

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇEŞİTLİ LAZER PARAMETRELERİNİN SİLİKON MALZEME DELME
SÜRECİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayşegül SAYDAM

Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇEŞİTLİ LAZER PARAMETRELERİNİN SİLİKON MALZEME DELME
SÜRECİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ayşegül Saydam
518101049**

Mekatronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ali Fuat ERGENÇ

HAZİRAN 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 518101049 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ayşegül SAYDAM** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ÇEŞİTLİ LAZER PARAMETRELERİNİN SİLİKON MALZEME DELME SÜRECİNE ETKİSİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Ali Fuat Ergenç**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. İlker Murat Koç**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Fevzi Çakmak Cebeci
Sabancı Üniversitesi

Teslim Tarihi : **5 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **8 Haziran 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Lazerle silikon malzemeye delik açma sürecine etkiyen çeşitli parametrelerin, delik çap ve kalitesine etkisini konu alan bu çalışmamızda, yardımlarını esirgemeyen yüksek lisans tez danışmanım, Sayın Yrd. Doç. Dr. Ali Fuat Ergenç'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamızda kullandığımız cihazları hizmetimize sunan, Yıldız Makine' nin sahibi Sayın Kazım Yıldız'a, Fizik laboratuvarını kullanımımıza açan Sayın Doç. Dr. Selçuk Aktürk'e, bilgilerini esirgemeyen, Arş. Gör. Ramazan Şahin'e

Ve değerli aileme, desteklerinden dolayı teşekkürü borç bilirim.

Haziran 2015

Ayşegül Saydam
Fizikçi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür araştırması	2
1.3 Mikroelektromekanik süreçte lazerle delme ve önemi.....	11
2. LAZERİN TANIMI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ.....	13
2.1 Lazerlerin Çalışma Prensibi	13
2.2 Lazer Işığının Özellikleri	14
2.3 Lazerlerin Endüstrideki Kullanımları.....	15
Mikroelektronik ve yarı iletkenlerde	15
2.4 Lazer çeşitleri	17
2.4.1 Gaz lazerler	18
2.4.1.1 HeNe gaz lazeri	18
2.4.1.2 Excimer lazerleri	18
2.4.1.3 Argon iyon (Ar ⁺) lazer	19
2.4.1.4 Karbondioksit Gaz Lazerler	19
2.4.1.5 Metal buharı lazerleri	19
2.4.2 Katı-hal lazerleri	20
2.4.2.1 Yakut Lazeri.....	20
2.4.2.2 Neodymium-YAG Lazer.....	20
2.4.2.3 Alexendrite lazerler	21
2.4.3 Boya lazerleri	21
2.4.4 Yarı iletken lazerler.....	21
2.4.5 Kimyasal Lazerler	22
2.4.6 Serbest elektron lazerleri.....	22
2.5 Lazere ait delme parametreleri	23
2.5.1 Lazer dalgaboyu ve frekansı	23
2.5.2 Atım genişliği.....	23
2.5.3 Atım tekrar sayısı ya da atım frekansı	24
2.5.4 Ortalama güç	24
2.5.5 Pik gücü.....	24
2.5.6 Akış (Fluence).....	24
2.5.7 Odak pozisyonu.....	24
2.6 Lazerde Güç ve Enerji.....	24
2.6.1 Q anahtarlama	25

2.6.2 Mod kilitleme	25
2.7 Lazerle Delme yöntemleri	26
2.7.1 Tek atım delme (single shot)	26
2.7.2 Darbeli (percussion) delme	26
2.7.3 Kuyu delme burgusu (trepanning)	27
2.7.4 Sarmal kuyu delme burgusu (helical trepanning)	27
2.8 Lazerle delinmiş deliklerin kalitesi	28
2.8.1 Konik açısı	28
2.8.2 Yeniden şekillendirilmiş malzeme	29
2.8.3 Püskürtülen malzeme (yüzey kalıntıları)	29
2.8.4 Mikroçatlaklar	30
2.9 Silikon malzemenin özellikleri	31
2.9.1 Fiziksel özellikleri	31
2.9.2 Mekanik özellikleri	32
2.9.3 Elektriksel özellikleri	32
2.9.4 Termal özellikleri	33
2.9.5 Optik özellikleri	33
3. ÇALIŞMALARDA KULLANILAN LAZERLER VE MALZEMELER.....	35
3.1 Kullanılan Lazerlerin Özellikleri	35
3.2 Kullanılan malzemeler	36
3.3 Kullanılan yöntemler	36
3.4 Kullanılan Diyot lazer ışın kaynağının alt bileşenleri ve çalışma prensibi	36
3.4.1 Lazer ışın kaynağı alt bileşenleri	36
3.4.2 Çalışma prensibi	37
3.5 Diğer Alt Lazer Birimleri	37
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	39
4.1 Silikon yüzeye boydan boya delik açılması	39
4.1.1 Amaç	39
4.1.2 Kullanılan lazer ve malzeme	39
4.1.3 Yöntem ve uygulama 1	39
4.1.3.1 Kullanılan parametreler	39
4.1.4 Yöntem ve Uygulama 2	40
4.1.4.1 Kullanılan parametreler	40
4.1.5 Sonuç	41
4.2 Ortalama lazer gücü-delik çapı ilişkisi	42
4.2.1 Amaç	42
4.2.2 Kullanılan malzeme ve lazerler	42
4.2.3 Yöntem ve uygulama 1	42
4.2.3.1 Parametreler	42
4.2.4 Yöntem ve uygulama 2	45
4.2.4.1 Parametreler	46
4.2.5 Yöntem ve uygulama 3	48
4.2.5.1 Parametreler	48
4.2.6 Sonuç ve tartışma	49
4.3 Atım genişliğinin odaklanılan bölge etrafındaki ısıdan etkilenmiş bölgeye (HAZ) etkisi	50
4.3.1 Amaç	50
4.3.2 Kullanılan malzeme ve lazerler	50
4.3.3 Yöntem ve uygulama 1	50
4.3.3.1 Parametreler	51

4.3.4 Yöntem ve uygulama 2	52
4.3.5 Sonuç ve tartışma	52
5. ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ.....	57

KISALTMALAR

MEMS	: Micro electromechanical Systems
VA-MWNT	: Vertically-Aligned Multiwall Carbon Nanotube
VACNT	: Vertically Aligned Carbon Nanotube
CNC	: Computer Numerical Control
FPGA	: Field Programmable Gate Array
SEM	: Scanning Electron Microscope
HAZ	: Heat Affected Zone
DPSS	: Diode pumped solid state
UV	: Ultra Violet
TEM	: Transverse electromagnetic (TEM) modes
ITO	: İndium Tin Oksit
RFID	: Radio-frequency identification
CW	: Continuous Wave
CD-ROM	: Compact Disc Read-Only Memory
DVD-ROM	: Digital Versatile Disc-Read Only Memory
Q	: Quality
DPL	: Diode Pumped Laser
DFL	: Diode Fiber Laser
IR	: Infrared
Nd:YAG	: Neodymium-Doped Yttrium Aluminium Garnet
EWT	: Emitter Wrap Through
MWT	: Metal Wrap Through
PV	: Photovoltaic
MATLAB	: Matrix Laboratory

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Bazı lazer türlerinin karşılaştırılması	23
Çizelge 3.1 : Kullanılan lazerlerin özellikleri.....	35
Çizelge 4.1 : Güç-ortalama ışık giriş yüzeyi delik çapı.	43
Çizelge 4.2 : Her bir atım enerjisine karşılık gelen ortalama delik çapları.	44
Çizelge 4.3 : Ortalama güç-ortalama delik çapları.	47
Çizelge 4.4 : Her bir güç değerine karşılık gelen ortalama delik çapları.	49

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : VA-MWNT model yapıları.....	1
Şekil 1.2 : Giriş delik çapı (a) ve çıkış delik çapı (b) sırayla ortalama güç 200 mW, 300 mW ve 400 mW, altlık sıcaklığının fonksiyonu olarak.	3
Şekil 1.3 : 190 µm kalınlıkta tabaka için, farklı spot çaplarında ve atım genişliklerinde delik çapının atım enerjisiyle değişimi.....	5
Şekil 1.4 : Çeşitli lazer güçlerinde atım sayısının $d_{giriş}$ üzerindeki etkisi	6
Şekil 1.5 : Lazer gücünün giriş ve çıkış delik çapı üzerindeki etkisi.	7
Şekil 1.6 : Hava ve su için, delme hızı 0.5 mm/s’de giriş ve çıkış delikleri: havada a) giriş deliği; (b), çıkış deliği-su altında delmede (c) giriş deliği; ve çıkış deliği.....	9
Şekil 1.7 : Silikon üzerinde, 25 mm lens ile power gator UV darbeli ablasyon.....	10
Şekil 1.8 : Farklı tekrar sayıları için, 10 watt ile 355 nm’de silikon odak pozisyonu ablasyon oranı.	10
Şekil 1.9 : Silikon üzerinde kuyu delme burgusu deliği.....	11
Şekil 2.1 : Uyarılmış atom ve temel seviyeye dönen atomun foton yayınlaması.....	13
Şekil 2.2 : Tipik bir lazer düzeneği	14
Şekil 2.3 : Lazerin ışık spektrumundaki yeri	17
Şekil 2.4 : Tek atım lazer delme metodu	26
Şekil 2.5 : Darbeli delme metodu	27
Şekil 2.6 : Kuyu delme burgusu metodu	27
Şekil 2.7 : Sarmal kuyu delme burgusu metodu	28
Şekil 2.8 : a) Darbeli delme metodu, b) kuyu delme burgusu-150 mJ atım.....	28
Şekil 2.9 : Delik kalitesini etkileyen özellikler	30
Şekil 2.10 : Tek kristalli silikonun kristal yapısı	31
Şekil 2.11 : Silikon malzemede kristal yönelimleri	32
Şekil 3.1 : DPL nexus marker lazer ışın kaynağının bileşenleri.....	36
Şekil 4.1 : Lazerle dairesel şeklin taratılarak delinmesi.	40
Şekil 4.2 : Işının giriş yüzey delik çapı 515.64 µm.	40
Şekil 4.3 : Işının çıkış yüzey delik çapı 388.94 µm.....	40
Şekil 4.4 : Kullanılan program ve delinmesi hedeflenen dairesel delik.	41
Şekil 4.5 : (a) Işığın giriş yüzey delik çapı 235.53 µm (b) ışığın çıkış yüzey delik çapı 58.10 µm.....	41
Şekil 4.6 : Her bir güç değerine karşılık gelen ortalama delik çapına ait grafik.	43
Şekil 4.7 : Atım enerjisinin ortalama delik çapına bağlı değişimi.....	44
Şekil 4.8 : 12 watt ortalama çıkış gücü, ortalama delik çapı giriş 185.545 µm (a), çıkış 96.99 µm (b) 10.2 watt ortalama çıkış gücü, ortalama delik çapı giriş 174.26 µm (c), çıkış 62.215 µm (d) 9 watt ortalama çıkış gücü, ortalama delik çapı giriş 166.355 µm (e), çıkış 76.27 µm (f).....	45
Şekil 4.9 : 20 watt ortalama güç (a) ortalama giriş delik çapı 270,16 µm, (b) ortalama çıkış delik çapı 162,98 µm, 17 watt ortalama güç (c) ortalama giriş delik çapı 252.63 (d) ortalama çıkış delik çapı 171,45 µm, 16 watt ortalama güç	

(e) ortalama giriş delik çapı 243,06 μm , (f) ortalama çıkış delik çapı 159,58 μm	47
Şekil 4.10 : Ortalama delik çaplarının lazerin ortalama gücüyle değişimini gösteren grafik.	48
Şekil 4.11 : Güce bağlı delik çapları değişimi.	49
Şekil 4.12 : 12 watt ortalama çıkış gücüne sahip lazerle yapılan deneyde (a) 2.8 μs genişlikli yatay çapı 224.54 μm , (b) 1.8 μs atım genişlikli, yatay çapı 207.53 μm , (c) 1 μs atım genişlikli, yatay çapı 192.90 μm olan delikler.....	52
Şekil 4.13 : Atım genişliği (a) 0,1 μs (b) 0.25 μs olan Ventus marker II ile açılmış mikro-delikler	52

ÇEŞİTLİ LAZER PARAMETRELERİNİN SİLİKON MALZEME DELME SÜRECİNE ETKİSİ

ÖZET

Ana malzemesi silisyumdan (Si) oluşan silikonun atomik yapısı, silikonu ideal bir yarı iletken haline getirir. Hem ucuz olması, hem de iletkenlik özellikleri nedeniyle, günümüzde ise birçok alanda; özellikle de ileri teknoloji sanayilerinde, bütünleşik devrelerde, MEMS (mikro-elektromekanik sistem) üretiminde, opto-elektronik bileşenlerde, dedektör ve sensörlerde ve güneş pillerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu silikon tabaka, üstünde ya da içinde mikro cihazların yapılandırıldığı bir alt tabaka olarak işlev görür. İyon katkılanması, aşındırma, çeşitli materyallerin kaplanması (deposition) ve fotolitografik desen oluşturma gibi birçok işleme maruz kalır. Son olarak da her bir silikon mikro-cihaz dilimlenir ve paketlenir.

Silikon tabakaların, yukarıda bahsedilen bütünleşik devrelerde, MEMS üretiminde ya da güneş pillerindeki gibi kullanımlarında bu tabakalara mikro-delikler açmak gerekir. Bu mikro-delikler çeşitli yöntemlerle açılabilir; kuru ya da ıslak aşındırma, kum püskürterek temizleme ve lazer işleme gibi. Aşındırma süreçleri hem yavaş, hem de pahalı ve maske gerektirirken, kum püskürtmede ise temiz oda süreci ile uyumsuz, minimum delik çapı sınırlı olup, kenarlar da konik olmaya meyillidir. Üretimde delme sürecinin hızlı olması ve delik kalitesinin iyi olması nedeniyle, lazerle delme işlemleri son zamanlarda en çok tercih edilen yöntemlerden biri haline gelmiştir.

Bu çalışmamızda mikro-cihaz yapımında kullanılan, silikon tabakalara farklı lazer türleriyle delik delme süreci, delik çap ve kalitesine etki eden lazer parametreleri ve bu sürecin optimize edilmesinde, parametrelerin etkisi deneysel ve teorik olarak araştırılmıştır.

Silikon yüzeye delik açma işlemi için, Nd: YAG diyot pompalı ve Nd: YAG fiber lazer kullanılmıştır. Tek bir lazer türü ile çalışırken; atım genişliği, lazerin ortalama gücü gibi lazer parametreleri birbirinden bağımsız olarak değiştirilip, delikler optik mikroskop ile incelenerek, delik çapları kaydedilmiştir.

Çalışmalarda lazerle delme yöntemlerinden; kuyu delme burgusu olarak adlandırılan ‘trepan’ delme ve içini doldurarak delme ya da diğer bir deyişle kazıyarak delme yöntemleri kullanılmıştır. Kullanılan bu yöntemlerde içini kazıma yöntemi, diğer yönteme göre daha temiz, daha yuvarlak, daha hassas deliklere ulaşılmasını sağlamıştır.

Diğer parametreler değiştirilmeden, lazerin ortalama gücü arttırıldıkça, mikro-delik çaplarının da arttığı gözlemlenmiştir. Yine diğer parametreler değiştirilmeden, atım genişliklerinin azaltılması ile mikro-delikler etrafında ısıdan daha az etkilenmiş bölgeler oluşmuş, dolayısıyla da daha kaliteli mikro-delikler elde edilmiştir.

EFFECT OF VARIOUS LASER PARAMETERS TO THE PROCESS OF DRILLING SILICON MATERIALS

SUMMARY

The atomic structure and the cost efficiency of the silicon materials utilized in the integrated circuits, solar batteries, detectors and the production of micro-electromechanical systems (MEMS) which has many fields of application such as biomedicine, biology, biochemistry, automotive, aerospace and photonics makes it an ideal semiconductor material. What makes silicon ideal is its electrical, optical and mechanical properties connected to its atomic structure which makes it semi conductor.

The micro-electromechanical systems may contain other materials compatible with the silicon such as silicon based aluminum, silicon nitride, silicon carbide, silicon oxide.

According to application and production processes, different types of silicon may be chosen as mono-crystalline, poly-crystalline or amorphous.

The silicon materials are subjected to many processes such as ion contribution, etching, deposition of various materials and creating a photolithographic patterns in the production of these micro devices.

It is required to open microholes to silicon layers for the implementations on integrated circuits or production of micro-electromechanical systems and solar cells. Such microholes may be drilled with various processes such as dry or wet etching, laser drilling or sandblasting. Yet, one of these methods, the etching method is both expensive and slow and requires masks. The sandblasting method also has some disadvantages such as having taper sides or limited minimum diameter of microholes.

The choice of laser, parameters of laser to be utilized in the process of laser drilling or the thickness and properties of the material to be utilized and the location of the material in regards to focus affect the process of drilling.

Various defects utilized for the structure and geometry of the microholes obtained in the process of drilling indicate the microhole quality. These defects consists of the terms of taper, microcracks, spatter and recast layer. For example, locating the material in regards to the focus may affect the size, depth and taper of the microholes obtained. In a same way, the laser power may affect the size, depth and taper of the microholes obtained and the creation of defects stated above. The pulse width is more effective for creating thermal damage at the perimeter of microholes. The smaller the pulse width, the smaller the damage given to the aimed area by the laser beam as known as from the femtolasers (10^{-15} s). The pulse width is also a parameter significantly effective over the microholes.

The drilling methods affecting the drilling process has effects over the diameter and quality of the microholes. For example, the single shot drilling method does not

produce microholes with good definition, the amount of defects stated above is increased. The taper is smaller and thicker materials may be drilled with the percussion drilling method. The drilling methods of trepanning and helical trepanning are more effective for thicker materials and able to obtain bigger and smoother holes.

The choice of laser shall have effective results of the materials utilized. For example, the literature contains many studies conducted with infrared lasers, UV lasers and ultrashort lasers over silicon materials.

In addition to these methods, the type, thickness and smoothness of the material utilized have impacts over the method of drilling; for example the type of laser utilized on a thick material or choice of parameters has a significance. For example, decreasing the power of the laser gradually while drilling a thick material is effective for some of the hole properties such as taper and depth. In case a hole is desired to be opened thoroughly, the power of the laser has a significant impact. The factors such as type and thickness of the material were not examined in this study.

With the consideration of all these factors affecting the period of drilling, the experiments and impacts of each parameter over the microholes were discussed in many studies. The purpose is to render the process of drilling to its most efficient way and obtain holes in aimed depths and sizes with lesser defects.

The combination of different laser parameters were experimented in experimental studies and the process is desired to be become effective with the optimal parameter combination. Reaching such combinations requires long and systematic studies, the knowledge of these parameter values and properties of the laser utilized has tens this process.

Along with the development of micro-electromechanical (MEMS) systems in recent years, silicon materials are preferred thanks to their properties stated above. The laser process became one of the most popular methods for many applications with the consideration of advantages of causing minor damage to the perimeter of the aimed area to be processed, being able to process even the hardest materials in regards to time and costliness and being able to obtain holes in desired diameters and depths. There are many types of lasers in the industry, the choice of laser conducted in the most suitable way for the properties of the materials increases these advantages even more. The parameters of the laser affecting the process of drilling, methods of drilling, the defaults affecting the quality of the drill hole are researched theoretically.

In experimental studies, Nd: YAG fiber with an average power of 20 Watt and Nd: YAG diode pump laser were utilized. In this section, how the average laser power which is one of the laser parameters affecting the process of drilling, affects the diameter and quality of the microholes. The parameters values such as average power, pulse frequency, scan speed of the lasers we have utilized may be adjusted in a finite way and thus eased the ability to obtain aimed microholes.

The experiments were conducted systematically, the average power was decreased in determined intervals and tests were conducted over two sample materials of same properties for each power value. The diameters of the microholes obtained were measured vertically and horizontally with a microscope and the relation between the

average laser power and diameters of the holes was examined. In addition, the effect of pulse width which has a very significant impact on this process, over the diameter and quality of microhole were examined experimentally. The experiments realized independently from each other with the utilization of different laser parameters and silicon materials of different thicknesses the parameter value which is desired to be studied was changed and other parameters were kept stable.

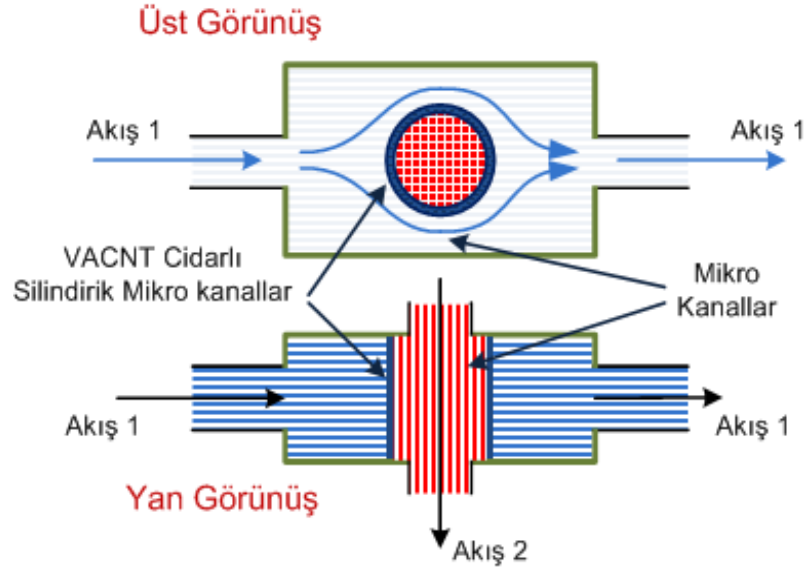
The repetition of this process for both lasers and having coherent results obtained was beneficial for understanding the parameters of average power and pulse width affecting the drilling process and microholes.

Contrast to the utilization of silicon materials of different thicknesses in our study, the effect of the change of material thickness over the microholes was not examined. The parameters such as pulse frequency, scan speed, location of the material by the focus which may have effect over this process was not examined in this study.

The effect of drilling methods to the diameter and quality of the hole was discussed theoretically and in addition to the trepanning method of the experiments, the method of drilling by incising the aimed figure was utilized for the experiments. The effect of the methods utilized over the quality of microholes was not discussed in detail, yet it was observed that method of incising was more effective for obtaining holes with more smooth and decent holes by the observation of the results with an optical microscope.

1. GİRİŞ

Mikro-elektromekanik cihazların üretiminde, silikonun altlık olarak kullanıldığı sistemlerin, mikro-fabrikasyon sürecinde, lazerle malzeme işleme diğer yöntemlere göre, sağladığı avantajlar nedeniyle tercih edilmektedir. Aşağıda (şekil 1.1); yapımında silikonun altlık olarak kullanıldığı ve silikon tabaka üzerinde, çok duvarlı karbon nanotüplerin sıralandığı ve bunlar sayesinde gaz ve sıvı ortamlarda madde aktarımının sağlandığı örnek bir mikro-cihazın şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 1.1 : VA-MWNT model yapıları.

Yukarıdaki mikro-cihazı yapmak için karbon nanotüplerin silikon tabaka üzerinde büyütülmesi gerekmektedir. Bu boru şeklinde üretilmiş nanotüplerin silikon üzerinde ayrılması zor olduğundan, kanalların ucunun açılması için silikon üzerinde delik açılması gerekmektedir. Lazerle minimum zararla, çok küçük boyutta delik açılması en uygun yöntem olarak görülmektedir. Bu amaçla değişik güç ve diğer parametrelere sahip, farklı tür lazerlerle bir dizi deney yapılmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Lazer ile mikro-işleme sürecinin en önemli unsurlarından olan bazı lazer parametrelerinin değişiminin ve farklı lazer türlerinin, silikon malzeme üzerinde açılan deliklere etkisini inceleyerek, daha pürüzsüz, etrafı ısıdan daha az zarar görmüş mikro-delikler üretebilmek için gerekli koşulların araştırılması. Bazı lazer parametreleri ile delik çap ve kalitesi arasındaki ilişkinin incelenmesi. Lazerle delme teknolojisinde kullanılan yöntemlerin tanıtılması, bu yöntemlerin mikro-deliklere etkisinin incelenmesi bu çalışmanın amaçlarıdır.

1.2 Literatür araştırması

L. S. Jiao ve arkadaşları [1] yaptıkları çalışmada; çeşitli sıcaklıklarda, silikon tabaka üzerinde, femtolazerle yapılan delme işleminin, delik geometrisi ve yüzey kalıntılarından oluşmuş alan üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir.

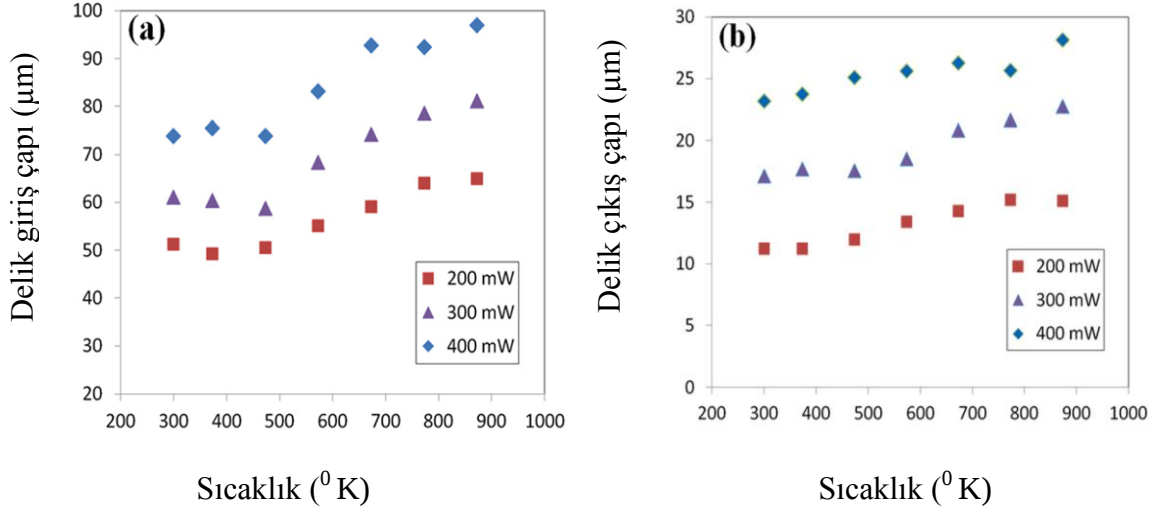
Tek kristalli silikon tabaka üzerindeki baştanbaşa delikler sıcaklık 300^0K den 873^0K 'e arttırılarak oluşturulmuş, delme verimliliği %56 artmış olup, yüzey kalıntıları bölgesi malzeme ısıtıldıkça, sürekli olarak azalmıştır. Bu sonuç, bu tip değişiklikler için, yüksek sıcaklıklarda, artmış lazer enerjisinin emilimi bakımından değerlendirilmiştir.

Deneyler silikon tabaka üzerinde, lazer gücü 200 mW' dan 400 mW' a kadar çeşitlendirilerek yapılmıştır. 775 nm dalga boylu (tekrar sayısı 1 kHz), 200 fs' lik atıma sahip lazer ışını kullanılmış olup, toplam atım enerjisi, yarım dalga-boyu döndürülerek zayıflatılmıştır. Mekanik kesici, malzeme üstüne, hedef lazerin serbest bırakılmasıyla kontrol edilmiştir. Lazer ışınının odaklanması için 75 mm odak uzunluğuna sahip mercekle kullanılmış olup, pozisyon kontrolü CNC ile sağlanmıştır. Malzeme olarak kullanılan silikon tabakanın kalınlığı 300 mikrometre olup içinde ısıtıcı bulunan iki tane paslanmaz çelik bloğa sabitlenmiştir.

Yüksek sıcaklıklarda, emilen foton enerjisi sayesinde, ilk etapta, valans banttan iletim bandına geçen, çok sayıda uyarılmış elektronun neden olduğu ve kovalent bağların kırılması neticesinde daha fazla malzeme hasarı olmaktadır.

Böylece daha yüksek malzeme sıcaklıklarında, daha büyük giriş deliklerinin oluştuğunu, 500^0K sıcaklığın altındaki değerlerde ise sıcaklığın, giriş deliğinin

çapına, önemli bir etkisinin olmadığını ve bununla birlikte sıcaklık 600°K 'e ulaştığında da giriş deliğinin keskin biçimde arttığını gözlemlemişlerdir.



Şekil 1.2 : Giriş delik çapı (a) ve çıkış delik çapı (b) sırayla ortalama güç 200 mW, 300 mW ve 400 mW, altlık sıcaklığının fonksiyonu olarak [1].

Atım sayıları 10, 20 ve 30 seçilerek, sıcaklığın delik şekli üzerindeki etkisini incelemişler ve seçilen atım için, delik derinliğinin 873°K 'de 300°K 'dekinden daha büyük olduğunu gözlemlemişlerdir.

Deliklerin çıkış genişliğinin de yüksek sıcaklıklarda daha büyük olduğunu gözlemlemişlerdir. 200 mW lazer gücü için, delik çapı 873°K 'de 300°K 'den %30 daha büyüktür. Lazer delme verimliliği, malzeme kazıma hacmi bakımından, 873°K 'de %56 ya yakın arttırır. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda, silikonu delmek için gerekli atım sayısı daha azdır. Koniklik açısı arttırılmış sıcaklıklarda daha küçüktür, lazer ışınının delik duvarından yansımalarından kaynaklanan kayıplar nedeniyle, lazer enerji kayıpları meydana gelmektedir. Bu nedenle de sıcaklığın artışı ile deliklerin çıkış çaplarında keskin bir artış gözlemlememişlerdir.

Sıcaklık 300°K 'den 773°K 'e yükseltildiğinde; çeşitli güç yoğunluğu ve atım sayılarında, beklenilenin tersine, yüzey kalıntısı alanın yarı yarıya azalmış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Rahul Patwa ve arkadaşlarının [2] yaptıkları çalışmada; güneş pillerinde, gölgelemeden kaynaklanan kayıpları azaltmak amacıyla geliştirilmiş bir yaklaşım olan sarma (wrap) teknolojisini ele almışlardır. Bu teknoloji ile modül kurulum aşamasının basitleştirilmesi imkanı ve modül içindeki direnç kayıplarını azaltmak ve bu sayede de modüllerde watt başına maliyetin azalması beklenmektedir. Bu

tasarımda; pilin arka ve ön bağlantıları birleştirmek için, silikon tabaka üzerine fazla sayıda mikro-deliklerin açılması gerekmektedir.

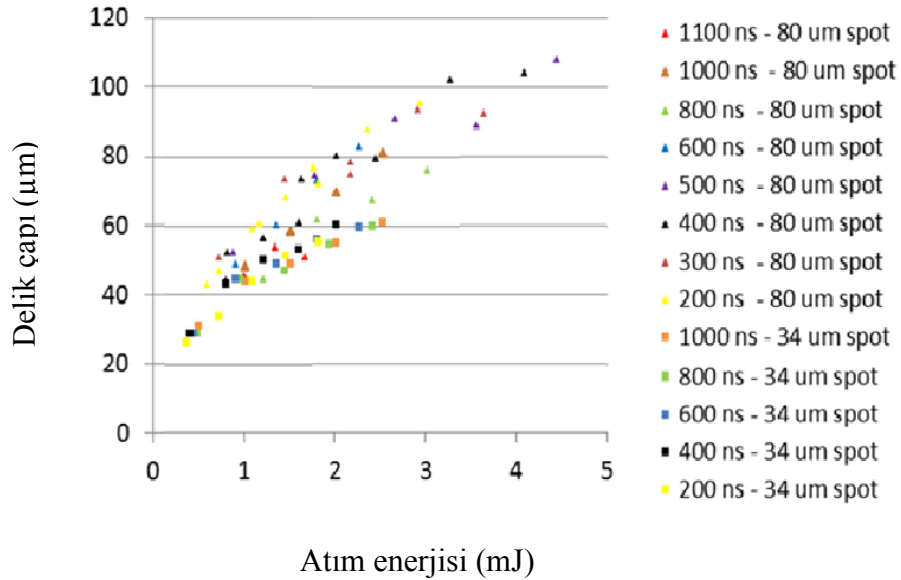
Lazer delme işlemi; atım genişliği, tekrar sayısı ve lazerin gücünün bağımsız ayarına olanak veren IR disk lazer (Jenoptik IR 70) ile yapılmış. Yüksek delme oranlarına ulaşmak için, lazer atımlarının eş zamanlanması iki eksen galvanometre tarayıcı ile FPGA kontrolör kullanılarak sağlanmış.

Deneylerin tasarlanması; ortalama delik çapı, delik koniklik açısı, delme hızı ve kalitesini etkileyen anahtar süreç sürücülerini anlamak için, geliştirilip, uygulanmış. Lazer delme testleri kalınlığı 120 mikrometre ile 190 mikrometre arasındaki farklı kalınlıklardaki silikon tabakalar ile yapılmış, ilk parametreler ortalama lazer gücünü, atım genişliğini, atım tekrar sayısını içermiş olup, farklı spot çaplarının (34 mikrometre ve 80 mikrometre), delme sonuçları üzerindeki etkileri kıyaslanmış ve parametreler değiştirilerek, ortalama çapı 30-100 mikrometre arasında değişen delikler elde edilmiş ve parametrelerin delik koniklik açısı, delik kalitesi ve delme oranına etkisi incelenmiş, ayrıca ayarlar optimize edilip, 120 mikrometre kalınlığındaki silikon tabaka üzerinde, sadece delik başına iki atım ve 20.2 W ortalama lazer gücü ile 40 mikrometre çaplı, saniyede 15,000 delik sayısına ulaşılmış.

Deney düzeneği atımlı disk lazer (Jenoptik IR 70), odak genişliği 163 mm olan bir f-theta lense sahip bir galvanometre tarayıcısı (Scanlab), dikey CNC eksenine monte edilmiş bir vakum sabitleyici (vacuum fixture) ve eksene bağlı olmayan bir görüntüleme sistemi ihtiva etmektedir. Ayarlanabilir bir ışın genişletici (beam expander), yönlendirilmiş ışının içine yerleştirilmiştir. Değişik dalga genişletme faktörleri kullanılarak koşutlandırılan (collimated) ışın çapı değişmiş ve odak noktasında farklı spot çapları elde edilmiş. Darbeli delme, lazerin rapid-fire-burst fonksiyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Delme döngüsü boyunca ışını sabit tutarak lazer spotunu bir noktadan başka bir noktaya hareket ettirerek delik dizileri oluşturulmuş. Lazer atımlarının sayısı lazer kontrolü tarafından zamanlandırılmış. Eşzamanlı anında delme (on-the-fly) yapabilmek için lazer sistemine FPGA kontrolör adapte edilmiş.

Sonuç olarak; yüksek tekrarlanabilirlik ve doğruluk bakımından, senkronize anında (on the fly) delme için, FPGA kontrolcü, darbeli delmeye göre daha fazla

onaylanmıştır. Ayrıca en küçük ve en büyük delik çapları olan 26.2 mikrometre ve 108.2 mikrometreye 190 mikrometre silikon tabakada ulaşılmış olup, aşağıdaki grafikten de anlaşılaçağı üzere (şekil 1.3), aynı değerde delik çaplarına lazer parametrelerinin farklı kombinasyonları ile de ulaşılmış, ancak sonuçlar deliklerin giriş ve çıkışlarındaki ısıdan etkilenmiş bölge ve tekrar katılaştıran malzemenin, parametre seçiminden etkilendiğini göstermiş, yine sonuçlar koniklik açısı daha küçük spot çapı ve atım genişliği ve atım enerjisi gibi parametrelerin optimize edilmesiyle azaltılabileceğini göstermiş, delme için delik başına düşen toplam enerji ise, kalın silikon tabaka için daha büyük çapta bir spot çapı etkili iken, daha ince tabaka için, daha küçük spot çapı yeterli olmuş. Silikonu baştanbaşa delmek için gerekli atım sayısı ve buna karşılık gelen delme oranının lazer parametrelerinden, özellikle de atım genişliğinden çok etkilendiğini gözlemlemişler.

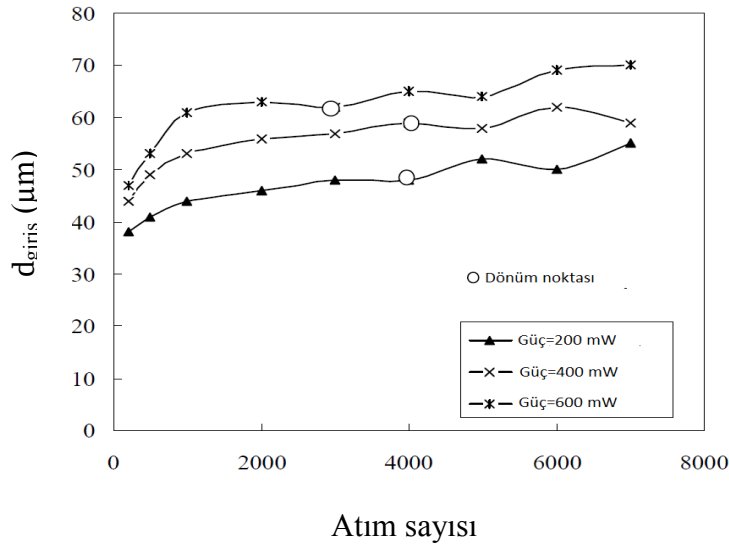


Şekil 1.3 : 190 µm kalınlıkta tabaka için, farklı spot çaplarında ve atım genişliklerinde, delik çapının atım enerjisiyle değişimi [2].

L.Jiao ve arkadaşları [3] yaptıkları çalışmada; 0.725 mm kalınlığındaki silikon tabakayı delmek için, atım genişliği 200 femtosaniye, 1030 nm kadar dalgaboyu ve nominal frekansı 1 KHz ve maksimum ortalama gücü 700 mW olan, Clark MXR femtosaniye lazer kullanmışlar. Deneyleri hava ortamında ve direkt odaklama tekniği ile yapmışlar; lazer delme sürecini üç basamakta incelemişler ve delik girişine, spatter oluşumuna ve delik çıkışına, lazer parametrelerinden lazer gücü, odak pozisyonu, odak merceği ve atım sayısının etkilerini incelemişler.

Deneylerde lazer parametreleri değiştirilerek delik üzerindeki etkilerini incelemişler; lazer gücünü 20 ile 600 mW arasında, odak pozisyonunu -2 ile +2 mm arasında, 75 ile 100 mm odak uzaklığı olan merceklerle, atım sayısını 200 ile 7000 arasında çeşitlendirmişler.

Delik çaplarını çeşitli güçlerde, atım sayısının fonksiyonu olarak ifade etmişler, atım sayısının artmasıyla kademeli olarak, delik giriş çapının da arttığını gözlemlemişler (şekil 1. 4), 1000 atımdan sonra yaklaşık aynı kaldığını saptamışlar.



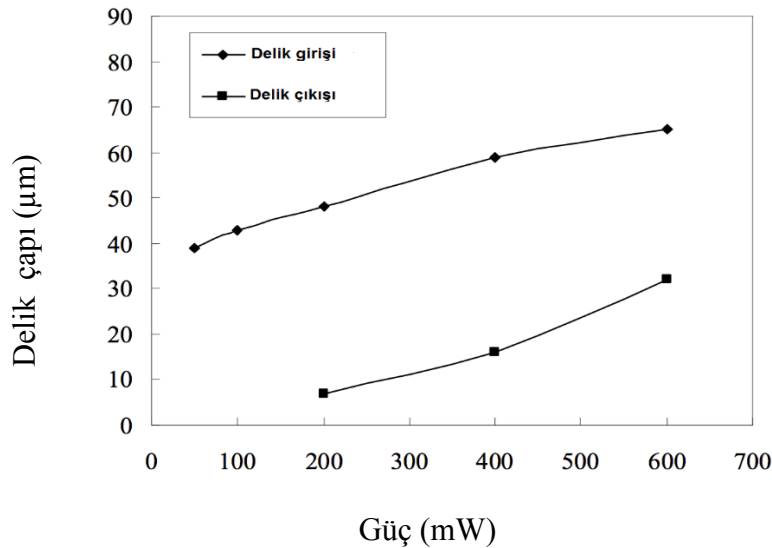
Şekil 1.4 : Çeşitli lazer güçlerinde atım sayısının $d_{giriş}$ üzerindeki etkisi [3].

Yüzey kalıntıları bölgesinin de, atım sayısı ile 4000 atım sayısına ulaşana kadar lineer olarak arttığını, 4000 atımdan sonra boydan boya delik açıldığını gözlemişler. Lazer ışını delip geçtikten sonra yüzey kalıntılarından oluşan bölgenin de, maksimum değer olarak yaklaşık sabit kaldığını gözlemlemişler. Delik girişi, yüzey kalıntıları alanı ve delik çıkışının atım sayısına bağlı eğrisini 3 ayrı bölgeye ayırmışlar; ilk bölgede lazer atımlarının sayısı 0-1000 arasında ve delip geçmeden önce, delik girişi net biçimde artış gösterirken, devamlı genişlemiş olup, kararlı duruma gelene kadar devam edip, ilk atımlar delik sınırının genişlemesine katkı sağlamıştır. İkinci bölgede 1000-4000 atım arası lazer atımları silikon tabakayı delip geçmek için yeterli olmuştur. Delik etrafında daha geniş yüzey kalıntıları birikmiş, ancak delik giriş çapı değişmemiş. Atım sayısı arttıkça aşağı doğru delik sınırı genişlemiş. Atım sayısının 4000-8000 arasında olduğu üçüncü bölgede ise, yüzey kalıntıları önemli bir fark gözlenmemiş, ancak delik çıkışında belirgin bir artış olmuş.

Değişik lazer güçleri ve 4000 atım sayısı ve 75 mm odak uzaklığı olan mercek ve odak pozisyonunun değiştirilmesiyle yapılan deneyde ise; en küçük delik giriş çapına -0.2 mm odak pozisyonu ile ulaşılmış, -0.3 mm nin altında ve 0.1 mm nin üstünde delik elde edilmemiş.

75 mm ve 100 mm odak uzaklığına sahip, merceklerle yapılan diğer bir deneyde ise; delik çapının büyük odaklı mercekte daha büyük olduğunu göstermiş, ilk delip geçme noktası 100 mm' lik mercek kullanılırken, 3000 atımda görünürken, 75 mm' lik mercek kullanılırken, 4000 atımda görünmektedir. Yüzey kalıntıları alan çapının ise; 100 mm' lik mercek kullanılırken, delme noktasından önce daha büyük olduğu gözlemlenmiştir.

Lazer gücünün değişimini inceleyen diğer bir deneyde ise; gücün artışı ile daha büyük delik ve daha fazla materyalin malzemeden ayrıldığını gözlemlemişler (şekil 1.5).



Şekil 1.5 : Lazer gücünün giriş ve çıkış delik çapı üzerindeki etkisi [3].

Optimum koşullarda minimum delik çapına odak pozisyonu olan -0.2 mm, 100 mm odak uzaklıklı mercek ve 200 mW güç ile ulaşılmış. En boy oranı 1:30 olarak en uygun koşullar sağlanarak elde edilmiş.

L.M. Wee ve arkadaşları [4] yaptıkları çalışmada; Lazer ablasyonu mikro-işleme testleri silikon tabaka üzerinde, hem hava ortamında ve su akışı altında, 355 nm-X AVIA lazer ile yapılmış. Lazer atım frekansı, güç seviyesi, tarama hızı, odak düzlem pozisyonunun, lazer sıçrayan malzeme birikintisi (hava ortamında), ışınlanmış alan (akan su filmi altında) ve konik açısının üzerindeki etkilerini araştırmışlar. Lazer

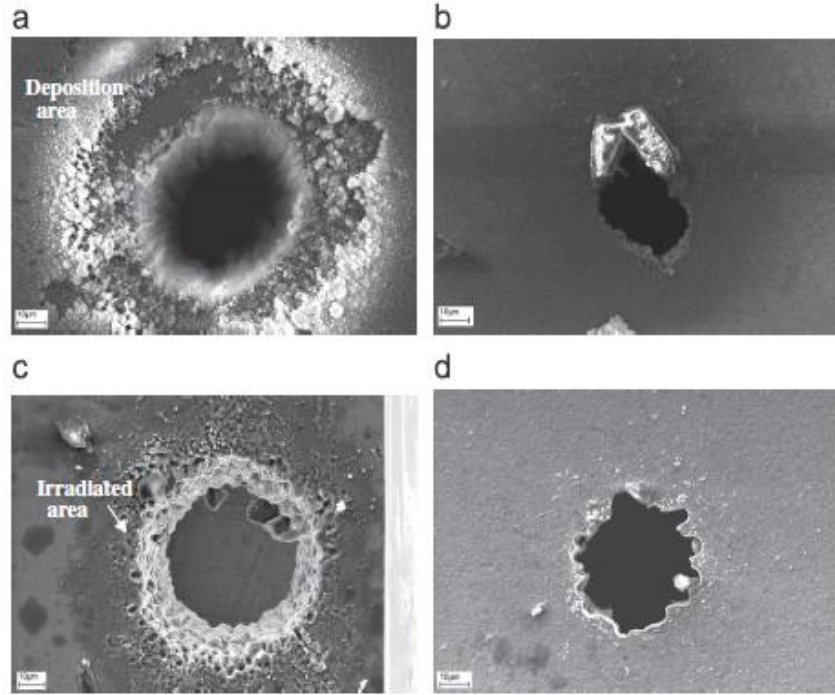
delme işlemi, cilalı, tek kristalli, 200 mikrometrelik silikon malzeme üzerinde, malzemeyi, 100 mm'lik odak uzaklığı ile odaklayarak gerçekleştirmişler. Spot çapı yaklaşık 25 mikrometre olup, tek kristalli silikon tabaka, tekrar eden dairesel hareket ve çoklu lazer atımlarıyla ve kuyu delme burgusu yöntemi kullanarak, mevcut atım pik güç değerini de 2.5 kW-4.5 kW değeri arasında değiştirerek yapmışlar. Tüm çalışma parçasını, CNC tablası üzerine yerleştirmişler. Gerekli donanımı planlamışlar ve su altında delme için, seviyesi 1 mm den az suyun içine tamamen silikon tabakayı batırmışlar. Kapalı çevrim sistemin akış hızı ise 2 L/dk'dır.

Delikler hızları 0.5 mm/s ile 16 mm/s arasında değişen hızlarla ve 50 mikrometre çaplı dairesel hareket kullanılarak, kuyu delme burgusu yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve dairesel hareket silikon tabaka boydan boya delinene kadar devam ettirilmiş. Lazer akışı 28 J/cm^2 ile 46 J/cm^2 arasında değiştirilmiş. Elde edilmiş delikler, sonrasında elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiş, 800X büyütme oranına sahip mikroskop; yüzeyi incelemek ve delik çaplarını ölçmek için kullanılmış.

Çalışmaları; delik etrafında birikmiş alan (hava ortamında) ve aydınlanmış alan, akan su altında) ve konikliğin ilgili lazer parametrelerine bağlı olduğunu göstermiş.

Lazer ablasyonunun hava ortamında ve su altında farklılık gösterdiğini gözlemlemişler; suyun soğutma ortamı gibi davrandığına dikkat çekerek, birinkintileri uzaklaştırmış ve daha az konikliğe neden olduğunu gözlemişler. Bununla birlikte, hava ortamında daha pürüzsüz bir yüzey elde edilmiş, yüksek frekanslarda, pik gücünün, silikonu eritme ve buharlaştırma için güçlü olmadığı ve daha fazla yüzey kalıntıları birikimi ve parlayan alanlarıyla beraber, daha az koniklik üretildiği gözlemlenmiş. Yüksek lazer akış yoğunluğu neticesinde; daha fazla erimiş ve buharlaşmış malzeme elde edilmiş, böylelikle birikmiş ve ışınlanmış alan, ısıdan etkilenmiş bölge (HAZ) ile birlikte artmış, yüzeyden daha fazla malzeme ayrılmasından dolayı, lazer akış yoğunluğunun artması, daha fazla konikliğe neden olmuş. Daha yüksek tarama hızlarında ise, her iki durumda da, daha büyük yüzey kalıntıları ve ışınlanmış alan gözlemlenmiş, hızın artmasıyla hava ortamındaki koniklik değişmemiş, akıcı su akışı altında ise; daha yüksek tarama hızlarında, koniklik artmış, akıcı ince film altında ise kararsız delik konikliği gözlemlenmiş. Dahası çalışma parçasının altındaki, hareketli odak düzlem pozisyonu, sıfır odak uzaklığı pozisyonuna kıyasla, daha küçük yüzey kalıntısı birikim alanı, ışıma ve koniklik sağlamış.

Hava ve su ortamında delinmiş deliklerin görüntüleri Şekil 1.6'da gösterilmiştir.

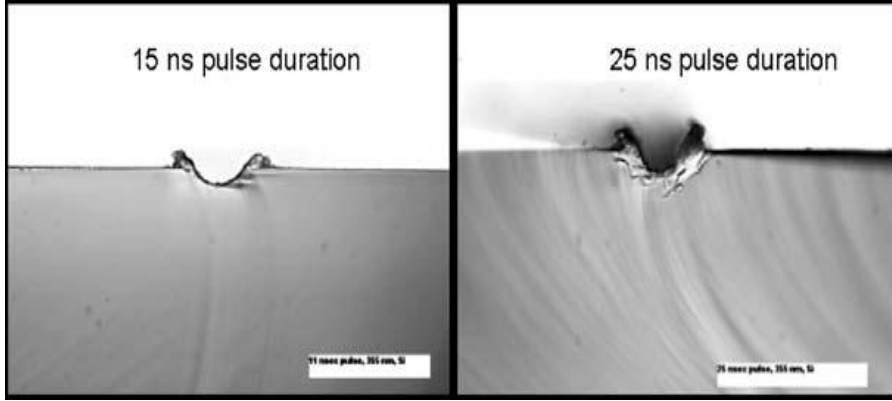


Şekil 1.6 : Hava ve su için, delme hızı 0.5 mm/s'de giriş ve çıkış delikleri: havada a) giriş deliği; (b), çıkış deliği-su altında delmede (c) giriş deliği; ve çıkış deliği [4].

T. Otani ve arkadaşları [5] yaptıkları çalışmada; yarı iletkenlerde, otomobillerde, mürekkep püskürtme, medical ve elektronik endüstrisinde, geniş uygulama alanı kaplayan, işlemesi zor ve sert materyalleri işlemede tipik endüstriyel uygulamalar ve aynı zamanda hassas mikro özellikleri işlemede, hassas odaklama tekniklerini tartışmışlardır.

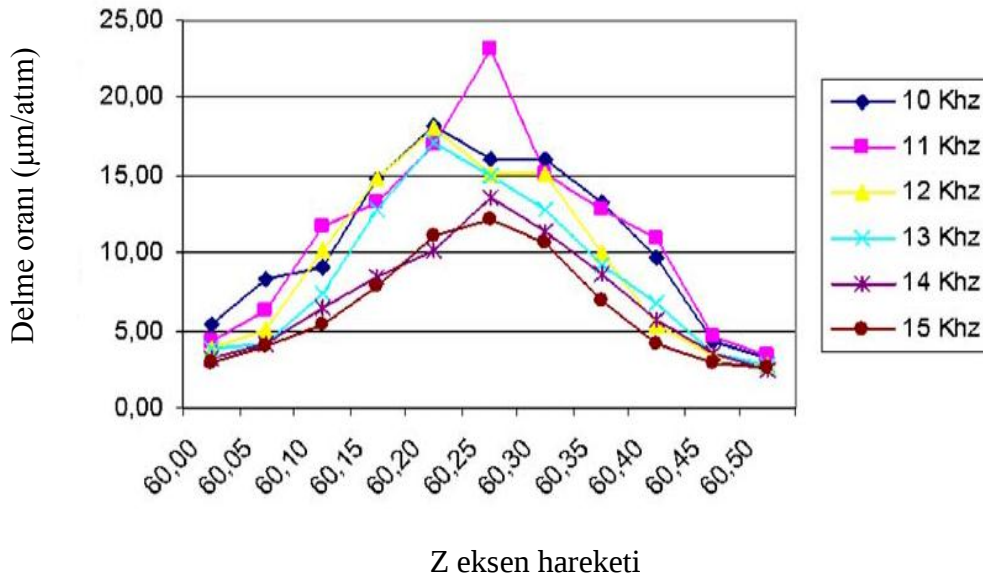
Karmaşık mikro özellikler yaratabilmek için, hedef üzerinde, lazer ışınına yüksek hız ve doğrulukta, programlanabilir tarayıcı rehberlik eder. Lazer ışını, açma kapama tepki süresi 3 ms'den küçük, lambda physic galvo shutter ile anahtarlanmış, Işını genişletmek için, teleskop kullanılmış, Hedef üzerinde, dairesel polarizasyon olayını sağlayan yarım dalga levhası kullanılmış, hassas dairesel delikler için lazer başı kuyu delme burgusu ile değiştirilmiş. Kuyu delme burgu sisteminin ana parçaları üçgen şeklinde ilerleyen küme olup, ışığı öteleyip, Işına dairesel yol çizdirir. Testlerde çıkış gücü 3 ile 28 watt aralığında olan, dalgaboyu 1064, 532 ve 355 nm, pik gücü 24 Gw/cm² ye kadar çıkabilen pik gücünde, 15 ns'lik kısa atımları ileten, ışın kalitesi M² <1.2 olan, DPSS (diyot pompalı katı hal lazerleri) kullanılmış. Silikonu kesmede

UV ve IR spektrumlu lazerler kullanılmış, Silikonun ışığı soğurmasının UV’de daha iyi olması nedeniyle, hassas delme ve kesme için UV lazer ışığı daha iyi kalite sunar. Yaklaşık 1mm kalınlığında silikon tabakayı 355 nm dalgaboylu, 15 ns atım genişlikli DPSS lazer ile mikro işleme tabi tutmuşlar. Neticesinde az mikroçatlaklı, ısıdan az etkilenmiş bölge elde edilmiş. Her atım genişliğinin biraz artışı, termal zararın da artmış olduğunu gözlemlemişler (Şekil 1. 7).



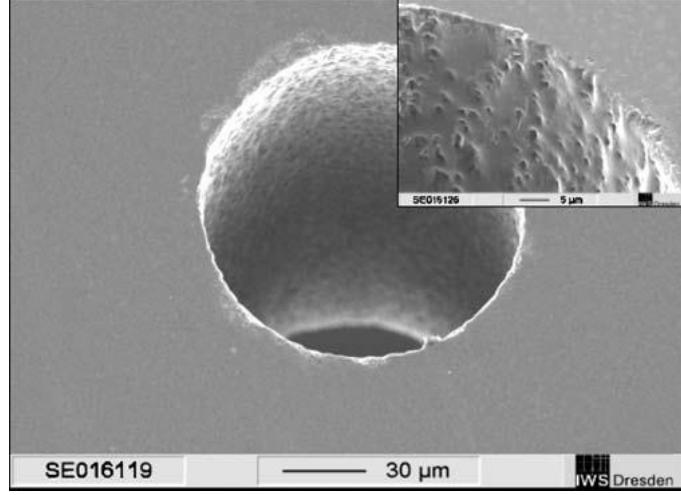
Şekil 1.7 : Silikon üzerinde, 25 mm lens ile power gator UV darbeleri ablasyon [5].

Aynı zamanda ablasyon oranı-odak pozisyonu deneyi 25 mm’lik lens ile yapılmış, Bu testlerde, aynı zamanda, tekrar oranını 10 kHz ile 15 kHz aralığında değiştirerek, ablasyon oranının sadece odak pozisyonuna değil aynı zamanda tekrar oranına da bağlı olduğunu göstermişler (Şekil 1.8).



Şekil 1.8 : Farklı tekrar sayıları için, 10 watt ile 355 nm’de silikon odak pozisyonu ablasyon oranı [5].

En yüksek silikon ablasyon oranı olan, atım başına 23 μm 'ye 11 kHz'de ulaşılmış. Aşağıdaki mikroskop görüntüsü (şekil 1.9) silikon üzerinde, kuyu delme burgusu ile açılmış, 120 μm çapında deliği göstermektedir.



Şekil 1.9 : Silikon üzerinde kuyu delme burgusu deliği [5].

1.3 Mikroelektromekanik süreçte lazerle delme ve önemi

Mikroelektromekanik (MEMS) sistemlerin artışında son yıllarda bir patlama görülmektedir. Teknolojinin minyatürleştirilmesi birçok anlamda yarar sağlar, örneğin yeni işlev kazandırma, maliyeti azaltma, alandan tasarruf gibi yararlar bu mikro cihazların otomotiv, havacılık ve uzay, fotonik, telekomünikasyon, yaşam bilimleri, biyokimya, biyoloji, biyomedikal, gibi alanlarda yaygınlaşmasına neden olmuştur. Silikonun çeşitli kristal yapılarına bağlı optik, elektriksel, mekanik özellikleri, ekonomik olması, bu materyalin mikroelektronik cihazların yapımında tercih edilme sebeplerindendir [6].

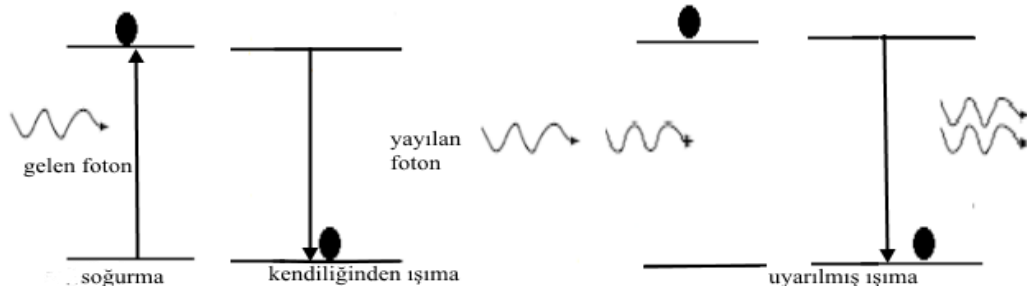
Mikroelektronik cihazların yapımında silikonun mikro-fabrikasyon aşamalarında kullanılan yöntemlerden biri de, lazerle mikro-delmedir. Lazer delme sürecinin, malzemeye temas etmeden işleyen süreci sayesinde, herhangi bir aşındırma aracına gerek kalmadan, işlenmesi zor olan materyaller bile işlenebilir. Lazerle delme ile mekanik yöntemlerle elde edilenlerinkine göre, daha küçük ölçeklere kadar uzanabilen ve genellikle 1 μm ile 1 mm çap aralığında olan delikler elde edilebilir. Malzeme çeşitliliği ve delik büyüklükleri, farklı çeşitte lazerlerin kullanımına olanak tanır. Birçok lazer çeşidi olmakla beraber, lazerle delme işlemlerinin birçoğu, darbeli

lazerler ile gerçekleştirilir. Darbeli lazerlerin darbe genişliği birkaç milisaniyeden, femtosaniyelere uzanır. Lazer seçimi için, kullanılan malzeme ve üretilecek mikro-delğin detayları önemlidir. Lazerle delme süreci kullanılan materyale, lazere, lazer parametrelerine bağlı bir süreçtir. Materyalden çıkarılan parçanın uzaklaştırılması buharlaşma ya da eriyik maddeyi dışarı atma şeklindedir. Yüksek güç yoğunluğuna sahip, atımlı lazerler tarafından, buharlaştırılarak madde çıkarılması, tercih edilen bir durumdur. Femto-saniye lazerler de mikroelektronik endüstride kullanılan kısa atımlı lazerlerdendir. Buharlaştırılarak madde çıkarılmasıyla oluşturulan delikler, temiz, düzgün şekilli, çevresindeki materyal en az zarar görmüş şekildedir. Bununla beraber delme oranı düşük olabilmektedir. Eriyik şeklinde madde atılımı, daha düşük güç yoğunluğunda gerçekleşir. Delme işlemi için çok çeşitli lazerler kullanılabilir [7].

2. LAZERİN TANIMI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

2.1 Lazerlerin Çalışma Prensibi

Foton soğurma neticesinde daha düşük enerji seviyelerinde olan atomlar daha üst enerji seviyelerine uyarılabilirler. Tersisi durumunda yani kendiliğinden ışıma; elektron yüksek enerji seviyelerinden düşük enerji seviyesine geçerken, foton yayımlanır. Üçüncü durumda ise yani uyarılmış ışıma durumunda; uyarılmış durumda bir atom kısa bir süre sonra (nanosaniyeden milisaniyeye) iki durum arasında enerji farkına eşit E_0 enerjili foton ile temel seviyeye kendiliğinden inecektir. Bu uyarılma dışarıdan bir kaynaktan bir E_0 enerjili bir fotonun atoma çarpmasıyla da oluşabilir. Eğer foton tam olarak E_0 enerjisine sahipse, atomun temel seviyeye, bu erken geri dönüşü, aynı zamanda E_0 enerjili bir fotonun yayılmasına (uyarılmış ışıma) ve ışımının tetiklenmesine neden olur. Bu yan yana iki foton şekil 2.1'deki gibi aynı doğrultuda yayılır [8].



Şekil 2.1 : Uyarılmış atom ve temel seviyeye dönen atomun foton yayınlaması [8].

Bu fotonlar başka atomları da uyararak, foton salınımını tetikler. Ortamın her iki ucuna da yerleştirilen biri tam yansıtıcı, diğeri yarı sırlı, kısmen yansıtıcı iki ayna bulunur. Uçlara ulaşan fotonlar aynalardan yansıyarak, geri döner ve olay devam eder. Bu şekilde ortamdaki fotonların sayısı artar ve atomların hepsine yakın kısmı foton yaymaya başlayınca, iyice kuvvetlenen ışık yarı geçirgen aynadan dışarı çıkar. Bu **lazer** ışımıdır. Lazer prensipte üç yapıdan oluşur;

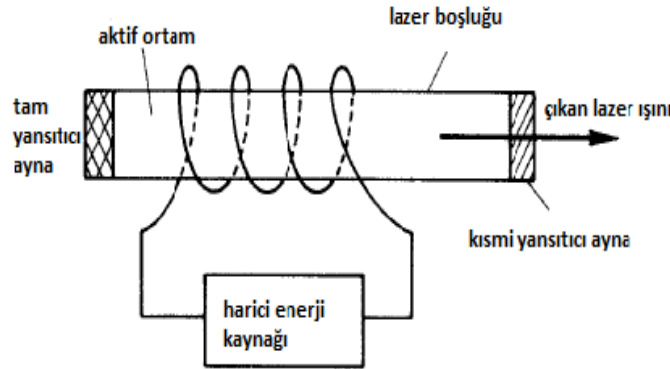
Aktif ortam; gaz, sıvı ya da katı olabilir. Bu bir katı çubuk olabilir, örneğin ilk lazer, yakut kristalinden oluşmuştur. Ya da gaz atomları ya da molekülleri içeren bir tüp, yarı iletken bir diyot da olabilir [8].

Lazer ışının oluşabilmesi için, sistemin uyarılmış olması gerekir; uyarılmış atom sayısının temel seviyedeki atom sayısından fazla olması gerekir (nüfuz terslenmesi). Bu da dışarıdan bir enerji kaynağı ile olur [9].

Yayılan fotonlar, uyarılmış atomlardan, uyarılmış ışımaya yaptırmaya yetecek kadar uzun süre sistem içinde tutulmalıdır. Bu da sistemin uçlarına yerleştirilmiş olan yansıtıcı aynalarla sağlanmaktadır. Uçlardan birisi tamamen yansıtıcı diğer uç ise lazer demetinin geçişine izin verecek şekilde yarı geçirgendir [9].

Lazerin rezonatör kısmı denilen ve ortamın her iki ucuna yerleştirilen aynaların içinde bulunduğu sistemde, aynalar arasındaki mesafe ile lazer ışının dalga boyu uyumludur. Tipik bir lazer düzeneği şekil 2.2’de verilmiştir.

Sistem yarı kararlı durumda olmalıdır. Bu durumun ömrü daha uzundur. Uyarılmış ışımaya kendiliğinden ışımadan daha önce meydana gelir [9].



Şekil 2.2 : Tipik bir lazer düzeneği [8].

2.2 Lazer Işığının Özellikleri

- Lazer ışını tek renklidir (monokromatik).
- Lazer ışını uyumludur (koherent). Uyumluluk ile lazer ışının elektromanyetik dalgalarının eşit fazlı olduğu ifade edilmektedir.
- Lazer ışını saçılmadan, paralel olarak ilerler.
- Lazer ışını iyi odaklanabilmektedir.

- Lazer ışını ışın kesitinde sabit bir enerjiye sahip değildir. Lazer ortamı ve lazerin yapısına bağlı olarak değişir ve ışın kesitindeki enerji dağılımı mod (TEM) olarak adlandırılır [10].

2.3 Lazerlerin Endüstrideki Kullanımları

Mikroelektronik ve yarı iletkenlerde

- Entegre devre paketlerindeki mikro-delikleri açmada
- Lehim maske şablonları için
- Kabloları sıyırmada
- Rezistör kırpmada
- Etrafında anten sarılı olan bir mikroçip ve bir okuyucudan oluşan, otomatik tanıma sistemi olan radyo frekanslı tanıma sistemlerinde (RFID), anten aşındırmada, devrelerin ince ayarında dilme, çizme ve delmede
- Yüksek iletkenliğe sahip ince bir film olan, düz panel ekran, dokunmatik ekranlar ve bazı medikal cihazlarda kullanılan indiyum tin oksit (ITO) filmlerini desenlendirmede
- Üretim sürecinde, iletken materyallerin sızdırma sorunlarının giderilmesinde; iletkeni izole ederek, kullanılabilir hale getirmede
- Mikroelektromekanik (MEMS) sistem bileşenlerinde; toplam cihaz genellikle 20-1000 mikrometre aralığında olup, birbirinden ayrı her bileşen 1-100 mikrometre aralığındadır. MEMS cihaz bileşenleri, direkt lazer malzeme ayrılması ile üretilebilir.
- Mürekkep püskürtmeli yazıcı enjektörlerin delinmesinde

Medikal cihazlarda

- Biyomedikal cihazlarda yer alan deliklerin delinmesinde
- Diyabet test çubuklarında; günde milyonlarca test çubuğu üretiliyor. Birçok üretici altın kaplamalı polimer üzerinde, elektrik devre deseni oluşturmak için
- Spreyler ve ilaçları sis formunda ciğerlere göndermeye yarayan, lazerle çok sayıda (500-1000 tane) delinmiş, çok küçük (5 mikrometreden küçük) deliklere sahip ızgaraları olan, nebulizatörler adı verilen cihazlarda
- Anjiyoplasti ve stentlerde
- Kateterlerde
- Deri içi flasterleri delmede

- Mikro-akışkanlarda
- Mikro-filtrelerde
- Üç boyutlu yüzey şekillendirmede (örneğin hamilelik testlerinde)
- Düz levha stok kesiminde
- Markalamada (medikal cihazlarda)
- Akışkan ölçüm cihazlarında; ilaç gönderimini sağlamak için, plastik enjeksiyon kalıp parçasına delik açmada
- Zarar görmüş dokuların kesilerek alınması
- Yaraların iyileştirilmesi
- Kanamanın durdurulması
- Göz retinasında oluşan zedelenmelerin giderilmesi
- Kanal çapı ölçeği, yüzlerce nanometre aralığından birkaç yüz mikrometre aralığına uzanan mikro-kanalların açılması
- Ayrıca akustik tanecik enjeksiyonunda, evrimsel/hücrel biyoloji ve biyofizikte, yakıt hücrelerinde, ilaç yollamada, mikro filtrelerde, çip üstü laboratuvarlar, MEMS, menfezler, biyosensörler, gen zincirleri oluşturmada, savunmada, ev güvenliği, tıbbi teşhis, hava kalite kontrolü, mürekkep püskürtme ve diğer sıvı karıştırma ve dağıtmada.

Savunma ve havacılıkta

- Kompozitleri kesme ve delmede karbon ya da cam kablo
- Kablo sıyırma ve markalama
- Uçak motor bileşenlerinde delme işlemi
- Termal bariyer kaplamaların kaldırılması
- İnce film işleme

Yenilenebilir enerjide

- Işık yayan diyotlarda
- Pillerde
- Sürtünmeyi azaltmak için mikro-yapılarda
- Yakıt hücrelerinde
- İnce film fotovoltailerde
- Bakır indiyum galyum selenid'lerde.
- Organik PV'lerde
- EWT ve MWT'lerde
- Kenar çıkarmada.

Otomobillerde

- Metal saç kesme ve kaynak yapmada
- Akıllı araç olarak adlandırılan araçlarda, algılayıcı üretmede
- Birçok elektronik bileşen yapılırken
- Paslanmaz çeliğe açılan deliklerle üretilen, yakıt filtreleri
- Benzin ve dizel için, yakıt enjektör delikleri yapmada [11, 12]

kullanılırlar.

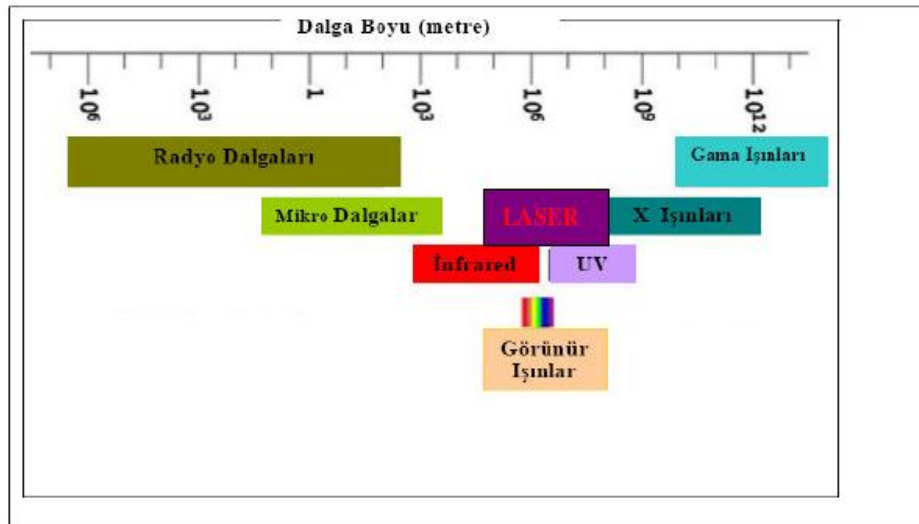
2.4 Lazer çeşitleri

Lazerlerin hemen hemen hepsi üç kısımdan oluşur; aktif ortam, pompalama kaynağı, rezonans boşluğu.

Aktif ortam maddenin dört halinden herhangi biri olabilir; katı, sıvı, gaz ya da plazma. Aktif ortam tipine göre atomlar, moleküller ya da iyonlar olabilir. Lazerler optik olarak, elektriksel olarak ya da kimyasal reaksiyon ile pompalanabilir. Aşağıda optik pompalamada üç kaynaktan bahsedilmiştir:

- 1.Düşük basınçta gazla dolu, olan kuartz tüpünden yapılan, flaş lambaları.
- 2.Genellikle xenon gazı kullanan, soygaz deşarj tüpleri
- 3.Diğer lazer ya da ışık kaynakları, tıpkı güneşten gelen ışık gibi [13].

Lazer ışının ışık spektrumu içindeki yeri ve dalgaboyu şekil 2.3’de verilmiştir.



Şekil 2.3 : Lazerin ışık spektrumundaki yeri [12,14].

2.4.1 Gaz lazerler

Gaz lazerleri iki gruba ayrılabilir; darbeli gaz lazerleri; N_2 , excimer, TEA CO_2 ve CW (sürekli) gaz lazerler; bakır buharı, CO_2 , Argon iyon ve helyum-neon gibi [13].

2.4.1.1 HeNe gaz lazeri

İlk gaz lazeri olan helyum ve neon kullanılarak, Ali Javan, William Bennet, ve Donald Herriot tarafından yapılmıştır. Bu lazer sınıf gösterilerinde, laboratuvar deneylerinde ve başlangıçta süper market ödemelerinde optik tarama sistemlerinde kullanılmıştır. Lazer uygulaması materyal gaz, yaklaşık %15 He ve %85 Ne karışımından oluşmaktadır. Düşük basınçlı gaz karışımı her bir ucunda, iki paralel aynaya sahip bir cam tüp içine yerleştirilmiştir. Gaz karışımının içindeki elektrik deşarjının gerçekleşmesi için, tüpe yüksek voltaj uygulanarak, helyum-neon gaz karışımının içindeki atomlar uyarılır. Bu lazerler sınıf uygulamalarında ve optik laboratuvarlarında kullanılır [13]. Yaklaşık 1 torr basınç altındaki he ile yaklaşık 0.1 torr basınçtaki neon karışımı, deşarja maruz kalır. Helyum atomları deşarj tarafından uyarılır ve fazla enerjileri neon atomlarına çarpışmalarla aktarılır. Benzer enerji seviye şemasına sahip iki element için, sağlanan bir olaydır. Neon atomları daha düşük enerji seviyelerine düştükleri zaman, 0.6328 mikrometre dalgaboylu, önemli lazer yayılımı gerçekleşir. Sınıf Ne-he lazerleri için çıkış gücü birkaç miliwattır [8].

2.4.1.2 Excimer lazerleri

Metal buharına ek olarak, deşarj lazerlerinin ikinci türü, yakın ve orta ultraviyole dalgaboyunun baskın bir kaynağı haline gelen nadir gaz-halojen türüdür. 3510 Å ve 3530 Å deki geçişleri bir örneği XeF lazeridir. XeF bir uyarılmış atom ve temel seviye atomundan oluşmuş bir molekül, excimer lazeridir. İzotop ayırma ve lineer olmayan optik işlemler gibi foto-kimyasal uygulamalar için, bunlar boya ve katı-hal lazer pompalama gibi diğer lazerlerle yer değiştirir. Bu lazerler kilo-joul mertebesinde enerji içerir ve lazer füzyonda kullanımı kabul görmektedir. Güç seviyeleri CO_2 lazerlerden daha düşüktür, fakat daha kısa dalgaboylu ışık belki füzyon süreçleri için daha uygundur [8].

2.4.1.3 Argon iyon (Ar⁺) lazer

Argon lazer 1964 yılında William Bridges tarafından Amerika’da, keşfedilmiştir. Argon iyon (Ar⁺) lazer güçlü, onlarca watt’lık CW görünür uyumlu ışık sağlar. Lazer çalışması, yüksek akım elektrik deşarjında, elektron çarpışmaları tarafından argon atomları iyonize edildiği zaman başlar. Yaklaşık 35 eV enerji seviyesine uyarılan atomların sonraki, yaklaşık 33.5 eV enerji seviyesine geçişi sonucu 351.1 nm ile 528.7 nm dalga-boyu aralığında ışınım meydana gelir. Maximum ışık gücü 488 nm ve 514.5 nm yayılımlarında yoğunlaşır [13].

2.4.1.4 Karbondioksit Gaz Lazerler

Karbondioksit gaz lazerleri, kızılötesi bölgede, yüksek çıkış gücü kapasitesine sahip, dalgaboyu 9 mikron ile 11 mikron arasında ayarlanabilir lazerlerdir. Yüksek ve orta seviye güçteki CO₂ lazerlerin, kaynak ve kesme gibi birçok endüstriyel uygulamalarda kullanımlarına karşın, birçok medikal uygulamaları da mevcuttur. CO₂ lazerler dövme kaldırma ve cilt yenileme gibi alanlarda da kullanılmaktadırlar. CO₂ lazerler sürekli ya da darbeli modda çalıştırılabilirler [13].

Karbondioksit lazerlerde, CO₂ karbondioksit moleküllerinin temel elektron durumundaki titreşim-dönme geçişlerinden yararlanılır. Gaz karışımı CO₂, azot ve helyumdan oluşur ve uyarma azot moleküllerinden karbondioksit moleküllerine aktarılır. Maksimum güç, sürekli çalışmada 400 kW, kısa darbeli çalışmada ise 10 TW’ dir [12,15].

2.4.1.5 Metal buharı lazerleri

Metal buharı lazerleri, helyum ve buharlaşmış metal; kadmiyum gibi gaz karışımını kullanır. HeCd’ nin başlıca dalga boyları; 325.0 ve 441.6 nm’ dir. Elektrik deşarjından gelen enerji, (gaz tüpünün içinde yer alan, iki elektrot arasındaki elektrik akımı) daha sonra enerjisini çarpışmalar vasıtasıyla metal buharı atomlarına transfer eden gaz atomlarını uyarır. Bu tip lazerler kızılötesi aralıktan ultraviyole aralığına kadar ışık üretebilirler [8].

2.4.2 Katı-hal lazerleri

Birçok Katı hal lazeri çeşidi mevcuttur; tıpkı yakut lazeri, Ti safir, alexandrite, nadir toprak lazerleri; Neodymium-YAG lazerler, Neodymium-cam ve erbium-silika fiber [13].

2.4.2.1 Yakut Lazeri

İlk başarılı optik mazer ya da lazer 1960'ta Theodore Maiman tarafından yakut kristali kullanılarak 1960'ta geliştirilmiştir. Yakut içindeki bazı alüminyum atomlarının krom atomları ile yer değiştirdiği alüminyum oksit kristalidir. Krom yakuta onun karakteristik, kırmızı rengini verir ve kristalin lazer uygulamasından da bu sorumludur. Krom atomları yeşil ve mavi ışığı hapsederek kırmızı ışık yayar. Yakut lazeri 694.3 nm dalga-boylu ışık yayar [13].

2.4.2.2 Neodymium-YAG Lazer

Neodim iyonu (Nd^{+3}), Yttrium-alüminyum-garnet (YAG) ev sahibi kristalinin içine katılanır. Neodim-YAG lazerler çok önemli lazerlerdir. Çünkü bunlar çok yüksek güçte lazer ışığı üretmede kullanılabilirler. Bazı lazerler bir kilowatt'ın üstünde 1064 nm'de sürekli lazer gücü üretirken, darbeli biçimde, çok daha yüksek güçlere ulaşabilirler [13]. Bu lazerlerde uyarma, ark ya da flaş lambası ile gerçekleştirilir ve ışımanın optik fiberler ile iletilmesi bu lazerleri önemli hale getiren özelliklerden biridir. Neodymium YAG lazerler birkaç nano-saniye kısa darbeleri üretmek için lazer osilatörlerde, darbe modunda kullanılır. Ayrıca neodymium lazer ışığı, frekansının çift katı olan, ikinci harmoniği üreten kristalin içinden geçirilebilir, böylelikle 532 nm dalga boyunda güçlü bir yeşil ışık kaynağı sağlar. Aynı zamanda 266 nm dalga boyunda ultraviyole ışınım sağlayarak, bu dört katına çıkarılabilir. Yakut, Nd^{3+} , ve Er^{3+} dan başka, karşılaşılan diğer optik pompalı katı hal yükseltici ve osilatörler aşağıdakileri içerir:

1. 700 nm ile 800 nm aralığında ayarlanabilir dalga boyuna sahip Alexandrite ($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{BeO}_4$),
2. 660 ile 1180 nm, daha geniş bir dalga boyu aralığında ayarlanabilir, $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ (Ti: safir),

3.Sıklıkla 1660 nm de çalışan Er^{+3} : YAG. Darbe uzunluğu bant genişliği ile ters orantılı olduğundan geniş bant aralığı nedeniyle, ultra kısa darbe üretimi için, sıklıkla Ti: safir seçilir [13].

2.4.2.3 Alexandrite lazerler

BeAl_2O_4 kristalinin %0.01 ile %0.40 arasında krom (Cr^{+3}) iyonlarıyla katkılandığı katı hal lazerleridir. Alexandrite lazerlerinin enerji seviyesi yakut lazerlerinininkine benzer. Alexandrite lazerleri dalga boyu 720 ile 800 nm boyunca ayarlanabilen, dört seviye lazeri gibi çalışır. Bu piyasaya ulaşan ayarlanabilir ilk katı-hal lazeridir [13].

2.4.3 Boya lazerleri

Boya lazeri ilk kez 1965'te, Amerika'da, IBM laboratuvarlarında, Peter Sorokin ve J.Lankard tarafından tanıtılmıştır. 1967'de bilim adamları optik boşluğun sonunda bir kırınım ağı kullanarak, yayılan dalgaboyunu ayarlamanın mümkün olduğunu keşfetti. Boya lazerler bir elektromanyetik ışımayı bir dalgaboyundan, ayarlanabilir diğer bir dalgaboyuna çeviren özel cihazlardır. Boya lazer çıkışı, her zaman, ayarlanabilir, uyumlu (koherent), belirli bir spektral bölge üzerinde, boya maddesi tarafından belirlenen bir ışıındır. Boya lazerin dalgaboyu belirli uygulamalar için ayarlanabilir. Örneğin bir ayarlanabilir medikal boya lazerin dalga-boyu aralığı 577 nm' den 585 nm'ye uzanır. Bu dalga-boyu aralığı, cilt dokusunda, delme derinliğini 0.5 ten 1.2 mm'ye çıkarır. Atımlı boya lazerden gelen, mikrosaniye darbeleri kullanarak, çevre dokuya ısı difüzyonu olmadan, hedef kan damarlarına verilen termal hasar sınırlanabilir [13].

2.4.4 Yarı iletken lazerler

Yarı iletken materyallerden yapılan, tüm yarı iletken lazerler, bazen diyot lazerler olarak adlandırılır. İlk yarı iletken lazer Robert Hall tarafından 1961'de Amerika'da yapılmıştır.1975'te, oda sıcaklığında sürekli modda çalıştırılabilen ilk yarı iletken lazer tanıtıldı. Bu gelişme, CD-ROM, DVD-ROM, lazer işaretçi (pointer) ve diğer birçok yararlı cihazda yarıiletken lazerlerin kullanımına yol açmıştır. Araştırmacılar yarı iletken malzemeden üretilen, ileri meyilli (forward bias) diyottan, uyumlu (coherent) elektromanyetik radyasyon üretmede başarılı oldular. Lazer ışınının karakteristiği cihazda kullanılan yarı iletkenin özelliklerine bağlıdır. Yarı iletken lazerlerin çoğu periyodik tablonun 3. grup elementlerinin 5. grup elementleriyle

bileşikleri temel oluşturmaktadır. CW lazer yayınının dalgaboyu normal olarak 630-1600 nm arasındadır, fakat InGaN yarı iletken lazerlerin, oda sıcaklığında 410 nm dalgaboylu ışık yaydığı bulunmuştur. Yarı iletken lazerler, periyodik cetvelin ikinci grup elementleriyle, 6. grup elementleri bileşik oluşturmasıyla elde edilen materyaller kullanılarak, mavi-yeşil ışık üretebilir. Belli sıcaklığa kadar, yarı iletkenin iletkenliği, sıcaklıkla artar. Yarı iletken lazerin verimliliği ise, sıcaklık arttıkça azalır. Fabry-Perot lazer yapısı yarı iletken lazerlerin en basit örneğidir. Fabry- Perot tek-uzamsal-mod lazer diyotlar onlarca mW lazer gücü ile, 730 nm ‘den 770 nm dalgaboyuna uzanan aralıkta çalışabilirler. Fabry-Perot lazerlerinin uygulamaları; tıp, spektroskopi, gaz tespiti, algılayıcılar, ölçüm aygıtları [13].

Yarı iletken kristal kafesinin içinde, elektronlar için, izin verilmiş enerji seviyeleri, geniş bant sınırları içinde yer alır. Elektronların işgal ettikleri tüm olabilecek enerji seviyeleri olan valans bant ile elektronların serbestçe dolaşabildikleri en düşük iletim bandı arasındaki enerji boşluğu elektronların olağan koşullar altında, serbestçe akışını önleyecek kadar büyüktür. Ancak elektrik alan uygulanmasıyla köprü olamayacak kadar da büyük değildir. İletim bandından valans banda geri düşen elektronlar uyarılmış yayına katılabilirler [8].

Enjeksiyon lazerler; tıpkı 840.0 nm’de, ileri meyilli galyum-arsenid (GaAs) diyot gibi, direk -akım giriş gücünü optik pompalama olmadan, doğrudan uyumlu, ışığa dönüştürür. Yarı-iletken lazerler nispeten daha ucuz, dayanıklı ve etkili: tipik diyot sadece milimetre ebatlarında olabilir, bir ya da iki voltluk gerilim üstünde çalışır. Lazeri iletişim ve ses/video disk okuma için bu kadar kullanışlı yapan, karakteristik dalgaboyu (1.3 mikrometreden, 1.6 mikrometreye) optik fiberlerin içindeki minimum enerji kayıp aralığına tekabül eder [8].

2.4.5 Kimyasal Lazerler

Bu lazerler kimyasal reaksiyonlarda serbest kalan enerjiyi o esnada lazer etkisine uğrayan atom ya da molekül örneğine pompalamak için kullanır. Yüksek enerji çıkışları bu lazerleri askeriyede kullanmak için elverişli kılar [8].

2.4.6 Serbest elektron lazerleri

Serbest elektron lazerleri; elektronların kinetik enerjisini doğrudan ışığa dönüştürmesine neden olan, yüksek enerjili elektron demetinin uzaysal periyodik

manyetik alanın içinden geçtiği yüksek-güçlü ayarlanabilir lazerlerdir. Elektronlar, zıt karşı yönde ilerleyen, yüksek yoğunluklu mikrodalgalar ile etkileşim halindedir. Bu, mikrodalga fotonlarının enerjisini yukarı yönde, birkaç seviye büyüklüğü kadar öteleyebilir. Lazer terminolojisinde bu şu anlama gelmektedir; daha üst lazer enerji seviyeleri, yüksek enerjili elektronlar ve düşük enerjili fotonlar içerirken, daha düşük enerji seviyesi de daha düşük enerjili elektron ve daha yüksek enerjili fotonlardan oluşur. Elektronların geçişinin yarattığı, harici hızlandırma elektronların enerji kaybetmesiyle sonuçlanır. Lazer ışığının enerjisi, manyetik alan ya da elektron-ışık enerjisi ayarlanarak değiştirilebilir [8].

Aşağıda bazı lazer türlerine ait parametreler ve özellikler verilmiştir (çizelge 2.1).

Çizelge 2.1 : Bazı lazer türlerinin karşılaştırılması [12].

Karşılaştırma	CO ₂ Lazeri	Nd: YAG Lazeri	Excimer Lazeri
Dalgaboyu (μm)	10,6	1,06	0,3-0,2
Tahrik Tekniği	Düşük Basıncılı Gaz Boşaltımı	Ark Lambası	Yüksek Basıncılı Gaz Boşaltımı
Çalışma Şekli	CW/P	P/CW	P
Maximum Güç (kW)	25	2	0,4
Darbe Gücü (kW)	10 kW'a kadar	100 kW'a kadar	30000 kW'a kadar
Işın Kalitesi	Maximum	Düşük	Düşük
Verimlilik (%)	5-10	2-5	1-2
Fiyat (x1000 Avro)	500	800	650
Kullanım yerleri	Termik prosesler makro işleme	Termik prosesler mikro işleme	Mikro alanda termik olmayan işlerde

2.5 Lazere ait delme parametreleri

2.5.1 Lazer dalgaboyu ve frekansı

Lazer ışınının bu önemli karakteristiği, verilen lazer için, genellikle belirlidir [7].

2.5.2 Atım genişliği

Bir atım süresi ya da zamanıdır. Delmede kullanılan lazerlerin atım süresinin aralığı milisaniyeden femto-saniyelere uzanır. Verilen lazer genellikle, atım genişliğini on

kat değiştirebilecektir. Daha ileride bir değişiklik ise lazer sisteminin de değişiklik gerektirir [7].

2.5.3 Atım tekrar sayısı ya da atım frekansı

Saniyedeki atım sayısıdır. Lazer sistemine bağlıdır. Birkaç hertz'den birkaç kilohertz'e kadar değişebilir [7].

2.5.4 Ortalama güç

Lazerin ortalama çıkış güç: Lazerin verilen zamandaki çıkış enerjisinin, verilen zamana oranıdır. Bir temsili g belirlenebilmesi için, kullanılan zaman, atım aralığına kıyasla daha bk olmalıdır [7].

2.5.5 Pik güç

Bir tek lazer atımı sırasında ulaşılan g, örneğin atım enerjisinin, atım genişliğine oranıdır. Pik g, ortalama lazer günden kat be kat bk olabilir [7].

2.5.6 Akış (Fluence)

Birim alana iletilen enerjidir [7].

2.5.7 Odak pozisyonu

Lazerin odaklandığı düzlemdir. Bu genellikle delinen yüzeyin en üstüne denk gelir fakat malzemenin altına saptanabilir ve delme sürecinde de hareket ettirilebilir [7].

2.6 Lazerde G ve Enerji

Lazerler hem sürekli (CW), hem de darbeli kipte çalıştırılabilir. Darbeli alıştırma bazen lazerin ısınmasını azaltmak için kullanılır. Bununla birlikte birçok olayda, darbeli mod, Q anahtarlama tekniği ve mod kilitleme tekniği gibi tekniklerle birleştirilir. Q anahtarlama ve mod kilitleme lazerler, nispeten kısa uzunluklu atımlardan dolayı, çok yüksek pik güç yoğunluğunu toplayabilir [13].

Lazerde, atomları uyarma sürekli ya da darbeli olarak yapılabilir. Darbeli lazerde atomlar, periyodik enerji girişleriyle uyarılır. Fotonların çoğalması, uyarılmış tüm atomlar, alt enerji seviyesine inene kadar devam eder. Bu süreç herbir darbe girişi ile tekrarlanır. Sürekli lazerde daha alt seviyelere inen atomların uyarılması için, enerji

giriş i sürekli dir, yani sürekli olarak enerji giriş i olmalıdır. Atomlar hemen üst enerji seviyelerine geri uyarılır [13].

Atımlı lazerleri sürekli lazerler yerine kullanılırken bir şeye dikkat edilmesi gerekir; çünkü pik gücünü açıklayan watt ile ortalama gücü açıklayan watt'ın kullanımı kolayca karışabilir [13].

Sürekli lazerlerde ortalama güç demekle, güç kastedilir. Darbeli lazerlerde ise, ortalama güç atım başına düşen enerji (Joule) ile atım tekrar sayısının (Hz) çarpımına eşittir; P_{ort} birim alana düşen ortalama güç yoğunluğudur ve p_{pik} ise birim alana düşen pik güç yoğunluğudur.

$$P_{ort}=E_{atım} \cdot R_{tekrar} \quad (2.1)$$

Pik gücü ise; atım başına enerjinin (Joule) atım genişliğine (saniye) oranıdır.

$$P_{pik}=E_{atım}/t_{atım} \quad (2.2)$$

2.6.1 Q anahtarlama

Q anahtarı (Q: Quality) sayesinde endüstriyel malzeme işlemlerinde yüksek lazer gücü elde edilebilmektedir. Olağan dışı yüksek güç kısa sürelerde üretilebilirse (birkaç ns' de 10 MW), kendiliğinden ve uyarılmış yayınım birlikte etki eder. Böylesi bir durum Q-anahtarı ile sağlanmaktadır. Q anahtarının çalışma şekli, rezonatörde ışın yolunun çok kısa süre ile engellenmesi sonucunda elde edilmektedir. Engellenen ışın daha sonra çok hızlı bir şekilde serbest bırakılmakta ve böylece olağan dışı kısa, yoğun ve 100 kW'ın üzerinde bir darbe gücü oluşturulmaktadır. Güç yoğunluğu ve lazer darbe süresi Q anahtarı hızına bağlıdır. Kullanımda mekanik ve elektro-optik olmak üzere iki tür Q anahtarı mevcuttur [10].

2.6.2 Mod kilitleme

Aktif ortam içindeki uyarılmış yayınım süreci, farklı birkaç yerde, eş zamanlı olarak başlayabilir. Aynı fazda olmayan ve hafif dalga-boyu farklılıkları olan, bu dalga dağılımlarına mod denir. Ardışık iki mod arasındaki frekans farkı lazer boşluğunun uzunluğuna bağlıdır.

Bir lazerdeki yayılan ilişkisiz çeşitli modlar, lazer boşluğuna bir modülasyon elemanı koyularak, senkronize edilebilir. Bazı organik boyalar ışık yoğunluğu arttıkça,

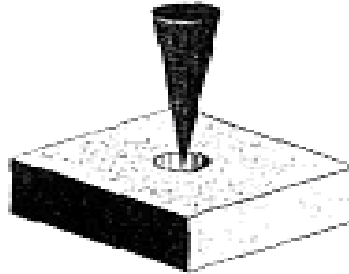
azalan absorbe özelliği gösterir. Bu davranış kısa atımlı, yoğun, optik dalga katarındaki çeşitli modları aynı anda kilitlemeyi sağlar [8].

Q anahtarlama ile yüksek yoğunluklu, ns aralığında kısa atımlar elde edilebilirken, mod kilitleme ise; pikosaniye (ps)'den femtosaniye (fs)' ye uzanan aralıkta, çok kısa atım süresine sahip, lazer atımları üretilir.

2.7 Lazerle Delme yöntemleri

2.7.1 Tek atım delme (single shot)

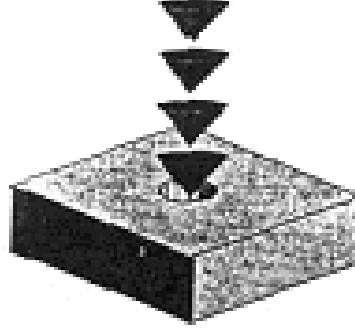
Bu delme yönteminde yeterince yüksek enerjili lazer atımı (şekil 2.4) ince bir tabakada, ya genişliği 1mm'den küçük, baştanbaşa bir delik açmak için ya da kalın bir tabakada kör, sığ bir delik açmak için kullanılır. Lazer atım genişliği, atım başına birkaç ya da onlarca J' lük enerjili, milisaniyelerden, atım başına onlarca mJ' llük enerjili onlarca nano-saniyelere uzanır. Genellikle atım enerjisi arttıkça delik derinliği ve çapı artar. Tek atım delme, yeniden şekillendirme (recast), sıçrayan malzeme kalıntısı (spatter) ve koniklik açısından zayıf toleransa sahiptir. Delik kalite ve netliği atım genişliğinin azalmasıyla, iyileştirilebilir [16].



Şekil 2.4 : Tek atım lazer delme metodu [17].

2.7.2 Darbeli (percussion) delme

Bu delme tekniğinde yüksek hızda, kısa süreli özdeş lazer atım serisi, tek bir noktaya yönlendirilerek (şekil 2.5) nispeten, daha kalın bir tabakayı delmek hedeflenir. Her bir lazer atımı malzemeden belirli bir derinliğe kadar materyal çıkarılmasına neden olur. Böylelikle atım sayısı arttıkça derinlik de artar. Deliğin konik olma durumu nispeten daha azdır. En popüler delme yöntemlerinden biridir ve yanma odaları, türbin ve kanatlarda çok sayıda delik açmak için kullanılır [16].



Şekil 2.5 : Darbeli delme metodu [17].

2.7.3 Kuyu delme burgusu (trepanning)

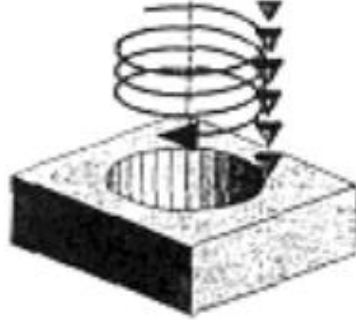
Bu delme türü, çok büyük delikler açmada kullanılır, bir kontur çevresinde, birbirleriyle örtüşen delikler serisi ile elde edilir (şekil 2.6). Ya yüksek tekrar sayısına sahip atımlı lazer, sürekli lazer (CW) ya da yarı CW lazerle yapılabilir. Kalın biri iş parçasında, ilk olarak pilot delik, darbeli delme ile oluşturulur. Daha sonra, lazer ışını, gittikçe artan, dairesel bir yol boyunca hareket ettirilerek, bir biri ile örtüşen, lazer atımları ile genişletilir. Delik herhangi bir şekil ya da büyüklükte, dairesel ya da dairesel olmayan şekillerde olabilir [16].



Şekil 2.6 : Kuyu delme burgusu metodu [17].

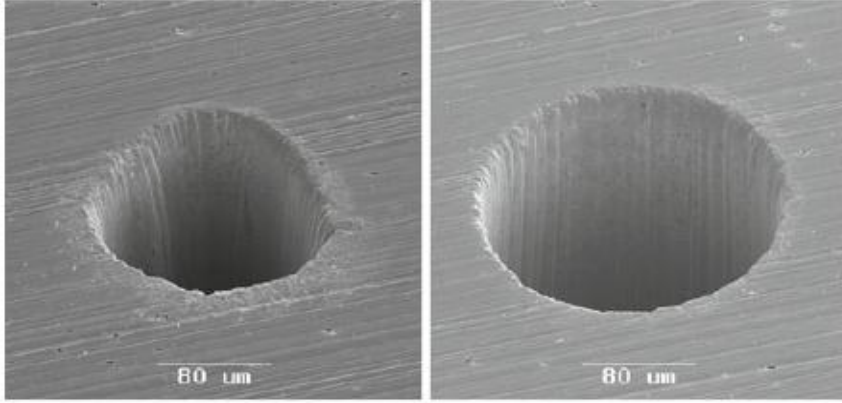
2.7.4 Sarmal kuyu delme burgusu (helical trepanning)

Bu teknikte; odaklanmış lazer ışını kendi çevresinde döndürülür ve kademeli biçimde, her bir spiral dönüş odak pozisyonundan aşağı doğru deliği derinleştirir (şekil 2.7). Lazer ışının odağının, daima deliğin arkasında kalması için ayarlanır. Öncelikle bir baştanbaşa delik oluşturulur, sonra lazer ışını deliğin etrafında birkaç kez döndürülerek, kenarları düzeltilir. Bu yöntemle oldukça büyük, derin ve kaliteli delikler elde edilir [16].



Şekil 2.7 : Sarmal kuyu delme burgusu metodu [17].

Lazer atım genişliğine, bağlı deliklere ait mikroskop görüntüleri şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8 : a) Darbeli delme metodu, b) kuyu delme burgusu-150mJ atım [18].

2.8 Lazerle delinmiş deliklerin kalitesi

Lazerle delme termal bir süreçtir ve eriyik tahliyesi genellikle tam değildir. Lazerle delinen delikler genellikle delik çapı, konik olma, dairesellik ile ilgili bazı geometrik kusurlar ya da ısıdan etkilenmiş bölgede, malzemedan sıçrayan çamur, yeniden şekillendirilmiş tabaka, mikro-çatlaklar, mikro-yapı değişiklikleri gibi metalürjik kusurlar içerir. Bu kusurlar, lazer atım enerjisi, atım genişliği, atım tekrar frekansı, delik derinliği, materyalin kalınlığı ya da materyalin özelliklerine bağlıdır [16].

2.8.1 Konik açısı

Konik açısı genellikle şu şekilde ifade edilir;

$$\text{Konik } (^{\circ}) = 180(d_{\text{giriş}} - d_{\text{çıkış}}) / 2\pi t \quad (2.3)$$

Koniklik + ya da – olabilir, giriş çapı, çıkış çapından ya küçüktür ya da büyüktür. Konik açısı, çalışma parçasının yüzeyine göre, odak derinliğine, odak pozisyonuna, delinen deliğin derinliğine, lazer atım enerjisine ve atım genişliğine bağlıdır. Genellikle delikler, daha kısa atım sürelerinde ve düşük pik güçlerinde daha fazla konik olur. Ayrıca malzemenin kalınlığının artması ve delik derinliğinin artmasıyla konik açısının derecesini düşürür. Konik açısı, darbeli delmede, tek atım delmeye göre daha küçüktür ve bu atım yoğunluğunun artmasıyla daha da azalır, tam temizleme etkisine sahip, atış sayısının artmasıyla da konik açısı azalır. Konik açısı, odak noktasını, delme işlemi devam ederken, materyalin içine sabit hızda indirerek, azaltılabilir [16].

2.8.2 Yeniden şekillendirilmiş malzeme

Delinen deliğin duvarında, püskürtülen materyal tekrar katılaştığında buna yeniden şekillenmiş katman olarak adlandırılır. Yeniden şekillenen malzeme genellikle çok incedir. Fakat yığın materyalden farklı özelliklerle gösterebilir, bundan dolayı bazı durumlarda istenmiyor olabilir, hatta eğer mikro-çatlak oluşuyorsa bir stres yükseltici olabilir. Yeniden katılaşmış malzemenin kalınlığı, lazerin akıcılığına, atım genişliğine, atım frekansı, atım sayısı, yardımcı gaz ve basıncı, delik derinliği ve materyal özelliklerine bağlıdır. Aynı zamanda deliğin boydan boya olup olmadığına da bağlıdır. Kör delikler genellikle, deliğin ağzında diptekinden daha ince bir yeniden şekillendirilmiş tabakaya sahiptir ve daha kısa ve yoğun lazer darbeleri için daha azdır. Darbeli delmede, oluşan yeniden şekillenmiş tabakanın derecesinin, derinlikle değişeceği bulunmuştur ve deliğin orta ve çıkış tarafına kıyasla kalınlığı deliğin giriş tarafında özellikle önemlidir [16].

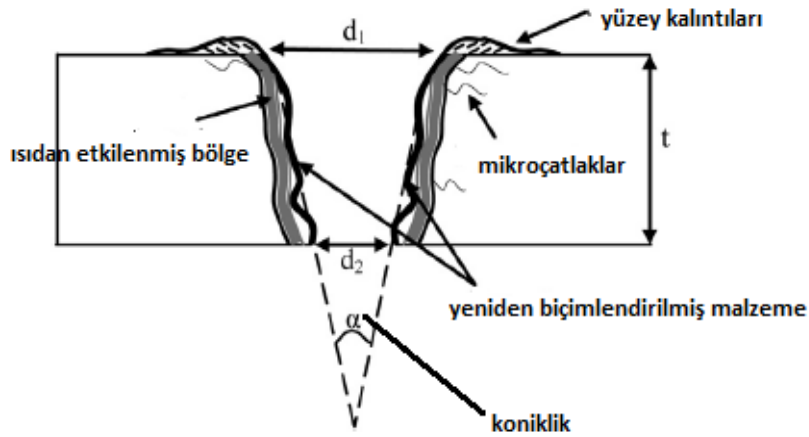
2.8.3 Püskürtülen malzeme (yüzey kalıntıları)

Lazerle delme esnasında bazı erimiş ve buharlaşmış materyal tekrar katılaşır, deliğin dış çevresi etrafına yapışır. Buna püskürtülen malzeme denir. Birçok uygulamada bu istenmeyen bir şeydir. Birçok darbeli delme deneyinde, daha kısa atım genişlikleri, düşük pik gücü ve yüksek atım frekansı olan lazer atımları ile daha az birikmiş alan üretilebilir [16].

2.8.4 Mikroçatlaklar

Materyalden madde sökmeye ve erimeye neden olan, yüksek yoğunluklu lazer ışını, mikro-çatlaklara yol açan, ısıdan etkilenmiş dar bölge içinde ve yeniden katılaşmış tabaka ile yığın tabaka altı arasında, aynı zamanda lokalize olmuş büyük termal stresleri uyarır; özellikle sert materyallerde; cam ve seramik gibi. Bu kusurlar lazer güç yoğunluğu, atım genişliği, materyal özellikleri, materyal işleme süreci boyunca iş parçasının sıcaklığına bağlıdır. Materyal sökmede, buharlaşmanın baskın mekanizma olduğu ve yeniden katılaşmanın minimum olduğu yerde, yüksek yoğunluklu, kısa atım genişlikli lazer delme ile ısıdan etkilenmiş bölgenin ve mikro-çatlakların minimum olması beklenir [16].

Lazerle delmede, delik kalitesini içeren terimlerin delik üzerinde gösterimi şekil 2.9' da yer almaktadır.



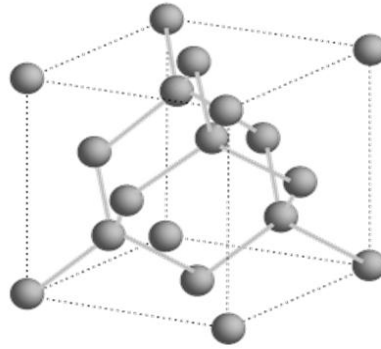
Şekil 2.9 : Delik kalitesini etkileyen özellikler [16].

2.9 Silikon malzemenin özellikleri

Mikroelektromekanik cihazların yapımında en çok tercih edilen materyal silikondur. Bu, MEMS üretimi için, endüstriyel altyapı sağlayan, iyi kurulmuş yarı iletken üretim teknolojisine bağlı olarak oluşan ekonomik yararından kaynaklanır. Buna ek olarak kristal yapısına bağlı olarak, elektriksel, optiksel ve mekanisel olarak silikonun cazip özellikleri mevcuttur. Silikon tabanlı MEMS, silikon oksit, silikon nitrit, silikon karbid içerebilir veya al, W, Cu gibi metaller ya da polyamid gibi başka polimerler de içerebilir [6].

2.9.1 Fiziksel özellikleri

Silikon mikro-elektromekanik cihazlarda, mikroyapı bakımından tek kristalli, çok kristalli ya da amorf olarak kullanılabilir. Silikonda, kovalent bağlarla bağlanan atomlar, elmas kübik kristal yapının içine kristalize olmuştur. Şekil (2.10).

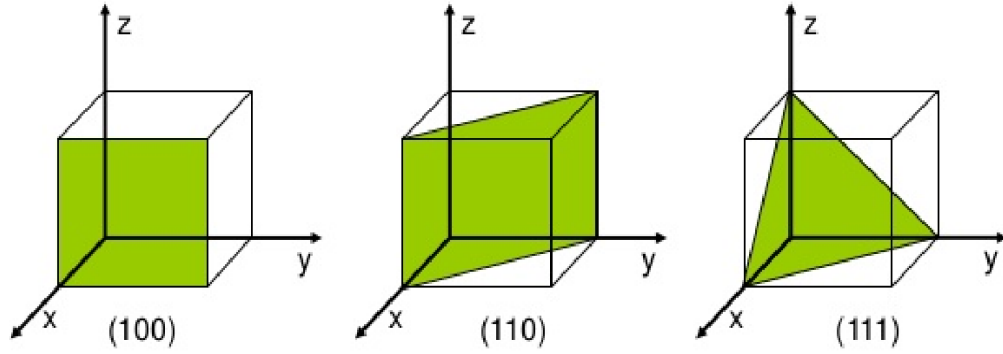


Şekil 2.10 : Tek kristalli silikonun kristal yapısı [19].

Silikon sert, kırılgan bir materyaldir ve tek kristalli silikon, kırılma stresi ortaya çıkana kadar, önemli plastik deformasyon olmaksızın, oda sıcaklığında stress altında elastikiyetini sürdürür [20].

Uygulama türü ya da üretim süreci, kullanılan silikonun seçiminde önemli bir faktördür. MEMS için kullanılan tek kristalli silikon tabakalar genellikle, tek tarafı parlatılmış tabakalar için, yaygın olarak 100 ve 150 mm çapında, kalınlığı 525 ile 650 μm arasında değişen ve iki tarafı parlatılmış tabakalar için, 100 μm daha incedir. N ve p tipi katkılı tabakaların kristal yönelimi genellikle (100) ve (111)'dir [6].

Silikon tabakaların kristal yönelimi, miller indisleri adı verilen, silikon tabaka yüzeyinde bulunan yüzeyi ifade eder (şekil 2.11).



Şekil 2.11 : Silikon malzemede kristal yönelimleri [21].

Kristalografik düzlemlerin görselleştirmesi, malzeme özelliklerinin kristal yönelimine bağımlılığı ve düzlem seçici aşındırma çözeltilerin etkisini anlamak için anahtardır. Düzlemler arasındaki açılar; $\{100\}$ ve $\{110\}$ düzlemleri arasındaki 45° ya da 90° , $\{100\}$ ve $\{111\}$ düzlemleri arasında 54.7° ya da 125.3° , benzer olarak, $\{111\}$ ve $\{110\}$ düzlemleri birbiriyle 35.3° , 90° ve 144.7° de kesişebilir. $\{100\}$ ve $\{111\}$ düzlemleri arasındaki açı özellikle mikro-işlemede birçok su bazlı çözeltiler, tıpkı potasyum Hidroksit (KOH), silikonun $\{111\}$ düzlemlerini değil de, $\{100\}$ düzlemini seçerek aşındırır. Aşındırma işlemi, $\{111\}$ düzlemi ile sınırlandırılmış oyuklarla sonuçlanır [22].

2.9.2 Mekanik özellikleri

Sert ve kırılgan olan silikon kırıldığı nokta olan, akma dayanımına kadar esnek biçimde şekil değiştirir. Silikonun maximum çekme gerilmesi 7 GPa olup, 1mm^2 'lik alana asılı 700 kg ağırlığa eşdeğerdir. $\langle 110 \rangle$ yönünde 169 GPa, $\langle 100 \rangle$ yönünde 130 GPa –yaklaşık çeliğinkine eşdeğer olan bu elastite modülü (young modulus), kristal yönelimine bağlıdır. Mekanik özelliklerin kristal yönelimine bağımlılığı, silikon tabakanın tercihen kristal düzlemler boyunca bölüneceği şeklinde yansıtılmıştır [22].

2.9.3 Elektriksel özellikleri

Silikon periyodik tabloda bulunan bir IV. grup elementi ve band genişliği 1.12 eV olan bir yarı-iletkenidir. Bu demektir ki oda sıcaklığında saf silisyum neredeyse yalıtkandır. III.grup ya da V.grup elementler ile katkılanarak, silikonun öz direnci geniş bir aralık boyunca çeşitlendirilebilir [20].

2.9.4 Termal özellikleri

Silikon termal iletkenliği birçok metalden daha yüksek olan ve camdan yaklaşık olarak 100 kez daha büyük olan, çok iyi bir termal iletkenidir. Kompleks entegre devrelerde etkili bir soğutucu olarak kullanılır [22].

2.9.5 Optik özellikleri

Ne yazık ki silikon aktif optik bir materyal değil, silikon tabanlı lazerler mevcut değildir. Kristal atomları ile iletim elektronlarının arasındaki belli etkileşim nedeniyle silikon, ulaşılacak ışığın yayılımı güç olan, sadece belli ışıklarda efektiftir. Kızıl ötesi dalgalarda 1.1 μm 'nin üstünde silikon saydamdır, fakat 0.4 μm dalgalardan daha kısa dalgalarda (mavi ve ultraviyole spektrum bölgesinde), silikon gelen ışığın % 60'ını yansıtır. Silikonun içinde, ışığın zayıfladığı derinlik (yoğunluğunun başlangıç değerinin %36'sına düşmeden önce katettiği mesafe), 633nm (kırmızıda) 2.7 μm , ve 436 nm'de (mavi-ultraviyole) 0.2 μm 'dir [22].

3. ÇALIŞMALARDA KULLANILAN LAZERLER VE MALZEMELER

3.1 Kullanılan Lazerlerin Özellikleri

Çalışmalarda DFL ventus marker II lazer (Nd: YAG fiber lazer) ve DPL nexus marker (Nd:YAĞ diyot pompalı lazer) lazer olup , kullanılan lazerlerin özellikleri tablo 3.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Kullanılan lazerlerin özellikleri

Lazer Parametre	DFL ventus marker II	DPL nexus marker
Dalgaboyu	1064 nm	1064 nm
Ortalama lazer gücü	20 W	12 W
Atım genişliği	200 ns (ayarlanabilir)	15-100 ns (ayarlanabilir)
Spot çapı	35 µm (F-teta163)	35 µm (F-teta163)
Frekans	25-500 kHz	1-100 kHz
Işın kalitesi (M²)	≤ 2	< 1.8
Çalışma şekli	Darbeli/sürekli	Darbeli/sürekli
Kontrol ünitesi	Güç kaynağı modülü ile kompakt kontrol ünitesi Sistem kontrolü ve veri işleme için çoklu işlemci Lazer kaynağı Tarayıcı kontrol Veri yolu sistemi vasıtasıyla tüm bileşenlerin bağlantısı	Lazer kaynağındaki entegre kontrol ünitesi Güç destek modülü Sistem kontrolü ve veri işleme için çoklu işlemci Lazer diyot sürücü ve termoelektrik kontrolcü Tarayıcı kontrol HF sürücü Veri yolu sistemi vasıtasıyla tüm bileşenlerin bağlantısı
Tarama ünitesi	Galvanometrik tarayıcı (Fire scan)	Galvanometrik tarayıcı (Fire scan)
Soğutma sistemi	Entegre termoelektrik hava soğutmalı lazer kaynağı	Entegre termoelektrik hava soğutmalı lazer kaynağı
Yazılım	marking on the fly	marking on the fly

3.2 Kullanılan malzemeler

Kullanılan malzemeler ise 1 mm, yaklaşık 700 mikrometre ve yaklaşık 500 mikrometre kalınlıklarında silikon tabakalardır.

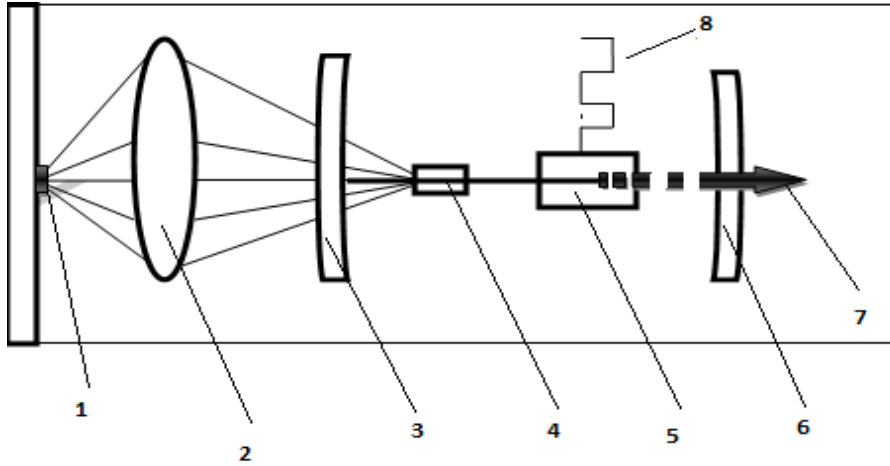
3.3 Kullanılan yöntemler

Kullanılan yöntemler ise; lazer ışının, malzemede, hedeflenen bölge etrafında, kontur çizdirerek, kuyu delme burgusu benzeri bir yöntemle ya da hedeflenen geometrideki şeklin içini, lazer ışını ile istenilen sıklıkta ve açıda taratarak delmedir.

Kullanılan bu lazerler lazer ışık kaynağı, ışığı ileten sistem, Q anahtarlama, soğutma birimi ışın sapma birimi (galvanometre içeren tarayıcı) alt sistemlerine sahiptirler.

3.4 Kullanılan Diyot lazer ışın kaynağının alt bileşenleri ve çalışma prensibi

Kullanılan lazerlerden DPL nexus marker lazer bileşenlerinin şematik gösterimi şekil 3.1’de mevcuttur.



Şekil 3.1 : DPL nexus marker lazer ışın kaynağının bileşenleri [23].

3.4.1 Lazer ışın kaynağı alt bileşenleri

1. Lazer diyot
2. Lens

3. Tam yansıtıcı ayna
4. Lazer kristali
5. Q anahtarı
6. Yarı geçirgen ayna
7. Darbeli lazer ışını

3.4.2 Çalışma prensibi

Bir lens sayesinde odaklanan bir diyotun ışınımı bir lazer kristalini uyarır. Bu, onu izleyen Q anahtarı ile birlikte aynalar arasındaki optik eksen arasında konumlandırılır. Uyarılan bu lazer kristali (kullanılan lazerde Nd:YAG) 1064 nm dalga boylu, sürekli, yüksek enerjili ışın yayar. Uygulama alanı için gerekli olan, materyali markalayacak enerji yoğunluğuna ulaşmak için, lazer ışını Q anahtarı üzerinden geçerek, 10 Hz ile 50 kHz arasında frekanslarla açılıp kapatılır. Bu lazer ışını, bir Q anahtarı ile ışının yolunun kesilip açılmasıyla darbeli lazer ışını haline getirilir [23].

3.5 Diğer Alt Lazer Birimleri

- Termoelektrik soğutma sistemli lazer diyot
- Lazer elektronikleri
- Lazer sürecini kesen kapatıcı (shutter) adı verilen bir sistem,
- Farklı materyalleri markalamak için, lazer ışınını x ve y yönünde saptırma ya yarayan, saptırma ünitesi adı verilen galvanometre tarama birimi
- Mercek (lazer ışın çıkışı)
- Güç giriş modül ve ara yüzler, lazere ait diğer bileşenlerdir [23].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Silikon yüzeye boydan boya delik açılması

4.1.1 Amaç

Parametrelerin değişiminin, delik kalitesine etkisini incelemekten, rastgele seçilen parametrelerle, 1 mm kalınlığındaki silikon tabakanın, boydan boya delinip delinemeyeceğinin belirlenmesi.

4.1.2 Kullanılan lazer ve malzeme

Kullanılan lazerler ise Nd:YAG diyet pompalı fiber lazer olan, ACI marka DFL Ventus marker lazer, DPL nexus marker lazer, 1mm kalınlığında silikon tabaka.

4.1.3 Yöntem ve uygulama 1

DFL ventus marker II' yi kullanarak, anında markalama (marking on the fly) yazılımı aracılığı ile ve 0.1 mm olarak belirlenen dairenin içi, belirlenen açı ve sıklıkta taratılarak, kazıyarak, çıkarılmıştır. Bu yöntemin şematik gösterimi ve optik mikroskop görüntüleri aşağıda mevcuttur.

4.1.3.1 Kullanılan parametreler

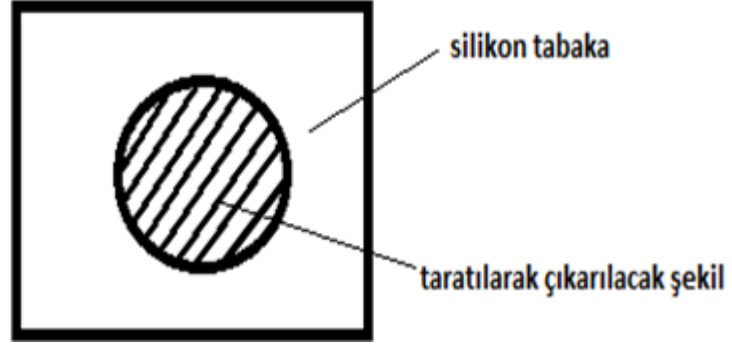
Atım genişliği: 250 ns

Frekans: 25 kHz

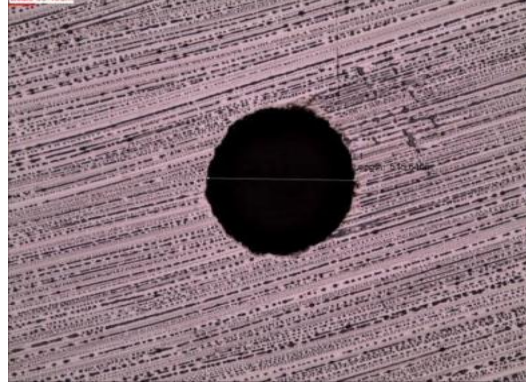
Tarama hızı: 300 mm/s

Ortalama çıkış gücü: 20 watt

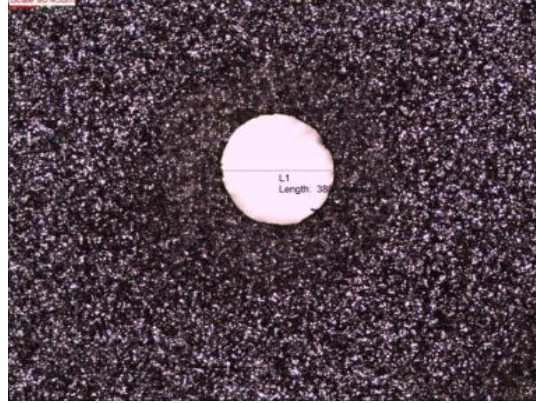
Yukarıdaki çalışmaya ait, içini taratarak kazıma yöntemine ait şematik gösterim şekil 4.1 ile, DFL Ventus Marker lazer ile yukarıdaki parametre değerleri kullanılarak delinen, ışının giriş ve çıkış yüzeyine ait optik mikroskop görüntüleri ise şekil 4.2 ve şekil 4.3 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Lazerle dairesel şeklin taratılarak delinmesi.



Şekil 4.2 : Işının giriş yüzey delik çapı 515.64 μm .



Şekil 4.3 : Işının çıkış yüzey delik çapı 388.94 μm

4.1.4 Yöntem ve Uygulama 2

DPL nexus marker kullanılarak ve anında markalama (marking on the fly) yazılımı aracılığı ile parametre değerleri ayarlandıktan sonra yine içini taratarak kazıma yöntemi ile optik mikroskop görüntüleri aşağıda verilen delikler oluşturulmuştur.

4.1.4.1 Kullanılan parametreler

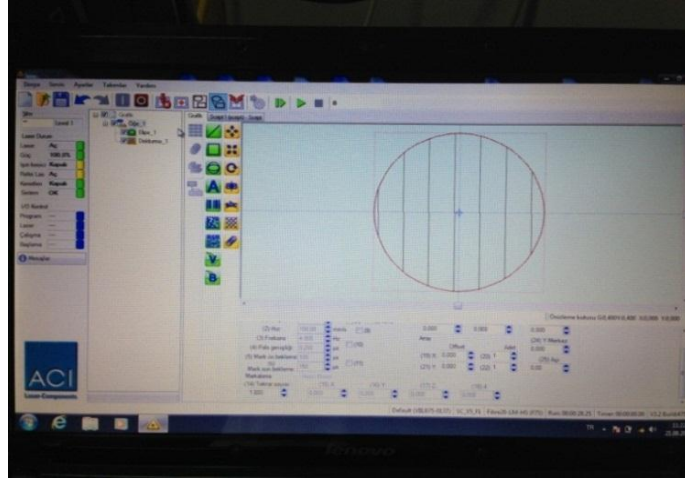
Atım genişliği: 300 ns

Frekans: 4 kHz

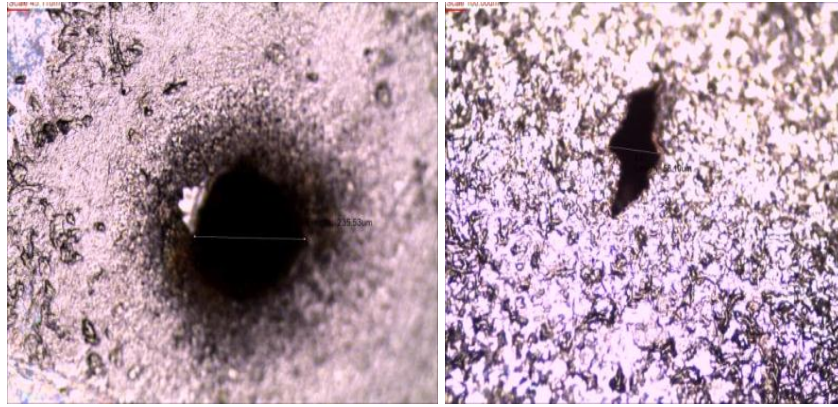
Tarama hızı: 60 mm/s

Ortalama çıkış gücü: 12 watt

Kullanılan yönteme ait ekran görüntüsü şekil 4.4 , DPL Nexus marker lazer ile yukarıdaki parametre değerleri kullanılarak delinen deliklere ait mikroskop görüntüleri şekil 4.5 (a) ve şekil 4.5 (b) ile gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Kullanılan program ve delinmesi hedeflenen dairesel delik.



Şekil 4.5 : (a) Işığın giriş yüzey delik çapı 235.53 μm (b) ışığın çıkış yüzey delik çapı 58.10 μm .

4.1.5 Sonuç

Deneyler sistematik olmamakla beraber, her iki lazerle de 1 mm kalınlığındaki silikon tabakaya boydan boya delik açılabilmiştir. Ortalama çıkış gücü, frekans ve atım genişliği gibi parametrelerin, delik çap ve kalitesine etkisini araştırmak için aşağıdaki çalışmalar yapılmıştır.

4.2 Ortalama lazer gücü-delik çapı ilişkisi

4.2.1 Amaç

Farklı lazer ve parametreler kullanılarak, ortalama lazer gücünün delik çapları üzerindeki etkisini incelemek.

4.2.2 Kullanılan malzeme ve lazerler

Nd: YAG diyet pompalı fiber lazer olan, ACI marka DFL ventus marker lazer, DPL nexus marker lazer, yaklaşık 700 µm ve yaklaşık 500 µm kalınlığında silikon tabaka.

4.2.3 Yöntem ve uygulama 1

Nd: YAG diyet pompalı lazer (DPL nexus marker) kullanarak, maksimum ortalama gücü 12 watt olan lazerin gücünü %100 den %70'e kadar (bu değerden sonra delik gözlemlenemediğinden) sistematik olarak düşürülerek, yaklaşık 700 µm silikon yüzeyde her güç değeri için iki delik oluşturuldu. Yüzeyde oluşan deliklerin optik mikroskopta yatay ve düşey düzlemdeki çapları ölçüldü. Her örnekte ön ve arka yüzeyler için adımlar tekrarlandı. Aynı güç uygulanan farklı iki örnek için, ön yüzeyde ortalama çap değerleri elde edildi. Güç değeri azaltıldıkça silikonun arka yüzeyindeki, yani ışığın çıktığı taraftaki deliklerin kalitesi ve geometrisi oldukça bozulduğundan (lazerin silikonu boydan boya delmesi için gereken güç azaldığından) arka yüzey için ortalama bir delik çapı hesaplanamadı. Bu yüzden güç ve ortalama çap değerleri sadece ön yüzey için tabloya kaydedildi. Kullanılan delme yöntemi ise; kuyu delme burgusudur.

4.2.3.1 Parametreler

Atım genişliği: 3 µs

Frekans: 4 kHz

Tarama hızı: 20 mm/s

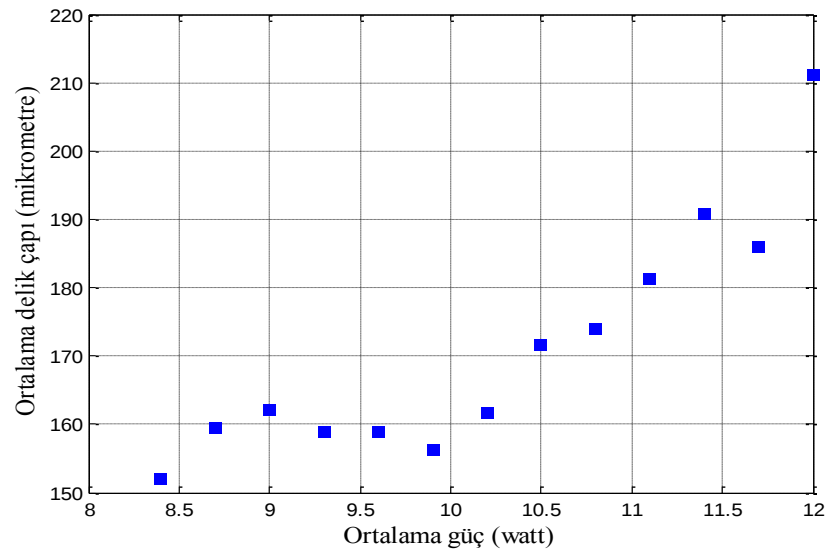
Tekrar sayısı: 800

Bu deneye ait her bir güç değişimine ait ortalama delik çapı tablo 4.1'e kaydedilmiştir.

Çizelge 4.1 : Güç-ortalama ışık giriş yüzeyi delik çapı.

%Güç	Güç(watt)	Ortalama çap (ön)
%100	12	211.233
%97.5	11.7	186.025
%95	11.4	190.905
%92.5	11.1	181.335
%90	10.8	173.99
%87.5	10.5	171.67
%85	10.2	161.61
%82.5	9.9	156.28
%80	9.6	158.905
%77.5	9.3	158.995
%75	9	162.19
%72.5	8.7	159.455
%70	8.4	152

Kademeli olarak azalttığımız güç değerlerine karşılık gelen, delik çapları için Matlab’da güç-delik çapı grafiği (şekil 4.6) çizdirilmiştir.



Şekil 4.6 : Her bir güç değerine karşılık gelen ortalama delik çapına ait grafik.

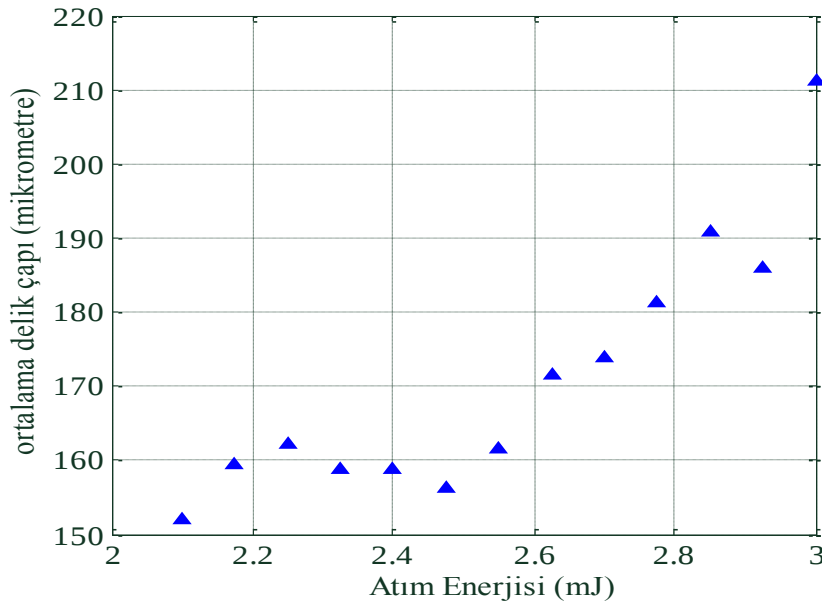
Tabloda verilen güç değerlerinden yola çıkarak; aşağıdaki güç-enerji denkleminde elde ettiğimiz enerji değerlerini tablo 4.2’ye kaydederek, atım enerjisi-delik çapı grafiği MATLAB program kullanılarak çizdirildi (şekil.4.7). Ayrıca bazı güç değerlerine karşılık, optik mikroskop ile ölçülerek kaydedilen delik çapları şekil 4.8 ile gösterilmiştir.

Atım enerjisi darbeli lazerlerde aşağıdaki gibi hesaplanır:

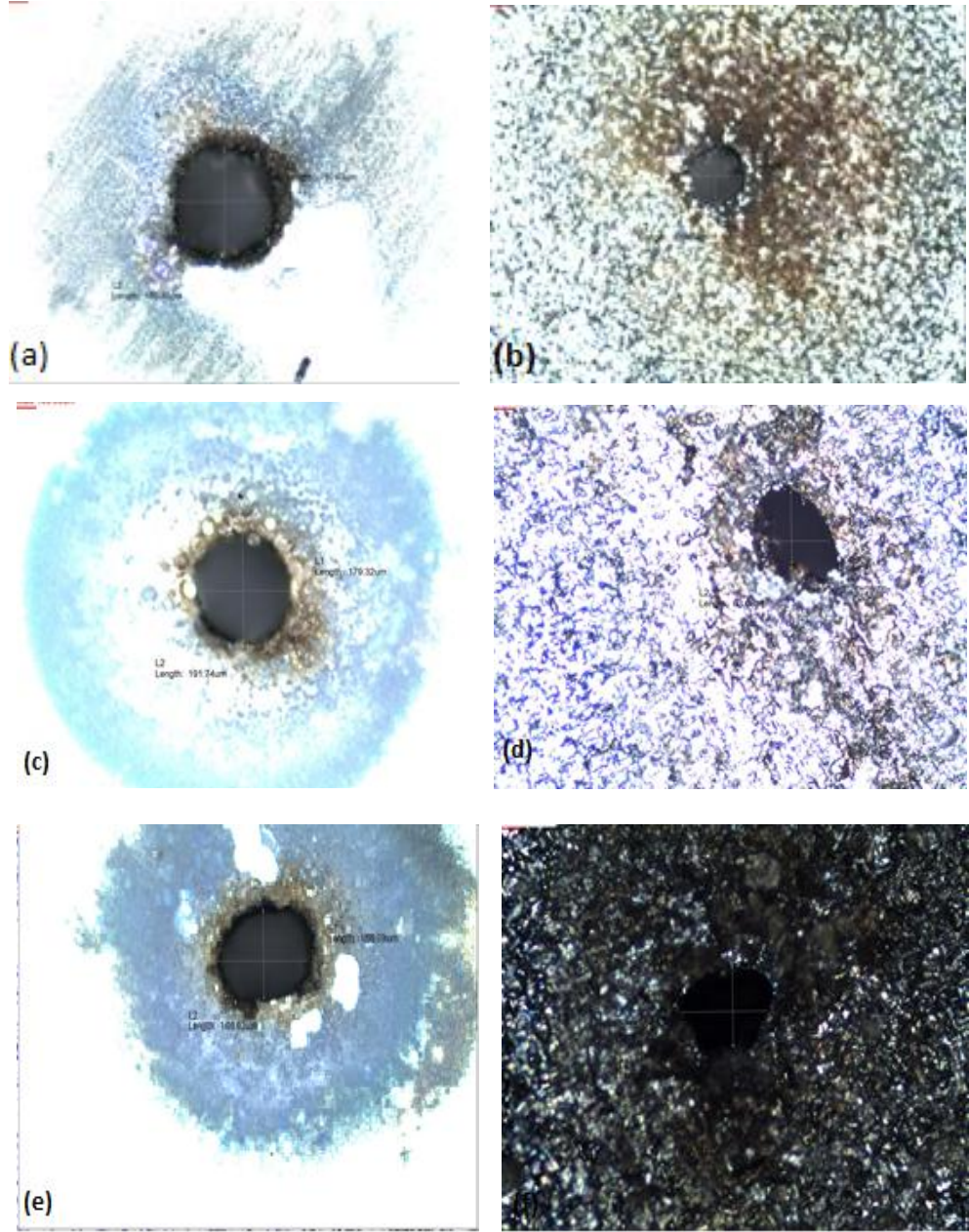
$$\text{Atım enerjisi} = \frac{\text{Ortalama güç}}{\text{Lazerin frekansı}} \quad (4.2)$$

Çizelge 4.2 : Her bir atım enerjisine karşılık gelen ortalama delik çapları.

Atım enerjisi (mJ)	Ortalama delik çapı (µm)
3	211.233
2.925	186.025
2.85	190.905
2.775	181.335
2.7	173.99
2.625	171.67
2.55	161.61
2.475	156.28
2.4	158.905
2.325	158.995
2.25	162.19
2.175	159.455
2.1	152



Şekil 4.7 : Atım enerjisinin ortalama delik çapına bağlı değişimi.



Şekil 4.8 : 12 watt ortalama çıkış gücü, ortalama delik çapı giriş 185.545 μm (a), çıkış 96.99 μm (b) 10.2 watt ortalama çıkış gücü, ortalama delik çapı giriş 174.26 μm (c), çıkış 62.215 μm (d), 9 watt ortalama çıkış gücü, ortalama delik çapı giriş 166.355 μm (e), çıkış 76.27 μm (f).

4.2.4 Yöntem ve uygulama 2

DFL ventus marker lazer kullanılarak, uygulama 1 ile yapılan işlemler tekrarlanarak, yaklaşık 500 μm kalınlığındaki silikon tabaka, belirtilen parametre değerleri ayarlanarak, lazer ışını 0.004 mm sıklıkta ve belirlediğimiz deliğin içinde yatay tarama yaptırılarak, içini kazıma yöntemi ile delinmiştir.

4.2.4.1 Parametreler

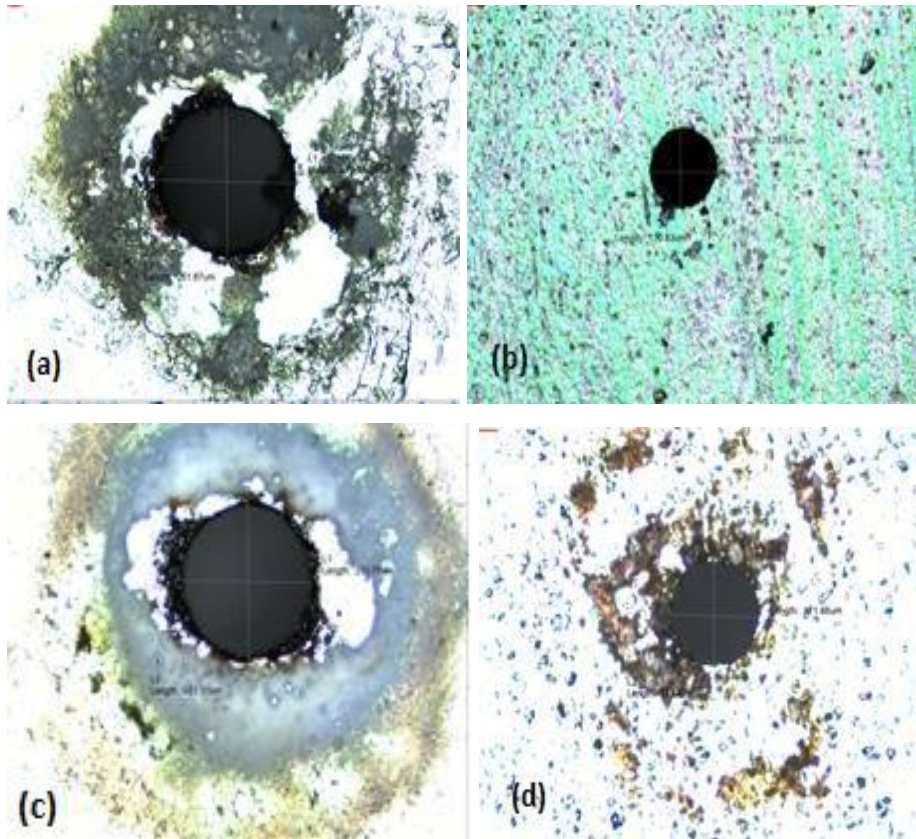
Atım genişliği: 0.25 μ s

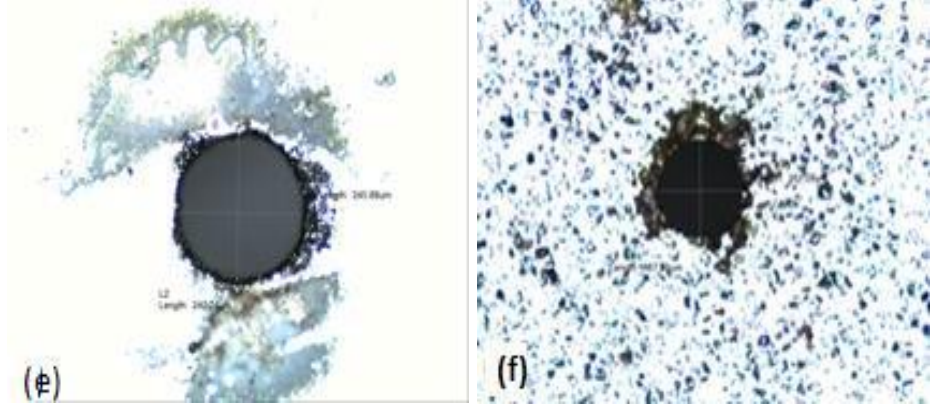
Frekans: 25 kHz

Tarama hızı: 100 mm/s

Tekrar sayısı: 1400

Deneye ait her bir güce karşılık ölçüm yaparak, hesapladığımız ortalama giriş ve çıkışa ait delik çapları tablo 4.3'e kaydedildi. Ayrıca güçle beraber delik çaplarının değişimi de şekil 4.9 ile gösterilen, optik mikroskop görüntüleri ile anlaşılabilir.



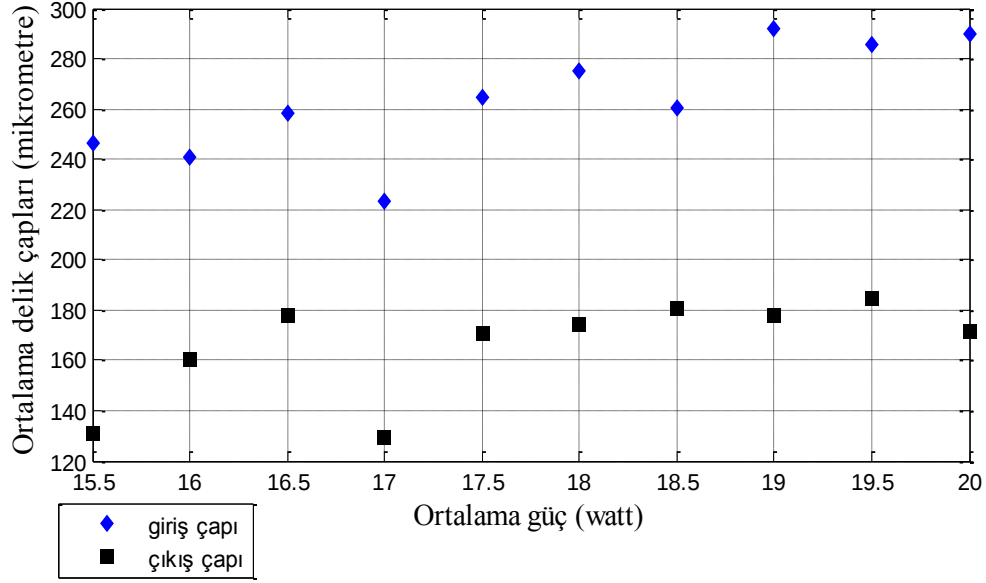


Şekil 4.9 : 20 watt ortalama güç (a) ortalama giriş delik çapı 270,16 μm , (b) ortalama çıkış delik çapı 162,98 μm , 17 watt ortalama güç (c) ortalama giriş delik çapı 252,63 μm (d), ortalama çıkış delik çapı 171,45 μm , 16 watt ortalama güç (e) ortalama giriş delik çapı 243,06 μm , (f) ortalama çıkış delik çapı 159,58 μm .

Çizelge 4.3 : Ortalama güç-ortalama delik çapları.

% güç	Güç(Watt)	Ortalama giriş çapı (μm)	Ortalama çıkış çapı (μm)
100	20	290.17	171.71
97.5	19.5	285.64	184.68
95	19	291.85	177.92
92.5	18.5	260.58	180.44
90	18	275.21	174.53
87.5	17.5	264.47	170.58
85	17	223.03	129.16
82.5	16.5	258.56	177.65
80	16	240.52	160.15
77.5	15.5	246.63	130.83

Matlab kullanarak yukarıdaki tabloya (tablo 4.3) kaydettiğimiz giriş ve çıkıştaki ortalama delik çaplarının ortalama güce bağlı grafiği (şekil.4.10) elde edilmiştir;



Şekil 4.10 : Ortalama delik çaplarının lazerin ortalama gücüyle değişimini gösteren grafik.

4.2.5 Yöntem ve uygulama 3

Yaklaşık 500 μm kalınlığında silikon tabaka ile yapılan çalışmada; nexus marker lazer ile parametre değerleri ayarlanarak, dairesel kontur çizilerek (trepanning) malzemenin delinmesi hedeflenmiştir;

Güç değeri %100 den sistematik olarak %70 a kadar azaltılarak, her örnek için iki kez tekrarlandı.

4.2.5.1 Parametreler

Atım genişliği: 3 μs

Frekans: 4 kHz

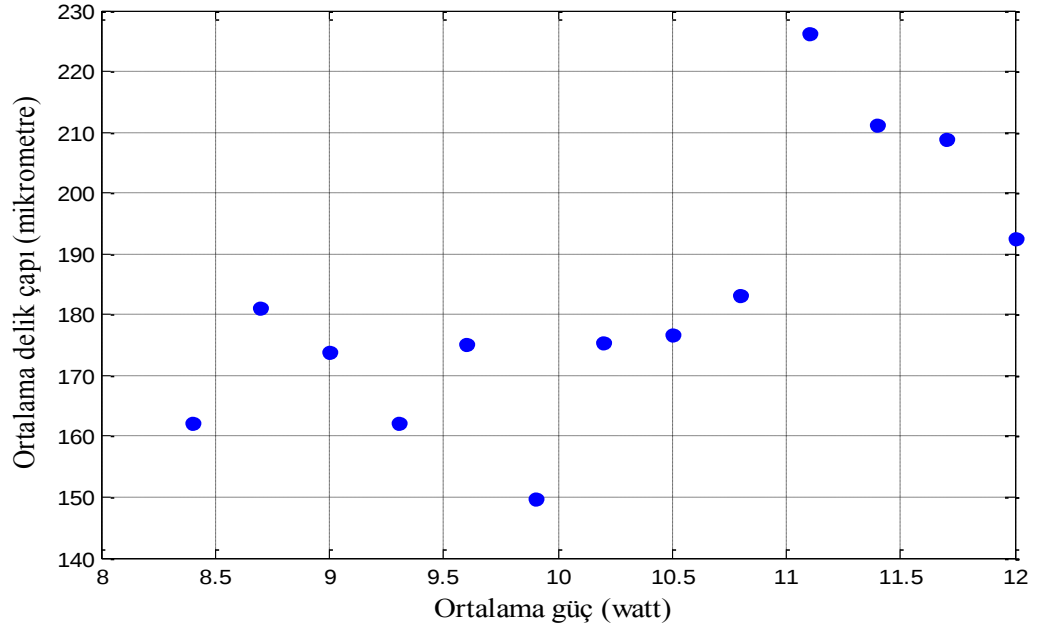
Tarama hızı: 20 mm/s

Tekrar sayısı: 800

Aynı güç değeri için, örneklerin ön yüzeyindeki delik çapları, optik mikroskop ile yatay ve dikey olarak ölçülüp, ortalama değer hesaplanarak, aşağıdaki (tablo 4. 4) tabloya kaydedilmiştir. Delik çapının ortalama güce bağlı değişimine ilişkin grafik şekil 4.11 ile gösterilmiştir. Silikonun, lazer ışının çıktığı yüzeyde oluşan delik geometrisi ortalama değer hesaplamaya uygun geometride olmadığından, arka yüzey için ortalama delik çapları hesaplanamadı.

Çizelge 4.4 : Her bir güç değerine karşılık gelen ortalama delik çapları.

%güç	Güç (watt)	Ortalama delik çapı (μm)
%100	12	192.58
%97.5	11.7	208.92
%95	11.4	211.07
%92.5	11.1	226.13
%90	10.8	183.29
%87.5	10.5	176.80
%85	10.2	175.38
%82.5	9.9	149.73
%80	9.6	175.10
%77.5	9.3	162.13
%75	9	173.96
%72.5	8.7	181.02
%70	8.4	162.14



Şekil 4.11 : Güce bağlı delik çapları değişimi.

4.2.6 Sonuç ve tartışma

Optik mikroskop görüntülerine bakarak, hem DPL nexus marker lazer için, hem de DFL ventus marker lazerle yapılan deneylerde, farklı parametre değerleri ve farklı kalınlıkta silikon tabakalar için, gücün azalmasıyla beraber, deliklerin netliğinin

kaybolduğunu söylemek mümkün. Belli bir güç değerinin altındaki güç değerlerinde ise (DPL nexus marker için gücün %70'in altına düştüğü, diğer bir deyişle 8.4 watt değerinin altındaki değerlerde, DFL ventus marker için ise 15.5 watt değerinin altındaki güç değerlerinde), boydan boya delik gözlenmemektedir. Yani lazerin ortalama gücü boydan boya delik açmaya yetmemektedir. Buna göre; gücün değişimi derinliği de doğrudan etkilemektedir. Ayrıca çeşitli güç değerlerinde salınımlar olmasına karşın, güç-delik çapı ilişkisi, genellikle delik çapının ortalama güç değerinin artmasıyla arttığını göstermektedir. DPL ventus marker lazer için, atım enerjisi, her bir güç değeri için hesaplanmış ve delik çapının, atım enerjisinin değişiminden etkilendiği gözlenmiştir. Grafikten de anlaşılabacağı gibi genel olarak, atım enerjisi arttıkça delik çapı da artmaktadır. Bu da Rahul Patwa ve arkadaşlarının yaptığı çalışmadaki atım enerjisi ve delik çapı ilişkisi ile uyumludur [2].

Ayrıca ışığın malzemeye girdiği yüzeydeki delik çapı ile çıktığı yüzeydeki delik çapı arasındaki farklılık dikkati çekmektedir (koniklik). Malzemenin odağa göre konumu ve derinlik arttıkça lazerin gücünün azalması bunun nedeni olarak gösterilebilir.

4.3 Atım genişliğinin odaklanılan bölge etrafındaki ısıdan etkilenmiş bölgeye (HAZ) etkisi

4.3.1 Amaç

Farklı atım genişlikleri ile delikler etrafında oluşan ısıdan etkilenmiş bölgenin (HAZ) değişimini incelemek.

4.3.2 Kullanılan malzeme ve lazerler

Yaklaşık 500 µm kalınlığında silikon tabaka, 12 watt ortalama çıkış gücüne sahip DPL nexus marker lazer, 20 watt ortalama çıkış gücüne sahip, DFL ventus marker lazer, optik mikroskop.

4.3.3 Yöntem ve uygulama 1

Sistematik olarak diğer tüm parametre değerleri sabit tutularak, atım genişliği sistematik olarak azaltılarak, içini tarama yöntemi ile delikler açılmıştır. Yaptığımız deneylerde, atım genişliği, çok geniş bir aralıkta değiştirilemediğinden, atım genişliğinin çap üzerindeki etkisine ve sistematik verilere bu çalışmada yer verilmemiştir.

İlk olarak, DPL nexus marker lazerle yaptığımız deney için, atım genişlikleri sırasıyla 2,8 μs , 1,8 μs ve 1 μs için, optik mikroskop görüntülerine (şekil 4.12) yer verilmiştir yalnızca.

4.3.3.1 Parametreler

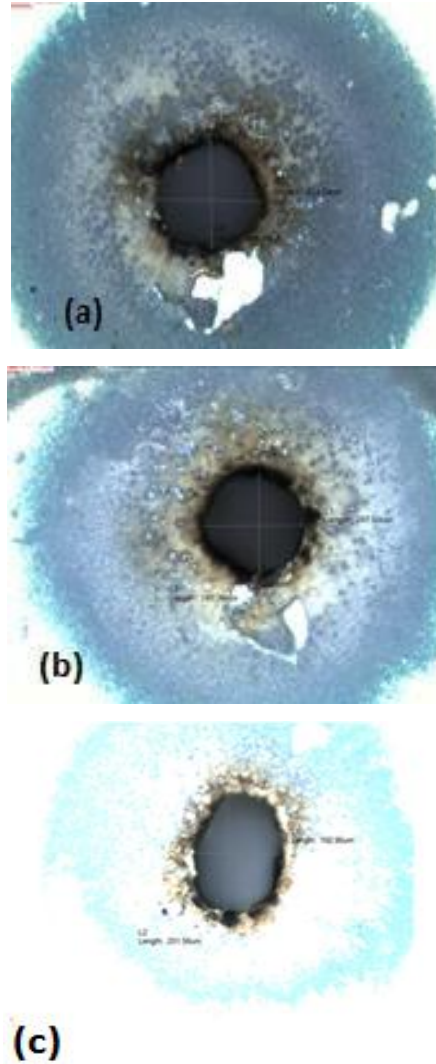
Atım genişliği: 2.8 μs , 1.8 μs ve 1 μs

Frekans: 4 kHz

Tarama hızı: 20 mm/s

Tekrar sayısı: 800

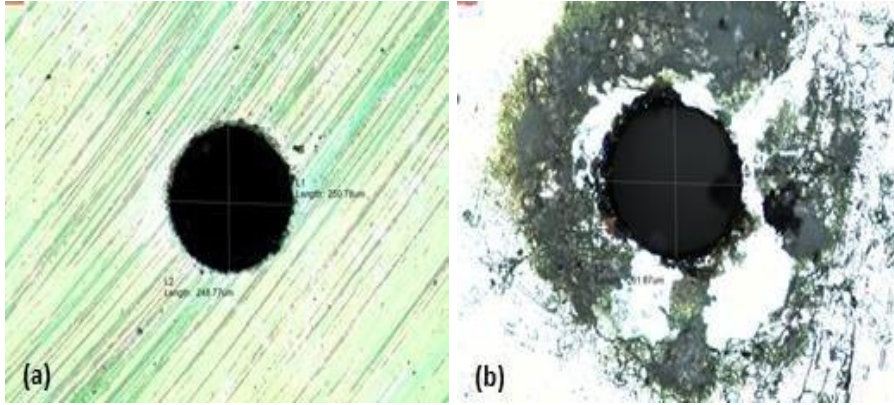
Ortalama güç: 12 watt



Şekil 4.12 : 12 watt ortalama çıkış gücüne sahip lazerle yapılan deneyde (a) 2.8 μs genişlikli yatay çapı 224.54 μm , (b) 1.8 μs atım genişlikli, yatay çapı 207.53 μm , (c) 1 μs atım genişlikli, yatay çapı 192.90 μm olan delikler.

4.3.4 Yöntem ve uygulama 2

Diğer tüm parametreler aynı tutularak, DFL ventus marker lazer ile yalnızca atım genişliği $0,1\ \mu\text{s}$ ' den $0,25\ \mu\text{s}$ ' ye arttırılarak ve içini kazıma yöntemi kullanılarak, yapılan deney sonucunda elde edilen optik mikroskop görüntüleri (şekil 4.13) aşağıdadır.



Şekil 4.13 : Atım genişliği (a) $0,1\ \mu\text{s}$ (b) $0,25\ \mu\text{s}$ olan Ventus marker II ile açılmış mikro-delikler .

4.3.5 Sonuç ve tartışma

Atım genişliğinin azalmasıyla beraber, delik etrafındaki ısıdan etkilenmiş bölgenin (HAZ) azalmış olması dikkat çekmektedir. Atım süresi ne kadar kısa olursa, lazerin sebep olduğu ısı, malzemenin içerisinde yayılmaya fırsat kalmadan doğrudan odaklanılan bölgede, malzemenin bağlarının kırılmasına neden olacaktır. Böylece odaklanılan bölge etrafındaki termal hasar da fazla olmayacaktır.

Ayrıca şekil 4.12'ye bakarak atım genişliğinin artmasıyla beraber, delik çaplarının da arttığı söylenebilir.

5. ÖNERİLER

Çalışılan malzemenin odağa göre konumlandırılması, lazerin en yüksek güce ulaşması ve mikro-delik kalitesi bakımından önemli bir etken olmakla beraber, odaktan uzaklaştıkça güç azalmaktadır. Çalışmalarda ise odağın malzemeye göre konumu, delik derinliği arttıkça değişmektedir. Güçteki bu azalma, hedeflenen geometride ve pürüzsüz ve daha derin deliklere ulaşılmasını zorlaştırmaktadır. Daha hassas bir konumlandırma ile deliklerin geometrisinde ve konikliğinde azalmayla beraber, daha pürüzsüz mikro-deliklere ulaşılması sağlanabilir.

Lazerin ortalama gücündeki artışın delik çaplarının da artışına neden olduğu bu çalışmada, iki lazer için oluşan mikro-delikler bakımından bir karşılaştırma yapılmamıştır. Her iki lazer için aynı parametre değerleri ayarlanıp, yalnızca bir parametre değeri değiştirilerek, lazerlerin etkinliği bu parametre değeri bakımından kıyaslanabilir.

Ayrıca delik çap ve kalitesini etkileyen diğer parametrelerden atım frekansı, tarama hızı ve lazerin odağa göre konumu, ayrı bir sistematik çalışmanın planlanması ile, mikro-delikler üzerindeki etkileri araştırılarak, en iyi koşullarda uygun parametre değerlerinin bulunması hedeflenebilir. Bu sayede hedeflenene en yakın mikro-deliklere ulaşılması sağlanabilir.

Çalışmalarda kullanılan lazerlerin endüstriyel lazer olması ve daha çok markalama için tasarlanmış olması, istenilen hassasiyette ve ölçüdeki deliklere ulaşmayı zorlaştırmıştır. Atım genişliğinin sınırlı ölçüde değiştirilebilir olması ise deliklerin çevresindeki termal hasarı azaltmak açısından sınırlayıcı olmuştur.

Burada kullandığımız lazerlerde ışığın yönlendirilmesini sağlayan sistemler mevcuttur. Benzer çalışmalar uygun bir yazılım kullanarak, programlanabilen ve malzemenin üzerinde hareketini sağlayan bir tabla (stage) ile de gerçekleştirilebilir. Burada yönlendirilen sistem lazer ışını değil de, çalışılan malzeme olacaktır.

Bu tip çalışmalarda, çok daha kısa atımlı lazerler kullanılarak, delik çevresindeki termal hasarı minimum seviyeye indirmek mümkün olabilmektedir. Femtolazerler (10^{-15} s) gibi ultra kısa atımlı lazerler bu gibi çalışmalarda sıkça kullanılmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **L. S. Jiao, S. K. Moon, E. Y. K. Ng, H. Y. Zheng, and H. S. Son**, (2014). Influence of substrate heating on hole geometry and spatter area in femtosecond laser. Applied physics letters, 104,181902 (2014).
- [2] **Rahul Patwa, Hans Herfurth, Guenther Mueller and Khan Bui**, (2013). Laser drilling up to 15,000 holes/sec in silicon wafer for PV solar cells. Proc of SPIE Vol. 8826, 882660G-1.
- [3] **L. Jiao, E. Y. K. Ng, L. M. Wee and H. Zheng**, (2009). Parametric study of femtosecond pulses laser hole drilling of silicon wafer. Advanced materials research vol.74 (2009) pp 273-277.
- [4] **L. M. Wee, E. Y. K. Ng , A. H. Prathama , H. Zheng**, (2011). Micro-machining of silicon wafer in air and under water. Optics & Laser technology 43 (2011) 62-71.
- [5] **T.Otani, L. Herbst, M. Heglin, S. V. Govorkov, A. O. Wiessner**, (2004). Microdrilling and micromachining with diode-pumped solid-state lasers. Applied physics A 79,1335-1339 (2004).
- [6] **Seyed M. Allameh**, (2006). Department of physics and geology, Northern Kentucky University. Chapter 4 (pp.63-69).
- [7] **KT Voisey**, (2014). University of Nottingham, Nottingham, UK, Laser Drilling of Metallic and Nonmetallic Materials and quality assesment- volume 9, Pages 177-194, machining and surface treatment.
- [8] **Phillip F. Schewe**, (1981). Lasers. The physics Teacher 19, 534 (1981).
- [9] <https://prezi.com/ebzxmpah6jel/lazerler-ve-calisma-prensipleri/>
- [10] **Ahmet Karaaslan**, (2009). Lazer ile malzeme işlemleri. Birinci basım.
- [11] **Ronald D. Schaeffer**, (2012). Fundamentals of Laser Micromachining, applications, chapter 7. Taylor & Francis Group.
- [12] **Şenol Erdoğan**, (2007). Yüksek lisans tezi makine mühendisliği, lazerle işleme parametrelerinin delik kalitesine olan etkisinin deneysel araştırılması.
- [13] **Abdul Al-Azzawi**, (2006). Physical Optics: Principles and Practices, chapter 6, 2006 by Taylor & Francis Group, LLC
- [14] Türkiye meteoroloji Enstitüsü, “2006 Yılı Araştırmaları”, İnternet:<http://www.meteor.gov.tr/2006/arastirma/files/uvradetki.pdf>(2006).
- [15] **Çelik S**, (1998). ” Lazerler, tıpta ve özellikle göz tedavisindeki uygulamaları” Proje-1, Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi elektrik mühendisliği bölümü, İstanbul, 4, 16-22 (1998).

- [16] **A. K. Nath**, (2014). Comprehensive Materials Processing, laser drilling of metallic and nonmetallic substrates, volume 9 , Pages 115-175.
- [17] **Sushant Dhar, Nishant Saini, R. Purohit**, (2006). A review on laser drilling and its Techniques, NSIT, Delhi, India. International conference on advances in mechanical engineering-2006 (AME-2006).
- [18] **jjyotsna Dutta Majumdar, Índranil Manna**, (2013). Laser assisted fabrication of materials. Springer series in metarial science 161.
- [19] **Kittel**, (1996). Introduction to solid state physics, 7th ed., Wiley, (1996).
- [20] **Markku Tilli, Atte Haapalina**, (2010). Handbook of silicon Based MEMS Materials and Technologies, A volume in Micro and Nano Technologies, pages 3-17, chapter one-properties of silicon, William Andrew applied science publishers.
- [21] **Omid Adljoy**, (dec. 2011). Crsytallography orientation, Faculty of Electrical and Computer Engineering University of Tabriz, Tabriz, Iran.
- [22] **Nadim Maluf, Kirt Williams**, (2004). Introdution to microelectromechanical system engineering, second eddition, chapter 2, pages 14-18. Artech house, inc.
- [23] **Operating instructions**, DPL magic marker, DPL genesis marker, DPL Nexus Marker, Laser Device Class 4, ACI Laser-compenents
- [24] http://www.synova.ch/uploads/media/107_Wafer_drilling_and_slotting.pdf

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad :Ayşegül Saydam

E-Posta :aysegul_saydam@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2002, Selçuk Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi,
Fizik Bölümü
- **Yüksek lisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mekatronik
Mühendisliği Ana Bilim Dalı,
Mekatronik Mühendisliği Bölümü

.

