı değeri için alınan TEM görüntüsü
(AgNP boyutu: 15 nm)

Şekil 4.16- -4.18'de alınan TEM görüntülerine bakıldığında, sonuçların 1 saat için bulunanlarla uyumlu olduğu ancak 1.5 saatte üretilen nano parçacık boyutlarının daha küçük olduğu görülmüştür.

4.2.4 Z-tarama düzeneği

Z-Tarama tekniği doğrusal olmayan kırılma ve soğurma değişimlerini belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu teknik ile doğrusal olmayan kırılma ve soğurma parametrelerinin büyüklükleri ve işareti belirlenebilir.

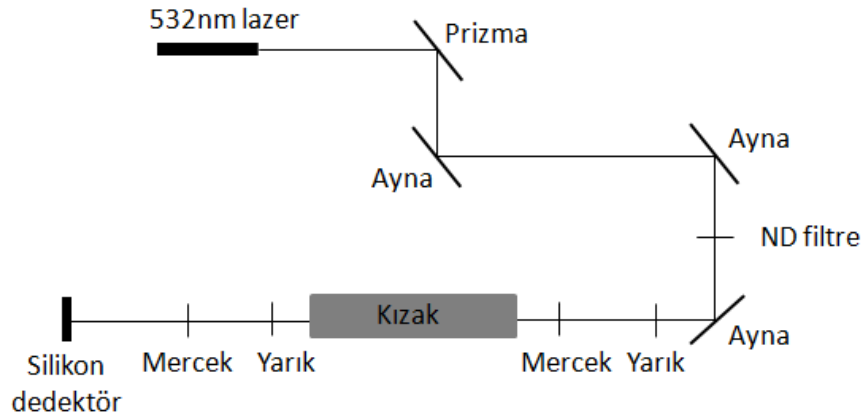
İlk olarak Bahae vd. (1989), z-tarama tekniği keşfetmişlerdir. Bu tekniğin kolay ve kullanışlı olmasının nedeni, tek ışın demeti kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

Z-Tarama tekniği açık ve kapalı Z-tarama tekniği olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Kapalı yarık Z-tarama tekniğinde malzemelerin doğrusal olmayan kırılma indisleri belirlenirken, açık yarık Z-tarama tekniğinde doğrusal olmayan soğurma ve doyurulabilir soğurma etkileri belirlenebilmektedir. Bu teknikte lazer ışını bir mercek ile odaklanır. Malzeme motorize bir hareket düzeneği ile odak etrafında hareket ettirilerek malzeme üzerine düşen ışının şiddetinin değişmesi sağlanır. Malzemedan geçen ışın, açık yada kapalı yarık olması durumunda sırası ile merceklerle dedektöre odaklanır veya bir yarıktan geçilerek dedektöre gönderilir (Yin vd. 2000).

Tez çalışmasında doğrusal olmayan soğurma, buna bağlı olarak saçılma ve doyurulabilir soğurma etkilerinin gözlemlenebilmesi için açık yarık z-tarama tekniğinin kullanılması tercih edilmiştir.

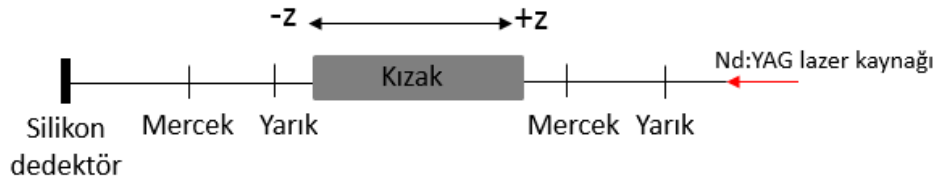
4.2.5 Açık yarık z-tarama düzeneği

Açık yarık Z-tarama düzeneğinin şematik gösterimi şekil 4.19'da gösterilmektedir.



Şekil 4.19 Açık yarık z-tarama düzeneği

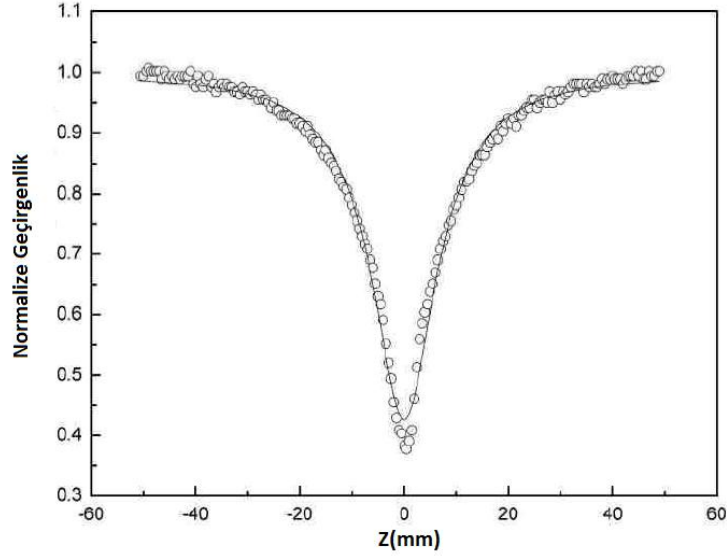
Deneyleerde, 532 nm dalgaboylu lazer kaynağı kullanılmış ve yüksek gücün malzemeye zarar vermemesi için prizmayla ışığın % 10'luk kısmının kullanımı tercih edilmiştir. Optik yolun ayarlanabilmesi için sisteme aynalar yerleştirilmiştir. Dedektörün önüne konulan ince kenarlı mercek sayesinde örnekten geçen tüm ışınlar dedektör üzerine odaklanabilmiştir. Son aynaya gelen ışın demeti Şekil 4.20'de gösterilen yolu takip etmektedir.



Şekil 4.20 Z-tarama deney düzeneğinin kurulumu ,

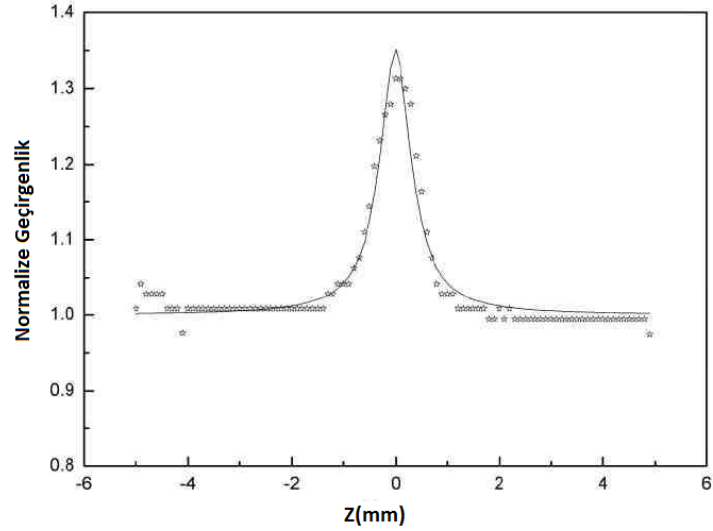
rnek +z'den -z'ye doğru hareket ettirilmeekteir. rnek odaktan uzakta +z konumundayken lazer demetinin Şiddeti düşük olacağı için sadece doğrusal soğurma gözlemlenecektir. rnek odak noktasına yaklaştığında ise doğrusal soğurmaya ek olarak doğrusal olmayan soğurma da meydana gelecektir. Hazırlanan örnekte etki görülmesi durumunda, örnek odağa yaklaştığında dedektörde gözlenen Şiddet azalacaktır ve tam odak noktasında bir dip gözlenecektir. Odak noktasını geçip -z yönüne doğru ilerledikçe örnek üzerine düşen Şiddet azalacağından dolayı doğrusal olmayan soğurma da azalacaktır ve dedektöre düşen ışının gücü tekrar artmaya başlayacaktır. Odaktan uzaklaşan örnekte sadece doğrusal soğurma olacağından dolayı dedektörün algıladığı g sabit kalacaktır. Tarama işlemi dedektörün algıladığı g sabit kaldığında sonlanmaktadır (Kürüm 2008).

Deneyleerde elde edilen mesafeye bağlı normalize geçirgenlik grafiğinin doğrusal olmayan soğurma etkisi Şekil 4.21' de gösterildiği Őekildedir.



Şekil 4.21 Doğrusal olmayan soğurma etkisi

Mesafeye bağlı normalize geçirgenlik grafiğinin doyurulabilir soğurma etkisi ise Şekil 4.22’de görüldüğü gibi bir grafik verir.



Şekil 4.22 Doyurulabilir soğurma etkisi

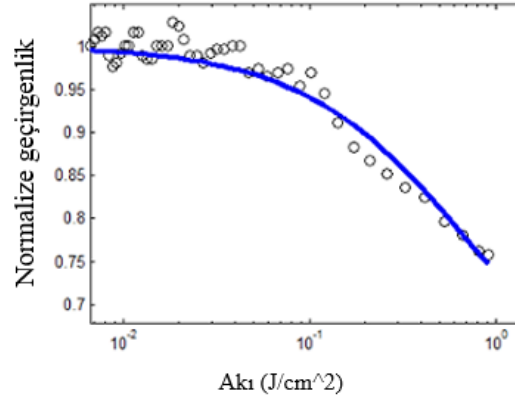
4.2.5.1 Açık yarık z-tarama deneylerinden optik sınırlamaya geçiş

Malzemenin optik sınırlama özelliği iki farklı şekilde belirlenebilir. İlk yöntemde optik sınırlama deneyi yapılarak, değişen ışık şiddetine bağlı olarak malzemeden çıkan ışık şiddeti güç metre ile ölçülerek bulunabilir, diğer yöntemde ise malzemenin optik

sınırlayıcı özelliklerini açık yarık z-tarama deney sonuçları kullanılarak bulunabilir. Bunun için açık yarık z-tarama grafiğinin odaktan önceki kısmı alınıp her z konumu ve z_0 ışınının kırınım uzunluğu için yarıçap değeri bulunur. z konumuna bağlı olarak yarıçap hesabı:

$$\omega_z = \omega_0 \left(1 + \frac{z^2}{z_0^2} \right)^{1/2}$$

ifadesiyle hesaplanabilir. Bulunan yarıçap değerleri kullanılarak her nokta için enerji yoğunluğuna geçilir. Örnekten çıkan ışının enerjisi, örneğe giren ışının enerjisine bölünerek geçirgenlik bulunur. Geçirgenlik 1'e normalize edilerek doğrusal olmayan etki hesaplanır. Bu değerler de grafiğin y eksenini oluşturur. Giriş enerjisine bağlı olarak normalize geçirgenlik grafiği şekil 4.23'de gösterilmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi giriş enerjisi arttıkça geçirgenlik azalmaktadır. Şiddete bağlı olarak malzemedeki soğurma miktarının artması optik sınırlama özelliğinin fazla olduğu anlamında gelmektedir.



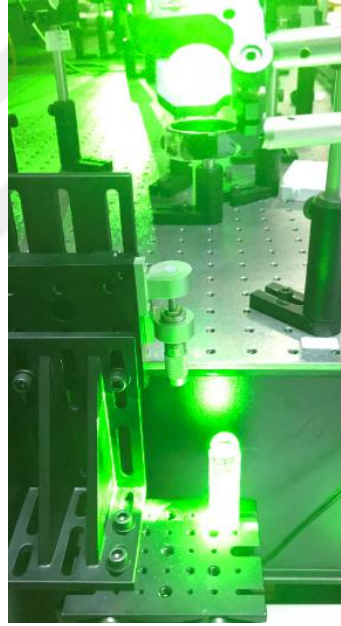
Şekil 4.23 Normalize geçirgenlik giriş enerji akısı grafiği

Normalize geçirgenliğin yarıya düştüğü giriş akısına optik sınırlama akısı eşik değeri (optical limiting fulence threshold, F_{th}) denir. İyi bir optik sınırlayıcı düşük F_{th} değerine sahip olmalıdır.

5. BULGULAR

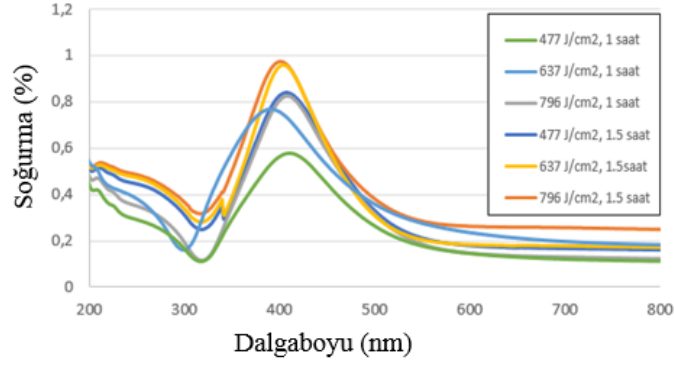
Bu tez çalışmasında AgNP'nin süre ve akı parametrelerine bağlı olarak doğrusal olmayan optik özellikleri araştırılmıştır. Deneyler Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Optik Malzemeler Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır.

AgNP üretimi için kolay ve ucuz bir yöntem olan lazer aşındırma tekniği seçilmiştir. Bu teknik için 2 mm kalınlığında, >% 99.999 saflığında Ag plaka kullanılmıştır. 7 mL'lik hücrenin içerisine 2 mL saf su konulup, gümüş plaka hücrenin içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 5.1). Deneylerde, 10 Hz tekrarlama frekanslı, 4 ns darbe süreli, 532 nm Nd:YAG lazeri kullanılmıştır.



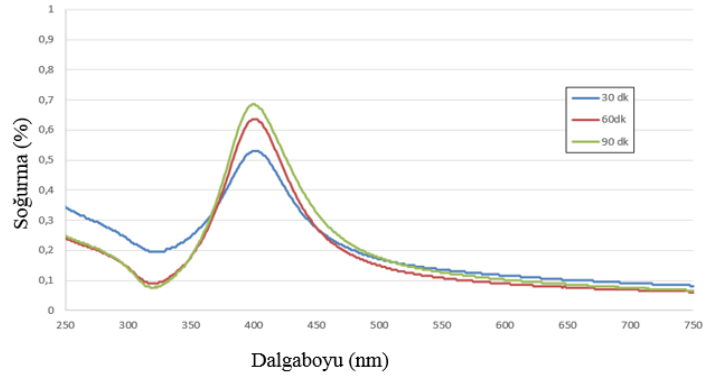
Şekil 5.1 Lazer aşındırma tekniğiyle AgNP üretimi

Kullanılan su miktarı 2 mL'den az olduğunda bulunan soğurma değerleri daha az çıkmıştır. Örneğin, şekil 5.2'de 7 mL'lik hücre içerisine 1.5 mL su konulduğu durumdaki akı ve süreye bağlı soğurma grafiği gösterilmektedir.



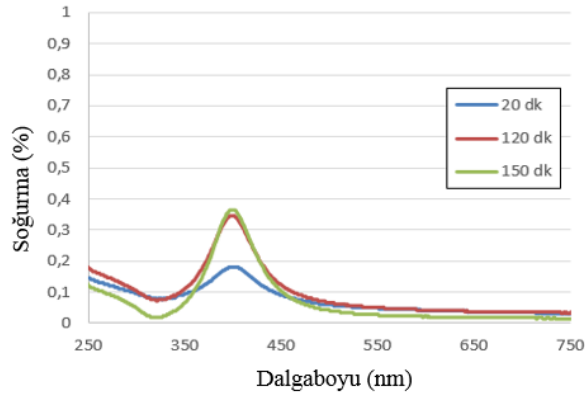
Şekil 5.2 Gümüş nano parçacıkların süre ve güce bağlı soğurma değerleri (1.5 mL su)

Lazer aşındırma tekniğiyle gümüş nano parçacık üretimi sırasında maksimum soğurma değerine ulaşılabilmesi için pek çok deneme yapılmıştır. Nano parçacık üretimi için nano saniye lazer kaynağı yerine piko saniye ve femto saniye lazerleriyle nano parçacık üretimi üzerine de çalışılmıştır. Piko saniye lazer kaynağı kullanılarak üretilen gümüş nano parçacıklara ait dalga boyu-soğurma grafiği Şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3 Piko saniye lazeri kullanılarak üretilen nano parçacıkların dalga boyuna bağlı soğurma grafiği (1.7 mJ, 532 nm, 2 mL su)

Femto saniye lazer kaynağı kullanılarak üretilen gümüş nano parçacıklara ait dalga boyu-soğurma grafiği Şekil 5.4’de verilmiştir.



Şekil 5.4 Femto saniye lazeri kullanılarak üretilen nano parçacıkların dalga boyuna bağlı soğurma grafiği (2.5 mJ, 532 nm, 2 mL su)

Şekil 5.3 - 5.4'de ki grafiklere bakıldığı zaman lazer aşındırma süresinin uzun tutulduğu ancak soğurma değerlerinin 1'in üzerine çıkamadığı görülmektedir. Ayrıca literatür araştırması yapıldığında da genellikle gümüş nano parçacık üretimi için nano saniye lazerinin tercih edildiği görülmüştür. Jean vd. (2018), darbe genişliğine bağlı olarak Ag üretimi üzerine çalışma yapmışlardır. Femto saniye ve piko saniye lazer kaynağı kullanıldığı durumda nano parçacıkların boyutları 25 μm civarında olurken, nano saniye lazer kaynağı kullanıldığı durumda boyutların 25-200 nm aralığında değiştirilebildiği görülmüştür. Ancak farklı makalelerde femto saniye ve piko saniye lazerleriyle de nm boyutlarında üretim yapılabildiği belirtilmiştir (Brikas, 2007). Darbe genişliğinin piko saniye ve femto saniye lazere kıyasla daha kısa olmasına bağlı olarak nano parçacık üretim hızı artmakta bu da hızlı sonuçların nano saniye lazer kaynağı kullanıldığı durumda ortaya çıktığını göstermektedir.

Lazer aşındırma deneyleri 477 J/cm^2 (30 mW), 637 J/cm^2 (40 mW) ve 796 J/cm^2 (50 mW) akı değerlerinde yapılmıştır. Üretilen solüsyonun optik sınırlama özelliğinin tayin edilebilmesi için açık yarık z-tarama deney düzeneği kullanılmıştır. Bu teknikte kullanılan güç değeri $150 \mu\text{J}$ 'dür. 20 mW ve 60 mW güç değerlerinde de denemeler yapılmıştır ancak 20 mW'da (318 J/cm^2) nano parçacık ürettirilemezken, 60 mW'da ki akı değeri (955 J/cm^2) fazla geldiğinden gümüş plakanın zarar görmesine neden olmuştur. Üretilen AgNP'lere bakıldığında renklerinin açık sarı olduğu gözlemlenmiştir. Ancak şekil 5.5'de görüldüğü gibi 60 mW güç değerinde deneyler yapıldığında

hazırlanan solüsyonun rengi daha koyulaşmış ve AgNP plaka üzerinde de aşınma gözlemlenmiştir. Bu da sonuçların doğru değerlendirilmesini önleyeceğinden, deneyler 477 J/cm^2 , 637 J/cm^2 ve 796 J/cm^2 akı değerlerinde yapılmıştır.



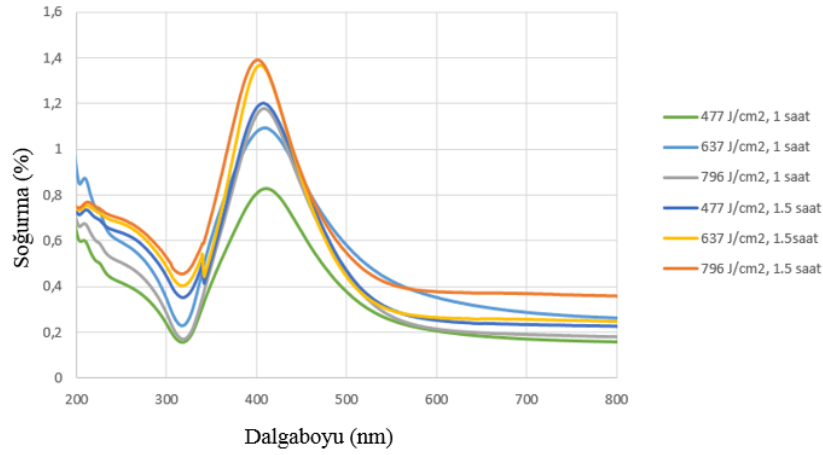
Şekil 5.5 955 J/cm^2 akı değerinde yapılan yanmış AgNP görüntüsü

Açık yarık z-tarama tekniğinde odaktaki çap değeri bıçak kenarı tekniğiyle ölçülmüştür. Hem lazer aşındırma tekniği hem z-tarama tekniği için akı değerlerinin hesaplanabilmesi aşamasında odaktaki çap değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Lazer ışınının % 10'unu ve % 90'ını kestiği x değerleri belirlenerek odaktaki çap değeri hesaplanabilmekte ancak bu değerlerin hesaplanabilmesi için öncelikle bıçağın lazer ışınını kesmediği durumdaki akı değerinin bilinmesi gerekmektedir. Odaktaki spot çapı ışın demetinin sahip olduğu en küçük değerdir, bu sebeple bıçak kenarı tekniği kullanılırken lazer gücünün minimum seçilmesi gerekmektedir aksi halde bıçak zarar görmektedir. Deneyler $4 \mu\text{J}$ güç değerinde yapılmıştır. Çizelge 5.1'de bıçak kenarı tekniğiyle bulunan odak çapı değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 5.1 Lazer aşındırma tekniği ve z-tarama tekniğindeki odak çapı değerleri

	%90'ını kestiği durumdaki mesafe (μm)	%10'unu kestiği durumdaki mesafe (μm)	Odak çapı değerleri
Lazer aşındırma tekniği	4.27	4.237	$= (1.28) / (4.27-4.237)= 40 \mu\text{m}$
Z-tarama tekniği	3.25	3.207	$=1.28 / (3.25-3.207)= 30 \mu\text{m}$

Lazer aşındırma deneyinde gümüş plakanın konulacağı konumun minimum demet çapı değeri olduğunun bulunabilmesi için farklı z değerlerindeki x konumları kaydedilmiş ve Çizelge 5.1’de belirtilen 40 µm çap değerinin minimum olduğu gözlemlenmiştir. Bu mesafeler kaydedilerek, saf su içerisine yerleştirilen gümüş plaka aynı konuma konulmuş ve deneyler farklı akı ve süreler için tekrarlanmıştır. Deneylerde kullanılan akı değerleri; 477 J/cm², 637 J/cm², 796 J/cm² olup, süre değerleri 1 saat ve 1.5 saat olarak seçilmiştir. Soğurma grafikleri şekil 5.6’de verilmiştir.



Şekil 5.6 Dalga boyu soğurma grafiği

Akı ve süreye bağlı olarak bulunan soğurma değerleri çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2 Lazer aşındırma süresi ve akıya bağlı olarak soğurma değerleri

Lazer aşındırma süresi (saat)	Akı (J/cm ²)	Soğurma Değerleri (%)
1 saat	477	0.829
	637	1.095
	796	1.18
1.5 saat	477	1.202
	637	1.367
	796	1.39

Çizelge 5.2’de görüldüğü gibi lazer aşındırma tekniğini kullanırken süre ve akı değerleri arttıkça, malzemenin soğurma değerleri artış göstermiştir.

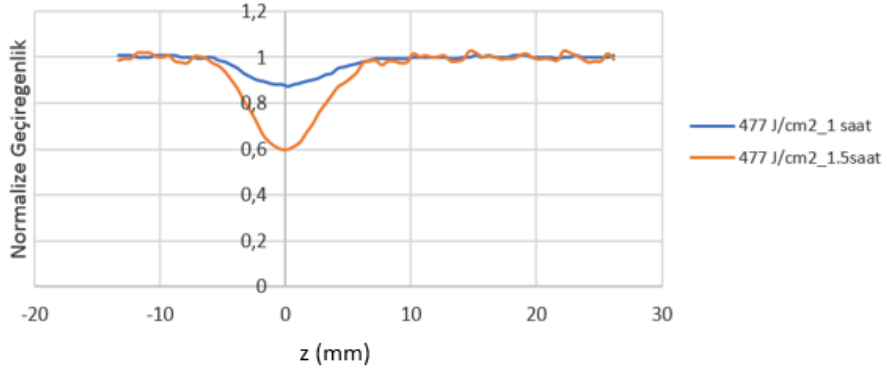
Lazer aşındırma tekniğiyle üretilen nano parçacıkların analizi yapıldığında parçacık büyüklüğüne bağlı olarak soğurma değerleri çıkartılmıştır. Bu sayede deneylerde her seferinde parçacık boyutuna bakılmaksızın, soğurma spektumu karşılaştırması yapılabilecektir (Çizelge 5.3). Dalga boyu aralığının belirlenmesi için daha önce yapılan çalışmalardan yararlanılmıştır (<http://www.cytodiagnosics.com> 2017c).

Çizelge 5.3 Parçacık boyutuna bağlı dalga boyu aralığının belirlenmesi

Lazer aşındırma süresi (saat)	Akı (j/cm^2)	Parçacık Boyutu (nm)	Soğurma spektrumundan elde edilen pik dalga boyu (nm)	Belirlenen dalga boyu Aralığı (nm)
1 saat	477	40	415	405-425
	637	30	413	400-410
	796	25	409	400-409
1.5 saat	477	22	408	390-410
	637	20	405	390-405
	796	15	401	390-405

Üretilen malzemenin optik sınırlama özelliğinin incelenebilmesi için Bölüm 4.2.5’de anlatılan açık yarık z-tarama deney düzeneği kullanılmıştır.

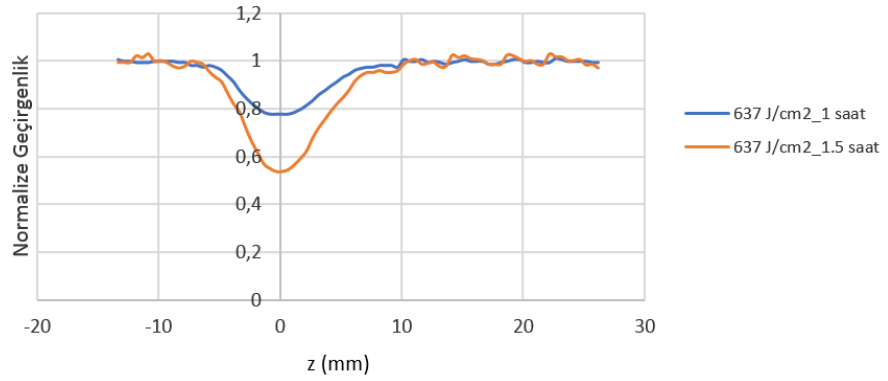
477 J/cm^2 akı değeri için z’ye bağlı normalize geçirgenlik grafiği şekil 5.7’de verilmiştir.



Şekil 5.7 Aynı akı (477 J/cm^2) değeri ve farklı süreler için mesafeye bağlı normalize geçirgenlik grafiği

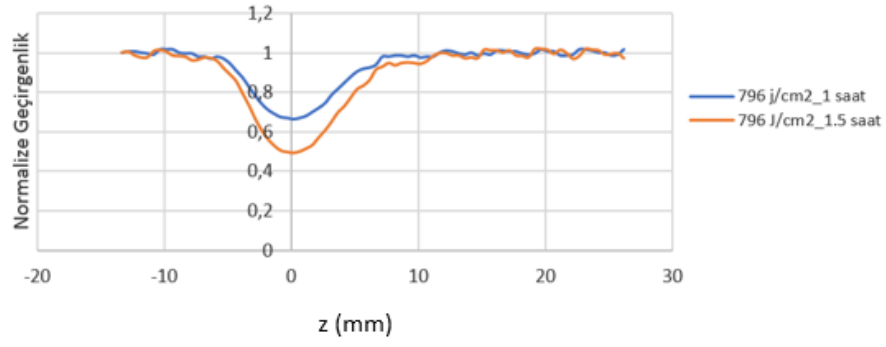
Alınan sonuçlara bakıldığında, 1 saatte üretilen örnekte normalize geçirgenlik 0,87 iken 1.5 saatte üretilen örnekte bu değer 0,59'a düşmüştür.

637 J/cm^2 akı değeri için z 'ye bağlı normalize geçirgenlik grafiği şekil 5.8'de verilmiştir. 1 saatte üretilen örnekte normalize geçirgenlik 0,77 iken 1.5 saatte üretilen örnekte bu değer 0,53'e düşmüştür.



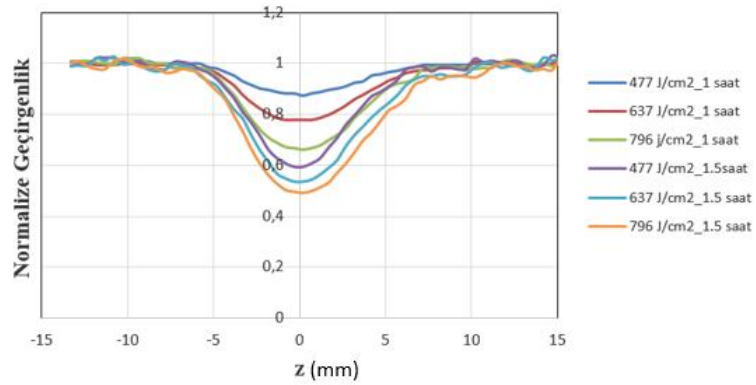
Şekil 5.8 Aynı akı (637 J/cm^2) değeri ve farklı süreler için mesafeye bağlı normalize geçirgenlik grafiği

796 J/cm^2 akı değeri için z 'ye bağlı normalize geçirgenlik grafiği şekil 5.9'da verilmiştir. 1 saatte üretilen örnek için normalize geçirgenlik 0,66, 1.5 saatte üretilen örnekte bu değer 0,49'a düşmüştür.



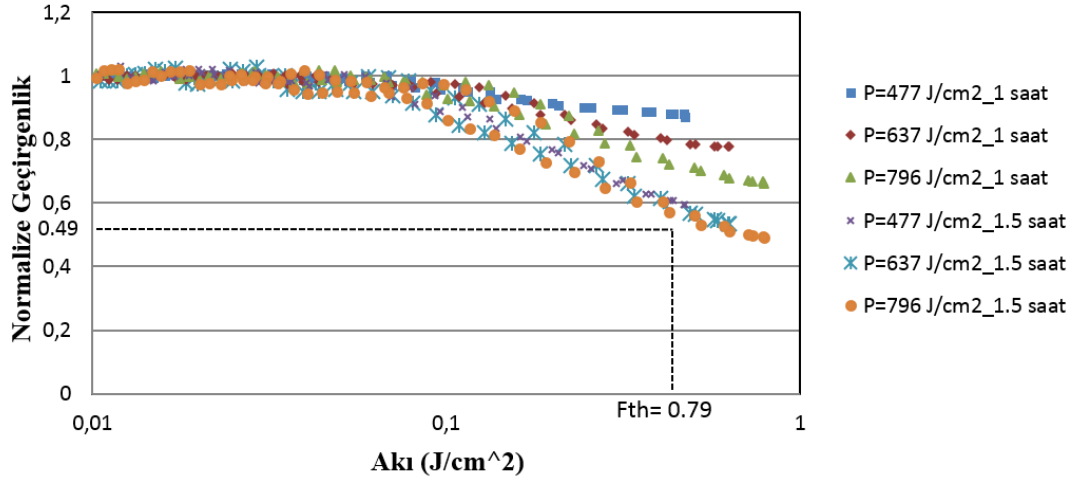
Şekil 5.9 Aynı akı (796 J/cm^2) ve farklı süreler için mesafeye bağlı normalize geçirgenlik grafiği

Sonuçların birbiri ile daha iyi kıyaslanabilmesi için farklı lazer giriş gücü ve üretim sürelerine bağlı olarak elde edilen açık yarık z-tarama deney sonuçları şekil 5.10'da üst üste çizdirilmiştir.



Şekil 5.10 Açık yarık z-tarama grafiği (z'ye bağlı normalize geçirgenlik)

4.2.5.1. kesiminde anlatılan yöntem kullanılarak şekil 5.10' da verilen açık yarık z-tarama deney sonuçlarından akıya bağlı normalize geçirgenlik değerleri elde edilerek şekil 5. 11' deki optik sınırlama grafiği çizilmiştir.



Şekil 5.11 Akıya bağlı normalize geçirgenlik grafiği

Bilindiği gibi F_{th} değeri normalize geçirgenliğin yarıya düştüğü lazer akı değeridir. Grafikteki değerlere bakıldığında 50 mW güç değerinde ve 1.5 saat süreyle üretilen AgNP'nin sınırlayıcı özelliğinin diğerlerine göre daha fazla olduğu ve akı değerinin 0.79 J/cm^2 olduğu görülmektedir.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Özellikle askeri sistemlerde kullanılan algılayıcılar yüksek güçteki lazer kaynaklarından zarar görmektedir. Bunu önleyebilmek için kapak (shutter), nd filtre vb bazı optik bileşenler kullanılabilir ancak bunlarda yeterince koruma sağlayamamaktadır. Kapakların kapanma süreleri mikro saniyeler mertebesindedir. Herhangi bir tehdit (yüksek enerjili lazer) varlığında, kapak kapatılana kadar algılayıcı sistem zarar görebilir. Bu nedenle kullanımı tercih edilmez. Diğer taraftan nd filtre kullanılması durumunda, sisteme giren tüm ışığın şiddeti azaltılıp, kaç adet nd kullanılması gerektiği gelen ışığın şiddetine bağlı olduğundan ve lazer tehditi bilinmeyeceğinden, bu tip filtrelerin kullanımı da pratik değildir. Bu nedenle optik sınırlayıcı filtrelerin kullanılması tercih edilmektedir.

Bu tez çalışması, algılayıcıların yüksek güçlerden korunması, doyuma ulaşmamasını sağlayacak optik sınırlayıcı malzemelerin lazer aşındırma tekniği ile üretimi ve üretim parametrelerinin optik sınırlama performansına etkisini araştırmak üzerine kurgulanmıştır. Bunun için yüksek güçlerden etkilenmeyen, maliyeti yüksek olmayan gümüş nano parçacıkların üretimi yapılmıştır.

Tez çalışmasında, üretilen gümüş nano parçacıkların içinde bulunduğu solüsyonların doğrusal soğurma özellikleri UV-VIS spektrometresi ile belirlenmiştir. Alınan soğurma değerlerine bağlı olarak dalga boyundaki kayma bölüm 6.1’de, akı değişimine bağlı olarak optik sınırlama etkisi bölüm 6.2’de ve süreye bağlı olarak optik sınırlama etkisi ise bölüm 6.3’de anlatılmıştır.

6.1 Soğurma Spektrumlarının Değerlendirilmesi

UV-VIS spektrometresi kullanılarak farklı akı ve sürelerde üretilen AgNP solüsyonlarının soğurmaya bağlı dalga boyu grafikleri incelenmiş ve dalga boyunda kayma gözlemlenmiştir (Çizelge 6.1). Bu durum, süreye ve güce bağlı olarak parçacık boyutundaki değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Çizelge 5.3’de de görüldüğü gibi süre

arttıkça, soğurma değeri artmakta ve dalga boyu sola doğru (küçük dalga boyuna doğru) kaymaktadır.

Nano parçacıkların parçacık büyüklükleri 10 nm' den 100 nm' ye doğru arttıkça, soğurma spektrumunda görülen λ_{\max} değeri 400 nm' den 500 nm' ye doğru kaymaktadır. Ancak, parçacık boyutunun 80 nm üzerinde olması durumunda Şekil 3.2'de görüldüğü gibi daha küçük dalga boylarında ikinci bir pik gözlemlenir. Tez çalışmasında 80 nm civarında parçacık boyutu TEM analiz sonuçlarında gözlemlenmediği için soğurma spektrumunda da ikinci pike rastlanmamıştır.

Çizelge 6.1 Farklı akı ve süreler için soğurmaya bağlı dalga boyu ilişkisi

Akı-Süre	Parçacık büyüklüğü	Soğurma	Dalga boyu (nm)
477 J/cm ² _1 saat	40 nm	0,829	415
637 J/cm ² _1 saat	30 nm	1,095	413
796 J/cm ² _1 saat	25 nm	1,18	409
477 J/cm ² _1.5 saat	22 nm	1,202	408
637 J/cm ² _1.5 saat	20 nm	1,367	405
796 J/cm ² _1.5 saat	15 nm	1,39	401

6.2 Akı Değişimine Bağlı Olarak Maksimum Optik Soğurma Dalga Boyunun Değerlendirilmesi

477 J/cm², 637 J/cm² ve 796 J/cm² akı değerleri kullanılarak yapılan lazer aşındırma tekniğinde, bıçak kenarı yöntemiyle ölçülen gümüş plaka üzerindeki odak çapı 40 μ m olarak bulunmuştur. Eneji akısına bağlı değişimin optik sınırlama üzerindeki etkisi açık yarık z-tarama düzeneğiyle tayin edilebilmektedir. Elde edilen sonuçlarda örneğe gelen demetin enerji akısındaki artışa bağlı olarak malzemenin gösterdiği optik sınırlama özelliğinin arttığı gözlemlenmiştir.

6.3 Lazer Aşındırma Süresine Bağlı Olarak Optik Sınırlama Özelliğinin Değerlendirilmesi

3 farklı akı değerinin lazer aşındırma süresine bağlı olarak gösterdiği optik sınırlama etkisi çizelge 6.2’de verilmiştir.

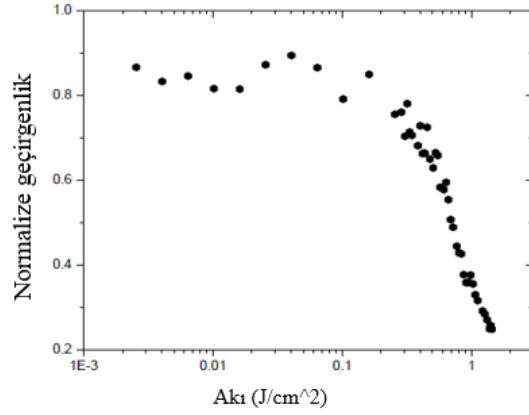
Çizelge 6.2 Süreye bağlı soğurma değerleri

Akı (J/cm^2)	Süreye bağlı soğurma değerleri	
	1 saat	1.5 saat
477 J/cm^2	0.87	0.59
637 J/cm^2	0.77	0.53
796 J/cm^2	0.66	0.49

Lazer aşındırma süresi arttıkça malzemenin doğrusal olmayan soğurma ve saçılma özelliği artmaktadır. Örneğin, 1 saat için 796 J/cm^2 akı değerindeki soğurma % 66 iken, 1.5 saatte bu değer % 49’a düşmüş ve malzemenin sınırlayıcı değerinin arttığı buna bağlı olarak normalize geçirgenliğin azaldığı görülmüştür.

Malzemelerin optik sınırlama özelliklerinin değerlendirilmesinde kullanılan parametrelerden birisi de F_{th} değeridir. Literatürde, F_{th} değerinin belirlenmesiyle ilgili olarak çeşitli çalışmalar yapılmıştır:

Porel vd. (2015), deneylerinde 532 nm Nd: YAG (6 ns, 10 Hz) lazer kaynağı kullanarak filme gömülü gümüş nano parçacıkların doğrusal olmayan optik karakterizasyonunu yapmışlardır. Farklı boyutlardaki gümüş nano parçacıklar, gümüş plakanın 1 saat, 90° ısıtılmasıyla elde edilmiştir. Spin kaplama tekniği kullanılarak üretilen gümüş nano parçacıklar (2-10 nm) PVA ile film üzerine kaplanmış ve optik sınırlama özelliklerinin tayin edilebilmesi için z-tarama tekniği kullanılmıştır. Gümüş nano parçacıklar için akıya bağlı geçirgenlik grafiği Şekil 6.1’de verilmiştir. F_{th} değeri 0.83 J/cm^2 olarak bulunmuştur. Doğrusal olmayan soğurmaya ve saçılmaya bağlı optik sınırlama mekanizmalarının etkin rol oynadığı belirtilmiştir.



Şekil 6.1 Akıya bağlı geçirgenlik grafiği (Porel, 2015)

Lakshminarayana vd. (2012), yaptıkları çalışmada Au ve Ag nano parçacıkların optik sınırlama özelliğini incelemişlerdir. Deneplerinde 532 nm dalgaboylu ve 7 ns darbeleri lazer kaynağı kullanılmıştır. Nano parçacık üretimi için kimyasal indirgeme yöntemi tercih edilmiştir. Au ve Ag nano parçacıklarının F_{th} değerleri 2.8 J/cm^2 ve 2.6 J/cm^2 olarak bulunmuştur. Yapılan çalışmalarda nano parçacık üretimi sırasında kullanılan akı değerleri belirtilmemiştir.

Bilindiği gibi iyi optik sınırlama özelliği gösteren malzemeler düşük F_{th} değerine sahiptirler. Bu tez çalışmasında elde edilen F_{th} değeri (0.79 J/cm^2), yukarıda bahsedilen çalışmalarda ölçülen F_{th} değerlerinden daha küçüktür. Bu nedenle bu tez çalışmasında elde edilen Ag nano parçacıkların literatürde bahsedilen çalışmalardaki Ag nano parçacıklardan daha iyi optik sınırlama özelliğine sahip olduğunu söylemek mümkündür. Ancak, elde edilen F_{th} değerinin herhangi bir uygulama için yeterli olup olmadığı belirlenebilmesi için hazırlanan nano parçacıkların hangi amaçla kullanılacağı bilinmesi gerekmektedir. Yüksek güçlü lazer kaynağının varlığında, algılayıcılar doyuma ulaşabilirler. Bunun önlenmesi için F_{th} değerinin minimum tutulması gerekmektedir. Bu sayede algılayıcı önünde kullanılacak optik sınırlayıcı malzemeyle hedeften yansıyıp gelen ışın demeti yüksek güçleri bloke edecek ve algılayıcının zarar görmesini engelleyecektir. F_{th} değerinin minimum tutulabilmesi için lazer aşındırma tekniğiyle üretilen nano parçacıkların soğurma değerinin yüksek olması

gerekmektedir. Üretim parametresini etkileyen etmenler, nano parçacıkların boyutu, sayısı, şekli vb parametrelerdir.

Bu tez çalışmasında elde edilen bulgulara göre tek bir nano parçacık üreterek optik sınırlayıcı malzemeler üretmek yerine farklı nano parçacıkların birleşimi ile de istenilen F_{th} değerlerinin elde edilmesi mümkün olabilmektedir. Diğer taraftan lazer aşındırma tekniğinde kullanılan akı değeri ve süre de F_{th} değerinin belirlenmesinde oldukça önemli parametrelerdendir.

Bu tez çalışmasında malzemenin optik sınırlama özelliğinin lazer kaynağının gücü ve aşındırma süresine bağlı olarak değiştirilebildiği görülmüştür. Akı değeri ve süredeki artış, alınan TEM sonuçlarından da görüldüğü gibi nano parçacıkların boyutunu etkilemektedir. Nano parçacık boyutlarının yüksek akı ve sürelerde küçülmesi, malzemenin optik sınırlayıcı özelliğini arttırmaktadır.

Sonuç olarak, lazer aşındırma tekniğinde kullanılan parametreler bu tez çalışmasında elde edilen bulgulara göre değiştirilerek istenilen F_{th} değerine sahip Ag nano parçacıkların içerisinde olduğu solüsyonlar üretilebilir.

Bu çalışmanın devamında lazer aşındırma tekniği kullanılarak elde edilen solüsyonlar, homojen bir şekilde alt taşın üzerine kaplanarak optik sınırlayıcı filtreler yapılabilir. Ayrıca, benzer çalışmalar farklı metal nano parçacıklar için de tekrarlanarak hangisinin daha iyi performans gösterdiği bulunabilir.

KAYNAKLAR

- Aleali, H., Sarkhosh, L., Karimzadeh, R., Mansour and N. 2011. Optical Limiting Response of Ag₂S Nanoparticles Synthesized by Laser Ablation of Silver Target in DMSO, *Solids B*; 680-685
- Aleali, H. and Mansour, N. 2010. Nonlinear Responers and Optical Limiting Behavior of Ag Nanoparticle Suspension, *Journal of Science*; 273-278
- Anonymous. 2012. Web Sitesi: http://massey.dur.ac.uk/resources/grad_skills/KnifeEdge.pdf Erişim Tarihi: 10.08.2016
- Anonymous. 2007. Web Sitesi: <http://www.understandingnano.com/nanomaterial-synthesis-laser-ablation.html> Erişim Tarihi: 10.05.2017
- Anonymous. 2018a. Web Sitesi:<http://www.sigmaaldrich.com/technical-documents/articles/materials-science/nanomaterials/silver-nanoparticles.html> Erişim Tarihi: 25.09.2017
- Anonymous. 2017a . Web Sitesi: <https://www.thorlabs.com/drawings/72fa7ca1e47aec0f-217F5165-0950-C5F2-03773A5ADCAF7C78/DET36A-Manual.pdf> Erişim Tarihi: 12. 08.2017
- Anonymous. 2017b. Web sitesi: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?Partnumber=DET36A> Erişim Tarihi: 11.04.2017
- Anonymous. 2009a. Web Sitesi: <https://commons.wikimedia.org> Erişim Tarihi: 17.04.2017
- Anonymous. 2009b. Web sitesi: https://www.rp-photonics.com/gaussian_beams.html Erişim Tarihi: 20.01.2017
- Anonymous. 2017c. Web sitesi: <http://www.cytodiagnosics.com/store/pc/Silver-Nanoparticle-Properties-d11.htm> Erişim Tarihi: 10.01.2017
- Bahae, M., Said, A., Wei, T. and Hagan, D. 1990. Sensitive Measurement of Optical Nonlinearities Using a Single Beam, *IEEE*, Vol.26; 760-769
- Boutinguiza, M., Comesana, R., Lusquinos, F., Riveriro, A. and Pou, J. 2015. Production of Silver Nanoparticles in Liquid by CW and Pulsed Lasers, *Lasers in Manufacturing Conference*
- Brikas, M., Barcikowski, S., Chichkov, B. and Raciukaitis, G. 2017. Production of Nanoparticles with High Repetition Rate Picosecond Laser, *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, Vol. 2; 230-233
- Chen, G., Hong, M., Tan, L., Chong, T., Elim, H., Chen W. and Ji, W. 2007. Optical Limiting Phenomena of Carbon Nanoparticles Prepared by Laser Ablation in Liquids, *Journal of Physics*; 289-292

- Çağlayan, M.G. 2014. Aminoglikozidlerin Altın ve Gümüş Nano parçacıklar Kullanılarak Spektroskopik Tayinleri, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Analitik Kimya Anabilim Dalı, Ankara
- Dagani, R. 1996, Advance in Optical Limiting Achieved with Organic Dye-Based Device, Chemical and Engineering News; 24-25
- Eberle, B., Dengler, S., Ritt, G. and Muller, O. 2012. Understanding How Nanoparticle Geometry May Influence Optical Limiting, SPIE
- Eslamifar, M. and Mansour, N. 2012. Optical Limiting Properties of Colloids Enhanced by Gold Nanoparticles Based on Thermal Nonlinear Refraction, International Journal of Optics and Photonics, Vol.6; 49-56
- Gao, Y., Chang, Q., Ye, H., Jiao, W., Li, Y., Wang, Y., Song, Y. and Zhu, D. 2007. Size Effect of Optical Limiting in Gold Nanoparticles, Chemical Physics, Vol.336; 99-102
- Gao, Y., Wang, Y., Song, Y., Li, Y., Qu, S., Liu, H., Dong, B. and Zu, J. 2003. Strong Optical Limiting Property of a Novel Silver Nanoparticle Containing C60 Derivative, Optics Communications; 103-108
- Hajiesmaeilbaigi, F., Mohammadalipour, A., Sabbaghzadeh, J., Hoseinkhani, S. and Fallah, H. 2005ç Preparation of Silver Nanoparticles by Laser Ablation and Fragmentation in Pure Water, Laser Phys. Lett.; 252-256
- He, G., Xu, G., Prasad, P., Reinhardt, B., Bhatt, J. and Dillard, A. 1995. Two Photon Absorption And Optical-Limiting Properties of Novel Organic Compounds, Opt., Lett. , Vol.20; 435-437
- Horvath, H. 2009, Gustav Mie and the Scattering and Absorption of Light by Particles: Developments and Basics, Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer; 787-799
- Jean, J., Yoon, S., Chii, H., Kim, J., Farson, D. and Cho, S. 2018. The Effect of Laser Pulse Width on Laser- Ag Nanoparticle Interaction: Femto- to Nanosecond Lasers, Applied Sciences
- Jia, W. and Douglas, W. 2005. Optical Limiting of Semiconductor Nanoparticles for Nanosecond Laser Pulses, Appl. Phys. Lett
- Kürüm, U. 2008, Bakır Koordineli Ftalosiyanın Bileşiminin Optik Sınırlama Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara
- Lakshminarayana, P., Mamidala, V., Guan, Z. and Xu, Q. 2012. Huge Enhancement of Optical Nonlinearities in Coupled Ag and Au Nanoparticles Induced by Conjugated Polymers, Applied Physics Letters
- Miller, J.M., Mott, A.G. and Ketchel, B.P. 1999. General Optical Limiting Requirements, Army Research Laboratory

- Miles, R., Lempert, W. and Forkey, J. 2001. Laser Rayleigh Scattering, Meas. Sci. Technol. Vol.12; 33-51
- Muller, O., Dengler, S., Ritt, G. and Eberle, B. 201. Size and Shape Effects on the Nonlinear Optical Behaviour of Silver Nanoparticles for Power Limiters, Applied Optics, Vol.52; 139-149
- Yin, M., Li, H. and Tang, S. 2000. Determination of Nonlinear Absorption and Refraction by Single Z-Scan Method, Applied Physics B, Vol. 70; 587-597
- Ong, T., Lee, S., Van, L., Hong, M. and Chong, T. 2004. Optical Limiting Properties of Silver Nanoparticles Fabricated by Laser Ablation, SPIE, Vol.5662; 66-70
- Porel, S., Harsha, S., Kiran, P., Radhakrishnan, T. and Rao, D. 2015. Optical Limiting Properties of Silver Nanoparticles Embedded Polymer Films, Research Gate
- Rashidian, M. and Dorrani, D. 2015. Investigation of Optical Limiting in Nanometals, Rev. Adv. Mater. Sci. ; 110-126
- Sun, Y. and Riggs, J. 2010. Organic and Inorganic Optical Limiting Materials. From Fullerenes to Nanoparticles, International Reviews in Physical Chemistry, Vol.18; 43-90
- Tyurnina, S., Shur, V., Kozin, R., Kuznetsov, D. and Mingaliev, E. 2013. Synthesis of Stable Silver Colloids by Laser Ablation in Water, SPIE, Vol.9065
- Qu, S., Song, Y., Liu, H., Wang, Y., Gao, Y., Liu, S., Zhang, X., Li, Y. and Zhu, D. 2002. A Theoretical and Experimental Study on Optical Limiting in Platinum Nanoparticles, Optics Communications, Vol.203, Issues 3-6; 283-288
- Wang, C., Zhao, P., Miao, Q., Sun, Y. and Zhou, Y. 2010. Optical Limiting and Dynamical Two-Photon Absorption of Organic Compounds for a Nanosecond Pulse, IOP Publishing Ltd, Vol.43
- Yin, M., Li, H., Tang, S. and Ji, W. 2000. Determination of Nonlinear Absorption and by Single Z-scan Method, Appl. Phys. B; 587-591
- Yuan, Y., Andrews, M., Marlow, B., Pyatenko, A. and Suzuki, M. 2005. Silver Nanoparticles by Laser Ablation, SPIE, Vol.5635; 77-82

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Irmak GÜRSOY
Doğum Yeri : Ankara
Doğum Tarihi : 9 Ağustos 1991
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : ODTÜ Geliştirme Vakfı Özel Lisesi (2009)
Lisans : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü (2014)
Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı (Şubat 2015- Haziran 2018)

Çalıştığı Kurum ve Yıl

ROKETSAN Roket Sanayii ve Ticaret A.Ş.- Mühendis (2014-2018)
ROKETSAN Roket Sanayii ve Ticaret A.Ş.- Uzman Mühendis (2018-)

Uluslararası Kongre Sunum

Gürsoy, I. and Yağlıoğlu, G., 2017. The effect of laser ablation parameters on optical limiting properties of silver nanoparticles, SPIE, Vol.10374