T.C.
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZER GÜCÜNÜN FONKSİYONU OLARAK LAZER YÜZEY İŞLEME ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

MEHMET HAKAN ÇOLPAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

Konya, 2008

T.C.

SELÇUK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LAZER GÜCÜNÜN FONKSİYONU OLARAK LAZER YÜZEY İŞLEME ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

MEHMET HAKAN ÇOLPAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ FİZİK ANABİLİM DALI

Bu tez 07/03/2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/~~oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ
(Danışman)

Yrd.Doç.Dr.Haziret DURMUŞ
(Üye)

Yrd.Doç.Dr.Gültekin ÇELİK
(Üye)

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

LAZER GÜCÜNÜN FONKSİYONU OLARAK LAZER YÜZEY İŞLEME ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

MEHMET HAKAN ÇOLPAN

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ
2008, 76 Sayfa

Jüri: Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ
Yrd. Doç. Dr.Haziret DURMUŞ
Yrd. Doç. Dr. Gültekin ÇELİK

Bu çalışmada malzemeler ile yüksek güçteki lazer radyasyonunun etkileşiminin meydana gelmesi sırasındaki fiziksel süreçler tanımlanmıştır. Bu süreçlerin bilinmesi, lazer tabanlı malzeme işlemenin olanak ve limitlerini anlamak için önemlidir. Bu etkileşimler malzeme işlemede lazer uygulamaları için temeldir. Bu etkileşimler kullanılan malzemein yansıtma ve soğurma katsayısı ile bunların lazerin malzemele etkileşmesinde nasıl davrandıkları hakkında bilgi verir. Bununla birlikte bu temel süreçler malzemele birleşen enerjinin akışı, faz değişimi ve lazer destekli ablasyon dalgalarının oluşumunu tanımlar. Bununla birlikte lazer demetinin gücü ile malzemede oluşan nüfuz etme hızları, işleme oranları gibi önemli parametrelerde açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: LASER, ABLASYON, YÜZEY, MALZEME

ABSTRACT

Ms Thesis

A STUDY ON LASER SURFACE PROCESSING AS A FUNCTION OF LASER POWER

MEHMET HAKAN ÇOLPAN

Selçuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ

2008, 76 Pages

Jury: Prof. Dr. Hamdi Şükür KILIÇ
Asst. Prof. Dr.Haziret DURMUŞ
Asst. Prof. Dr. Gültekin ÇELİK

In this work, the physical processes taken place during the interaction of high power laser with materials have been determined. It is important to understand and know the facilities and limitation of the material processing based on the laser technology. This interaction between laser energy and material is essential for laser applications. These intearctions clearify how these materials behaves during the interaction as well as giving information about the refraction and diffraction constants of materials. Hence, these principle processes have defined the flow of the energy joining to material properties, phase changes and ablation based on laser interaction. Therefore, some important parameters like laser penetration speed, depth and processing rate have been worked out.

Key words: LASER, ABLATION, SURFACE, MATERIAL

ÖNSÖZ

Bu çalışma Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne yüksek lisans tezi olarak sunulmuştur.

Bu çalışmada bilgi ve tecrübeleriyle bana her konuda yardımcı olan, yol gösteren ve bana büyük bir sabırla katlanan kendisi ile çalışmaktan büyük onur duyduğum ve bundan sonraki çalışmalarımda da kendisinden çok şey öğreneceğime inandığım saygı değer danışman hocam Sayın Prof.Dr. Hamdi Şükür KILIÇ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmam sırasında yardımlarından dolayı da araştırma görevlisi arkadaşlarım Murat YILDIRIM'a, Ümmühan UÇAR'a ve Fen Edebiyat Fizik Bölümü elemanlarına teşekkür ederim.

Varlığımın sebebi merhume annem Neriman ÇOLPAN, saygı değer babam Hidayet ÇOLPAN ve kardeşim Hilal ÇOLPAN'ana da teşekkür ederim.

Bu çalışmam bize imkânlar sağlayan devletime, üniversiteme, aileme ve Yüce Türk Milleti'ne armağan olsun.

Mehmet Hakan ÇOLPAN
Konya, 2008

İÇİNDEKİLER

ÖZET iii

ABSTRACT iv

ÖNSÖZ v

İÇİNDEKİLER vi

I GİRİŞ 1

II TEORİK ALT YAPI 4

2.1 Malzemelerin Optik Özellikleri 5

2.2 Malzemelerin Termal Özellikleri 9

2.3 Isı İletimi 13

2.4 Erime ve Buharlaşma Olmadığı Durumda Sıcaklık Değişimi 15

2.5 Erime Derinlikleri 20

2.6 Buharlaşma Derinliği 21

2.7 Malzeme İşleme Uygulamaları 22

2.8 Laser Ablasyon Süreci 23

2.9 Laser Kesme İşlemi 31

2.10 Delme, Yazma ve İşaretleme 33

III DENEYSEL DÜZENEK 36

3.1 Laser Sistemi 37

3.2 Laser Nedir ? 38

3.3 Laser Çaşitleri 40

3.4 Katı Laserler 40

3.5 Pompalama Metodları 41

3.6 YAG Laserler 44

3.7 Laser Işınının Özellikleri 46

3.7.1 Monokromatiklik 47

3.7.2 Eş Zamanlılık 47

3.7.3 Yoğunluk 48

3.7.4 Yönlendirilebilirlik (Parlaklık) 51

3.8 Spot Yarıçapı 51

3.9 Odak Derinliği **52**
3.10 Iraksama **52**
3.11 Laserlerde Güç ve Enerji **53**
3.12 Optik Enerji Akısı **55**
3.13 Optiksel Güç ve Işık Şiddeti **56**
3.14 Spot Hacmi **58**
3.15 Foton Akısı **58**
3.16 Malzeme İşleme Uygulamaları İçin Önemli Laserler **59**

IV DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR 62

4.1 Deneysel Sistem **64**
4.2 Lazer Sistemi **65**
4.3 Puls Enerjisinin Düşürülmesi **66**
4.4 Puls Gücünün Ölçümü **67**
4.5 Data Ölçme ve Değerlendirme Sistemi **69**
4.6 Lazer Puls Biçimi **70**
4.7 Tekstil Temizleme Çalışmaları **72**

5 TEŞEKKÜR 74

6 KAYNAKLAR 75

1. GİRİŞ

Bu çalışmada temel laser uyarımlı süreçler kullanılarak malzeme işleme teknikleri üzerine analitik bir çalışma yaparak bu alana bilimsel katkı sağlamayı amaçlamıştır.

Lazer, temelleri 19. Yüz yılın başlarında Einstein tarafından atılan ve 1950 yılların başlarında üretilerek 1960 lı yılların başlarında uygulamaları başlatılan oldukça önemli bir spektroskopik enerji kaynağıdır. Sorakin ve Stevenson, uranyum katkılı kalsiyum flüorid lazerleri için flaş pompalı çubuk tasarımında çalıştılar. Bu lazerle Kasım 1960'taki ilk denemelerinde başarılı oldular. İki hafta sonra, Sorakin ve Stevenson samaryum katkılı kalsiyum flüoridle lazer etkisini elde ettiler. Lazer etkisini gösterecek yeni malzemeler bulunması için farklı çalışmalar yapıldı. 12 Aralık 1960'ta Ali Javan, William R. Bennet ve Donald Herriot Neon-Helyum gaz karışımında lazer etkisini elde ettiler. 1961 yılında Neodmiyum lazer geliştirilmiştir. 1963'te C. Kumar, N. Patel karbondioksit, 1964'te Joseph Geusic, H. M. Marcos ve Le Grnd Von Uitert Nd:YAG'da ve William Bridges argon-iyonda lazer etkisini elde ettiler. Günümüzde lazerler katı, sıvı, gaz ve plazma malzemelerinde ve hemen hemen her dalga boyunda elde edilebilmektedir.

Günümüz bilim, endüstri ve sağlık dünyasında lazerler spektroskopik çalışmaların yanı sıra malzeme işleme amaçlı olarak oldukça yaygın kullanım alanı bulmaktadır.

Temel olarak malzeme işleme süreci iki ana aşamadan oluşmaktadır. Bunlardan birincisi katı nümune üzerinden malzeme sükülmesi (ablasyon, buharlaştırma veya malzeme uzaklaştırma) ve ikincisi ise katı malzeme(substrate) üzerine malzeme ilave (kaplama, depozisyon) edilmesidir. Bu konuların her ikiside oldukça anlamlı ve önemli teknolojik sonuçlar ortaya koymuş ve teknoloj hayatımızda yerini almış durumdadırlar. Bu nedenle her iki durumunda ortaya

konabildiği farklı teknikler belirlenmiş ve yoğun olarak çalışılmaktadır. Bu konunun gelişmelere açık olması ve tam anlamıyla anlaşılmaya muhtaç olması nedeniyle, oldukça yoğun çalışmalara gereksinim duyulmaktadır. Bu anlamda, bu konuda ortaya konulan bilimsel çalışmalara katkı yapmak için bu çalışma planlanmış ve bu çalışmanın sınırlarını, ablasyon veya malzeme uzaklaştırma işlemlerinin her ikisinin de irdeleneceği tarzda bir çalışma olarak tasarlanmıştır. Sonuç olarak yüzey işleme sonunda yüzeyde ortaya çıkan desenin incelenmesi ve analitik bir yorum yapılması tasarlanmıştır.

Bu noktada laser işleme süreci geleneksel laser işleme ve laser kimyasal işleme (LCP) süreci olarak iki anlamlı kategoride ele alınabilir. Birinci durum prensip olarak, bir inert gaz içerisinde gerçekleştirilmektedir. Bu durumda scribing, kesme, delme ve parlatma(düzlemleştirme) işlemleri genel olarak gerçekleştirilmektedir. İkinci durum ise, malzemenin kimyasal kompozisyonunun tamamen değiştirilmesi veya gerçek kimyasal reaksiyonların aktif hale getirilmesiyle karekterize edilmektedir. Bu teknik, mikromekanik, metalurji, optoelektronik, elektronik devreler ve yarı iletken teknoloji üretimi, sensör teknolojisi, tıp ve biyoteknoloji alanlarında oldukça yaygın kullanıma sahiptir.

Yüksek enerjili kısa pulslar yardımıyla malzeme sökülmesi işlemi lazer ablasyonu olarak bilinmektedir. Lazer ablasyonu son yıllarda oldukça artan bir popüleriteye sahip olan ve oldukça yoğun çalışmaların üzerine odaklanmasını sağlayan güçlü bir analitik buharlaştırma tekniğidir. Lazer ablasyon tekniği, güçlü bir puls lazerin numune yüzeyine odaklanması neticesinde yüzeyle etkileşmeye giren laser fotonlarının katı nümune yüzeyinden atom sökme işlemi olarak tanımlanmaktadır. Bu noktada ortaya konan buhar çeşitli analizörler kullanılmak sureti ile analiz edilebilmektedir.

Bu çalışmada bizim temel amacımız buharlaştırılan nümuneyi analiz etmek ve nümunede yüzey analizi veya iz analiz yapmaktan ziyade nümune buharlaştırması yaparak plazma üretmek ve bu üretim dinamiklerini analitik anlamda incelemektir.

Geleneksel buharlaştırma teknikleriyle karşılaştırıldığında, laser ablasyon tekniği bir çok temel avantajlara sahiptir. Malzeme analizinde kullanılan birçok teknik, nümuneden belli bir miktar büyüklüğe sahip malzeme almak ve bunu asit içerisinde çözmek sureti ile çözelti hazırlanması yoluyla inceleyebilmektedir. Bu şekilde, tehlikeli ve sağlığı riske sokan birçok nümunenin veya bu tür bazı safsızlıkların olduğu nümunelerin de incelenmek istenebileceği tartışılmaz bir gerçektir. Halbuki, laser ablasyon durumunda, bu tür katı nümunelerin direk spektrometreye sunulumu oldukça pratik bir uygulama ortaya koymakta ve spektrometre içerisine konulan katı nümune veya bu nümuneden etrafa yayılacak olan herhangi bir buharın herhanhi bir sağlık riski doğurmayacağı bir güvenlik ve temizlik vaadi yapmaktadır. Bu temizlik ve güvenliğin yanı sıra herhangi bir nümune hacim sınırlamasının olmadığı gibi nümune hazırlamaya da gereksinim duyulmamaktadır. Laser ablasyon prosedüründe çözelti için gerekli nümune miktarından çok daha az nümune kullanılmak sureti ile inceleme yapılabilmektedir. Gerek duyulan nümune miktarı, kesinlikle kullanılan analitik teknikle alakalı bir gereksinimdir.

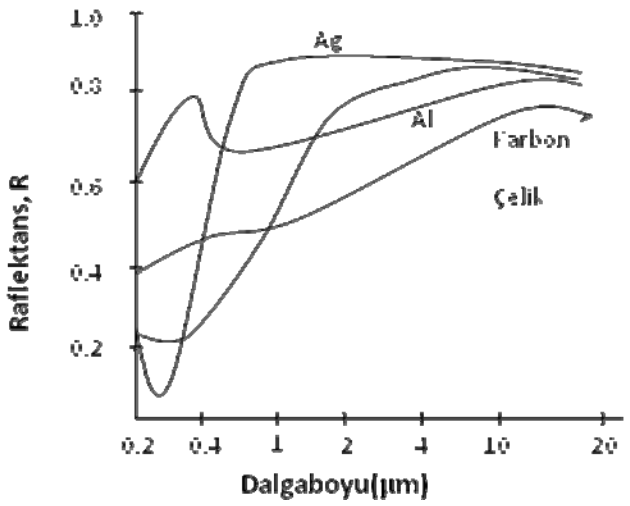
Bu çerçeveden bakıldığında, laser ablasyon tekniği özellikle kütle spektroskopi uygulamalarında direk nümune girişi sağlaması bakımından oldukça önemli ve faydalı bir tekniktir, bu özelliği itibariyle birçok noktadan analitik olarak bu çalışmada ortaya konulacaktır.

Malzeme işleme çalışmasının sonuçları, malzemelerin yüzey durumuna, yüzeydeki demet profiline, yüzey üzerindeki gaza ve gazın çeşidine bağlıdır. Ancak bu faktörler tam anlamıyla henüz tanımlanabilmiş değildir.

Endüstriyel uygulamaları da çok geniş olan lazerlerle, malzeme kesme, kaynaklama, delme, markalama, sertleştirme gibi birçok işlem kolaylıkla yapılabilmektedir.

2. TEORİK ALT YAPI

Lazer-madde işleme sürecinde lazer-madde etkileşmesi anlaşılması oldukça önemli bir aşamadır. Bu sürecin anlaşılmasında anahtar olay, lazerin madde üzerine düşmesi ile madde tarafından enerjinin soğurulması olayıdır. Dolayısıyla, soğurma oldukça önemli bir süreç olmasına karşın maddenin yansıtma katsayısı da oldukça önemli bir durum ortaya koymaktadır.

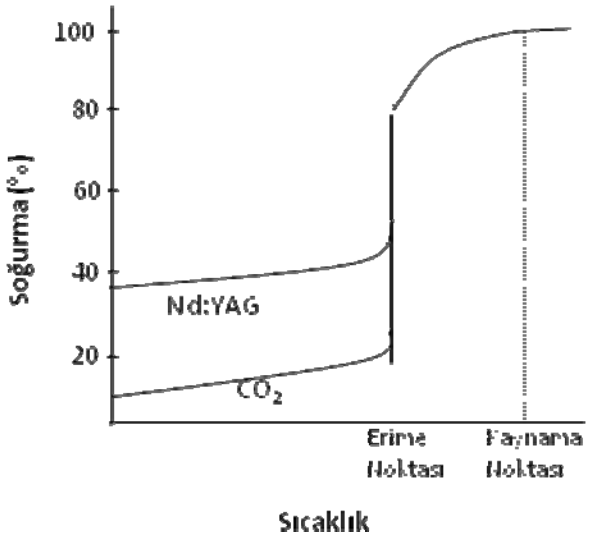


Şekil 2.1: Bazı maddelerin yansıma katsayısının dalgaboyunun fonksiyonu olarak değişimi görülmektedir.

İlk olarak sabit şiddetli bir lazer radyasyon demetinin düzgün bir madde yüzeyine dik bir şekilde düştüğünü kabul edelim. Başlangıçta basitlik olması bakımından ışık demetini sonsuz genişlikte ve maddeyi yarı sonsuz kalınlıkta alalım. Çalışmak istediğimiz ilk süreç madde içerisine nüfuz eden ışık miktarının (gelen ışığın madde içine giren miktarını) belirlenmesine ihtiyaç duyarız. Bu I(1-

R_s) şeklinde yazılailir. Burada I ışık şiddeti ve R_s yüzeyin yansıma katsayısıdır. Çeşitli maddelerin yansıma katsayıları dalga boyunun bir fonksiyonu olarak Şekil 2.1'de görülmektedir. Yani mümkün olduğu kadar kısa dalga boyu kullanmak avantajlı görünmektedir. Sıcaklık artarken çoğu yüzeyin yansıma katsayısı lazer pulsu süresince düşer. Herhangi bir erime veya buharlaşma meydana gelir gelmez, durum daha belirgin bir şekilde değişir, yani puls başlangıcında belirgin olan kısa dalga boyunun avantajı puls süresi geçtikçe avantajını kaybetmektedir.

Şekil 2.2'de, Nd: YAG ve CO_2 lazer dalga boylarında sıcaklık artarken bir metal yüzeyi tarafından soğurulan ışık şiddetindeki değişme görülmektedir. Erime noktasının üzerinde iki lazer arasında etkin bir fark olmadığı görülmektedir.



Şekil 2.2: Nd:YAG ve CO_2 lazerlerin madde tarafından soğurulması oranı karşılaştırılmalı olarak görülmektedir.

Malzemelerin Optik Özellikler

Metaller kısa mesafelerde ışık şiddetini sönüme uğratırlar. Bu yüzden metallerin optik özellikleri karakterize edilirken bir malzeme sabiti tanımlanmaktadır ve sönüm sabitini içeren dalga denklemi,

$$\mathrm{E} = \text{Sönümlü Genlik - Sönümsüz dalga} = \mathrm{E}_0 \; e^{\left|\frac{2\pi k}{\lambda} z\right|} - e^{\left|\frac{2\pi c i}{\lambda}\left(t - \frac{zn}{c}\right)\right|} \qquad (2.1)$$

şeklinde verilir.

Malzeme üzerine düşen elektrik alan şiddeti E'nin vakum ve madde arasındaki arayüzeyden uzaklaştıkça üstsel bir azalma gösterir, bu durum Denk(2.1) ile ifade edilmektedir. Denk(2.2) ifadesindeki k sabiti dalga sayısıdır ve aldığı karakteristik değerleri Tablo 2'de dalga boyunun fonksiyonu olarak verilmiştir.

Elektrik alan şiddetini, E, ölçmek oldukça zordur. Bu nedenle yaygın olarak kullanılan ışığa duyarlı aygıtlarla (fotodetektör gibi) I şiddeti kolayca ölçülür. Şiddet genliğin karesi ile orantılıdır. Böylece, denk(2.1) ifadesindeki sönüm terimi

$$I = E_2 = I_0 e^{\left(\frac{4\pi k}{\lambda} z\right)} \qquad (2.2)$$

şeklinde yazılır. Burada, I_0 yüzeydeki şiddettir. Karakteristik nüfuz derinliği malzeme içine ilerleyen ışık dalgası şiddetin 1/e katına yada %37 oranına düştüğü mesafe olarak tanımlanır ve

$$I / I_0 + I / e = e^{-1} \qquad (2.3)$$

biçiminde verilir. Bu tanımlama yardımıyla denk(2.2) değerlendirilirse nüfuz derinliği olarak

$$z = w = \frac{\lambda}{4\pi k} \qquad (2.4)$$

bulunur.

Tablo 2.1 : Temel Optik Özellikler

Sembol	**Tanımlama**	**Özellik**	**Birimi (SI)**
Λ	Işığın dalgaboyu	Işık kaynağına bağlıdır	Nanometre (nm) yada mikrometre (μm)
C	Işığın hızı	$2,998x10^8$	Metre/saniye
A	Yüzeye gelme açısı	Gelen ışık ile yüzeyin normali arasındaki açı	Derece
B	Yüzeyden yansıma açısı	Yansıyan ışık ile yüzeyin normali arasındaki açı	Derece
N	Kırılma indisi		Birimsiz
K	Sönüm sabiti	Işığın yoğun ortama girdiğinde şiddetinin azalması olarak açıklanan özelliği	Birimsiz
R	Yansıtıcılık		Yüzde
T	Geçirgenlik		Yüzde
W	Karakteristik nüfuz derinliği	Işık şiddetinin 1/e oranına düştüğü mesafe	Nanometre (nm) yada mikrometre (μm)
A	Soğurganlık		cm^{-1}
ε_2	Soğurma	$\varepsilon_2=2nk$	Birimsiz
ε_1	Kutuplanma	$\varepsilon_1=n^2-k^2$	Birimsiz

Nüfuz derinliği w'nin tersi (üstel) zayıflatma yada soğurma olarak adlandırılır ve Denk(2.4) kullanılarak

$$a = \frac{4\pi k}{\lambda} \tag{2.5}$$

şeklinde ifade edilir ve cm^{-1} biriminde ölçülür.

Yansıma şiddeti I_R ile gelen ışık şiddeti I_0 oranı

$$R = \frac{I_R}{I_0} \tag{2.6}$$

Biçiminde yazılır ve yansıma katsayısı olarak adlandırılır.

Benzer şekilde geçen ışık şiddeti I_T ile uygulanan ışık şiddeti oranı geçirgenlik katsayısı olarak tanımlanır.

$$T = \frac{I_T}{I_0} \tag{2.7}$$

Yalıtkanlar için R yansıma katsayısı

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \tag{2.8}$$

biçiminde kırılma indisine bağlı olarak verilmektedir.

Tablo 2.2: Gümüş, Bakır, ve Nikel için Optik Özellikler

λ	Ag			Cu			Ni		
(nm)	n	K	R(%)	n	k	R(%)	n	k	R(%)
2	0,997	2,69	4	0,997	6,3	2,3	0,997	5,2	2,3
5	0,989	3,5	3	0,980	1,9	1,9	0,982	8,1	9,9
10	0,926	6,22	0,15	0,966	5,1	9,7	0,955	4,1	9,7
20	0,881	0,211	1,6	0,965	0,107	0,33	0,964	0,112	0,36
50	0,906	0,522	7,2	0,96	0,396	4,0	0,91	0,421	4,8
80	1,202	0,691	9,7	,981	0,695	11,0	1,01	0,687	10,5
100	1,308	0,581	7,6	1,09	0,128	11,0	1,07	0,711	10,7
200	1,072	1,24	26,5	1,0	1,45	34,4	1,0	1,54	37,2
300	1,510	0,902	15,1	1,41	1,68	34,6	1,74	2,00	39,5
400	0,173	1,95	86,6	1,18	2,21	51,0	1,61	2,362	48,0
500	0,130	3,0	94,9	1,13	2,55	59,0	1,68	2,98	58,2
600	0,128	3,70	96,6	0,35	3,01	87,1	188	3,56	64,1
700	0,144	4,65	97,5	0,213	4,15	95,4	2,19	4,07	64,1
800	0,144	5,31	98,0	0,24	4,31	95,2	2,48	4,38	68,3
1000	0,266	6,99	98,2	0,41	7,51	97,2	2,82	5,01	71,6
2000	0,650	12,2	98,3	0,85	10,6	97,0	3,78	8,20	83,2
3100	0,387	18,8	98,4	1,59	16,5	97,7	3,84	11,4	90,0
4133	2,449	25,1	98,5	2,59	22,2	97,9	4,19	15,0	93,3
5166	3,732	31,3	98,5	3,81	27,5	98,0	4,16	18,4	95,4
8266	9,441	47,1	98,4	8,57	42,6	98,2	5,45	30,6	97,8
9919	13,11	53,7	98,3	10,8	47,5	98,2	6,90	36,2	98,0

Metallerde ise (k≠0)(metaller, yarı iletkenler vb.), Denk (2.8) düzenlenerek

$$R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \tag{2.9}$$

ifadesi elde edilir.

Bu ifade Beer denklemi olarak bilinir. Yansıma katsayısı birimsiz bir sabittir ve genellikle gelen ışığın yüzdesi olarak verilir. Gümüş bakır ve nikel için optik özelliklerin dalgaboyuna bağlı değişimi Tablo 2.2 de verilmektedir.

Sonuç olarak yansıma katsayısı büyük dalgaboyları için iletkenlikle ilişkilendirilerek

$$R = 1 - 2\sqrt{\frac{c}{\sigma\lambda}} \qquad (2.10)$$

biçiminde verilmektedir.

Malzemelerim Termal Özellikler

Termal enerjide artma, mekanik iş (sürtünme), elektriksel iş (direnç, ısıya dayanıklılık), radyasyon veya daha sıcak ortam ile temasla elde edilebilir. Enerji E, iş W ve ısı Q aynı birime sahiptirler ve Joule (J) olarak adlandırılır (1 cal=4,184 J).

Malzemenin sıcaklığı T, derece santigrad(ºC) veya Kelvin (ºK) olarak verilir. Tablo 3 bazı önemli termal özellikleri vermektedir.

Farklı maddeler, verilen sıcaklık aralıklarıyla sıcaklıkları için farklı miktarlarda ısı artışına ihtiyaç duyarlar. Mesela, 1 g suyun 1K sıcaklık artışı için 4,18J gerekir, fakat aynı ısı artışı, 1g bakır için yaklaşık 11 K'dir. Bir başka deyişle, su daha büyük ısı kapasitesine sahiptir. Isı kapasitesinin birimleri J/K (veya cal/K) olarak tanımlanmaktadır. Isı kapasitesi tek olarak tanımlanamaz; en az sistemin toplam ısısı olan durumlarını belirtmek gerekir. Isı kapasitesinin birkaç seçeneğine rağmen, genellikle yalnızca ikisiyle ilgili olması mümkündür. Sabit hacimde ısı kapasitesi $C_V^{'}$ ve sabit basınç altında ısı kapasitesi $C_P^{'}$ olarak tanımlanmaktadır. $C_V^{'}$ en kullanışlı niceliklerden birisidir. Çünkü $C_V^{'}$ sistemin enerjisinden hemen elde edilebilir ve

$$C_V^{'} = \left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_V \qquad (2.11)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Bir başka deyişle, katının ısı kapasitesini sabit basınçta ölçmek sabit hacimdekinden daha kolaydır. Neyse ki, katıları için $C_V^{'}$ ve $C_P^{'}$ arasında fark düşük sıcaklıklarda ihmal edilebilecek kadar küçüktür ve oda sıcaklığında sadece %5 civarındadır. Eğer $C_V^{'}$ niceliği bilinen bir malzemenin hacimsel büyüme katsayısı α ve sıkıştırılabilirliği K ise, V katının hacmi olmak üzere $C_V^{'}$ ve $C_P^{'}$ arasındaki ilişki

$$C_V^{'} = C_P^{'} - \frac{\alpha_2 TV}{\kappa} \tag{2.12}$$

ifadesi ile hesaplanabilir.

Spesifik ısı kapasitesi 'm' kütle başına düşen ısı kapasitesidir ve

$$c = \frac{C^{'}}{m} \tag{2.13}$$

ile tanımlanmaktadır. Bu, malzemeyi tanımlayan bir sabittir ve sıcaklığa bağlıdır. Spesifik ısı kapasitesinin (C_P) tipik değerleri Tablo 4'te verilmektedir.

Sistemin transfer olan termal enerjisi (veya ısısı), kütle, sıcaklık artışı ve spesifik ısı kapasitesinin çarpımına eşittir ve

$$\Delta E = Q = m\Delta T c_v \tag{2.14}$$

ifadesiyle verilmektedir.

Tablo 2.3: Temel Termal Özellikler

Sembol	Tanımlama	Özellik	Birimi (SI)
E	Enerji	Enerji, iş ve ısı birbirlerine eşittir.	$J = kg\,m^2/s^2$
W	İş		$J = kg\,m^2/s^2$
Q	Isı		$J = kg\,m^2/s^2$ (cal)
T	Sıcaklık		ºC yada K
C	Isı kapasitesi	Belirli bir aralıkta dQ olarak verilen ısı miktarı	J/K
C	Spesifik Isı kapasitesi	Birim kütle başına düşen ısı kapasitesi	J/gK
C	Molar Isı Kapasitesi	Birim mol başına düşen ısı kapasitesi	$J/molK$
θ_D	Debye Sıcaklığı	C'nin son değerinin %96 sına ulaşılan sıcaklık	K
J_Q	Isı Akışı	Birim zamanda birim alandan geçen ısı akışı	J/m^2s
K (yada λ)	Termal iletkenlik	Malzemede ısı akışının miktarını tanımlayan sabit	J/msK yada W/mK
α_L	Lineer Genişleme Katsayısı	Sıcaklık artışı ile meyadana gelen genleşmeyi tanımlayan sabit	K^{-1}
α_{th}	Termal difüzyon	Sıcaklığın zamana bağlı uzaysal dağılımını tanımlayan sabit	m^2/s

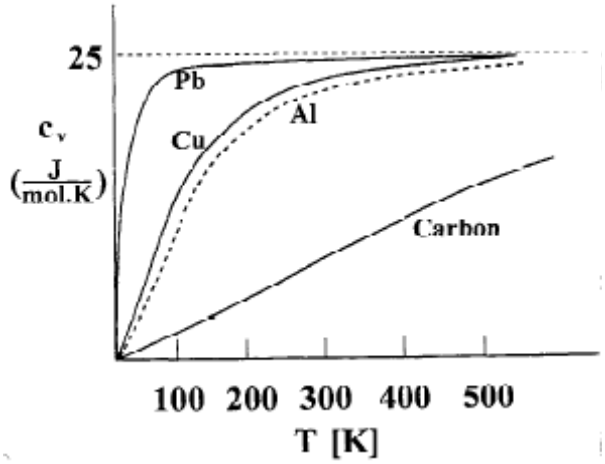
Tablo 2.4: Oda sıcaklığında ve çevre basıncında Bazı Malzemelerin deneysel termal özellikleri

Malzeme	Spesifik Isı Kapasitesi (J/gK)	Molar kütle (g/mol)	Molar Isı Kapasitesi C_p (J/mol K)	Molar Isı Kapasitesi C_v (J/mol K)
Al	0,897	27,0	24,25	23,01
Fe	0,449	55,8	25,15	24,68
Ni	0,456	28,7	26,8	24,68
Cu	0,385	63,5	24,48	23,43
Pb	0,129	207,2	26,85	24,68
Ag	0,235	107,9	25,36	24,27
C (grafit)	0,904	12,0	10,9	9,20
Su	4,184	18,0	75,3	

Bir başka yararlı malzeme sabiti mol başına düşen ısı kapasitesidir. Moleküllerin veya atomların aynı numara içeren malzemeleri karşılaştırır. Molar ısı kapasitesi molar kütleyle, M spesifik ısı kapasitesi Cv (ile Cp) çarpılarak elde edilir.

$$C_v = \frac{C_v'}{n} = c_v M \qquad (2.15)$$

Tablo 2.4, oda sıcaklığında sabit hacimde molar ısı kapasitesinin yaklaşık 25 J/molK olduğunu gösterir. Birkaç malzeme için deneysel molar ısı kapasiteli Şekil 3'de sıcaklığın fonksiyonu olarak gösterilmektedir.



Şekil 3: Bazı malzemeler için molar ısı kapasitesinin C_v, sıcaklığa değişimi.

Karbon gibi bazı malzemelerin sadece yüksek sıcaklıklarda 25 (J/molK)'in üst limitine ulaşmasına dikkat ederiz. C_v'nin limitinin üstüne %96 ulaştığı varsayılan sıcaklık Debye sıcaklığıdır (Tablo 2.5).

Malzemelere bir işlem yapmak için gerekli olan enerjinin malzemeye verilmesi için farklı uygulama yöntemleri vardır. Bu enerji daha çok ısı enerjisi olarak malzemeye verilir ve kontrollü bir biçimde malzemede istenilen şekil değişimi sağlanır. Lazerlerde enerji, ışık enerjisi olarak verilse de malzeme

üzerine etkiyen ışık demetinin taşıdığı ısı enerjisi malzemede istenilen etkiyi yapar. Bir malzeme için ısı transferi üç yolla sağlanır;

- İletim
- Konveksiyon
- Işınım

olarak sıralanabilir.

Tablo 2.5: Bazı Malzemelerin Debye Sıcaklıkları

Malzeme	θ_d (K)
Pb	95
Au	170
Ag	230
W	270
Cu	340
Fe	360
Al	375
Si	650
C	1850
GaAs	204
InP	162

Isı İletimi

İletim, ısının malzeme içerisinde atomdan atoma iletilmesidir. Malzemeler için bu iletim miktarı ısı iletim katsayısı ile ifade edilir. Her malzemenin farklı ısı iletim katsayıları vardır. Metaller iyi bir ısı iletimine sahiptirler. Isı iletimi malzemeye uygulanan ısının her metrede meydana getirdiği sıcaklık artışı olarak da ifade edilebilir. Isı iletim katsayısının (k) birimi W/(m_x.ºC) dir. Burada W: malzemeye uygulanan güç birimi (Watt), m: malzeme boyu (metre), ºC: metalde meydana gelen sıcaklık artışı (santigrat)tır. Isı iletim katsayısı, metallerin saflık derecesi, hacimsel biçimi ve bulunduğu ortamın sıcaklığına bağlı olarak değişen bir katsayıdır. Metallerin sıcaklıkları arttıkça söz konusu katsayının değeri de artar, saflığı bozuldukça bu değer azalır.

Metallerin ısı iletimleri belli bir ölçüde elektrik akımını iletebilmelerine de bağlıdır. Elektrik akımını iyi ileten malzemelerin ısı iletim katsayıları da çoğunlukla iyidir. Tablo 2.6 bazı metallerin ısı iletim katsayısı, elektrik geçirgenliğini bu iki değerin uyumunu göstermektedir.

Tablo 2.6: Metallere ait ısı iletkenlik ve elektriksel iletkenlik sayıları

Metal cinsi	Isıl iletkenlik (W/mºC)	Elektriksel iletkenlik (Ω/m)
Gümüş	106	108
Bakır	100	100
Alüminyum	62	56
Çinko	29	29
Nikel	25	15
Demir	17	17
Çelik	13–17	13–17
Kalay	15	17
Kurşun	8	8

Isı iletiminin metaller arasındaki farklılığını ve malzemeye etkisini bir örnekle anlamak bakımından, 1 kg bakır ve çeliği 0 ºC'den erime noktasına ulaştırmak için gerekli ısı enerjisini hesaplarsak;

$Q_{bakır} = m.c.\Delta t$
$Q_{bakır} = 1x0.39x10^3x1083$
$Q_{bakır} = 0.422x10^6$ J.

$Q_{çelik} = m.c.\Delta t$
$Q_{çelik} = 1x0.45x10^3x1400$
$Q_{çelik} = 0.63x10^6$ J.

sonuçlarını elde ederiz.

Formülde; Q: Enerji miktarı, m: Malzemenin kütlesi, Δt: Sıcaklık artış miktarıdır. Görüldüğü gibi, aynı kütledeki bakır ve çeliği erime noktalarına ulaştırmak için çeliğe daha çok ısı verilmesi gerekir. Isı iletkenliğinin daha iyi anlaşılması için verilen yukarıdaki iki metalden bakır, ısı iletkenliği açısından çeliğe nazaran altı kat daha yüksek bir ısı iletkenliğine sahiptir.

Isı iletkenliğinin olumlu ve olumsuz etkileri malzemelere göre değişmektedir. Bir bakır levhanın yalnızca küçük bir kısmı eritilmek istenirse,

bakır yüksek bir ısı iletkenliğine sahip olduğu için malzemenin tamamı erime noktasına ulaşamayacağından ısının uygulandığı alanda erimeyecektir. Çelik içinse durum tam tersidir. Isı iletim katsayısı daha düşük olan çelik tamamı erime noktasına ulaşmadan eriyecektir. Bu nedenle ısı iletim katsayısı yüksek malzemelerin bir kısmını eritmek için aynı hacim ve kütledeki ısı iletim katsayısı düşük diğer malzemelere uygulanması gereken ısıdan daha çok ısı uygulamak gerekir.

2.4. Erime veya Buharlaşma Olmadığı Durumda Sıcaklık Değişimleri

Radyasyon yansıtılmayıp, madde tarafından α soğurma katsayısına bağlı olarak bir oranda soğurulur. İlgi duyulan çoğu maddeler için α soğurma katsayısı oldukça büyüktür ve radyasyon soğurulması olayının yüzeye çok yakın meydana geldiği tahmin edilmektedir.

Eğer birim alan başına ısı akış oranı H(=I(1-R_s)) olarak alınırsa, bu durumda ısı akışı başladıktan sonra herhangi bir t anında yüzeyin içinde bir z derinliğindeki ısı artışı

$$T(z,t) = \frac{2H}{K}(xt)^{1/2} ierfc\left(\frac{z}{2(xt)^{1/2}}\right) \tag{2.16}$$

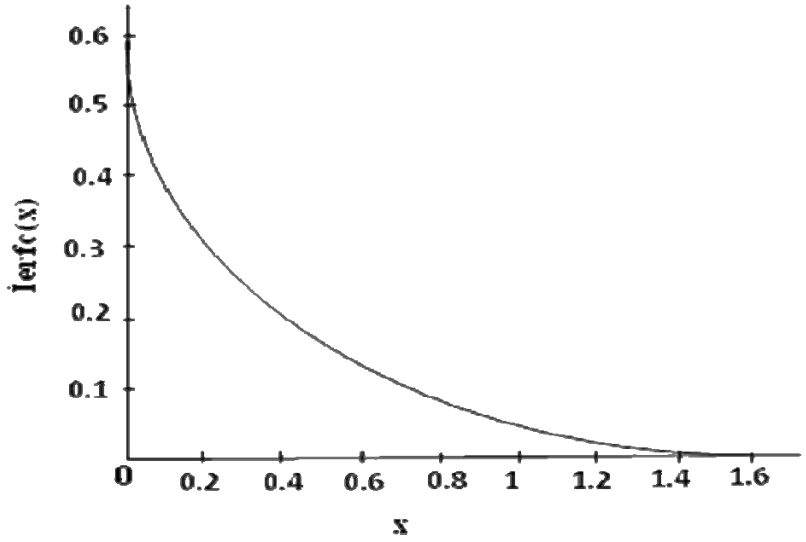
ifadesiyle verilmektedir. İerfc fonksiyonu

$$\text{İerfc(x)} = \frac{1}{\sqrt{\pi}}\left\{\exp(-x^2) - x(1 - erf(x))\right\} \tag{2.17}$$

ile verilmektedir. Burada

$$\text{erf(x)} = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^x e^{-\xi^2} d\xi \tag{2.18}$$

biçiminde bir fonksiyondur.



Şekil 2.3: ierfc(x) fonksiyonunun grafiği

K termal iletkenlik (burada sıcaklıktan bağımsız olarak kabul edilir) ve x termal yayınganlık (yani $K/\rho c$, burada ρ madde yoğunluğu ve c maddenin spesifik ısı kapasitesi).

İerfc(x) fonksiyonu muhtemelen aşina olunan fonksiyonlardan bir tanesi değildir (erf(x), hata fonksiyonu olarak adlandırılır ve belki daha iyi bilinen bir fonksiyondur). Bu fonksiyonun yapısı Şek.2.3 ile verilmektedir. x>1 olduğunda, ierfc(x) fonksiyonunun değeri relatif olarak küçülmektedir ve böylece denk. (2.17) ifadesinde $z^2>4xt$ olduğunda

$$\frac{z}{2(xt)^{1/2}} > 1$$

olur. Bu durumda, ısı artışı oldukça küçük olacaktır. Böylece, τ boyutunda bir zamanda ısının bir L mesafesine yayılacağı söylenebilir. Burada

$$\tau = L^2/4x \qquad (2.19)$$

olarak belirlenir.

Yüzey ısısının zamanla değişimi, denk.(2.17) ifadesinde z = 0 koyarak kolayca elde edilebilir. Denk(2.19) ifadesi ierfc(0) = $1/\sqrt{\pi}$ olduğundan

$$\Delta T(0,t) = \frac{2H}{K}\left(\frac{xt}{\pi}\right)^{1/2} \qquad (2.20)$$

elde edilir. Yüzey sıcaklığının sadece ısının sabit bir şekilde beslenmesiyle belirli olmayan bir şekilde artacağını görürüz. Daha gerçekci bir durum, ısının sonlu bir t_p zamanı için beslendiği ve daha sonra kesildiği durumdur. Bu durumda $0<t<t_p$ zamanı için sıcaklık artışı denk(2.17) ifadesine özdeş olacaktır. $t > t_p$ için sıcaklık artışı

$$T(z,t)_{t>t_p} = \frac{2H\,x^{1/2}}{K}\left[t^{1/2}\,ierfc\left(\frac{z}{2(xt)^{1/2}}\right) - (t-t_p)^{1/2}\ \text{ierfc}\left(\frac{z}{2\left(x\left(t-t_p\right)\right)^{1/2}}\right)\right] \qquad (2.21a)$$

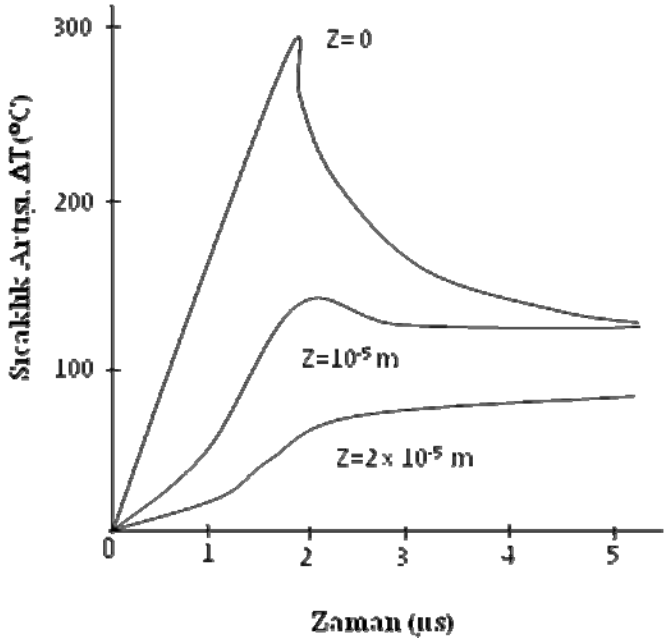
ile veya kompakt bir şekilde

$$\Delta T(z,t)_{t>t_p} = \Delta T(z,t) - \Delta T(z,(t-t_p)) \qquad (2.21b)$$

ile verilmektedir. Denk(2.17) ve (2.21) ifadelerinin bir gösterimi olarak Şekil(2.20), bakır malzemenin 10^{-6}s süresince 10^{10} W/m^2 büyüklüğünde sabit yoğunluklu bir ısı pulsuna maruz kaldığında çeşitli derinliklerde zamanla hesaplanan sıcaklık değişimleri gösterilmektedir. En belirgin noktalar yanlızca yüzeyin en yüksek ısı değişimlerine maruz kalması değil aynı zamanda sıcaklığının puls biter bitmez hızlı bir şekilde düşmeye başlamasıdır.

Tabiki burada gözönüne alınan basit modeli daha realistik yapmak için bazı düzenlemeler söz konusudur. Örneğin Odaklanmış lazer demetinin etkisini daha kesin bir şekilde kopye etmek için madde yüzeyinde ısı enerjisinin uniform olarak dağılmadığını gözönüne almalıyız. İlk yaklaşım olarak ısı enerjisinin a yarıçaplı bir alanda üniform bir şekilde dağıldığını düşünebiliriz. Birim alan başına düşen ısı enerjisinin aynı değeri için uniform ısınma modeliyle verilenden daha küçük ısı değişimleri bekleyebiliriz çünkü şimdi ısı enerjisi madde içerisine

doğru olmakla beraber kenarlara doğruda yayılmaktadır. Isıtma başladıktan sonra bir t anında z derinliğindeki ısı artışı



Şekil 2.4: Yarı sonsuz bir bakır blokun 1μs süresince sabit bit $10^{10}Wm^{-2}$ mertebesinde bir radyasyona maruz bırakıldığında yüzeyden z derinlikte zamanla ısı değişimi görülmektedir.

$$\Delta T(z,t) = \frac{2H(xt)^{1/2}}{K}\left[\text{ierfc}\left(\frac{z}{2(xt)^{1/2}}\right) - \text{ierfc}\left(\frac{(z^2+a^2)^{1/2}}{2(xt)^{1/2}}\right)\right] \qquad (2.22)$$

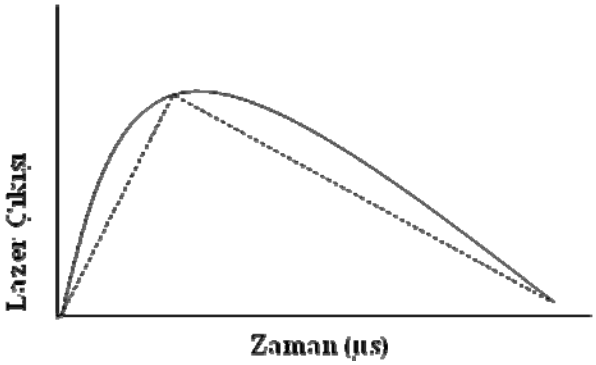
ile verilmektedir. Bu ifadenin sağ tarafındaki ikinci terimin ısının kenarlara doğru yayılması için ele alınması gerektiği açıktır. Spot merkezindeki yüzey ısısı z=0 konularak, yani

$$\Delta T(0,t) = \frac{2H(xt)^{1/2}}{K}\left[\frac{1}{\pi^{1/2}} - \text{ierfc}\left(\frac{a}{2(xt)^{1/2}}\right)\right] \qquad (2.22a)$$

ile elde edilmektedir. Gerçekte bu ifade sadece

$$i\mathrm{erfc}\left(\frac{a}{2(xt)^{1/2}}\right) << 1 \text{ veya } t << a^2/4x$$

olduğunda uniform ısıtmanın olduğu durumdakine hemen hemen özdeş sonuçlar verir. Böylece, $a^2/4x$ niceliği anlamlı bir radyal ısı iletiminin olması için geçen süreyi ifade etmektedir. $a^2/4x$ tipik olarak mili saniye mertebesindedir.



Şekil 2.5: Bir lazer çıkışının lazer pulsu boyunca tipik değişimi. Bu bir üçgen yaklaşımına tabi tutulabilir.

Çok uzun bir ısıtma süresi ($t \to \infty$ alarak) için denk (2.22) ifadesinin

$$\Delta T(z,\infty) = \frac{H}{K}\left[\left(z^2 + a^2\right)^{1/2} - z\right] \qquad (2.22b)$$

sonucuna indirgendiği görülebilir. Böylece, ulaşılabilecek en yüksek yüzey ısı artışı

$$\Delta T(0,\infty) = Ha/K. \qquad (2.22c)$$

ile verilmektedir. Diğer üniform olmayan yüzey ısınma dağılımlarının etkisi (örneğin Gaussian veya dikdörtgen dağılımlar) de hesaplanabilir; bununla beraber genelde sonuçlar denk (2.22) ile verilenden çok farklı değildir.

2.5. Erime Derinlikleri

Denk(2.20), ısının bir yüzeye uygulanma zamanının sınırlandığını görmekteyiz. Bu yüzeyin sıcaklığı belirsiz bir şekilde artmaya devam edecektir. Pratikte yüzey sıcaklığı maddenin erime noktasına ulaşıncaya kadar yükselecektir ve böylece ısı/katı etkileşim yüzeyi madde içerisine hareket edecektir. Devam eden ısıtma işlemi yüzeyin sıcaklığını buharlaşma noktasına bile getirebilir. Eritmenin pratik uygulaması lazer welding (erime veya kaynatma) olarak bilinmektedir ve burada esas ilgi noktası yüzey buharlaşmasının başlamasından önce ulaşılabilen sıvı bölgenin nüfuz derinliğidir. Erimenin meydana gelmesinde bile maddeyi bir tek (katı) fazmış gibi inceleyebiliriz. Denk (2.17) ve (2.20) ifadelerinden iç noktaların yüzey sıcaklığına t anındaki oranının

$$\frac{\Delta T(z,t)}{\Delta T(0,t)} = \pi^{1/2}\,\text{ierfc}\left(\frac{z}{2(xt)^{1/2}}\right). \tag{2.23}$$

olduğunu görürüz. Yüzey tam kaynama noktasına ulaştığında, maddenin erime noktasına ulaştığı derinliği hesaplamayı arzularız. Böylece $\Delta T(z,t) = T_m$ (erime noktası) ve $\Delta T(0,t) = T_b$ (kaynama noktası) kullanılarak yüzey erimesinin maksimum nüfuz derinliği, z_m,

$$T_m / T_b = \pi^{1/2}\, ierfc\left(\frac{z_m}{2(xt)^{1/2}}\right) \tag{2.24}$$

ifadesinin çözümünden bulunur. Denk(2.20) ifadesinden

$$(xt)^{1/2} = \frac{T_b K \pi^{1/2}}{2H} \tag{2.25}$$

elde edilir. Böylece Z

$$\text{ierfc}\left(\frac{Hz_m}{KT_b\pi^{1/2}}\right) = \frac{T_m}{\pi^{1/2}T_b} \tag{2.26}$$

çözümünden elde edilmektedir. Değişkenler sadece H ve Z_m olduğundan verilen bir durum için HZ_m çarpımı belirlenir. Böylece, geniş bir erime (welding) derinliği uzun süre uygulanan düşük bir ısı yoğunluğuyla verilmektetir.

Tablo 2.5 Bazı malzemelerin bazı ısıl özellikleri

Madde	**Isı İletkinliği**	**Isı Yayılganlığı**	**Özel Isı Kapasitesi**	**Yoğunluk**	**Erime Noktası**	**Kaynama Noktası**	**Buharlaşma Isısı**
Aliminyum	238	97.3	903	2710	932	2720	10.90
Bakır	400	116.3	385	8960	1356	2855	4.75
Demir	82	23.2	449	7870	1810	3160	6.80
	45	13.6	420	7860	1700		
Paslanmaz Çelik (304)	16	4.45	460	7818	1700		
Nikel	90	22.8	444	8900	1726	3110	6.47
	418	169	235	10500	1234	2466	2.31
Seramik	29	9.54	800	3800	2300		
	0.2	0.11	1500	1190	350		
Silikon	170	103	707	2330	1680	2628	10.6

Denklem (2.7) ifadesini çözmek için ilk olarak x sayısını belirleriz. Burada ierfc(x) $= (1/\sqrt{\pi})x0.413$ veya 0.232 dir. Şekil 2.3 'den x = 0.44 olduğunu görürüz ve

$$H = \frac{KT_b \pi^{1/2} x}{Z_m} \qquad (2.27)$$

olduğundan, sonuç olarak H= $8x10^9$ W/m^{-2} elde ederiz.

2.6 Buharlaşma Derinliği

Eğer lazer demet şiddeti madde sıcaklığını erime noktasına ulaştıracak şekilde yoğun ise yüzey maddesinin anlamlı bir miktarı yüzeyden uzaklaştırılabilir. Uzaklaştırma oranı basit bir enerji dengesi kullanılarak tahmin

edilebilir. Önceki gibi yüzeyin birim alanına H ısı akış oranıyla yarı-sonsuz bir katıyı gözönüne alırız. Buharlaşma nedeni ile madde yüzeyinin V_s hızıyla içeri doğru ilerlediğini kabul edelim. Böylece birim zamanda maddenin $V_s \rho$ ya eşit kütlesi uzaklaştırılacaktır. Şimdi T başlangıç sıcaklığında m kütleli bir maddeyi buharlaştırmak için gerek duyulan toplam enerji miktarını

$$E_v = m(C_s(T_m-T) + C_L(T_v-T_m) + L_f + L_v),$$

biçiminde yazalım. Burada

C_s: Katının spesifik ısı kapasitesi
C_L: Sıvının spesifik ısı kapasitesi
T_m: Erime noktası
T_v: Buharlaşma noktası
L_f: Aktif yayılma ısısı
L_v: Aktif buharlaşma ısısı

Eğer sıcaklık C° cinsinden verilir ise, daima $L_f << L_v$ ve $T << T_v$ ve $C_s \cong C_L = C$ alabileceğimizi kabul edelim. Böylece, V_s yüzey hızını desteklemek için gerek duyulan ısı akışı

$$H = V_s \rho (CT_v + L_v)$$

ile verilmektedir.

2.7. Malzeme İşleme Uygulamaları

Bu bölümde lazerleri termal enerji kaynağı olarak gözönüne alıyoruz. Bununla beraber lazer demetinin çok küçük bir spot hacmine odaklanmasına imkan veren yüksek uzaysal koherenslikde önem kazanmaktadır. Metallerin kesilmesi için, özellikle metaller için lazer uygulamaları diğer metodlardan daha çok ilgi çekmektedir.

Elbetteki lazerler gibi bir alternatif teknik bulunmadığından, lazerlerle delme, kesme ve eritme işlemi yapmak mükemmel bir şekilde mümkün

olmaktadır. Daha geleneksel tekniklerle mukayese edildiğinde, lazerler birçok avantaj sağlamaktadır. Örneğin;

(1) Lazer radyosyonu çok temiz bir enerji biçimidir. Bu enerji biçiminde üzerinde çalışılan numuneyi bulaştıracak herhangi bir yabancı madde bulunmamaktadır. Gerçekte çalışma ortamı özel bir amaca yönelik olarak kontrol altında tutulabilir.

(2) Yüksek uzaysal koherensliği nedeni ile lazerler çok küçük alanlara odaklanabilirler. Bu yoğun bölgesel ısıtma komşu alanları etkilemeksizin gerçekleştirilebilmektedir.

(3) Işık demeti için yoğunluk kontrolü bağıl olarak oldukça kolaydır.

(4) Demet ulaşılması zor olan noktalara kolaylıkla yönlendirilebilmektedir. Lazer ışını şeffaf pencerelerden kolayca geçirilebilir ve keskin köşelerden diğer taraflara yönlendirilebilir.

(5) Lazer enerjisinin büyük bir kısmı hedef yüzeye toplanabilmektedir. Böylece yüzeydeki hafif çukur bölgeler genişleme etkisine maruz kalmaksızın incelenebilmektedir.

Maddeler üzerindeki işlemler için en çok kullanılan iki lazer tipi Nd: YAG ve CO_2 lazerleridir. Daha kısa çalışma dalga boyuna sahip olması nedeni ile bazı alanlarda Nd: YAG lazerler birçok avantaja sahiptirler.

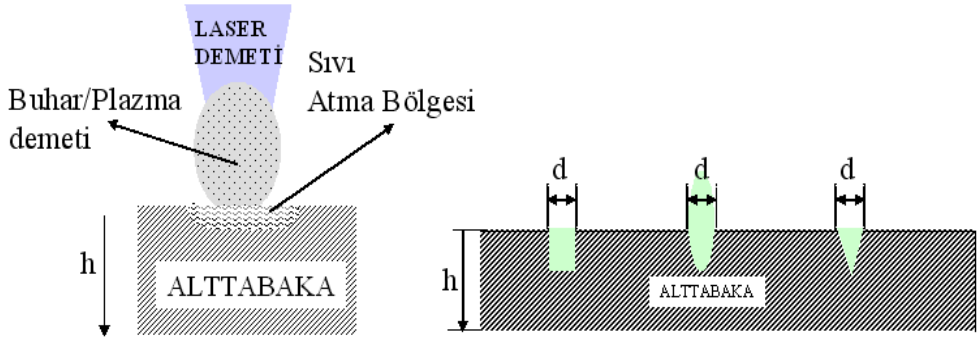
2.8. Laser Ablasyon Süreci

Kısa ve yoğun laser pulslarının ortaya koydugu yüzeyden malzeme uzaklaştırma işlemi genel anlamda puls lazer ablasyonu olarak tanımlanmaktadır. Yüzeyden malzeme uzaklaştırma süreci dengeden uzak gerçekleşen bir süreçtir ve termal veya termal olmayan mekanizmalara dayanmaktadır. Madde ablasyonu kısa süreli lazer pulsları ile yapılan basit bir işlemdir ve puls lazer ablasyonu, puls süresince ablate edilen hacmin dışına enerjinin harcanmamasını sağlayan bir uygulamaya imkan vermektedir. Toplam enerjinin ablasyon bölgesinde harcanması nedeniyle birçok lazer teknolojisinde lazerle ablasyona uğrayan bölgede katı plazma etkileşmesinde bazı problemler meydana gelir. Bunlardan bazıları lazer enerjisinin soğurulması, erime bölgesindeki hidrodinamikler, erimiş

parçacıkların sıçraması, buharlaşma, lazer enerjisinin soğurulması sonucu plazma ısınması ve iyonlaşması olarak sıralanabilir.

Dolayısıyla, sökülen bu numuneler iyon veya nötral formda olabilir. UV lazer uyarımlı ablasyonun ilk gözlemleri 1982 yılından daha öncelerine uzanır ve geleneksel çözünme teknikleriyle mukayese edildiğinde birçok avantaja sahip olmasının yanı sıra kavramsal olarak basit ve anlaşılır bir yöntemdir. Literatürden, lazer-destekli buharlaştırma ve malzeme sökme işlemlerinin endüstri, teknoloji, bilimsel çalışmalar ve sağlık uygulamalarında sık sık kullanıldığı iyi bilinmektedir. Yüzeyden malzeme sökme işlemi termal ve termal olmayan mekanizmalara dayanmaktadır. Dolayısıyla lazer ablasyon terimi sürece katılan termal süreçler içerisinde önemli bir model ortaya koyması bakımından ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Pulslu lazer ablasyon, puls süresince ablasyona tabi tutulan hacmin dışına uyarma enerjisinin harcanmasını engelleyecek bir mekanizma sunar. Pulslu lazer ablasyon temel olarak termal, fotofiziksel ve fotokimyasal ablasyon şeklinde üç katogoriye ayrılmaktadır ve bu mekanizmalar lazer akısına bağlıdır (Bäuerle, 1996).

Şekil 2.6, lazer demetinin yüzeyle etkileşme mekanizmasını ve yüzey işleme dinamiklerini göstermektedir. Şekle baktığımızda lazer ablasyon yöntemiyle yüzeyden sökülen numune gaz formdadır ve bu buhar yapı klastır, molekül, atom, iyon ve elektronlardan oluşmaktadır.



Şekil 2.6: Lazer demetinin yüzeyle etkileşme mekanizmasının ve yüzey işleme dinamiklerinin şematik gösterimi.

Yüzeyden ayrılan numune kinetik enerji ve en sonunda termal enerji kazanır. Bir katıdan bir atom sökmek için gerekli bağlanma enerjisi

$$\Delta H^{a}\left[J/atom\right] = \Delta H\left[J/g\right]/N_s \approx \Delta H_v\left[J/g\right]/N_s$$

dir. Burada ΔH_v buharlaşma entalpisi, $N_s = L/M(atom)$ sayı yoğunluğu, L Avogadro sayısı, M mol başına atom ağırlığıdır. Birkaç atomdan oluşan parçalar ya da klastırları buharlaştırmak için gerekli ortalama enerji daha küçüktür.

Yüzeyi terk eden termalize edilmiş olan numuneler yüzeyden birkaç mikron uzaklaşır (Bäuerle, 1996). Genellikle yoğunluk yeterince yüksek ise, lazer üretimli parçacıklar karşılıklı çarpışmalara uğrarlar ve dolayısıyla gaz dinamik genişleşmesi yoluyla bu çarpışmaların aldığı ortalama yol bölgesi Knudsen tabakası olarak adlandırılır. Plazma bulutunun genleşmesi ve biçimi akıcılığa bağlı olduğundan bu çarpışmalar, artan akıcılık ile açısal dağılımın bir daralmasına neden olurlar (Rubahn, 1999; Bäuerle, 1996). Buhar bulutunun eksenel doğrultusundaki büyük sıcaklık ve basınç gradyenti demetin dost doğru ileri gitmesine sebep olur. Knudsen tabaka ilerisindeki buhar genişlemesi adyabatik olarak genişleyen bir gaz ile tanımlanır. Bulut içerisindeki sıcaklık yüzeyden uzaklaştıkça azalır. Vakum içerisinde, genleşme hızı belli bir hacme kadar zamanla artar. Bir ortam gazı varlığında, genleşen gaz hızı belli bir noktada maksimuma ulaşır ve daha sonra düşmeye başlar. Bu hidrodinamik tanımlamada dengede olmayan etkiler dikkate alınmaz. Bu durum yüksek yoğunluklu pulslu lazer durumunda önemli bir hale gelmektedir (Bäuerle, 1996).

Oluşan buhar bulutu, gelen lazer radyasyonunu soğurur ve saçar (Bäuerle, 1996). Plazmanın soğurma katsayısı lazer dalga boyuna bağlıdır (Russo et al., 2002). Tipik olarak plazma soğurması daha uzun dalga boylarında daha büyüktür (Liu et al., 1999; Russo et al., 2002). Bundan dolayı buhar içindeki lazer soğurması önemlidir ve bu soğurma hedefe ulaşan lazer ışınını (enerji akısını) azaltır ve ayrıca yüksek yoğunluklu plazma oluşturmak için buhar içinde ısınmaya ve iyonlaşmaya neden olur. Buhar iyonlaşmasına ve ısınmaya neden olan lazer

soğurma hedef yüzeyle yoğunlaşmış plazmayla birlikte göz önüne alınır (Lunney and Jordan, 1998). Yüksek gaz basıncında buhar, artan buhar yoğunluğunda ve şok dalga arkasındaki daha yüksek sıcaklıklardan dolayı daha kolay bir şekilde iyonize edilir (Pinho, 1998). Plazma içindeki iç basınç hedef yüzeyden uzak bir yerde plazmanın hızlı genleşmesini sağlar. Bu iç basınç, yoğunluğu ve sıcaklığı azaltma eğilimlidir (Lunney and Jordan, 1998).

Bulutun gaz dinamikleri üzerine yapılan son çalışmalar ablasyona daha iyi gerçek-zaman anlayışı ve hedeften alttabakaya maddenin aktarım sürecinin daha iyi anlaşılmasını sağlar (Di Palma et al., 1995). Bulut içinde parçacıklarla ortam gazının çarpışması daha yüksek salma şiddeti ve elektronik ve iyonik uyarmanın artmasına neden olur. Bu olaylar bulutun daha küçük bir hacim içerisinde tutulması ile belirlenir. İlave gazın varlığında ortalama ön hız yaklaşık olarak bulut içindeki tüm nötr parçacıklar için aynıdır (Di Palma et al., 1995). Her ne kadar stokiyometri çeşitli bileşenlerin yapışma katsayılarına veya geri reaksiyonuna bağlı olsa da bu aynılık, deposit edilen ince film üzerine hedefin stokiyometrisini korumaya olanak sağlar (Kelly and Dreyfus, 1988). Vakum içerisinde ve genleşmenin son aşamalarında hızlar kütleye bağımlı olduklarından durum farklı olur ve çeşitli numuneler ortak bir bulut genleşmesine sahiptir (Di Palma et al., 1995).

Pulslu lazer ablasyon temel olarak termal, fotofiziksel ve fotokimyasal ablasyon şeklinde üç kategoriye ayrılmaktadır (Bäuerle, 1996) ve bu mekanizmalar lazer akısına bağlıdır (Di Palma et al., 1995).

Termal (pyrolitik) ablasyon lazer-uyarımlı ısıtma ve buharlaşmaya dayalı bir süreçtir. Bu sistemde uyarma enerjisi kaybı çok hızlıdır ve detaylı uyarma mekanizmaları ilgisiz bir hal almaktadır.

Fotofiziksel ablasyon sisteminde, termal olmayan uyarımlar doğrudan ablasyon oranını etkiler. Bu sistemde, elektron-deşik çifti, elektronik olarak uyarılmış numuneler enerji transferinden önce yüzeyi terk eder.

Fotokimyasal (fotolitik) ablasyon sistemi, hem foto çözüşme hem de bozukluk veya safsızlıkları üzerinde dolaylı enerji transferiyle termal olmayan bağ kırılması sistemine dayanmaktadır (Bäuerle, 1996).

Bu üç katogoriye ilaveten termo- ve foto-mekanik ablasyon mekanizmaları da zikredilebilmektedir. Basınçların sebep olduğu ablasyon mekanik ablasyon olarak tanımlanır. Bu basınçların termal etkilerden (termal genleşme, buharlaşma, termal olarak üretilmiş bozukluklar, vs.) kaynaklandığında *termomekanik* ablasyon, termal olmayan etkilerden (direk bağ kırılmasından kaynaklanan genleşme, termal olmayan bozukluk oluşumu, vs.) kaynaklandığında *fotomekanik* ablasyon olarak tanımlanır.

Kısa-yoğun pulslu lazer ablasyonuna tabi tutulan maddelerin hemen hepsinden, lazer akıcılığının (fluence) bir $\phi = \phi_{eşik}$, $\phi < \phi_{eşik}$ ve $\phi > \phi_{eşik}$ katogorilerine ayrılabildiği iyi bilinir (Bäuerle, 1996).

Lazer akıcılığı eşik değerinin altında olduğunda ($\phi < \phi_{eşik}$), malzeme sadece termal olarak ablate edilir. Yüzey hasarının/ablasyonun farklı bölgelerine karşılık gelen lazer akıcılıkları özel maddeye ve lazer parametrelerine bağlıdır. Enerji soğurmadaki bir artış eşik akıcılığında bir azalmaya neden olur. Böylece çok-puls ablasyon için ϕ_{th} , tek-puls belirli birçok pulsdan sonra başlar. Soğurma gibi yansıtma katsayısıda değişen geçici elektron yoğunluk dağılımından dolayı puls süresince değişir (Choi and Grigoropoulos, 2002; Bäuerle, 1996).

Diğer karakteristik özellik, τ_ℓ darbe süresi ile ϕ_{th}'deki azalışdır. Daha kısa puls ile uzaysal uyarma enerjisi kaybı azaltılır ve ϕ_{th}'e daha düşük akıcılıklarda ulaşılır. Bu gözlem hem ısı nüfuz derinliğindeki azalmaya hem de lineer olmayan uyarım nedeniyle soğurma katsayısındaki artış ile ilişkilendirilebilir. Eşik akcılığı üzerindeki lineer olmayan optik uyarımların etkisi özellikle geniş band-aralıklı metaller veya optiksel olarak güçlü lineer olmayan metaller için önemli olur (Bäuerle, 1996).

Metaller üzerindeki nanosaniye lazer pulsları için lazerin nüfuz derinliği ısı difüzyon derinliğinden çok daha azdır. Dolayısıyla lazerden gelen radyasyon

enerji akısı, yüzeyde bir kaynak terim olarak incelenebilir. Lazer akısı arttıkça ablasyon derinliği artar, fakat plazma içerisinde soğurması olmazsa ablasyon derinliği daha da artar (Lunney and Jordan, 1998).

Ablasyon oranı ya lazer puls başına ablate edilen tabaka kalınlığı ya da puls başına ortalama ablasyon hızıyla belirlenmektedir. Ablasyon oranı foton enerjisi, lazer akıcılığı ve odak noktasındaki demet genişliği, ısı veya optik işleme derinliği, buharlaşma entalpisi, iç basınç gibi parametrelere bağlıdır. Olukların genişliği lazer pulslarının sayısından bağımsızdır, fakat artan akıcılık ile artar. Odaklanan lazer demeti ablasyonun gerçekleştiği noktada belli hacimden madde uzaklaşmasına sebep olur ve kullanılan puls sayısı etkinin derinliğini arttırır-genişliğini etkilemez, fakat lazer akıcılığı etkinin genişliği üzerinde oldukça etkin bir parametredir. Bunun yanı sıra, odak noktasındaki spot hacmi (2ω) oluşturulan desenin genişliğini ve plazma demetinin genişlemesini belirlemektedir.

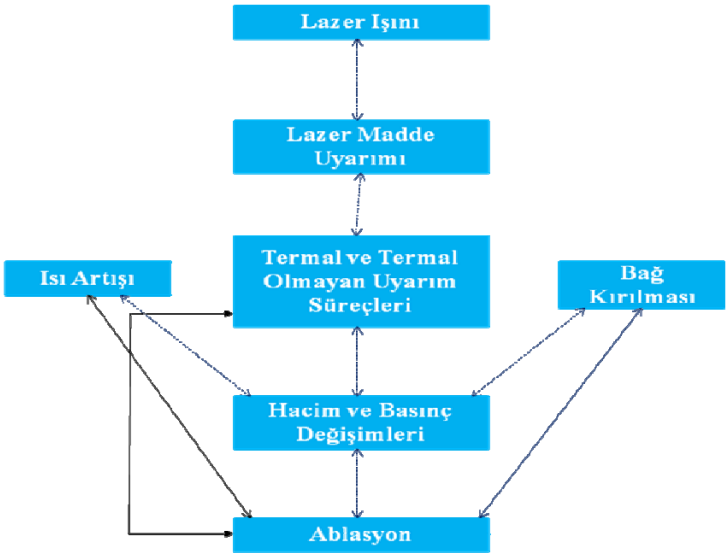
Ablasyon oranları daha küçük spot boyutları için daha yüksekdir. Yaklaşık 80 μm'lik bir "doyum (saturation)" değeri üzerinde ablasyon oranı ω'den bağımsız olur. ω'e göre ablasyon oran bağımlılığı nanosaniye veya daha kısa lazer pulsları kullanıldığı zaman birçok madde için gözlendi. Bu etki, genişleyen plazma bulutu içerisinden geçen lazer radyasyonunun zayıflamasından kaynaklanır (Bäuerle, 1996).

Ablasyon süreci tarafından sebep olunan hasarın tipi ve derecesi, lazer parametrelerine ve malzemenin özel mikroyapısı, safsızlığı, iç basıncı, vs. özelliklerine bağlıdır. Çoğu durumda madde hasarı ya lazer dalga boyuna veya madde katkılama yoluyla artan soğurma gücü ile yada/ve azalan lazer puls genişliği ile azaltılabilir. Böylelikle hasarlı bölgenin genişliği soğurulmuş lazer enerjisinin yerini belirleme derecesiyle ve bu nedenle ısı difüzyon uzunluğu ve optik işleme derinliği ile ilişkilidir (Bäuerle, 1996).

Uygulamalarda önemli bir diğer nokta, ablasyona maruz kalan yüzeyin düzgünlüğüdür. Birçok madde üzerinde yapılan uygulamaların sonuçlarına göre akıcılık hemen $\phi_{eşik}$ değerinin üzerinde ise kabaca bir yüzey deseni elde

edilebilmekte, ancak daha yüksek akıcılıklar veya daha kısa pulslarla daha düzgün işleme yapılabilmektedir. Bu sonuçlar ise UV veya görünür bölgede kısa pulslu lazerlerin uygulama önemini net bir şekilde ortaya koymaktadır (Bäuerle, 1996).

Ortam atmosferi de ablate edilen yüzeyin fiziksel ve kimyasal özelliklerini değiştirebilir. Reaktif atmosfer, ablate edilen yüzeyin kimyasal bileşimini değiştirebildiğinden pulslu-lazer depozisyonuda özellikle önemlidir. Reaktif olmayan atmosfer ise numunelerin aktarımını, ablasyon oranını ve çöküntü oluşumunu etkiler (Luk'yanchuk et al., 1993).



Şekil 2.7: Lazer ablasyonda muhtemel süreçler

Ablasyon mekanizması bütün bu dinamiklerin ışığında Şekil 2.7'de verilen diyagramda özetlenebilmektedir.

Ablasyon süreci tek veya çok fotonlu uyarma işlemiyle başlamaktadır. Uyarma enerjisi ani bir şekilde ısıya dönüşmektedir. Isıdaki artma maddenin optik özelliklerini ve dolayısıyla soğrulan lazer gücünü değiştirmektedir. Termal alan ve optik özellikler arasındaki bu çiftlenim (bağlantı) çift taraflı ok ile şekilde

gösterilmektedir. Isı artışı yüzeyde erime meydana getirerek veya erime olmaksızın (termal) madde ablasyonu (buharlaşma) sonucunu doğurur.

Diyagramdaki diğer bir mekanizma da kesikli çizgilerle belirtilmektedir. Bu mekanizmalarda, sıcaklık artışı, patlama tipi bir ablasyonun meydana geldiği basınçları uyarır. Basınçlarda yine maddenin optik özelliklerini ve lazerin sebep olduğu sıcaklık artışını değiştirir. Bu durumda termal etkilerden kaynaklanan bozukluklar da oluşabilir.

Eğer foton enerjisi yeterince büyükse, lazer uyarma işlemi direk bir bağ kırılmasına sebep olabilir. Bunun sonucunda tek atom, molekül, klastır veya parçalar yüzeyden sökülebilir. Bunun yanı sıra, fotokimyasal olarak ayrışmış olan bağlarda olduğu gibi ışıkla uyarılan deformasyonlar ablasyonla sonuçlanacak baskılar (mekanik ablasyon) ortaya koyabilir. Bu direk ve dolaylı mekanizmaların her ikisi de yüzey sıcaklığında herhangi bir değişiklik meydana getirmeksizin gerçekleşebilir. Dolayısıyla bu süreç fotokimyasal ablasyon olarak adlandırılmaktadır.

Hem termal hem de termal olmayan mekanizmaların toplam ablasyon oranına katkı yaptığı süreç fotofiziksel ablasyon olarak tanımlanır. Dolayısıyla, termal ve fotokimyasal ablasyon süreçleri fotofiziksel ablasyon sürecinin iki özel durumudur.

Özet olarak uzun dalga boylu radyasyon moleküler bağı titreşim seviyeleri boyunca uyararak termal ve kimyasal ablasyon süreci olasılığını arttırırken, kısa dalga boylu lazer radyasyonu direk bağ kırılma olasılığını arttırmaktadır.

Termal veya termal olmayan bir şekilde üretilen bozukluklar, basınçlar ve hacim değişimleri tüm süreci etkileyebilir (Bäuerle, 1996).

Günümüzde ablasyon çalışmaları eşsiz avantajlarından ve önemli teknolojik uygulamaları olmasından dolayı başta tıp alanında olmak üzere endüstride ve savunma sanayisinde büyük önem arz etmektedir. Pulslu lazer ablasyon tekniğinin bu uygulamaları:

- Sert, kırılgan ve ısıya duyarlı maddelerin yüzey mikro desenleme, telin izolasyonunun soyulması, yüzey temizleme, yüzey desenleme işlemlerinde (Bäuerle, 1996)

- Trimming'in farklı tiplerinde (Bäuerle, 1996)

- Reduancy teknolojisinde bağ kesme işlemlerinde (Bäuerle, 1996)

- Kompleks stokiyometrik ince filmlerin üretiminde(Bäuerle, 1996; Lunney and Jordan, 1998). Özellikle nitrürün çok değerli metallerden olmasından dolayı bor nitrür, silikon nitrür, karbon nitrür ve titanyum nitrürü benzeri sıcağa dayanıklı maddelerin depozisyonunda (Chae and Park, 1998)

- Mikroanaliz işlemlerinde (Kools et al., 1991)

- Mikroelektronikler, dolgu endüstrisi, temel biyolojik araştırmalarda (Rubahn, 1999)

- Kimyasal analiz için analitik kimyada; çevresel, jeolojik, kriminal uygulamalarda (Russo et al., 2002)

- Angioplasty, optalmology, dermatolog ve cellular microsurgery gibi tıp alanlarında (Bäuerle, 1996)

başarılı bir şekilde kullanılabilmektedir.

2.9. Lazer Kesme İşlemi

Kesme işleminde, amaç maddeyi mümkün olduğu kadar çabuk buharlaştırmaktır ve çalışma parçacığında minimum bozulmayla mümkün olduğu kadar dar ısıdan etkilenmiş bir alan üretmektir. Endüstriyel lazer kesicilerin çoğu kaynatma işleminde olduğu gibi lazer demeti ile eş eksenli bir gaz bulutu kullanılır. Metal kesme durumunda reaktif bir gaz (genellikle oksijen) kullanılmaktadır. Bu durum kesme hızını büyük bir miktarda artırır çünkü reaksiyon tarafından üretilen ısı lazer demetinden soğurulan enerji ile üretmektedir. İdeal şartlar altında kesme hızı 5 kat veya daha fazla artırılabilmektedir. İlave olarak gaz bulutu erimiş maddenin kesme bölgesinden uzaklaştırılmasına sebep olur. Bazı şartlar altında reaktif kesme işlemi

arzulanmayabilir çünkü kesme köşeleri bir oksit kaplamasına sebep olabilir ve bu oksit kaplama bu parçalar kaynatılmak istendiğinde problem teşkil edebilir. Metalik olmayan (örneğin seramik, plastik veya odun) malzemeler kesilmek istendiğinde, oksidasyondan daha iyi bir şekilde kaçınılmaktadır. Bu durumda lazer kesme işlemi için gerek duyulan tüm enerjiyi vermelidir.

Kesme hızı kadar önemli olan diğer faktörler uzaklaştırılan (kerf) madde genişliği ve kesme civarında (HAZ) ısıdan etkilenen bölgenin genişliğini içerir. "Kerf "genişliği yaklaşık olarak demetin odaklanma çapına eşittir ve böylece daima diğer tekniklerle üretilenle karşılaştırıldığında relatif olarak dardır. Benzer bir şekilde HAZ genişliği de dardır. Örneğin 1kw' lık bir CO_2 lazeri 0.02 mm HAZ ile 0.2 mm' lik bir kerf verebilmektedir. Lazer kesme işleminin bu özellikleri titanyumla ilgilenildiğinde oldukça faydalı bulunmaktadır. Sadece bu maddeyi kesmek için mevcut olan diğer tekniklerin (plazma ark ve oksiasetilen kesme işlemi) her ikiside büyük bir kerf ve geniş bir HAZ 'a sebep olmaktadırlar.

Tablo 2.6: Çeşitli maddelerde elde edilebilen bazı tipik kesme hızlarını göstermektedir.

	Kalınlık (mm)	Kesme hızı (mm/s)	Güç (kW)
Alüminyum	1.3	97	2
Alüminyum	13	14	3
410 Paslanmaz Çelik	6.4	25	1.2
410 Paslanmaz Çelik	0.3	38	0.2
Karbon	3.2	9	0.2
Titanyum Alaşım	6.4	47	0.25
	0.76	69	2
Cam	3.2	76	5
	6.4	8	0.85
	6.4	90	0.85
	4.8	76	0.85

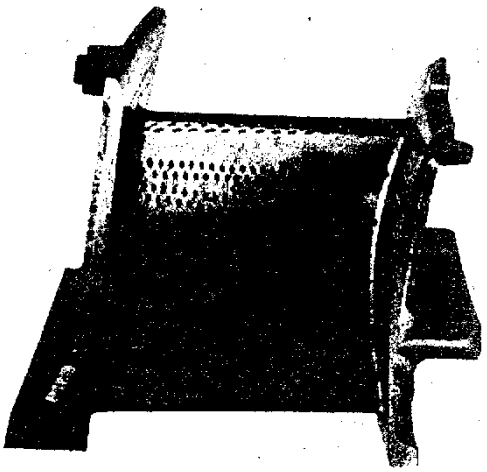
10.6 μm dalga boyunda yüksek reflektansa ve aynı zamanda yüksek ısı iletkenliğine sahip olan pirinç, bakır ve aliminyum haricinde çoğu maddeler CO_2 lazer kullanılarak kolayca kesilebilir. Bütün maddelerde başlangıçta küçük bir ısı madde içerisine nüfuz eder ve hızla numune hacminin içerisine iletilirler. Sonuç

olarak çok çok yüksek güç kullanılmadıkça ve çok yavaş bir scan hızı kullanılmadıkça, sıcaklığın hızlı bir şekilde erime noktasına yükseltilmesi çok zordur. Bununla beraber reflektansın 1.06 μm dalga boyunda çok daha düşük olması nedeniyle Nd: YAG lazeri kullanılabilir.

Metal olmayan maddeler için lazerler çeşitli avantajlara sahiptir. Örneğin kağıt kesme işleminde normal olarak mekaniksel tekniklerle ilgili kalıntı problemi ortadan kaldırılır. Naylon emniyet kemeri maddesi temiz bir şekilde kesilebilir - kesme köşeleri sıkıştırılır ve herhangi bir yanma yoktur. Aynı zamanda köpük lastikte temiz bir şekilde kesilebilir renk bozukluğu meydana getirmeksizin bu işlem yapılabilir.

2.10. Delme, Yazma ve İşaretleme

Lazerlerin endüstride ilk olarak kullanımlarından birisi, kablo çekmek için bir pulslu rubby lazeri kullanılarak elmasın delinmesi işlemidir. Bu çalışmada, 4.7 mm çapında ve 2 mm derinliğinde bir deliğin 15 dakika civarında delindiği rapor edilmiştir. Bu işlem mekanik bir sistem kullanılarak 24 saatte ancak gerçekleştirilebilmekteydi. Şekil 2.8 bir helikopter türbin bıçağında pulslu bir Nd:YAG lazer kullanılarak açılmış olan soğutma deliklerini göstermektedir.



Şekil 2.8: Bir Nd:YAG lazer kullanılarak işlenmiş bir helikopter türbin bıçağı.

Etkili bir delme işlemi mümkün olduğu kadar çok hedef yüzey maddesini kaynama noktasının üzerinde ısıtmamıza gerek duyar. Denk(2.20) ifadesinden $\Delta T(0,t) \alpha (H,t) t^{-1/2}$ ifadesin elde ederiz. Bu durum verilen (sağlanan) ısının aynı toplam (H.t) miktarı için yüzey ısısındaki artışın daha kısa puls uzunluğunda daha yüksek olduğunu göstermektedir. Uzun bir puls süresince verilen ısı madde içlerine nüfuz etmek için daha uzun bir zamana sahiptir. Bu durum relatif olarak düşük sıcaklıkta relatif olarak geniş bir madde hacminin ısıtılması sonucunu doğurur. Dolayısıyla puls lazerlerin CW lazerlerden çok daha etkili olacağını bekleriz (ortalama mukayese edilebilir gücü kabul ederek). Maddedeki delik delme işleminde genel olarak Nd: YAG lazer tercih edilmektedir. Metal olmayan maddeler için durum tam tersidir.

Lazerlerin diğer bir uygulaması ise, özellikle üzerinde kesikli (ayrık = discrete) elemanların veya toplu (integre) devrelerin yapıldığı silikon levhaların (tabakaların) çizilmesinde kullanışlı bir şekilde gelişmektedir. Çok sayıda özdeş devre elemanı yarıçapı bir kaç mm olabilen bir tek alt tabaka üzerinde oluşturulmaktadır. Geleneksel ayırma teknikleri bir elmas ucu bir mekaniksel baskıyla yüzey boyunca çekmekten ibarettir. Bununla beraber elmasın eskimesi bozuk çizgi üretimine sebep olabilir ve sonuç olarak tabaka kırılmasıyla devre elemanlarının bazılarının kaybolmasına sebep olur. Lazerlerin kullanılması bu istenmeyen sonucun doğmasından kesinlikle emin olmamızı sağlar ve çok daha iyi bir kontrol altında uniform çizgisinin elde edilmesini sağlar.

Lazerle işaretleme işleminde demet şiddeti yüzeydeki çok az bir madde miktarının yüzeyden uzaklaşmasını sağlamaktadır. Bu yolla görünür bir işaret üretebilir. Bu tür işaretleme metodları özel bir cisim üzerinde ayırdetme numaralarının veya logo vb. gibi işaretlerin oyulmasının uygun bir yoludur. Nd: YAG (pulslu) ve CO_2 (puls veya CW) lazerlerin her ikiside kullanılabilir. Lazer dalga boyu için transparent olan maddeler eğer soğurucu bir madde ile hesaplanırsa, buna rağmen işaretlenebilirler.

Arzulanan desenin elde edilmesi için temel olarak iki metod vardır. Bunlardan bir tanesi demetin kompütür kontrollü bir sistem kullanılarak yüzey boyunca taranmasıdır. Bu durumda oluşturulan desen direk olarak yüzeyde işlenmiştir. Bu teknik çok yaygındır fakat çok pahalı bir tekniktir. Diğer yaklaşım ise arzulanan bir desen şeklinde kesilmiş bir yansıtıcı maske olarak kullanılmaktadır. Bu bir yüzeye konur ve daha sonra lazer demetiyle ışınlanır. Eğer yeterince güçlü bir CO_2 puls lazeri kullanılırsa, bu durumda gerek duyulan işlem ışığın tümünün maskenin hacmine kadar genişletilmesidir ve yüzeyi tek bir pulsa maruz bırakmaktadır. Alternatif olarak lazer demeti maske boyunca taranabilir. Bu iki yoldan herhangi birinde maske kullanılması karşılaştırılmalı olarak oldukça ekonomik bir tekniktir fakat diğerleri gibi yaygın bir metod değildir.

3. DENEYSEL DÜZENEK

LASER (**L**ight **A**mplification by **S**timulatet **E**mission of **R**adiation) olayının teorik temelleri 1917 yılında A.Einstein tarafından atılmış olmasına rağmen lazer olayı ikinci dünya savaşı sırasında Amerikan ordusu için yapılan araştırmalar sonunda gözlenen MASER (Mikrodalga tekniği) olayına simülasyonla ancak 1950'li yıllarda gözlenebilmiştir. Bu gözlemlere rağmen ilk lazer 1960 'lı yıllarda dizayn edilmiştir. Günümüzde lazerlerin dizaynının yaşı yaklaşık olarak 35 yılın üzerinde olmasına rağmen genç denecek bir tarihi altyapıya sahiptir.

Lazerler ilk olarak icad edilir edilmez dermatolojide, kanser araştırmalarında, neurocerrahide, dişçilikte ve gözde kullanılmaya başlamış ve bunların kullanımı gittikçe yaygın bir hal almaktadır.

Bütün biyomedikal lazer uygulamaları, lazer ışığı ile biyolojik numunenin etkileşmesine dayanmaktadır ve bu etkileşme esnasında meydana gelen temel olaylar incelenir. En basit durumda, düşük enerjili lazer soğurulur, yansıtılır veya floresans gibi bir formda yeniden ışınıma tabi olur. Bütün bu olaylar numuneyi teşkil eden atom veya moleküllerin enerji seviyeleri arasında uyarmalara dayanmaktadır. UV ve visible radyasyon biyolojik olarak birçok önemli moleküllerde elektronik enerji seviyelerini uyarabilir. Koherent olmayan kaynaktan gelen ışığın etkisiyle meydana gelen bu tür olaylar fotobiyolojiciler tarafından çalışılmakta ve fotomedical alanda yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır.

3.1. Laser Sistemi

Maddeler üzerindeki işlemler için en çok kullanılan iki lazer tipi Nd: YAG ve CO_2 lazerleridir. Bu iki lazer tipinden CO_2 lazerlerinin daha kullanışlı olduğunu birçok amaca yönelik olarak kullanım esnekliğine sahip olduğunu söylemek genel anlamda doğrudur. Bu lazer tipi geniş bir bölgede çıkış gücünü verecek şekilde kullanım amacıyla elde edilebilir ve makul bir maliyete sahiptir. Daha kısa çalışma dalga boyuna sahip olması nedeni ile bazı alanlarda Nd:YAG lazerler bir çok avantaja sahiptirler.

Tabiki lazerler çok hassas ve nazik optiksel aletlerdir ve çevre şartlarında gözönüne alınabilir derecede değişiklikler mevcut ve oldukça tozlu bir ortam sözkonusu ise sonuç dizayn ve paketlemede bu etkiler gözönüne alınarak koruyucu bir paketleme kullanılabilir. Diğer bir problem ise ışık demetinin lazerden numuneye taşınması esnasında ortaya çıkmaktadır. Bu daima döner aynalar kullanılarak yapılabilir ve aynı zamanda esnek fiber optiksel dalga klavuzları relatif olarak düşük-güçle ışık demetleri için kullanılabilir. Güvenlik meseleside dikkatlice gözönüne alınmalıdır. Çoğunlukla radyasyon görünmez bölgededir ve özellikle çok yüksek güçlü lazerlerle saçılan ışık demetinin çok küçük bir miktarı bile oldukça zararlıdır ve büyük hasar verebilir. İlave olarak ışık demetinin uygun zamanda uygun spot hacmine odaklandığından emin olmak için yeterince dikkatli olunmalıdır, aksi takdirde üzerinde çalışılan maddede veya çevredeki diğer aletlerde ve elektronik cihazlarda tamiri mümkün olmayan tahribat meydana gelebilir.

Lazerin malzemeyle etkileşiminde temel olarak iki yöntem vardır. İlk yöntem sürekli ışıma ile malzeme işlemedir. Buradaki temel prensip, noktasal olarak malzemenin ısıtılması ve eritilmesidir. Bu on yıllardır uygulanan ve iyi bilinen bir tekniktir. Yeni olan yöntem ise kısa pulslarla malzemenin işlenmesidir. Bu işlem sırasında anlık olarak çok yüksek güçler oluşturulur,

normal şartlarda gerçekleşmeyen çok foton etkileşmeleri kuvvetli hale gelir. Malzeme, eritilerek ya da parçalanarak değil, bir plazma ortamının çok kısa sürede oluşturulması ve moleküler bağların koparılmasıyla işlenir. Çok hızlı lazer kullanıldığında ışığın odaklandığı küçük işlem bölgesinin dışında malzemeye etkide bulunulmaz, böylece çok daha pürüzsüz işlem yapılır.

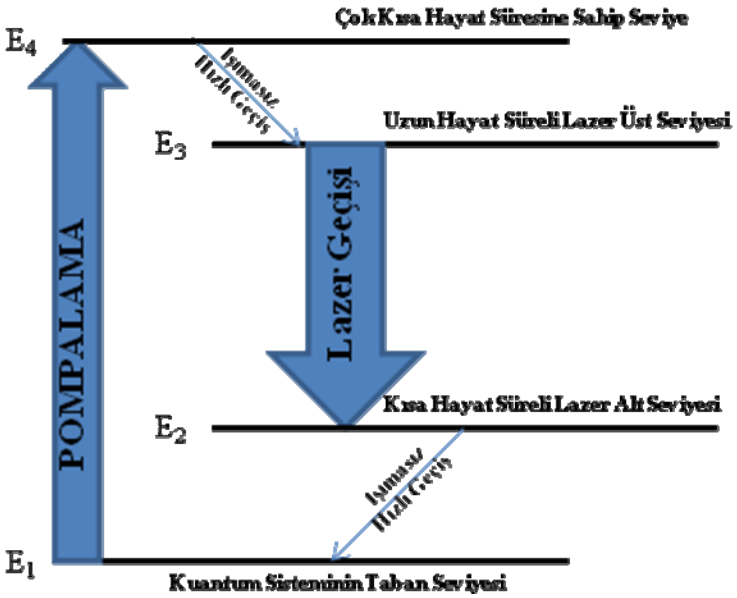
Lazerler icat edildiği günden bu güne sürekli gelişen bir uygulama alanıyla karşı karşıyadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte sürekli olumlu yönde gelişen lazerler endüstrisi de çok geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Lazerlerin sahip oldukları olumlu özellikler endüstride birçok ihtiyacı karşılamış, daha ekonomik, daha kaliteli ve daha az işletme masraflarıyla endüstrideki yerlerini almışlardır.

Lazerlerin endüstrideki kullanım amaçlarına geçmeden önce lazer ışığının malzemeler üzerinde nasıl bir etki yaptığını anlamak gerekir. Lazerler endüstride en çok ısısından istifade edildiği alanlarda kullanılmaktadır. Lazer, ışığının çok güçlü ve ısısının küçük bir alanda yoğunlaştırılması sayesinde hemen tüm metalleri eriterek kesebilme yeteneğine sahiptir.

3.2. Lazer Nedir?

Bir kuantum sisteminin dört enerji düzeyi Şekil 3.1'de görüldüğü gibi olsun. Enerji düzeylerinin enerji değerleri alt seviyeden üst seviyeye doğru büyüyor olsun. Yani enerji $E_4>E_3>E_2>E_1$ büyüklük sıralamasına sahip olsun. Atom ve moleküller daima daha düşük enerji düzeyinde bulunmak istediklerinden, kuantum sistemi E_1 taban enerji seviyesinde bulunmaktadır. Kuantum sistemi güçlü bir enerji kaynağı tarafından taban enerji seviyesinden hızlı bir şekilde E_4 üst enerji seviyesine uyarılır. Bu hızlı uyarma süreci optik pompalama olarak tanımlanmaktadır. E_4 üst enerji seviyesinin hayat süresi çok kısadır ve dolayısıyla sistem çok hızlı bir şekilde E_3 ara seviyeye ışımasız bir şekilde durulur. E_3 seviyesinin hayat süresi E_4 ile mukayese edildiğinde oldukça

uzundur ve kuantum sistemi bu seviyede depolanma zamanına sahip olur. Taban seviyedeki kuantum sistemi defalarca pompalanarak büyük bir popülasyon oranının üst lazer seviyesine toplanmasını sağlar. Bu durumda $N_3>>N_2(N_2=0)$ nüfud terslenimi elde edilmiş olur. Bu durmda 3 seviyesine ulaşak ilk kuantum sisteminin bu seviyedeki hayat süresi dolmadan hemen önce N_3 ppülasyonu $h\nu=(E_3 - E_2)$ enerjili foton demeti ile etkilenmek sureti ile kuantum sistemi $E_3 \rightarrow E_2$ zorlanır. Bu zorlama nedeniyle 3 seviyesindeki kuantum sistemi topluluğu toplu bir şekilde $nh\nu$ foton salınımına meydan verecek şekilde geçiş yapar. Bu etkilemeli salınım neticesinde elde edilen foton demetini oluşturan fotonların tamamı eş zamanlı, aynı enerjili ve aynı doğrultulu fotonlardan ibarettir. Bu şeklde salınan foton demeti lazer olarak adlandırılmaktadır ve bu özelliği nedeniyle demet monokromatik, koherens ve paralel fotonlardan oluşan bir demettir. 2 seviyesine topluca inen kuantum sistemi kısa hayat süresine sahip bu lazer alt seviyesinden çok hızlı bir şekilde kuantum sisteminin taban seviyesine iner. Bu seviyede kuantum sistemi aynı sürece maruz kalacak şekilde tekrar 4 seviyesine hızlı bir şekild pompalanır. Bu süreç tekrarlanıp devam eder ve bu sürecin tekrarlanması olayına optiksel geri besleme adı verilir.



Şekil 3.1: Bir lazer üretim dögüsünü gösteren 4 seviyeli bir lazer sistemi.

E_3 ve E_2 enerji düzeyleri arasındaki geçişten bir lazer ışığı elde edebilmek için, atomların E_3 düzeyinde kalma süresi, E_2 düzeyinde kalma süresinden çok daha uzun olmalıdır. Çünkü uyarılmış seviyelerin ömrü genelde çok kısadır, örneğin 10^{-8} saniye kadardır. Uyarılmış seviyelerden bazıları da milisaniye, saniye veya dakika mertebesinde bir ömre sahiptir. Bu tür seviyeler özel olarak yarı-kararlı seviye olarak adlandırılır. Dolayısıyla E_3 seviyesi E_2 seviyesine göre yarı-kararlıdır.

3.3. Lazer Çeşitleri

Lazerler yapımında kullanılan maddenin cinsine göre katı, gaz ve sıvı lazerler olarak üretilmektedirler. Bu lazerlerin her birinin kendine özgü özellikleri vardır. Bu çalışmada katı lazer olan Nd:YAG lazerler kullanılacaktır dolayısıyla katı lazerlerden biraz daha detaylı bahsetmekte fayda var.

3.4. Katı Lazerler

Katı lazerlere örnek olarak ilk lazer üretiminde kullanılan içine Cr^+ katılmış yakut kristalinden elde edilen lazeri verebiliriz. Başka bir örnek ise, içine Nd^+ katılmış YAG (yitriyum-alüminyum-garnet) lazeridir. Elmas taklidi olan bu maddenin saldığı ışık, 1064 nm dalgaboyundadır. Katı-hal lazerler, genellikle flaş lambalar ile pompalanmaktadır. Birçok yerde dış aynalar yerine, lazer kristalin iki yüzeyi parlatılarak lazer kovuğu elde edilir.

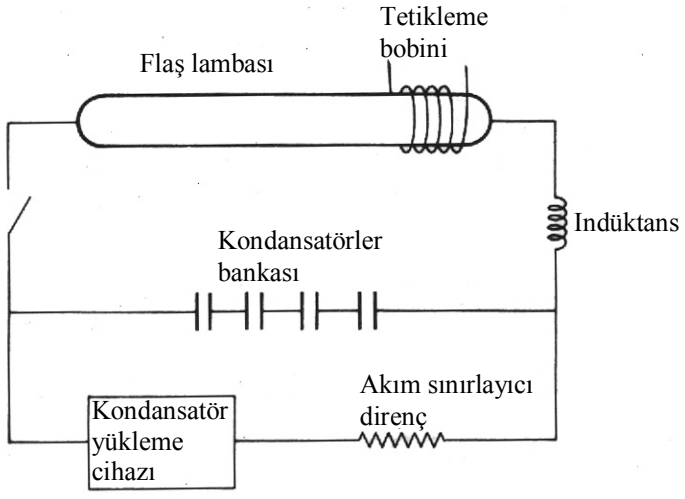
Bu çalışmada Selçuk Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümünde, Prof.Dr. Hamdi Şükür Kılıç yönetimindeki Lazer Spektroskopi

Laboratuarında bulunan Continuum: Surelite III lazer ve bu lazer tarafından pompalanan bir dalgaboyu değiştirilebilir OPO (*Optical Parametric Oscillator*) lazer kullanılmıştır ve bu lazerlerle ilgili detaylar aşağıda verilmektedir.

3.5. Pompalama Metotları

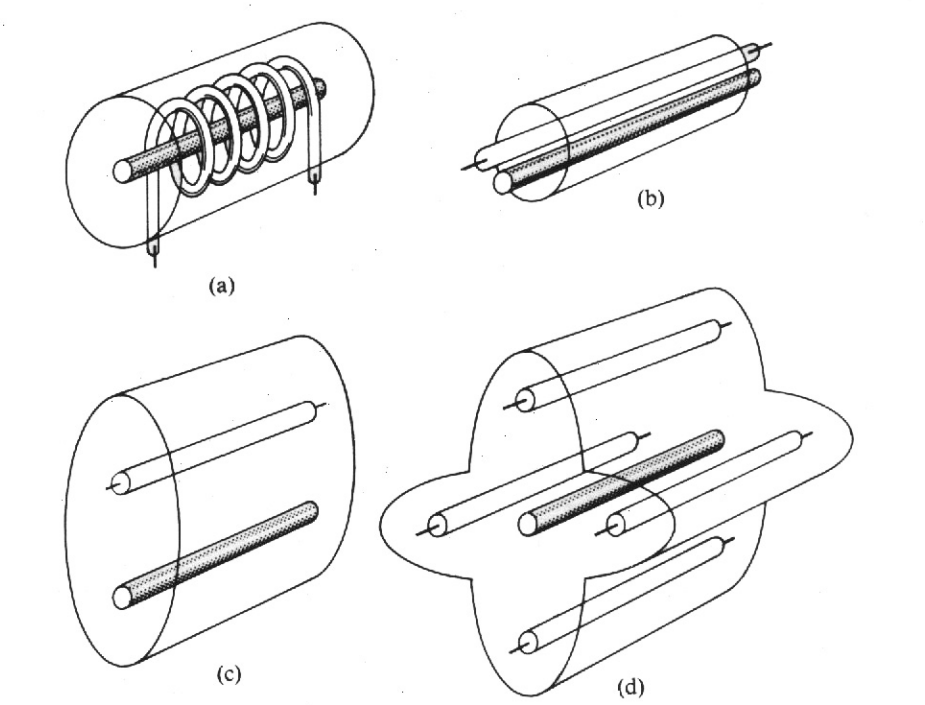
Yukarıda bahsedildiği gibi, lazer olayını harekete geçirmek için kuantum sisteminin en üst seviyeye hızlı uyarılması tekniğini görmüş ve bu uyarım olayını optik pompalama olarak tanımlamıştık.

Pompalama, düzenli aralıklarla ya da sürekli olabilir. Genellikle aralıklı işletimde daha az sorunla karşılaşılır çünkü lazer malzemei soğutulmaktadır. Pompa kaynağından çıkan "artık" ışığın büyük kısmı sistemde ısı olarak kendini göstermektedir. Katı hal lazerler genellikle bir flaş lamba ile pompalanmaktadırlar. Şekil 3.2'de bir *flaş lambası* ve ilgili devre görülmektedir.



Şekil 3.2: Flaş lambası akım devresi.

Sürekli pompalama için kaynaklar, tungsten halojen lambaları ve yüksek basınçlı civa deşarj lambalarını içerir. Genellikle bir kW ya da daha fazla lamba girdi gücü gerektiği için güç kaynakları biraz çok olabilir.

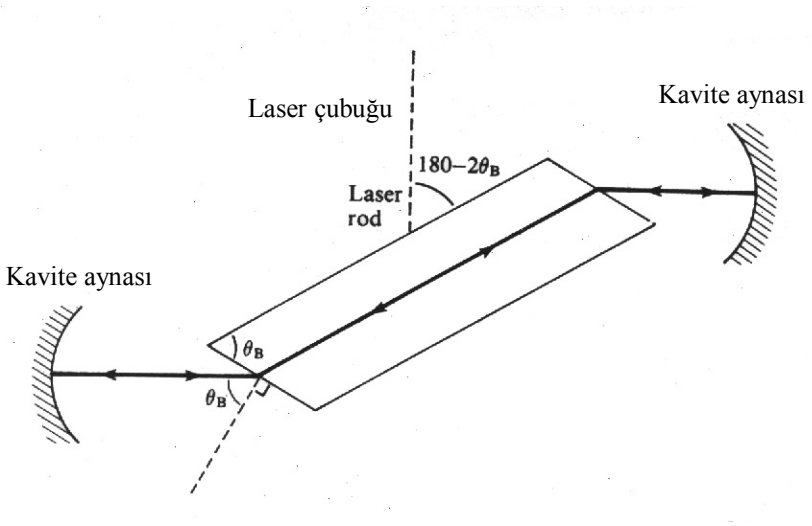


Şekil 3.3: Optiksel pompalamada kullanılan birkaç flaş lambasının geometrisi. a) Lazer çubuğunun çevresindeki sarmal flaş lamba, b) birleşik lazer lambası ve lazer çubuğu, c) Elipsel oyuklara odaklanan flaş lambası vr çubuk, d) çoklu elipsel oyuklara odaklanan flaş lambası ve çubuk

Hangi pompalama kaynağı kullanılırsa kullanılsın, yine de, *lazer ışığı medyum*'a mümkün olduğunca fazla pompalama radyasyonu gibi bağlama problemleri halen mevcuttur. İkincisi genellikle, birkaç milimetre çapında ve birkaç on milimetre uzunluğunda bir çubuk formundadır ve hem *flaş lambası* hem de çubuk, yüksek yansıtıcılığa sahip duvarları olan bir kavite içine yerleştirilmiştir. Kullanılabilecek birçok olası şekil vardır ve bunlar Şekil 3.3'te görülmektedir. İlk dizaynlar, lazer çubuğunu çevreleyen yay şeklinde bir *flaş*

lambası kullanmıştır ve her ikisi de silindir şeklinde bir yansıtıcı kavite içine yerleştirilmiştir. (Şekil 3.3 (a)) Bu düzenleme, çubuk içindeki parlamanın iyi bir bütünlüğünü vermesine rağmen optik bağlama çok iyi değildir. Daha basit bir teknik, her ikisinin de çevresinde bir yansıtıcı yüzey ile çubuk boyunca bir çizgisel *flaş lambası* olmasıdır. Yakın bağlama olarak bilinen bu düzenleme iyi bağlama etkisi vermesine rağmen ışınlanma düzgün değil, zayıftır.

Bir diğer popüler düzenleme, çizgisel *flaş lambası* ve çubuğu, elips şeklindeki bir yansıtıcının iki odaksal çizgisi boyunca yerleştirmektir. (Şekil 3.3(c)) Elipsin bir odağından ayrılan herhangi bir ışık, diğer odaktan geçmek üzere yansıtılır. Tahmin edileceği gibi, radyasyon, çubuğun merkezi yakınında oldukça yoğun olmaktadır ve çok sayıda lamba ve elips şeklindeki odaklama düzenlemeleri ile daha fazla bütünlüğe sahip bir enerji dağılımı elde edilebilir (Şekil 3.3(d)).

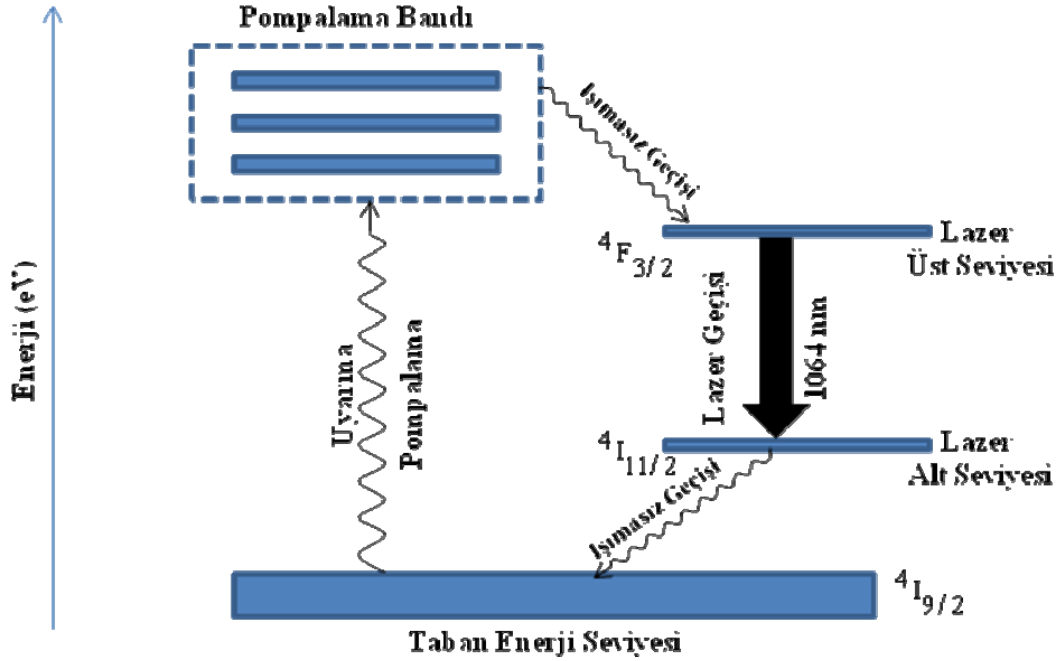


Şekil 3.4: Uçları Brewster açısında kesilmiş bir lazer çubuğu kullanılan bir lazer kavite düzeneği. Bu düzenleme ile, lazer çubuğunun iç açısı θ_B ve çubuğun kendisi de 180° – dikeye bir $2\theta_B$ açı eğimlidir.

3.6. Nd: YAG Lazeri

Nd:YAG Lazer katıhal lazerlerin en popüler tipidir. Lazer malzemesi daima ya $Y_2Al_5O_{12}$ (genel olarak **Y**ttrium **A**luminum **G**arnit kelimelerinin baş harflerinde YAG olarak kısaltılmıştır). Bu malzeme içerisinde bazı Y^{3+} yttrium iyonlarının %1.5 oranının yerine Nd^{3+} iyonları yerleşmektedir. Şekil 3.5 lazer olayına dahil olan seviyeleri göstermektedir. $^4F_{3/2}$ ve $^4I_{11/2}$ durumları arasında meydana gelen *lazer ışığı* geçişine sahip 4 seviyeli bir sisteme sahip olduğumuzu görürüz. Sondaki durum ($^4I_{11/2}$), pratik olarak, taban seviyeden oda sıcaklığında boş kalacak kadar yukarıda bir enerjiye sahiptir. İlk ve son durumlar, sırasıyla 2 ve 6 adet kristal alan seviyelerine bölünürler, böylece birçok dalgaboyunda *lazer ışığı* üretilmesi mümkün olur. Bunların en güçlüsü 1064 nm'de ortaya çıkar ve genellikle kullanılan da budur.

Nd iyonları genellikle YAG içerisine 1-1.5% oranında doping yapılır. Bu oran daha fazla olduğunda çarpışmalardan kaynaklanan bozunma oranını artırmakta, üst seviyedeki hayat süresinin kısalmasına sebep olmaktadır. Oda sıcaklığındaki emisyon çizgi genişliği $1.2x10^{11}$Hz ($\Delta\lambda$=0.45 nm) ve üst seviyenin hayat süresi τ=230 μs büyüklüğündedir.

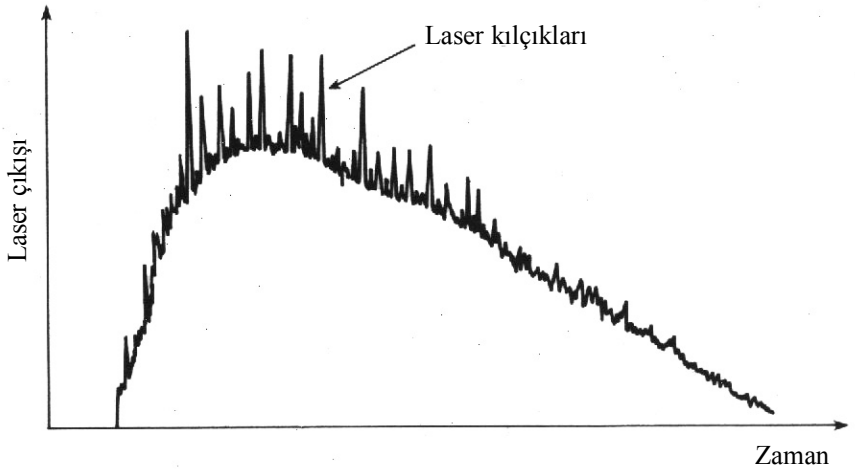


Şekil 3.5: Nd:YAG lazer kristali için enerji seviyesi diyagramı. Lazer yayılımları $^4F_{3/2}$ seviyeleri ile $^4I_{11/2}$ seviyeleri arasındaki geçişler sonucu ortaya çıkar.

Nd:YAG sistemi dört seviyeli bir sistem olduğu için pompalama gereksinimleri düşüktür ve bir *flaş lambası* ile pompalanabilir ve yansıtıcı aynalar kullanılarak oluşturulan kavite geometrisiyle çalıştırılabilir. Aşırı ısınma ve bunun sonucu lazer çubuğunun hasar görmesini engellemek için kavite hava ile soğutulur. Daha önce belirttiğimiz gibi, *flaş lambası*nden gelen optik *pulse* birkaç milisaniye sürer. Yerleşim çevriminin gerçekleştirilmesi de yaklaşık 0.5ms sürer. Etkilemeli salma bir kez başladı mı, üst *lazer* seviyesi oldukça hızla, hatta pompalamanın elektronları yeniden üst seviyeye uyarmasından çok daha hızlı bir şekilde boşalır ve böylece lazer olayının, yeterli bir nüfus terslenmesi yeniden oluşturuluncaya kadar kısa bir süre için durması beklenir. Bu nedenle, çıktıda düzenli bir *puls* üretimi sağlanmış olur. Bu metdla üretilen puls lazer çıkışı Şekil 3.5 ile ortaya konmaktadır (Svelto, 1989).

Tek bir *flaş lambası pulsu* boyunca toplam enerji çıktısı 0.01 J 'den 100 J'e kadar değişebilir ve *puls* tekrarlama frekansları 300 Hz e kadar çıkabilir. Bir *puls*

boyunca ortalama güç oldukça geniş olabilir, böylece 0.5 ms süren 10 J'lik bir *puls*, $2x10^4$ W'lık bir ortalama güç ortaya koyar. Toplam *puls* enerjisinin Q-switching olarak bilinen bir teknikle daha kısa bir süreye sıkıştırılması mümkündür; bu durumda daha büyük güçler elde edilebilmektedir.



Şekil 3.6: Nd:YAG lazeri pompalayan bir *flaş lambası*'dan, lazer spike'ını gösteren tipik çıkışıdır.

3.7. Lazer Işınının Özellikleri

Lazer ışığının dalga boyuna bağlı olan ve malzeme işleme alanında önemli olan lazer radyasyonunun özellikleri:

- Tek renklilik (Monokromatiklik),
- Eş zamanlılık (Koherenslik),
- Yoğunluk,
- Yönlendirilebilirlik (Paralellik)

3.7.1. Monokromatiklik

Lazer ışığının en belirgin özelliklerinden bir tanesi tek renkli oluşudur. Bir mumun veya akkor telli elektrik ampulünün yaydığı ışık tek renkli değildir. Bu kaynaklardan çıkan ışınlar bir prizmadan geçirilirse birçok renge ayrıldığı görülür. Her ışığın kendine has bir dalga boyu vardır. Tipik olarak bir lazer ışınının rengi, merkezi dalga boyu ile karakterize edilir. Dalganın kendisini tekrarladığı mesafeye dalga boyu denir ve λ ile gösterilir.

Bir grup fotonun tek bir frekansa sahip olması özelliğine tek renklilik (*monokromatiklik*) denir. Gerçek uygulamalarda dalga boyu birimi için Angstrom veya nm, frekans birimi için ise Hertz (s^{-1}) kullanılır.

Gerçekte hiç bir ışık kaynağının mükemmel bir monokromatik ışık üretme durumunda değildir. Gerek lazer ışığı gerekse herhangi bir ışık kaynağı bir minimum büyüklükte geniş bandlı bir ışık demeti üretmektedir. Daha sonra üretilen ışık bir prizma veya kırınım ağından geçirildiğinde ışık dispersiyona uğramakta ve ışığın spektrumu ortaya konulmaktadır. Mükemmel bir monokromatik ışık elde etmek için ışık filtrelenebilir ve bu işlemden sonra elde edilen ışığın tek renkliliği filtrenin mükemmelliğine bağlıdır.

Bir kaynaktan gelen ışığın monokromatiklik mertebesinden bahsetmek için kırımın ağında gözlenen bir spektral çizginin frekansa bağlı genişliğini $\Delta\nu$, buna paralel olarak kaynağın çizgi genişliğini dalga boyuna bağlı olarak $\Delta\lambda$ ile tanımlarız. Bu iki genişlik tanımı arasındaki ilişki; $\lambda\nu=c$ ifadesi yardımıyla ortaya konur.

3.7.2. Eş zamanlılık (Koherenslik)

Lazer hariç diğer ışık kaynaklarının verdiği ışık aynı fazlı değildir. Yani demet içinde bütün ışınlar aynı fazda bulunmazlar. Lazer ışınları tabiatında

birbirleri ile uyumludur. Frekansı, fazı ve doğrultusu aynı olan iki dalga birbiriyle uyumlu (koherens) olan dalgalar olarak tanımlanır. Uyumlu olan tüm dalgalar sinüzoidal olup, belirli bir genliğe ve dalga boyuna sahiptirler. Tablo 3.1'de çeşitli lazerlerin uyumluluk mesafeleri verilmiştir.

Tablo 3.1: Yaygın olarak kullanılan lazerlerin uyumluluk mesafeleri

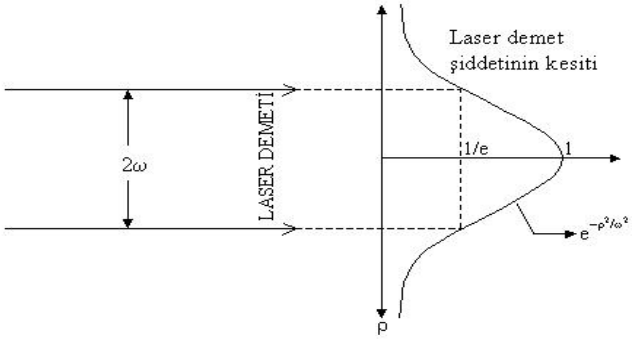
Lazer Tipi	**Tipik Uyumluluk uzunluğu (m)**
He-Ne Tek modlu	<1000
He-Ne Çok modlu	0.1–0.2
modlu	0.02
Nd:YAG	$1x10^{-2}$
Nd:Cam	$2x10^{-4}$
GaAs	$1x10^{-3}$
Yakut	$1x10^{-2}$

3.7.3. Yoğunluk

Lazer demeti çok yoğun bir ışık üretir. Lazerin pompalanması sırasında aldıkları ışınlar yoğunluk bakımından küçük değerlerde olmasına rağmen optik kavite sayesinde bu lazerden alınan ışığın yoğunluğu çok yüksektir. Bunun sebebi uyarılmış emisyonla foton yayan atomların tüm fotonları birbirine paralel bir biçimde eş fazlı olarak yaymalarıdır ve optik kavite içerisinde birbirini takip eden yansımalar neticesinde lazerden çıkan ışığın yoğunluğunun artmasıdır.

Bir ışık kaynağının şiddeti, bir yüzeye birim zamanda ulaştırdığı enerji ile ölçülür. Bir noktaya gelen dalgalar aynı fazda olmaları halinde birbirlerini güçlendirirler. Zıt fazda olmaları halindeyse birbirlerini zayıflatırlar. Lazerler haricindeki bütün ışıklar lazere göre çok zayıf şiddetli ışık kaynaklarıdır. Lazer fotonları kavite yardımıyla çok dar bir demete topladığı için, demet oldukça parlak ve yoğundur. Bazı puls lazerlerin yoğunluğu 10^{18} W/cm^2 değerlerine kadar ulaşabilmektedir. Bu yoğunluk, bu çalışmada kullanılacak olan Nd:YAG lazer tarafından 10^{18} W/cm^2 yoğunluk üretilebilmektedir.

Laser cihazından çıkan lazer demeti odaklanabilir veya genişletilebilir. Bu işlemler için lens, prizma veya benzer cihazlar kullanılabilir. Bu kullanılan optik cihazların kenarları etkin bir yarık gibi davranabilir. Laser demetinin genişlemesi, yarıkla değil laser kavitesi içerisindeki laser demetinin doğal genişlemesiyle belirlenmektedir.



Şekil 3.7: Gaussian laser demeti. Gaussian demet şiddeti demet merkezinden uzaklığa bağlı olarak fonksiyonu şeklinde yumuşak bir üstel değişim göstermektedir.

Laser ışığını kavite içerisine hapsetmek için düz aynadan ziyade çukur ayna kullanılmaktadır. Çoğu laserlerde ışık demeti dairesel olarak simetrik bir kesite sahiptir ve bu durumda ışık demetinin merkezi en yüksek yoğunluğa sahipken demetin yarı çapı arttıkça ışık demetindeki yoğunluk $e^{-\rho^2/\omega^2}$ şeklinde azalmaktadır. Buradaki ρ ışık merkezinden olan uzaklıktır (yani demetin yarıçapıdır). Bu tür bir ışık demeti Gaussian ışık demeti olarak adlandırılmaktadır. ρ parametresinin ω_0 değeri için ışık şiddeti 1/e değerine düşmektedir ve bu ω_0 spot hacmi olarak adlandırılmaktadır. Yani;

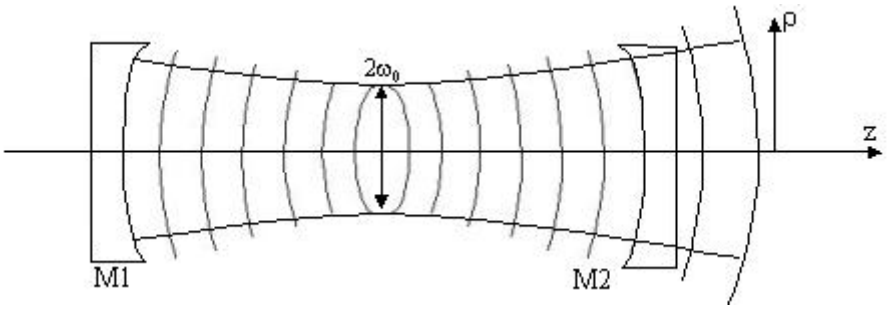
$$I = I_0 \, e^{-\rho^2/\omega^2} \qquad (3.1)$$

bir Gaussian ışık demetinin şiddetini vermektedir ve eğer ρ=ω olduğu uzaysal noktayı gözönüne alacak olursak

$$I = I_0 \, e^{-\omega^2/\omega^2} = I_0/e \qquad (3.2)$$

elde edilir. ρ parametresinin bu ω_0 değerine spot hacmi denmektedir. Kavite içerisindeki bir ışık demeti için ω noktadan noktaya değişmektedir. Kavite

içerisindeki herhangi bir noktada Gaussian ışık demeti ω_0 minimum spot hacmine sahiptir ve bu minimum demet için "weist" olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 3.8: İki M1 ve M2 aynalarından oluşan laser kavitesi görülmektedir. Bu aynaların eğrilikleri laser ışığını aynalar arasına toplamaktadır ve Gaussian ışık demetinin sahip olacağı en küçük spot hacmi olan ω_0 yarıçapına kadar küçülmektedir. Bu en küçük yarıçap bölgesine *waist* bölgesi denir. Bu waist bölgesinde ışık demetinin minimum yarıçapa sahip olması nedeniyle laser ışığının maksimum parlaklığa sahip olduğu anlamına gelir ve bu durum laser ışığının paralellikten saptığı anlamına gelir.

Demet *weist*indeki spot hacmi laser ışık demetinin paralellikten sapmasının belirlenmesine yardımcı olmaktadır, çünkü dışarıdaki demet içerideki demetin ayna arkasındaki uzantısıdır. Laser *weist*inden uzak bir yerlerde tam açı sapması spot hacmine bağlı olarak

$$\theta = \frac{2\lambda}{\pi\omega_0} = \frac{4}{\pi}\frac{\lambda}{2\omega_0} \cong 1.27\frac{\lambda}{2\omega_0} \qquad (3.3)$$

ifadesiyle verilmektedir. Bu ifade, yarıktan elde edilen kırınım deseninin D yarık çapından ziyade $2\omega_0$ ile ifade edilmesini sağlamaktadır.

3.7.4. Yönlendirilebilirlik (Paralellik)

Günlük hayatta kullandığımız tüm ışık kaynaklarından her yönde ışık yayılmaktadır. Bunun aksine lazer oldukça monokromatik olması nedeniyle kaviteden oldukça paralel bir demet çıkışı sağlar ve oldukça dar bir bantta ışık yaymaktadır. Lazerlerin en önemli özelliklerinden bir tanesi de lazer ışığının doğrultusunun değiştirilebilir ve yönlendirilebilir olmasıdır. En düşük enerji çıkışı veren lazerlerle yapılan gözlemlerde bile toz bulutu veya sigara dumanının lazer ışığını saçtığı veya yönlendirdiği görülebilir. Lazer ışınları oldukça uzun bir mesafeyi sabit genişlikte bir ışın demeti olarak alır, belli bir mesafeden sonra genişleme algılanmaya başlar. Bazı uygulamalarda optik sistemler yardımıyla lazer ışın demeti kolayca yönlendirilebilmektedir.

3.8. Spot Yarıçapı ve Alanı

Lazer demetinin temel 4 özelliğinin sonucu olarak uygulamada dile getirilmesi gereken başka bazı özellikleri de ele alınabilir. Bunlardan birisi de lazerlerin küçük spot hacimlerine odaklanabiliyor olmasıdır.

D çapına sahip dairesel bir lazer demeti için, λ dalga boylu bir ışık demetinin f odak uzunluğuna sahip mercekle odaklanabileceği minimum spot boyutu,

$$r = 2.44f\lambda / D \qquad (3.4)$$

olarak belirlenir. Spot boyutunun çok küçük değerleri, işlenecek parçanın yüzeyindeki radyasyonun çok yüksek yoğunluk değerlerinde olmasını sağlar. Spot boyutunun dalga boyuyla ve lens odak uzaklığıyla doğru orantılı olduğuna dikkat edelim.

Bu hesaplanan spot yarı çapına bağlı olarak lazer enerjisinin odaklanabileceği spot alanı

$$A = \pi r^2 \ cm^2 \tag{3.5}$$

ifadesi yardımıyla hesaplanabilmektedir.

3.9. Odak Derinliği

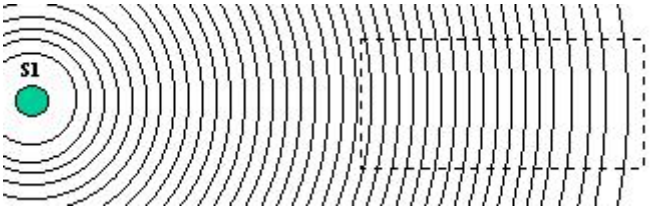
Lazer demetinin odak derinliği, lazer demeti yoğunluğu yaklaşık aynı olan aralığın ölçümüdür. Odak derinliği, odaklama merceğinin F# numarasının ve lazer demetinin dalga boyunun fonksiyonudur ve

$$z = 1.48F^2\lambda \tag{3.6}$$

şeklinde ifade edilmektedir.

3.10. Iraksama

Lazer tarafından üretilen ışık demeti çok yüksek yansıtıcılığa sahip iki ayna arasında hapsedilir. Aynalar arasında çok kısa bir bölgeye hapsedilmiş olan bu demetin seyahat yolu, demetin aynalardan birçok kez yansıtılmasıyla uzatılabilir. Lazer ışığı başka ışıklar gibi çok geniş bir bölgeye yayılmaz. Çünkü lazer yalnızca birbirine paralel olan demetler üretir. Fakat bu yinede kesin bir paralellik anlamına gelmez. Her zaman az da olsa bir ıraksama söz konusudur. Bu ıraksama eğilmesine *difraksiyon* denir. Optik kavite içerisinde seyahat edilen bu uzun yol nedeniyle dalgaların eğriliği çok küçüktür ve lazerden dışarı çıkan ışık dalgaları yaklaşık olarak düzlemseldir.



Şekil 3.9: S nokta kaynağından gelen küresel bir dalganın kesiti. Çizgiler pozitif elektrik alanının maksimumlarını ima etmektedir. Nokta kaynaktan uzak bir noktada küresel bir dalga düzlem dalgaya yakın bir yapı kazanmaktadır(noktalı çizgi ile gösterilen kare bölge).

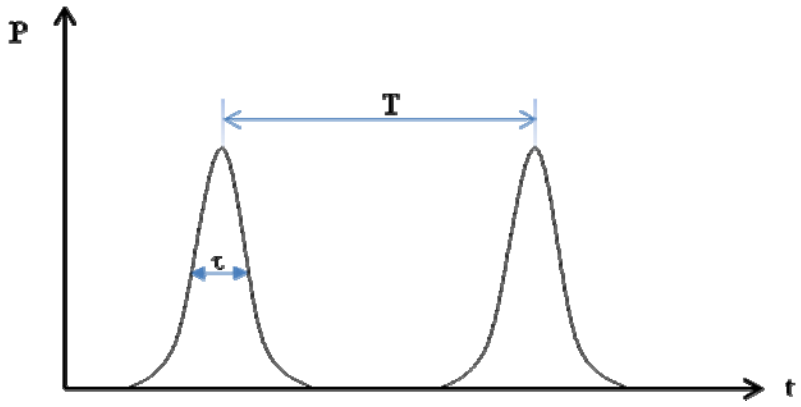
Demet sapması, ışık demetinin lazerden salınmasından sonra demetin ne kadar çabuk genişlediğini belirleyen bir ölçüdür. Genellikle lazer demetinin yayılma açısı mili radyan olarak ölçülür. Tipik bir küçük lazer için demet sapması yaklaşık olarak 1 miliradyan'dır. Tipik bir He-Ne lazerinin ıraksama dağılımı 0.5 ile 1.5 mili radyan arasında değişmektedir. Dolayısıyla, lazer demeti metre başına yaklaşık 1 mm genişlemektedir.

3.11. Lazerlerde Güç ve Enerji

Lazer demetinin gücü genellikle Watt (W) cinsinden ve enerjisi ise joule (J) cinsinden ifade edilmektedir. Bir Watt bir saniyede üretilen/harcanan joule birimlerinde enerji olarak tanımlanmaktadır.

Işık demetini sürekli dalga biçiminde üreten lazerlere sürekli dalga (Continuous Wave, CW) modlu lazerler, ışık demetini periyodik pulslar şeklinde üreten lazerlere ise puls modlu lazerler denir. Şekil 3.6 ile gösterilen bir lazer pulsu Şekil 3.10 ile verildiği gibi ardışık lazer pulsları şeklinde göeterilecek olursa, şekil lazer pulsları ve puls süresini göstermektedir. Burada T: puls periyodu, τ: Puls süresidir.

CW lazerlerde ölçülen güç ortalama güçtür. Pulslu lazerlerde ise güç, puls başına ortalama güç ve pulsun tepe gücü olarak iki biçimde ölçülmektedir. Ortalama güç T periyodunda, tepe gücü ise τ süresince ölçülür.



Şekil 3.10: Lazer güç pulsları

Lazer ışın demeti ile malzeme üzerinde işlem yapmak için lazer cihazının gücünden ziyade, malzemenin birim alanına düşen ($2x10^6$ W/cm^2) güç daha önemlidir. Bu parametre güç yoğunluğu olarak tanımlanmaktadır. Güç yoğunluğunun W/cm² birimlerinde ölçülmektedir. Eğer radyasyon $1x10^6$ W/cm² değerinden daha küçük ise sadece erime meydana gelir. Alüminyum alaşımı için bu değer $3.5x10^6$ W/cm^2 mertebesindedir.

Lazer demetinin monokromatikliği ve koherensliği, demetinin çok küçük bir alana odaklanabilmesini ve çok büyük bir tepe gücü yoğunluğunun elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Elde edilen güç yoğunluğuna göre malzeme üzerinde, kesme, kaynak, delme vb. işlemlerin yapılabilmesi mümkün olmaktadır. Tablo 3.2 lazerlerin güç yoğunluğuna göre malzemeler üzerinde yapabilecekleri işlemleri göstermektedir.

Tablo 3.2 : Lazer güç yoğunluğuna göre uygulama alanı

Güç Yoğunluğu (W/cm^2)	Malzemenin Tepkisi	Uygulama Alanı
$<10^4$	Isınma	Isıtma, ısıl işlemler
10^4-10^6	Erime	Kaynak
10^6-10^8	Buharlaşma	Kesme, delme

Tablodan anlaşılacağı gibi laboratuarımızda bulunan lazer sisteminin bize sağladığı güç ile katı malzemelerde kesme ve delme işlemi rahatlıkla yapılabilmektedir.

3.12. Optik Enerji Akısı

Lazerlerin malzeme üzerindeki etkisi, malzeme üzerine gelen demetin güç yoğunluğuna ve demetin uygulandığı spot büyüklüğüne bağlıdır. Bu bilgileri tamamlama açısından lazer ışığının önemli karakteristikleri olan ışık şiddeti ve enerji yoğunluğu (veya akı) terimlerini ifade etmekte fayda vardır. Bu manada tanımlanması gereken ışık şiddeti denk (2.7) ve (2.8) ifadeleriyle yukarıda tanımlanmıştı.

Gelen lazer gücü W, aydınlatılan alan cm² ise ışık şiddeti birimi W/cm² olarak tanımlanır. Örneğin; CO_2 lazeri için ortalama güç 50 W olarak alınıp 0,5 cm'lik alana düşürülürse uygulama alanında ışık şiddeti 250 W/cm² olur. Bu lazere odaklama yapılırsa ışık şiddetinin 1500 W/cm² olduğu görülür.

Lazer puls enerjisi sağlıklı bir şekilde ölçülürse, enerji akısı,

$$\text{Akı} = \frac{\text{Laser Puls Enerjisi (J)}}{\text{Aydınlanan Alan } (cm^2)} \qquad (3.7)$$

olarak belirlenebilmektedir. Burada Lazer Gücü ile uygulama zamanının çarpımı bize joule cinsinden puls enerjisini verir. Formülden de görüleceği gibi akı birim alana düşen enerji miktarı olarak j/cm² birimiyle tanımlanmaktadır.

Tablo 3.3: Lazer gücünün yüzey alanı, Mercek odak uzaklığı ve spot büyüklüğü ile değişimi

	Yüzey Alanı (cm^2)				
	0.00785mm	0.03799mm	0.15896mm	0.502mm	3.14mm
	Mercek Odak Uzaklığı				
	50	125	250	340	430
	Spot Büyüklüğü				
Güç(Watt)	0.1mm	0.22mm	0.45mm	0.6mm	0.8mm
80	1.019.108	210.560	50.326	15.924	2.548
70	891.720	184.240	44.036	13.933	2.229
60	764.331	157.936	37.745	11.952	1.910
50	636.943	131.613	31.454	9.960	1.592
40	509.554	105.290	25.164	7.968	1.273
30	382.165	78.968	18.872	5.976	955
20	254.777	52.645	12.582	3.984	637
10	127.388	26.322	6.291	1.922	318
5	63.694	13.161	3.195	996	159

Lazer demetinin malzemedeki etkisini artırmak veya azaltmak için ışık şiddeti üzerinde çeşitli odaklama özellikleri kullanılabilir. Odaklama yöntemiyle yapılan bu düzenlemeler, malzemenin buharlaştırılmasını, kesilmesini, bir başka deyişle ablasyon özelliği oluşturmamızı sağlar.

3.13. Optiksel Güç ve Işık Şiddeti

Optik güç, birim zamanda harcanan ortalama veya pik enerjisine bağlı olarak

$$\mathrm{P\,(Watt)} = \frac{E\ (Joule)}{\tau\,(s)}$$

olarak tanımlanmaktadır. Buna bağlı olarak bu gücün ortaya koyduğu ışık şiddeti I($\mathrm{Wm^{-2}}$) birimi ile verilir ve;

$$\mathrm{I} = \frac{\text{Gelen Laser Gücü (W/s)}}{\text{Aydıydınla Alan (cm}^2\text{)}}$$

(3.8)

şeklinde tanımlanmaktadır.

CW lazer için ışık şiddeti güce (P) bağlı olarak ;

$$\mathrm{I} = \frac{P}{\pi r^2} = \frac{4P}{\pi d^2}$$

ile ifade edilmektedir. Burada r ve d sırası ile ışık demetinin yarıçapı ve çapıdır. Bir başka örnek olarak pulslu lazeri göz önüne alırsak küçük bir problem ortaya çıkmaktadır. Bunun için iki ayrı ışık şiddeti göz önünde bulundurulur. İlk olarak I_{ort} ortalama ışık şiddeti ;

$$\mathrm{I}_{\mathrm{ort}} = \frac{ER}{\pi r^2} = \frac{4ER}{\pi d^2}$$

ifadesiyle verilir. Burada E lazerin her bir puls için joule cinsinden enerji değeri ve R ise lazerin hertz cinsinden puls tekrarlama frekansıdır. İkinci olarak I_{pik} lazer pulsunun pik şiddeti ;

$$\mathrm{I_{pik}} = \frac{\mathrm{E}}{\pi \mathrm{r}^2\,\tau_{\mathrm{puls}}} = \frac{4\mathrm{E}}{\pi \mathrm{d}^2\,\tau_{\mathrm{puls}}} \qquad (3.9)$$

ifadesiyle verilmektedir. Burada τ lazerin puls genişliğidir. Lazer pulsları Şekil (3.6) ve (3.10) ile ortaya konduğu gibi bir τ süresince üniform değildir dolayısıyla sağlıklı bir güç ölçümü yapabilmek oldukça zordur. Bu nedenle pik ışık şiddeti bir puls boyunca lazer gücünün gerçek değişiminin sadece kaba bir ölçümüdür.

3.14. Spot Hacmi

Enerji yoğunluğu değişimi Şekil (3.7) ve odak noktasındaki profili Şekil (3.8) ile verilen Gaussian profiline sahip olan bir lazer demetinin odak noktasındaki spot hacmi

$$w_0 = \frac{f\lambda}{\pi r} \tag{3.10}$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada λ ışığın dalga boyu, r lazer demetinin yarı çapı ve f lensin odak uzaklığıdır.

3.15. Foton Akısı

Bu noktada göz önüne alınmasında fayda görülen son parametre foton akısıdır ve foton I ($foton\,.m^{-2}s^{-1}$) akısıdır. Dalga boyu λ olan bir lazer demeti için foton akısı ;

$$I_{foton} = \frac{\text{Şid det}}{\text{Foton Enerjisi}} = \frac{I}{h\nu} = \frac{I\lambda}{hc} \quad \text{foton / s.m}^2 \tag{3.11}$$

denklemine uygun olarak ışık şiddeti yardımıyla belirlenir

Örnek: Tanımlanan bu parametreleri sayısal olarak belirlemek maksatı ile bir örnek ele almak uygun olacaktır. Bu örneği laboratuarımızda bulunan Nd:YAG lazer parametreleri için tartışalım. Laze demetinin λ=1064 nm dalgaboyunda 10 Hz tekrarlama oranlı 6ns genişliğindeki puls puls başına 800 mJ enerji parametrelerine sahiptir. Buna göre yukarıda tanımlanan parametreleri, odak uzaklığı 10 cm, 15 cm, 20 cm, 25 cm ve 30 cm olan lensler kullanılarak ayrı ayrı hesaplayarak tablo halinde verelim. Bu parametrelerin hesaplanmasında, denk(3.8.) kullanılarak P=1,33x10^8 W/s, Foton enerjisi E=hν=2,27348x10^{-19} J = 2,27348 eV kullanılarak hesplanır.

3.16. Malzeme İşleme Uygulamaları için Önemli Lazerler

Lazerlerin birçok farklı tipleri geliştirilmektedir, fakat sadece belirli lazerler malzeme işleme için kullanışlıdır. Lazerler gün geçtikçe farklı uygulama alanları bulsa da günümüzde lazer cihazları endüstride çoğunlukla

Tablo 3.4: Deney sisteminde kullanılan lazer sistemi için bazı parametrelerin sayısal değerleri.

Odak Uzunluğu (f) (cm)	**Spot Yarıçapı** $r = 2.44f\lambda / D$	**Spot Alanı** $A=\pi r^2$	**Lazer Şiddeti** $I=P/A$ $(W/s.cm^2)$	**Foton Akısı** $I_{foton} = I / h\nu = I\lambda / hc$
10	0,0032452	3,30684E-05	4,02197E+12	1,76909E+31
15	0,0048678	7,44038E-05	1,78754E+12	7,8626E+30
20	0,0064904	0,000132273	1,00549E+12	4,42271E+30
25	0,008113	0,000206677	6,43516E+11	2,83054E+30
30	0,0097356	0,000297615	4,46886E+11	1,96565E+30

- Kesme işlemi,
- Kaynak işlemi,
- Delme işlemi,
- Sertleştirme işlemi,

işlemleri gerçekleştirmek için kullanılmaktadır. Bu işlemlerin gerçekleştirilmesinde sürekli veya pulslu dalga modunda çalışan CO_2 ve Nd: YAG lazerler kullanılmaktadır. CO_2 lazerler çıkış gücünün geniş sınırlar arasında değişebilmesi ve maliyet açısından daha ekonomik olduğu için Nd: YAG lazerlere göre daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır

Malzeme işlemede kullanılan lazer ve kullanım alanları Tablo 3.4'de gösterilmektedir. Nd:YAG ve CO_2 lazerler malzeme işlemede uzun süre kullanılmak suretiyle etkili olmaktadır.

Ruby ve Nd:cam lazerler, küçük sayılı pulslu uygulamalara nazaran büyük enerji gerektiren uygulamalarda kullanılır. Excimer lazer sahip olduğu ultraviyole dalgaboyları ile yüksek soğurulma özelliğine sahiptir. Tablodaki diğer lazer uygulamaları geliştirilmektedir. Kullanılan en önemli iki lazer tipi Nd:YAG ve CO_2 lazerleri için yaygın olan uygulamaları hakkında gerekli bazı bilgiler Tablo 3.5, Tablo 3.6 ve Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.5: Malzeme İşlemede Kullanılan lazerler

Lazer	**Dalgaboyu (µm)**	**Çalışma Şekli**	**Uygulamalar**
CO_2	10.6	Sürekli, pulslu, TEA	Eritme,Isısal İşeme, markalama, delme
Nd:YAG	1.06 0.532	Sürekli, Pulslu	Eritme, markalama, delme
Ruby	0.6943	Pulslu	Spot eritme, delme
Nd:Cam	1.06	Pulslu	Spot eritme, delme
Diod	0.8	Sürekli	Isısal İşeme, mikro işlem
Bakır Buharı	0.511 0.578	Pulslu	Delme
Excimer	0.249	Pulslu	Mikroişleme,Ablasyon, markalama
Argon	0.488 0.5145	Sürekli	Yarıiletken işleme

Tablo 3.6: Metallerin işlenmesinde Kullanılan Lazerler

Lazer	**Isıl işlem**	**Markalama**	**Eritme**	**Delme**	**Kesme**
Orta Güçlü CO_2	----	Evet	Evet	Evet	----
Yüksek Güç CO_2	Evet	Evet	Evet	Evet	----
Düşük Güçlü Nd:YAG	----	Evet	Evet	----	Evet
Yüksek Güçlü Nd:YAG	Evet	Evet	Evet	Evet	----

Tablo 3.7: Ametallerin işlenmesinde Kullanılan Lazerler

Lazer	**Delme**	**Kesme**	**Yazma**	**Markalama**
Düşük Güçlü CO_2	Evet	Evet	----	Evet
Orta Güçlü CO_2	Evet	Evet	----	----
Yüksek Güçlü CO_2	----	Evet	----	----
Düşük Güçlü Nd:YAG	Evet	----	Evet	----
Excimer	Evet	----	----	Evet

Tablolar sırasıyla metaller ve ametaller için tipik uygulamalarda kullanılan güç seviyelerini tanımlar. Tablolar uygulamaları seçmek için genellikle çalışan belirli lazerler olan bir matris uygulaması şeklinde gösterilmiştir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR

Lazerlerin icad edilmesinden bu yana lazerlerin malzeme işleme, yüzey temizleme ve yüzey desenlemede oldukça yoğun bir şekilde kullanılmaktadır ve son yıllarda bu tekniklerde kullanılmasında oldukça anlamlı bir ilgi artışı söz konusudur. Yüksek pik gücü nedeniyle yüksek performans elde edilmesi ve işlenen sistemin komşuluğundaki yapıya en az seviyede zarar vermesi nedeniyle, puls lazerler optik malzemelerin işlenmesinde oldukça anlamlıdır. Elbette yüksek pik gücü malzemede geçici veya kalıcı hasar verebilir.

Bu çalışma temel olarak lazer puls gücünün veya yoğunluğunun fonksiyonu olarak yüzey işleme üzerine odaklanmaktadır. Bilindiği gibi, lazer işleme de yüzey kalitesi ve hasarsızlığı can alıcı bir önem taşımaktadır. Bu anlamda lazerin ürettiği puls parametreleri çalışmalarda oldukça büyük ehemmiyet taşımaktadır. Bu nedenle, ilk önce lazer sistemini ve devamında lazerin etkin parametrelerini ve çalışmaların genel yapısını tanımlayalım.

Özellikle lazer kullanılarak yüzey temizleme işlemi oldukça önemli bir uygulamayı oluşturmaktadır. Gerek eski, tarihi sikkelerin üzerinin ana yapı ve dokuya zarar vermeksizin temizlenmesi, gerek boya çalışmaların yüzeyindeki gerekli temizleme çalılşmları gerekse oksitlenmiş yüzeylerin temizlenmesi oldukça kapsamlı bir şekilde yapılır hale gelmiştir. Günümüze kadar yüzey temizleme işlemi kimyasal temizleyiciler kullanılarak yapılmaktaydır. Bu tür geleneksel tekniklerin uygulanması, kullanılan kimyasalların yüzey temizleme yaparken aynı zamanda eserin kendisine de zarar vermekte ve bu tür zararlar geri dönüşü olmayan hatalara sebep olmaktadır. Bu çalışmalara alternatif olarak ortaya konan ve başarılı bir şekilde uygulanan lazer ablasyon tekniği son yıllarda, yukarıda da belirtildiği gibi oldukça yoğun ilgi görmektedir. Bu ilginin temel kaynağı lazer ablasyonun oldukça cazip bazı avantajlara sahip olmasıdır. Bu avantajlardan bazıları; etkileşmeye girdiği alan dışına zarar vermemesi, yani nümuneye zarar vermeksizin boya ve kirleri başarılı bir şekilde uzaklaştırması olarak öne çıkmaktadır. Bu alanda kentsel yapıların yüzeyinde oluşan grafit

temizlenmesi için bir Nd:YAG lazer kullanılarak detaylı bir çalışma yapılmış ve özellikle temel (1064 nm), birinci harmonik (532 nm) ve ikinci harmonik (355 nm) dalga boyları kullanılarak karşılaştırılmalı olarak tartışılmıştır (Costela *et al*., 2003). Yüzey temizlemenin en güzel örneklerinden birisi, yüzeyin tozdan arındırlması, boyanın temizlenmesi ve yüzey oksitlenmesinin temizlenmesi işlemi CO_2 ve Nd:YAG lazerler kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Daurelio *et al.*, 1999).

Çok hassas ve zayıf malzemelerin temizlenmesinde oldukça başarılı olabilen lazer yüzey temizleme tekniği tekstil liflerinin zarar verilmeden temizlenmesinde oldukça iyi çalışmalar ortaya koymaktadır. Özellikle tarihi tekstil malzemelerin temizlenmesini başarılı bir şekilde gerçekleştirebilmesi oldukça önemli bir uygulama ortaya koymaktadır. Arkeolojik eserlerin üzerleri özellikle toz, toprak ve böcekler tarafından kaplanabilir. Dolayısıyla ana esere zarar vermeden yüzey temizliğini başarabilmek gerekmektedir (Belli *et al.*, 2005).

Tarihi eserler elbetteki sadece tekstil mazemeler veya boyalardan oluşmamaktadır. Genellikle metal veya bakır arkeolojik malzemelerin yüzeyleri ince bir oksit tabaka ile kaplanmıştır. Bu ince filmin malzemenin orijinaline zarar vermeksizin temizlenmesi gerekmektedir. Buna güzel bir örnek olacak çalışma Drakaki ve arkadaşları tarafından başarılı bir şekilde yapılmıştır (Drakaki *et al*., 2004). Bu çalışmada CO_2, Er:YAG ve Nd:YAG lazerler kullanılarak antika sikkelerin temizlenmesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırılmalı olarak verilen sonuçlardan, kuru nümune üzerinde en başarılı sonucun firekan çiflenmiş (532 nm) Nd:YAG lazerle yapılan çalışmadan alındığı sonucu yorumlanmıştır (Drakaki *et al*., 2004). Islak nümuneler üzerinde yapılan çalışmalarda her üç lazerinde daha başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Daha pratik uygulama alanı sayılabilecek diğer bir çalışma ise elektronik baskı devresinin temizlenmesi çalışmasıdır ve çeşitli başarılı çalışmalar bu konuda ortaya konulmuştur (Song *et al.*, 2003). Bu çalışmada bir Nd:YAG lazer kullanılması, bizim çalışmamıza uygunluk bakımından oldukça ehemmiyet taşımaktadır. Bu çalışmada baskı devresinin yüzeyini kaplayan reçine tabakası, tabakanın ablasyona uğrama eşik yoğunluğun 75 mJ/cm^2 değerinin üzerinde bir puls enerjisiyle başarılı bir şekilde temizlendiği ortaya konulmuştur. Bunun yanı

sıra, lazer akısının artmasıyla artan bir temizleme verimi ortaya konmuştur. Akının artmasıyla herhangi bir oksitlemenin meydana gelmediği ve baskı devresinde (temizleme yüzeyinde) herhangi bir hasar meydana gelmediği yorumlanmıştır (Song *et al.*, 2003).

Lazer yüzey temizleme sürecinde, lazer yüzey temizleme süresi ve lazer parametreleri, kaplamanın özellikleri ve çalışma şartları arasındaki ilişkilere dayalı olarak yüzey temizleme verimliliği detaylı bir şekilde çalışılarak, lazer yoğunluğunun artırlıması veya lazer spot hacminin küçültülmesi ile temizleme veriminin (hızının) arttığı ortaya konulmuştur (Zhou *et al.*, 2002).

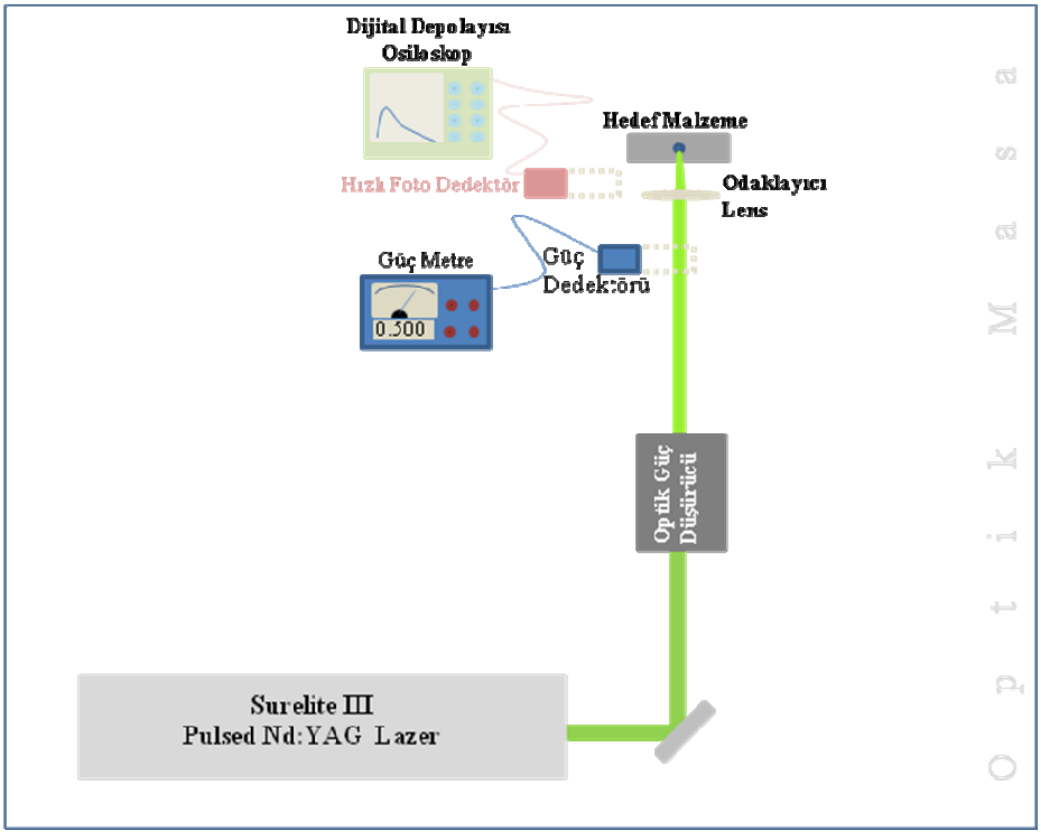
Bu çalışmalar ve günümüzde duyulan gereksinimin bilinci ışığında, lazer yüzey temizleme dinamikleri ve lazer ablasyon mekanızmasını işleterek, lazer gücünün, diğer bir deyişle lazer yoğunluğunun fomksiyonu olarak yüzey çalışmaları yaparak literatüre, bilimsel çalışmalara ve eknolojiye gerekli katkıyı yapmayı hedeflemekteyiz. Bunun için ilk önce çalışmalar sürdüreceğimiz deney sistemi ve diğer parametreleri tanımlayalım.

4.1. Deneysel Sistem

Bu çalışmada kullanılan deney düzeneği Şekil 4.1 ‘de görülmektedir. Sistem, bir optik masa üzerine kurulmuş lazer, optik dizayin, fotodedektör, osiloskop ve bilgisayardan oluşmaktadır.

Bu çalışma için yapılan deneyler ve yüzey işleme işlemleri atmosfer basıncı altında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Yüzeyi üzerinde işlem yapılan malzeme bir levha şeklinde olup x-y-z düzlemlerinde hareket edebilen bir tabla üzerine monte edilmiş, lazer demetinin levha üzerindeki pozisyonu ve odaklam durumu ayarlanmıştır. İyi bir termal iletken olması bakımından nümune olarak bakır seçilmiştir. Bakır diğer metaller arasında en düşük ablasyon oranına sahip nümune

olduğu iyi bilinmektedir (Maier-Komor, 1991). Bu nedenle nümune üzerinde büyük oranda bir ablasyon elde edilmesi umulmamaktadır.



Şekil 4.1: Çalışmada kullanılan deney düzeneğinin blok şeması görülmektedir.

4.2. Lazer Sistemi

Puls lazer malzeme işlemek üzere Continuum şirketinden temin edilmiş ve laboratuarımızda mevcut olan Surelite III model mode-locked bir Nd:YAG lazer sistemi kullanılmıştır. Bu lazer sistemi 1064 nm dalga boyunda temel, 532 nm dalgaboyunda birinci ve 355 nm dalga boyunda ikinci harmonik ışıma yapmaktadır. 6 ns (FWHM) genişliğinde üretilen pulslar 1064 nm dalga boyunda 800 mJ puls enerjisinde üretilmektedir. Bunun yanı sıra 532 nm dalgaboyunda lazer 800 mJ

maksimum puls enerjisi sağlamaktadır. Deneylerde kullanılan lazer sisteminin bir fotografı Şekil 4.2 ‘de görülmektedir.

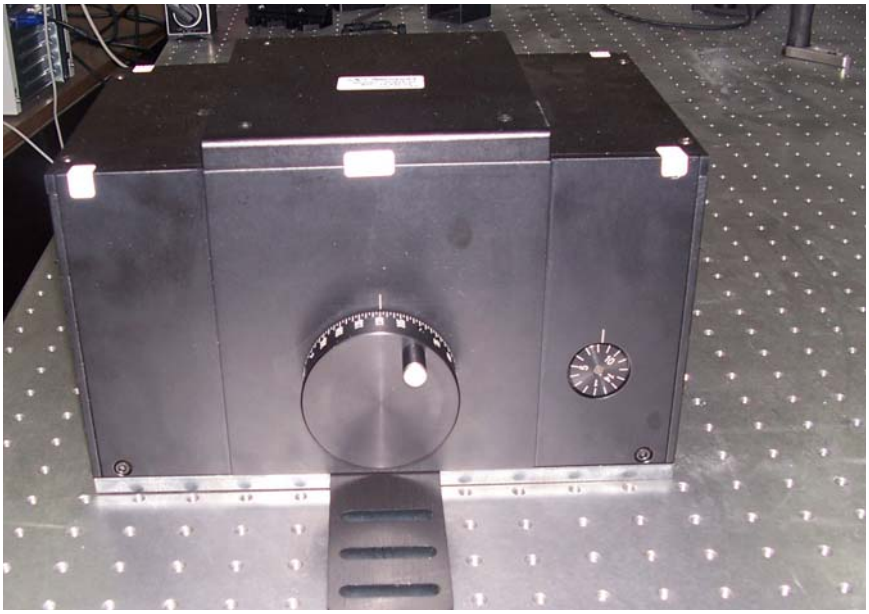
Q-Switched pulslu Nd:YAG lazer sistemi 5 ns puls üretmektedir. Puls başına 800 mJ enerji üreten bu yüksek güçlü lazer sisteminin çıkış gücü ciddi anlamda kontrol edilmesi gerekmektedir ve oldukça zor kontrol edilebilmektedir. Bunun için kullanılması gereken optik malzemeler oldukça pahalı ve özel üretim gerektirmektedir. Bu nedenle seçilen ve satınalınan bütün malzemeler oldukça sıkı bir çalışmayla temin edilmiştir.



Şekil 4.2: Continuum, Surelite III laser görülmektedir.

4.3. Puls Enerjisinin Düşürülmesi

Puls enerjisi Newport şirketi tarafından sağlanan bir yüksek enerji düşürücü kullanılarak, lazer enerjisi en büyük değerden en küçük değere kadar değiştirilmiştir ve lazer yüzey işleme süreci lazer puls enerjisinin bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Kullanılan güç düşürücü Şekil 4.3’te görülmektedir.



Şekil 4.3: Çalışmada kullanılan Newport marka, 935-10 model güç düşürücü görülmektedir.

Güç düşürücü, 1064 nm dalga boyunda 3 J/cm^2 hasar eşik değerine sahiptir. Dolayısıyla laboratuarımızdaki lazer sistemi 1064 nm dalgaboyunda ve 6 ns puls genişliğinde yaklaşık 1 J/cm^2 puls enerjisi üretmektedir.

Ayrıca sağlanan bu güç düşürücü, geniş bir dinamik bölgeye, geniş band geçirgenliğe, büyük bir hasar eşik gücüne ve ihmal edilebilir demet sapmasına sahiptir. 10 cm yarık çapına sahiptir.

Dolayısıyla bu attenuatör laboratuardaki lazer sisteminde herhangi bir tereddüte yer vermeksizin güvenle kullanılabilecek yeterli fiziksel özelliklere sahiptir.

4.4. Puls Gücünün Ölçümü

Puls gücünün belirlenmesi metodu bölüm-2'de detaylı bir şekilde verilmiştir. Verilen bu hesaplama metodu ve formülasyonu kullanılarak, puls

enerjisi Joule cinsinden ölçülerek puls başına güç hesaplanabilir veya direk puls gücü öçülebilmektedir. Laboratuarımızda her iki ölçümde yapılabilmektedir fakat bir işlem daha az yapmak amacıyla güç ölçümü yaparak işlemleri yürüttük. Bu ölçümler Newport marka, 1825-C model bir Güç/Enerji ölçer kullanılarak ortaya konmuştur.

Şekil 4.4, yüksek güç dedektörü ve bağlı olduğu enerji/güç ölçerin birer fotografını göstermektedir.



(a) **(b)**

Şekil 4.4: Laser gücünün ölçülmesi için kullanılan Newport marka, (a)1825-C model bir güç ölçeri ve (b) 818P model güç dedektörü görülmektedir.

Bu enerji/güç ölçer bir 818P Model bir yüksek güç dedektörüne bağlanarak güç ölçülebilmektedir. Laboratuarımızda her iki dedektör mevcut olup, lazer gücünü ölçüp, odaklama şartlarını belirleyerek lazer spot hacminde oluşan lazer yoğunluğunu hesaplayarak sonuçlar ölçülmeye çalışılmıştır. Şekil 4.4 laboratuarımızda mevcut olan bir Newport marka, 1825-C model bir Güç/Enerji ölçeri göstermektedir.

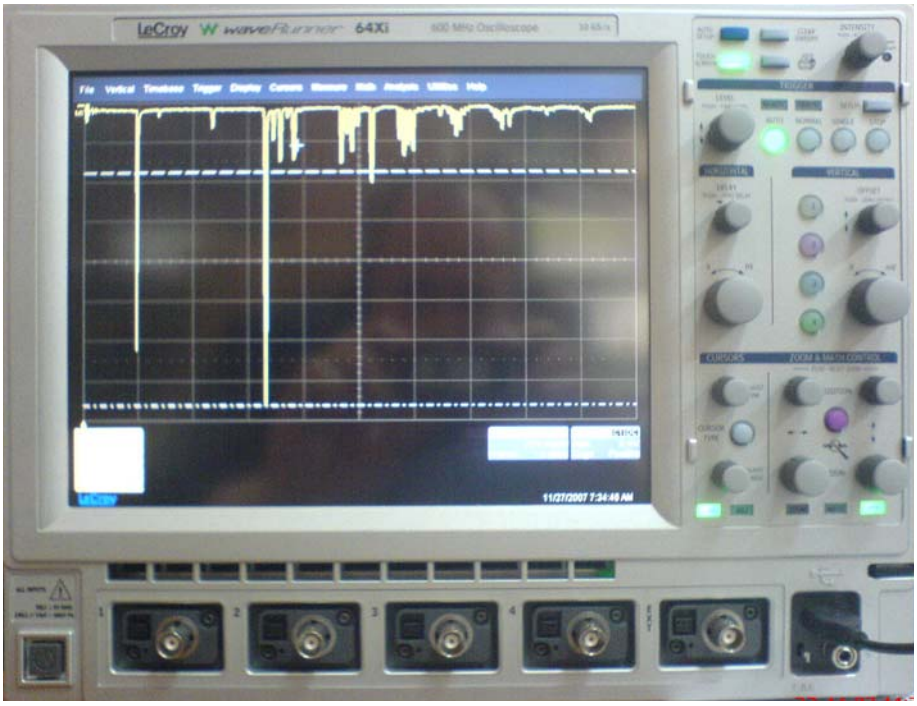
Kullandığımız ve Şekil 4.4 ile yukarıda bahsedilmiş olan Newport marka, 1825-C model Güç/Enerji ölçer ile birlikte verilen 818P-030-18 model güç dedektörünün ölçme bölgesi 20mW-30W arasındadır ve optik güç ölçümünde gerekli

ölçüm bölgesini kapsamakta ve laboratuarımızdaki lazer sistemimizin çıkışını ölçmek için oldukça uygun bir dedektör özelliği ortaya konmaktadır. Bu dedektör serisi geniş band, spektral olarak genel kullanım için düzlem güç dedektörüdür. Lazer sisteminin maksimum çıkış gücü yaklaşık 800 mW civarındadır ve dedektörün kullanım aralığı 20 mW-30 Watt aralığındadır. Dolayısıyla, 20-800 mW arasındaki güç değerleri optik güç düşürücü kullanılarak değiştirilmiş ve çalışmalar gücün fonksiyonu olarak irdelenmiştir. Diğer taraftan dedektör 190-2500 nm aralığıda kullanılabilme özelliğine sahiptir. 1064 nm dalgaboyunda ölçülebilen maksimum yoğunluk 4 J/cm^2 olarak bilinmektedir. Fiziksel olarak dedektör aktif çapı 18 mm ve aktif alanı 2.54 cm^2 dir. Lazer demet çapı 8 mm 'dir ve rahatlıkla tüm demet dedektör yüzeyine herhangi bir odaklama yapılmaksızın düşürülebilmektedir.

4.5. Data Ölçme ve Değerlendirme Sistemi

Veri toplama ve değerlendirme işleminde temel olarak bir LeCroy 64Xi ***Wave****Runner*, 600 MHz sayısal depolayıcı osiloskop ve bir PC bilgisayar kullanılmıştır. Bir yüksek hızlı foto diyod osiloskopa bağlanarak kullanılmak sureti ile lazer çıkışının demet profili kontrol altında tutulmuş ve malzeme yüzeyinden yansıyan enerji şideeti sürekli bir şekilde osiloskop ekranından monitörize edilmiştir. Şekil 4.5 laboratuarımızda mevcut olan LeCroy 64Xi ***Wave****Runner*, 600 MHz sayısal depolayıcı osiloskopu görüntülemektedir.

LeCroy 64Xi ***Wave****Runner*, 600 MHz sayısal depolayıcı osiloskop Microsoft Windows XP yüklü olarak temin edilmiş olup, Windows altında çalışmaktadır ve datayı faklı formatlarda dijital olarak kaydedebilme özelliğine sahiptir. Bu çalışmada datayı zaman zaman kullanım amacına yönelik olarak Microsoft Office Excel veya osiloskopun okuyabildiği ikilik sayı koduyla kaydettik. Osiloskop ikilik sayı kodunda kaydedilen sinyali tekrar okuyabilme ve analiz edebilmemize yardımcı olmaktadır. Excel formatında kaysettiğimiz sinyalleri ise Microsoft Office ortamında analiz edebilmekteyiz.



Şekil 4.5: LeCroy 64Xi ***Wave****Runner*, 600 MHz dijital depolayıcı osiloskop.

LeCroy 64Xi ***Wave****Runner*, 600 MHz sayısal depolayıcı osiloskopu lazer çıkışını ölçebilecek bir band genişliğine sahiptir ve ultrafast fotodiyot kullanılarak lazer çıkışının direk olarak gözlenmesini sağlamaktadır.

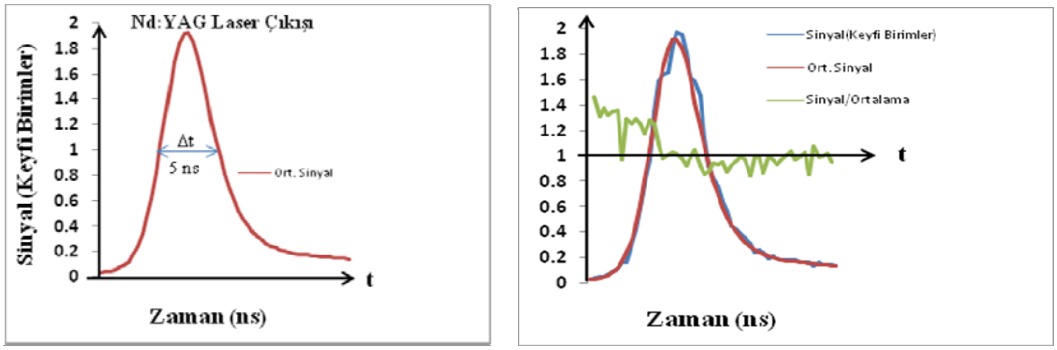
4.6. Lazer Puls Biçimi

Laboratuarımızda mevcut olan ve bu çalışmada kullanılan laser sisteminin çıkış enerji profili yine laboratuarımıza alınan bir LeCroy 64Xi ***Wave****Runner*, 600 MHz dijital depolayıcı osiloskop yardımıyla UPD serisi bir UPD-70-UVIR-D model hızlı bir fotodiyot kullanılmıştır. Kullanılan foto diyodun tepki zamanı 70 ps değerinden daha küçük ve 250-1700 nm dalga boyu bölgesinde çalışmaktadır. Laser puls genişliği 5 ns civarında katalog değerine sahiptir ve yukarıda tanıtımını yaptığımız osiloskop ve UPD dedektör kullanılarak laser çıkış pulsunun genişliği (FWHM) 5 ns olarak ölçülmüştür. Tekrar tekrar yapılan ölçümlerde puls

genişliğinin değeri 5-6 ns arasında bulunmuştur. 5 ns ölçebildiğimiz minimum çizgi genişliğidir.

Şekil 4.6, Nd:YAG lazer çıkışının bir UPD-70-UVIR-D model hızlı fotodiyodun ve LeCroy 64Xi ***Wave****Runner*, 600 MHz dijital depolayıcı osiloskop tarafından ölçümünü göstermektedir. Grafik zamana karşı enerji şiddetini göstermektedir.

Osiloskop impedans çiftlenimi 50 Ω olarak ayarlanmıştır. Osiloskop aynı zamanda UPD diyot çıkışının kendisiyle trigger edilmiştir. Diyot üzerine düşen laser puls gücünün nokasına büyüklüğü diyodun herhangi bir yüzeyden yasıtılarak dedektörün yansıma noktasına uzaklığı değiştirilerek ayarlanmıştır. Laser güç seviyesi osiloskopun trigger eşik değeri ve diyodun doyum değerleri arasında dar bir bölgeye sınırlıdır. Çok hassas olmamakla beraber bu sınırlar arasında, doyum değerine yaklaşıldıkça çok az bir güç genişlemesinin gerçekleştiği gözlenmiştir.



(a) **(b)**

Şekil 4.6: Laser çıkışı görülmektedir. **(a)** Lazer çıkışını 500 puls üzerinden alınan ortalamasını göstermektedir. **(b)** Tek lazer pulsu ile 500 lazer pulsu üzerinden alınan ortalamanın karşılaştırmasını vermektedir.

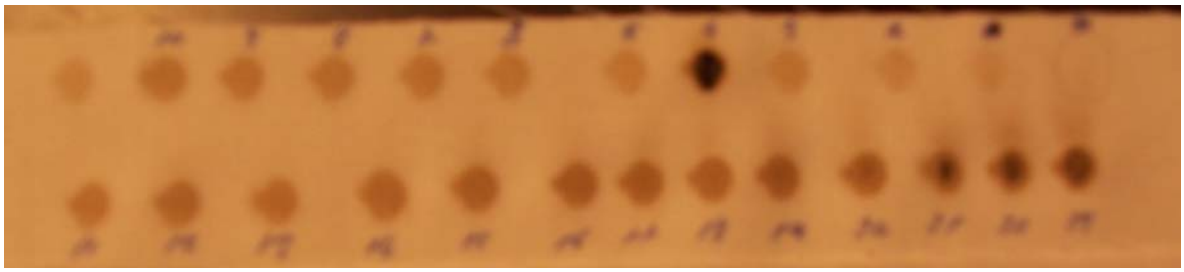
Şekil 4.6(a) lazer çıkışını göstermektedir. Bu data 500 puls üzerinden ortalama alınarak kaydedilmiştir. Grafiğin genişliği laser puls genişliğini ifade etmektedir ve laser pulsunun genişliği (FWHM) 5 ns olarak ölçülmüştür. Fakat yüksekliği skalaya konmaksızın keyfi birimlerde çizilmiştir ve kaydedilmiştir. Şekil 4.6(b) ise (a) ile verilen sinyali tek puls üzerinden alınan data ile karşılaştırmaktadır. Sinyal ortalama sinyalin altında kalmakta zor bir şekilde görselleşmektedir.

Kahverengi sinyal (a) ile verilen 500 puls üzerinden ortalama alınarak kaydedilen sinyal, onun altında zorla görülebilme durumundaki mavi sinyal ise tek puls üzerinden kaydedilen sinyali göstermektedir. Bu karşılaştırmanın daha anlamlı bir şekilde yapılabilmesi için Şekil 4.6(b) ile verilen yeşil çizgi ile bu iki sinyalin birbirine oranını (S1/S2) verilmektedir. Bu oran sinyalinden görüldüğü gibi S1/S2 oranının grafiği (S1/S2 =1) bir civarında salınmaktadır. Bu durum lazerin oldukça kararlı puls ürettiği anlamında yorumlanabilmektedir.

4.7. Tekstil Temizleme Çalışmaları

Deneysel çalışmalarda, yukarıda bahsedildiği gibi laser puls biçimi ve laser puls enerjisi belirlenerek ve parametrelerin doğru olduğundan emin olunarak başlanmıştır. Çalışma dalgaboyu Nd:YAG laserin 532 nm ikinci harmonik dalgaboyu kullanılmıştır. Bu çalışmada laser demeti odaklanmaksızın free running modunda kullanılmış ve kullanılan demet gücü 620 mW olarak ölçülmüştür.

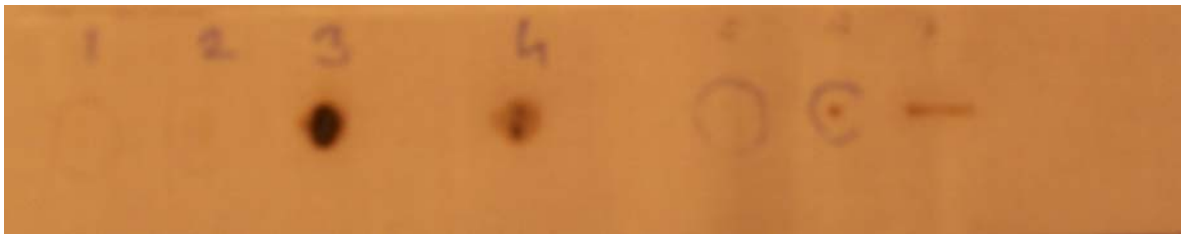
İlk olarak nümune uygun bir destek zemininin üzerine tutturulmuştur. Malzeme üzerinde doğan spotlar laser spotunun yapısını yansıtabilir bir görüntü ortaya koymaktadır. Çalışmada sadece 532 nm ve 355 nm dalgaboyu kullanılmıştır, lazer puls sayısı ve laser puls enerjisi değiştirilerek spotlar hem puls sayısı hemde puls enerjisinin fonksiyonu olarak kaydedilmiştir.



Şekil 4.7: Laser puls atışlarıyla bir tekstil yüzeyinde yapılan sistematik bir temizleme çalışması görülmektedir.

Şekil 4.7 bu şekilde belirlenen parametrelerle free running laser kullanılarak yapılmıştır. Deneyin yapılışına gelince, Şekil 4.7 de iki sıra data alınmıştır. Üst sıra soldan sağa doğru artan puls sayısıyla değişen desenli spotlardır. En soldan sağa doğru, bir tek puls, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 ve 100 puls kullanılarak elde edilen spotlardır. Alt sıradaki spotlar ise soldan sağa doğru giderek artan puls sayısıyla alınmıştır ve 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200, 220, 250 ve 300 puls kullanılarak kaydedilmiştir. Elde edilen bu spotlar bir Sony Cybershot marka ve DSC-W55 7.2 MP model dijital fotograf makinası kullanılarak resmedilmiştir.

Çalışmanın bu deneyinde kumaş fiberlerinin zarar görmeyeceği ve zarar görmeksizin en güzel bir tarzda temizleneceği puls sayısını belirlemektir. Bu nedenle, detaylı bir çalışma puls sayısı değiştirilerek yapılmıştır. Genişletilmiş skalada gösterilen Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 numaralı resimlerde bu durum kolayca görülebilmektedir. Görüldüğü gibi puls sayısı artırıldıkça kumaş yüzeyi daha güzel temizlenmektedir ve lifler daha aşikar bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Fakat belli bir puls sayısından sonra liflerin yavaş yavaş zarar görmeye başladığı görülmektedir. Belirli bir puls sayısından sonra malzemenin tamamen tahrip olmaya başladığı görülmektedir.



Şekil 4.8: Soldan sağa doğru sırasıyla 5, 10, 500, 200, puls kullanılarak elde edilmiş spotlardır.

Lazerlerin icad edilmesinden bu yana lazerlerin malzeme işleme, yüzey temizleme ve yüzey desenlemede oldukça yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma S.Ü. BAP Bürosu tarafından desteklenen 06201068 ve 06101045 numaralı tez projeleri, 06401024, 2003135 ve 05401021 numaralı BAP tarafından desteklenen araştırma projeleri ile birlikte TÜBİTAK tarafından desteklenen 106T679 numaralı araştırma projesi üzerinden sağlanan destekler toplamıyla kurulan laboratuar kullanılarak yapılmıştır. Dolayısıyla ilgili desteklerinden dolayı adı geçen kuruluşlara son derece minnettar olduğumu ve teşekkürü bir borç bilirim.

KAYNAKLAR

Bäuerle, D., "*Laser processing and chemistry*", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1996.

Belli, R., Miotello, M., Mosaner, P. And Tuniutti, L., Applied Surface Science, **247** (2005) 369-372.

Costela, A., Carsía-Moreno, I., Gómez, Caballero, O and Sastre, R., Applied Surface Science, **207** (2003) 86-99.

Daurelio, G., Chita, G. And Cinquepalmi, M., Applied Physics **A69** (1999) S543-S546.

Drakaki, E., Karydas, A.G., Klinkenberg, A., Kokkoris, M., Serafettinidies, A.A., Stavrou, E., Vlastou, V. And Zarkadas, C., Applied Physics **A79** (2004) 111-115.

Meier-Komor, P., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **B56/57** (1991) 921-925.

Svelto, O., Principle of Lasers, Plenum Press, New York London, 1989.

Song, W.D., Hong, M.H., Lu, Y.F. and Chong, T. C., Applied Surface Science, **208-209** (2003) 463-467.

Zhou, X., Imasaki, K., Furukawa, H., Nakai, S. And Yamanaka, C., The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **19** (2002) 642-645.

Anderson, M. H., Ensher J. R., Matthews M. R., Wieman C. E., and Cornell, E. A. 1995. Observation of Bose-Einstein condensation in a dilute atomic vapor. Science **269**, 198-201.

Chae, H. and Park, S.M., "*Mass spectroscopic studies on the laser ablation of boron nitride*", applied Surface Science, **127-129**, 304-308, 1998.

Choi, T.Y. and Grigoropoulos, C.P., "*Plasma and ablation dynamics in ultrafast laser processing of crystalline silicon*", Journal of Applied Physics, **92**, 9, 2002.

Di Palma, T.M., Orlando, S., Giardini-Guidoni, A., Paul, A.J., Hastie, J.W. and Mele, A., "*Composition and gas dynamics of laser ablated AIN plumes*", Applied Surface Science, **86**, 68-73, 1995.

Kelly, R. and Dreyfus, R.W., "*Reconsidering the mechanisms of laser sputtering with Knudsen layer formation taken into account*", Nucl. Instr. Meth. B, **32**, 341, 1988.

Kools, J.C.S., Brongersma , S.H., van de Riet, E. and Dieleman, J., "*Concentrations and Velocity Distributions of Positive Ions İn Laser Ablation of Copper*", Appl. Phys. B, **53**, 125-130, 1991.

Liu, H.C., Mao, X.L., Yoo, J.H. and Russo, R.E., "*Early phase laser induced plasma diagnostics and mass removal during single-pulse laser ablation of silicon*", Spectrochim. Acta B, **54**, 1607, 1999.

Lunney, J.G. and Jordan, R., "*Pulsed laser ablation of metals*", Applied Surface Science, **127-129**, 941-946, 1998.

Pinho, G.P., "*UV laser ablation of metals*", Doctor of philosophy, waterloo, Ontario, Canada, 1998.

Rubahn, H.-G., "*Laser applications in surface science and technolgy*", John Wiley&Sons, 1999.

Russo, R.E., Mao, X., Liu, H., Gonzalez, J. and Mao, S.S., "*Laser ablation in analytical chemistry-a review*", Talanta, **57**, 425-451, 2002.