

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SİLİSYUM ALTLIK ÜZERİNE LAZER İLE AKTİFLEŞTİRİLMİŞ AKIMSIZ
BAKIR BİRİKTİRME**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sergen Halim AYHAN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

EYLÜL 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**SİLİSYUM ALTLIK ÜZERİNE LAZER İLE AKTİFLEŞTİRİLMİŞ AKIMSIZ
BAKIR BİRİKTİRME**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Sergen Halim AYHAN
(506201427)**

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Kürşat KAZMANLI

EYLÜL 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 506201427 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Sergen Halim AYHAN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “SİLİSYUM ALTLIK ÜZERİNE LAZER İLE AKTİFLEŞTİRİLMİŞ AKIMSIZ BAKIR BİRİKTİRME” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Kürşat KAZMANLI**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Güldem Kartal ŞİRELİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Garip ERDOĞAN
Sakarya Üniversitesi

Teslim Tarihi : 19 Eylül 2023
Savunma Tarihi : 25 Eylül 2023





Aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyuncaengin bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, laboratuvarlarının imkanlarını sonuna kadar bana sunan, tez çalışmamın tamamlanmasında bana yol gösteren danışmanım Prof. Dr. Kürşat KAZMANLI'ya sabrı ve desteği en içten teşekkürlerimi sunarım.

Lisans yıllarımdan bu yana bilgisini ve desteğini esirgemeyen Dr. Nuri SOLAK'a laboratuvarlarının imkanlarını sunduğu için teşekkür ederim.

SEM analizlerimde yardımcı olan Sevgin TÜRKELİ ve Melisa KONAR'a, çözeltilerimi hazırlamamda yardımcı olan Seyhan ATİK'e, profilometre ölçümlemede yardımcı olan Araş. Gör. Erdem BALCI'ya ve optik mikroskop analizlerimde yardımcı olan Bilgehan Murat ŞEŞEN, Araş. Gör. Beste PAYAM ikilisine teşekkür ederim.

Yüksek lisansın ilk günlerinden beri yanımda olan sevgili arkadaşlarım Bilgehan Murat ŞEŞEN, Beste PAYAM ve Giray ARSLAN'a beraber geçirdiğimiz tüm anlar için teşekkür ederim.

Beraber vakit geçirmekten fevkalade keyif aldığım dostlarım Atakan Ege SAVAŞ ve Kerem Can DİZDAR'a varlıklarından ötürü teşekkür ederim.

Sevgili arkadaşlarım Alican Dikbıyık, Emircan UYSAL, Güllü Gültuğ YÜN, Kamer ERDOĞAN, Melike ERTÜRK, Selçuk KAN ve Tuğçe HASIRCI'ya yüksek lisans çalışmalarım sırasında sağladıkları motivasyon ve hoş sohbetlerinden ötürü teşekkür ederim.

Beni her zaman destekleyen takım liderim ve arkadaşım Hanifi Eray KORKMAZ'a en içten duygularıyla teşekkür ederim.

Her zaman beni destekleyeceklerini bildiğim babam Ersan AYHAN, kardeşim Tuğra AYHAN ve sevgili annem Esin AYHAN'a her şey için teşekkür ederim.

Son olarak, hiçbir zaman ümidimi yitirmememi bana sürekli hatırlatan Mustafa Kemal ATATÜRK'e teşekkürlerimi sunarım.

Eylül 2023

Sergen Halim AYHAN
(Metalurji ve Malzeme Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
2. LİTERATÜR İNCELEMESİ	3
2.1 Lazer.....	3
2.2 Lazerin Tarihçesi.....	5
2.3 Lazer Işınının Özellikleri	6
2.3.1 Monokromatiklik	6
2.3.2 Uyumluluk	7
2.3.3 Yönlülük.....	8
2.4 Lazer Sisteminin Temel Bileşenleri	8
2.4.1 Lazer aktif ortamı.....	9
2.4.2 Pompalama sistemi	10
2.4.3 Optik rezonatör	11
2.5 Lazer Işını Oluşumunun Temelleri	12
2.5.1 Uyarılmış soğurma	12
2.5.2 Kendiliğinden emisyon	13
2.5.3 Uyarılmış emisyon	14
2.5.4 Popülasyon tersinmesi.....	14
2.6 Lazer Çeşitleri	14
2.6.1 Katı hal lazerleri.....	15
2.6.1.1 Nd:YAG lazerler	15
2.6.2 Sıvı hal lazerleri	17
2.6.3 Gaz hal lazerleri	18
2.6.4 Kimyasal lazerler	18
2.6.5 Yarı iletken lazerler.....	18
2.7 Lazer Malzeme Etkileşimleri	18
2.8 Kaplama Yöntemleri	20
2.8.1 Lazer destekli kimyasal buhar biriktirme (LACVD)	20
2.8.2 Atımlı lazerle biriktirme (PLD)	21
2.8.3 Geleneksel akımsız kaplama metotları	22
2.8.4 Akımsız bakır biriktirme	24
2.8.5 Lazerle aktifleştirilmiş akımsız biriktirme	25

2.8.6 Lazer aktifleştirilmiş akımsız kaplama	26
3. MALZEME VE YÖNTEM	29
3.1 Hazne Tasarımı.....	29
3.2 Silikon Altlıkların Hazırlanışı	30
3.3 Banyo Hazırlanışı	30
3.4 Desen Tasarımı.....	32
3.5 Lazer Parametreleri	33
3.5.1 Q-Anahtarlama periyodu (Q-Switch period).....	33
3.5.2 Q-Anahtarlama genişliği (Q-Switch width)	33
3.6 Atış Tekrar Sayısı	34
3.7 Banyo Süresi.....	35
3.8 Banyo Sonrası Numunelerin Temizliği	35
4. SONUÇLAR	37
4.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri	37
4.1.1 30 dakika banyoda kalan 5 atış tekrarlanan numuneler	37
4.1.2 30 dakika banyoda kalan 10 atış tekrarlanan numuneler	38
4.1.3 30 dakika banyoda kalan 20 atış tekrarlanan numuneler	40
4.1.4 60 dakika banyoda kalan 5 atış tekrarlanan numuneler	42
4.1.5 60 dakika banyoda kalan 10 atış tekrarlanan numuneler	43
4.1.6 60 dakika banyoda kalan 20 atış tekrarlanan numuneler	44
4.2 İğneli Profilometre Analizleri.....	46
4.3 Dört Noktalı Prob Cihazı (Four Point Probe) Ölçülen Özdirençler	47
4.3.1 30 dakika banyoda kalan 5 atış yapılan numuneler.....	48
4.3.2 30 dakika banyoda kalan 10 atış yapılan numuneler.....	48
4.3.3 30 dakika banyoda kalan 20 atış yapılan numuneler.....	49
4.3.4 60 dakika banyoda kalan 5 atış yapılan numuneler.....	50
4.3.5 60 dakika banyoda kalan 10 atış yapılan numuneler.....	51
4.3.6 60 dakika banyoda kalan 20 atış yapılan numuneler.....	51
4.4 Optik Mikroskop Analizi.....	52
5. TARTIŞMA	55
KAYNAKLAR.....	59
ÖZGEÇMİŞ	65

KISALTMALAR

CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
CW	: Sürekli Dalga
EDS	: Enerji Dağılımı Spektrometresi
EDTA	: Etilendiamin Tetraasetik Asit
EMF	: Elektromotor Kuvvet
LACVD	: Lazer Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
PLD	: Atımlı Lazerle Biriktirme
PMMA	: Polimetil Metakrilat
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
QSP	: Q-Anahtarlama Periyodu
QSW	: Q-Anahtarlama Genişliği
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu



SEMBOLLER

Au	: Altın
C	: Işık hızı
Cu	: Bakır
CuSO₄	: Bakır sülfat
E	: Enerji
E⁰	: Standart Redoks Potansiyeli
E[*]	: Aktivasyon Enerjisi
eV	: Elektronvolt
F	: Faraday sabiti
h	: Planck sabiti
HCOOH	: Formaldehit
K	: Potasyum
KNaC₄H₄O₆	: Roehelle Tuzu
NaOH	: Sodyum Hidroksit
Ni-P	: Nikel fosfür
Nd:YAG	: Neodyum İttriyum Alüminyum Granat
Pd	: Paladyum
Pt	: Platin
R_a	: Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü
R_p	: Ortalama Tepe Pürüzlülüğü
Rh	: Rodyum
YAG	: İttriyum Alüminyum Granat
λ	: Dalgaboyu
ΔG	: Gibbs Serbest Enerjisi
v	: Frekans



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Lazer parametre seti.	34
--	----





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Lazer aktif ortamı, pompa ve optik rezonatörden oluşan bir lazer sistemi	9
Şekil 2.2 : Lazerlerin aktif ortamları, çalışma modları ve dalga boyları	10
Şekil 2.3 : İki enerji seviyeli bir sistemde uyarılmış soğurma	12
Şekil 2.4 : İki enerji seviyeli bir sistemde kendiliğinden emisyon	14
Şekil 2.5 : İki enerji seviyeli bir sistemde uyarılmış emisyon	14
Şekil 2.6 : Dört enerji seviyeli bir lazer sisteminde popülasyon tersinmesi (nüfus terslenmesi)	14
Şekil 2.7 : Dört seviyeli bir lazer sisteminin enerji seviyeleri	17
Şekil 2.8 : Farklı dalga boylarındaki lazer ışınlarının farklı malzemeler tarafından soğurulma oranları	19
Şekil 2.9 : Gibbs serbest enerji diyagramı	23
Şekil 2.10 : Dember efekti sebebiyle EMF oluşumu	27
Şekil 3.1 : Deneylerin gerçekleştirilmesi için tasarlanan hazne ve kapağının üç boyutlu görüntüsü.....	29
Şekil 3.2 : Banyo hazırlama aşamaları.	31
Şekil 3.3 : a) CuSO_4 + Saf Su karışımı, b) Rochelle tuzu eklenmesi, c) NaOH eklenmesi.....	31
Şekil 3.4 : Desenin simülasyonu.....	32
Şekil 3.5 : Desen.	32
Şekil 3.6 : Q-anahtarlama komut sinyali.	33
Şekil 4.1 : 30 dakika banyoda kalan 5 atış tekrarlanmış numuneler; 1) 2 kHz, QSP: 500 μs , QSW: 400 μs 2) 3 kHz, QSP: 333 μs , QSW: 267 μs 3) 4 kHz, QSP: 250 μs , QSW: 200 μs 4) 5 kHz, QSP: 200 μs , QSW: 160 μs 5) 8 kHz, QSP: 125 μs , QSW: 100 μs 6) 2 kHz, QSP: 500 μs , QSW: 500 μs 7) 3 kHz, QSP: 333 μs , QSW: 333 μs 8) 4 kHz, QSP: 250 μs , QSW: 250 μs 9) 5 kHz, QSP: 200 μs , QSW: 200 μs 10) 8 kHz, QSP: 125 μs , QSW: 125 μs	37
Şekil 4.2 : 30 dakika banyoda kalan 5 atış tekrarlanmış numunelerin kimyasal kompozisyonları.	38
Şekil 4.3 : 30 dakika banyoda kalan 10 atış tekrarlanmış numuneler; 1) 2 kHz, QSP: 500 μs , QSW: 400 μs 2) 3 kHz, QSP: 333 μs , QSW: 267 μs 3) 4 kHz, QSP: 250 μs , QSW: 200 μs 4) 5 kHz, QSP: 200 μs , QSW: 160 μs 5) 8 kHz, QSP: 125 μs , QSW: 100 μs 6) 2 kHz, QSP: 500 μs , QSW: 500 μs 7) 3 kHz, QSP: 333 μs , QSW: 333 μs 8) 4 kHz, QSP: 250 μs , QSW: 250 μs 9) 5 kHz, QSP: 200 μs , QSW: 200 μs 10) 8 kHz, QSP: 125 μs , QSW: 125 μs	39
Şekil 4.4 : 30 dakika banyoda kalan 10 atış tekrarlanmış numunelerin kimyasal kompozisyonları.	39

Şekil 4.5 : 30 dakika banyoda kalan 20 atış tekrarlanmış numuneler; 1) 2 kHz, QSP: 500 µs, QSW: 400 µs 2) 3 kHz, QSP: 333 µs, QSW: 267 µs 3) 4 kHz, QSP: 250 µs, QSW: 200 µs 4) 5 kHz, QSP: 200 µs, QSW: 160 µs 5) 8 kHz, QSP: 125 µs, QSW: 100 µs 6) 2 kHz, QSP: 500 µs, QSW: 500 µs 7) 3 kHz, QSP: 333 µs, QSW: 333 µs 8) 4 kHz, QSP: 250 µs, QSW: 250 µs 9) 5 kHz, QSP: 200 µs, QSW: 200 µs 10) 8 kHz, QSP: 125 µs, QSW: 125 µs.	40
Şekil 4.6 : 8 kHz, QSP: 125 µs, QSW: 100 µs parametrelili numune.....	41
Şekil 4.7 : 30 dakika banyoda kalan 20 atış tekrarlanmış numunelerin kimyasal kompozisyonları.	41
Şekil 4.8 : 60 dakika banyoda kalan 5 atış tekrarlanmış numuneler; 1) 2 kHz, QSP: 500 µs, QSW: 400 µs 2) 3 kHz, QSP: 333 µs, QSW: 267 µs 3) 4 kHz, QSP: 250 µs, QSW: 200 µs 4) 5 kHz, QSP: 200 µs, QSW: 160 µs 5) 8 kHz, QSP: 125 µs, QSW: 100 µs 6) 2 kHz, QSP: 500 µs, QSW: 500 µs 7) 3 kHz, QSP: 333 µs, QSW: 333 µs 8) 4 kHz, QSP: 250 µs, QSW: 250 µs 9) 5 kHz, QSP: 200 µs, QSW: 200 µs 10) 8 kHz, QSP: 125 µs, QSW: 125 µs.	42
Şekil 4.9 : 60 dakika banyoda kalan 5 atış tekrarlanmış numunelerin kimyasal kompozisyonları.	43
Şekil 4.10 : 60 dakika banyoda kalan 10 atış tekrarlanmış numuneler; 1) 2 kHz, QSP: 500 µs, QSW: 400 µs 2) 3 kHz, QSP: 333 µs, QSW: 267 µs 3) 4 kHz, QSP: 250 µs, QSW: 200 µs 4) 5 kHz, QSP: 200 µs, QSW: 160 µs 5) 8 kHz, QSP: 125 µs, QSW: 100 µs 6) 2 kHz, QSP: 500 µs, QSW: 500 µs 7) 3 kHz, QSP: 333 µs, QSW: 333 µs 8) 4 kHz, QSP: 250 µs, QSW: 250 µs 9) 5 kHz, QSP: 200 µs, QSW: 200 µs 10) 8 kHz, QSP: 125 µs, QSW: 125 µs.	43
Şekil 4.11 : 60 dakika banyoda kalan 10 atış tekrarlanmış numunelerin kimyasal kompozisyonları.	44
Şekil 4.12 : 60 dakika banyoda kalan 20 atış tekrarlanmış numuneler; 1) 2 kHz, QSP: 500 µs, QSW: 400 µs 2) 3 kHz, QSP: 333 µs, QSW: 267 µs 3) 4 kHz, QSP: 250 µs, QSW: 200 µs 4) 5 kHz, QSP: 200 µs, QSW: 160 µs 5) 8 kHz, QSP: 125 µs, QSW: 100 µs 6) 2 kHz, QSP: 500 µs, QSW: 500 µs 7) 3 kHz, QSP: 333 µs, QSW: 333 µs 8) 4 kHz, QSP: 250 µs, QSW: 250 µs 9) 5 kHz, QSP: 200 µs, QSW: 200 µs 10) 8 kHz, QSP: 125 µs, QSW: 125 µs.	45
Şekil 4.13 : 60 dakika banyoda kalan 20 atış tekrarlanmış numunelerin kimyasal kompozisyonları.	45
Şekil 4.14 : Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri.....	46
Şekil 4.15 : Tepelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_p) değerleri.	47
Şekil 4.16 : Tepelerin yüksekliği (Peak) değerleri.	47
Şekil 4.17 : 30 dakika banyoda kalan 5 atış yapılan numunelerin öz dirençleri.....	48
Şekil 4.18 : 30 dakika banyoda kalan 10 atış yapılan numunelerin öz dirençleri.....	49
Şekil 4.19 : 30 dakika banyoda kalan 20 atış yapılan numunelerin öz dirençleri.....	50
Şekil 4.20 : 60 dakika banyoda kalan 5 atış yapılan numunelerin öz dirençleri.....	50
Şekil 4.21 : 60 dakika banyoda kalan 10 atış yapılan numunelerin öz dirençleri.....	51
Şekil 4.22 : 60 dakika banyoda kalan 20 atış yapılan numunelerin öz dirençleri.....	52
Şekil 4.23 : 60 dakika banyoda kalan 20 atış yapılan numunelerin optik mikroskop görüntüleri.	53

SİLİSYUM YÜZEY ÜZERİNE LAZER İLE AKTİFLEŞTİRİLMİŞ AKIMSIZ BAKIR BİRİKTİRME

ÖZET

Kaplamalar yüzeyleri korumak, işlevselliği arttırmak veya estetik bir görünüm elde etmek amacıyla kullanılan malzemeleri ve bu malzemelerin üretimini mümkün kılan yöntemler olarak adlandırılır. Otomotiv, havacılık, elektronik gibi birçok endüstriyel alanda yaygın olarak kullanılan kaplamalar, malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesi açısından birçok avantaj sağlamakta ve birçok amaç için kullanılabilir.

Kaplamaların temel işlevlerinden biri yüzeylerin korunmasıdır. Kaplama, korozyona ve aşınmaya karşı direnç göstererek malzemenin ömrünü uzatabilir. Servis ömrünü uzatabileceği gibi bakım maliyetlerini de azaltabilir.

Bu faydalardan sadece biri amaçlanarak kaplama yapılabilir ancak çoğunlukla birbiriyle kombinasyon halinde uygulanır. Örneğin ısı iletimini önlemek için termal bariyer kaplamalar uygulanabileceği gibi, aynı zamanda altlık malzemenin korozyon direnci de artmaktadır. Ayrıca çevresel bariyer kaplamalar malzemenin yaptığı radyasyonu gölgeleyerek askeri uygulamalarda düşük görünürlük elde edilmesini sağlar. Bu da malzemenin işlevsel hale gelmesinin ve yeni bir ürün ortaya çıkmasının önünü açmaktadır.

Yarı iletken endüstrisinin, silikon yüzeylerde bakır biriktirmek üzerine yoğun bir ilgisi bulunmaktadır. Elektronik cihazların üretimi, bakırın silikon yüzeylere doğru ve hassas bir şekilde biriktirilmesi yeteneğine bağlıdır. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) gibi kullanılan mevcut prosedürler ve maliyet, tekdüzellik ve karmaşıklık açısından farklı avantajlara sahip iki yaklaşımdır. Silisyum yüzeyinde lazerle aktive edilen akımsız bakır biriktirme, silisyum yüzeylerde bakırın kontrollü olarak biriktirilmesine izin veren yeni bir tekniktir. Gelişmiş özelliklere sahip malzemelerin imalatı için de alternatif bir yoldur. Bu işlem, silisyum yüzey üzerinde bir çözeltiden bakır iyonlarının indirgenmesini indükleyen, silisyum altlık üzerinde lokalize bir sıcaklık artışı oluşturmak için bir lazerin kullanılmasını içerir. Ortaya çıkan bakır biriktirme, yüksek hassasiyet ve doğrulukla modellenabilir, bu da onu mikroelettronik cihazların üretimi için umut verici bir teknik haline getirir. Bu teknik, silikon altlığın yüzeyini seçici olarak değiştirmek için lazer ışınının kullanılmasını içerir. Lazer kaynaklı kimyasal sıvı faz biriktirme, mikrometre ve nanometre ölçeklerinde karmaşık yapıların üretimi için yenilikçi bir yöntemdir. Mikroelettronik ve mikroeletromekanik alanında büyük potansiyele sahip bir teknolojiye sahiptir, yarı iletkenlerin yüzeyindeki metalik yapıların maskesiz üretimini sağlar. İşlem, bir katı malzemenin birikmesine yol açan bir altlık ile öncü çözelti arasında kimyasal bir reaksiyon başlatmak için bir lazer ışınının kullanılmasını içerir. Lazer kaynaklı kimyasal sıvı biriktirme kullanılarak incelenen çeşitli malzemeler arasında yer alan silisyum plaka üzerinde bakır, mikroelettronik uygulamalarının önemi nedeniyle öne çıkar. Silikon altlık üzerine bakır biriktirme tekniği, maskeli litografi tekniği uygulanmadan karmaşık şekilli desenler için iletken bakırın

biriktirilmesini sağlar. Paladyum (Pd) gibi yüzey aktivatörleri kullanılmadan otokatalitik akımsız metal biriktirme olan yeni bir olasılık yaratır.

Bu çalışmada, bakır desenler açık atmosferde sıvı bir çözelti içerisinde lazer destekli biriktirme yoluyla biriktirilmiştir. Biriktirme deneylerinde Nd:YAG ($\lambda = 1064$ nm, darbe/sürekli dalga) lazer kullanılmıştır. Lazer darbe çıkışının davranışını incelemek için lazer modülasyon frekansı, eşdeğer Q-anahtar periyoduyla 2 KHz ila 8 KHz arasında değişmektedir. Q-switch genişlikleri, yüksek tepe gücü elde etmek için Q-switch periyotlarının %80'ine, minimum tepe gücünü elde etmek için %100'e ayarlanmıştır. Sürekli dalga da uygulanmıştır.

Temel olarak lazer parametrelerine göre 10 farklı kombinasyon oluşturulmuştur. 10 parametrenin ilk 5'i yüksek tepe gücü-düşük ortalama güç kombinasyonuna sahiptir. 10 parametrenin ikinci 5'i düşük tepe gücü-yüksek ortalama güç kombinasyonuna sahiptir. Birim zamanda yapılan atımların sayısı her 5 parametre içerisinde orantılı olarak artar. Bu parametreler lazer gücünün ve atım sayısının etkilerini incelemek için oluşturulmuştur. Lazer ışınlarının deseni tarama tekrarı 5, 10 ve 20'ye ayarlanmıştır. Silikon altlıklar her 10 lazer parametresi için 5, 10 ve 20 atışa maruz bırakılmıştır. Böylece 30 adet numune elde edilmiştir.

Biriktirme işlemi CuSO_4 bazlı temel akımsız bakır kaplama çözeltisi ile gerçekleştirilmiştir. 3 farklı atış tekrarından elde edilen 30 farklı numune banyoda 30 ve 60 dakika bekletilmiştir. Tüm bu parametrelerden toplamda 60 adet numune üretilmiştir.

Biriken bakır desenleri, biriken bakır desenlerinin kimyasal bileşimi açısından enerji dağılımlı spektrometre (EDS) ile analiz edilmiştir. Süreksizlikler ve morfolojiler gibi mikroyapısal özellikleri analiz etmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Bakır yüzeyde %98'e kadar birikmiştir. Kaplama kalınlıkları 0,5 mikrometreden 15 mikrometreye kadar geniş bir aralıkta elde edilmiştir. Kaplamalara daha geniş bir bakış açısı sağlamak için optik mikroskop analizi yapılmıştır. 60 numunenin tamamı için elektriksel özdirenç ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ve kaplama kalınlığı hakkında bilgi edinmek için iğneli profilometre analizi yapılmıştır. Bu analizler en iyi sonuçları veren setteki 10 numuneye uygulanmıştır.

LASER ACTIVATED ELECTROLESS COPPER DEPOSITION ON SILICON SUBSTRATE

SUMMARY

Coatings are materials and methods used to protect surfaces, increase functionality or obtain an aesthetic appearance. Coatings, which are widely used in many industrial areas such as automotive, aviation, electronics, provide many advantages in terms of improving the properties of materials and can be used for many purposes.

One of the main functions of coatings is the protection of surfaces. A coating can increase the lifespan of the material by resisting corrosion and wear. It can increase the service life as well as reduce maintenance costs.

A coating is made for only one of them, but mostly it is applied in combination with each other. For example, thermal barrier coatings are applied to prevent heat conduction while also improving the material in terms of corrosion resistance. In addition, environmental barrier coatings provide low visibility in military applications by shading the radiation made by the material. This paves the way for the material to become functional and create a new product.

The semiconductor industry is very interested in the copper deposition on silicon surfaces. The creation of electronic devices depends on the ability to accurately and precisely deposit copper onto silicon surfaces. Physical vapour deposition (PVD) and chemical vapour deposition (CVD) are two approaches used in this procedure that have differing advantages in terms of cost, uniformity, and complexity.

The costs of these processes have created alternative searches. Electroless coating methods are thought to be an alternative. However, selective coating is very difficult. masking operations are costly and difficult to implement. This situation creates new opportunities for the development of new processes. There are many methods for coating using lasers, but most of them are very complex processes because they work in a vacuum environment. In this sense, performing electroless coating with the usage of laser stands out as a cost-effective and preferable option. The vacuum requirement of PVD systems is to create plasma. Because it is actually what evaporates the coating material and allows it to accumulate on the surface. However, when you use electrons, arcs or other energy sources, you can only create plasma in a vacuum environment. Since the energy required to create plasma from these sources in the open atmosphere is practically not possible. But the laser has the advantage here as an energy source. In fact, since it consists of photons, it can move in the open atmosphere. Laser acts as an energy source as well as a photon source. It provides to required energy to induce the surface. Free electrons, excited electronic states, and free radicals occur thanks to the laser. Laser-beamed areas can acts as catalytic sites in the metal deposition. This eliminates the need for surface activators and allows the reaction to start.

Laser-activated electroless copper deposition on silicon surfaces is a novel technique that allows for the controlled deposition of copper on silicon substrates. It is also an alternative way to manufacture materials with advanced properties. This process involves the use of a laser to create a localized temperature increase on the silicon substrate, which induces the reduction of copper ions from a solution onto the silicon surface. The resulting copper deposition can be patterned with high precision and accuracy, making it a promising technique for the fabrication of microelectronic devices. This technique consists of the use of a laser beam to selectively modify the surface of the silicon substrate. Laser-induced chemical liquid phase deposition is an innovative method for the manufacturing of complex structures in the micrometer and nanometer scales. It has a great potential technology in the field of microelectronics and microelectromechanics, and enables maskless manufacture of metallic structures on the surface of semiconductors. The process involves the use of a laser beam to induce a chemical reaction between a substrate and precursor solution, leading to the deposition of a solid material. Among the various materials that have been studied using laser-induced chemical liquid deposition, copper on silicon wafer substrate stands out due to its importance in microelectronic applications. This technique for depositing copper on silicon wafers enables the deposition of conductive copper for complex-shaped patterns without to apply the masked lithography technique. It creates a new possibility which is autocatalytic electroless metal deposition without the usage of surface activators such as Palladium (Pd).

In this study, copper patterns were deposited by laser-assisted deposition in a liquid solution at open atmosphere. A Nd:YAG ($\lambda = 1064$ nm, pulse/continuous wave) laser was used in the deposition experiments. The laser modulation frequency varied from 2 KHz to 8 KHz with the equivalent Q-switch period to examine the behavior of laser pulse output. Q-switch widths are set to %80 of Q-switch periods to obtain high peak power and %100 to obtain minimum peak power. Continuous wave has also been applied.

Basically, 10 different combinations were created based on the laser parameters. The first 5 of the 10 parameters have a combination of high peak power-low average power. The second 5 of the 10 parameters have a combination of low peak power-high average power. The number of unit pulses that pulse in a unit time increases proportionally within each 5 parameter. These parameters were created to examine effects of the laser power and the number of pulses. Scan repetition of laser beams are set 5, 10, and 20. Silicon wafers were exposed to 5, 10, and 20 shots for each 10 parameters. Thus, 30 samples were obtained.

The deposition process is initiated by a CuSO_4 -based basic electroless copper coating solution. 30 different samples obtained from 3 different shot repetitions were held in the bath for 30 and 60 minutes in the solution. In total, 60 samples were produced from all these parameters.

The deposited copper patterns were analyzed by energy dispersive spectrometer (EDS) for the chemical composition of deposited copper patterns. Scanning electron microscopy (SEM) is applied to analyze the microstructural properties such as discontinuities and morphologies. Copper has deposited up to 98% on the surface. Coating thicknesses were obtained in a wide range from 0.5 micrometers to 15 micrometers. Optical microscope analysis was performed to provide a wider perspective on coatings. Electrical resistivity was measured for all 60 samples.

Profilometer analysis was performed to obtain information about surface roughness and coating thickness. These analyses were applied to best best-practice 10 samples.





1. GİRİŞ

Elektronik cihazların sayısındaki artış üreticiler için daha rekabetçi bir ortamı doğurmuştur. Daha yeni ve iyi cihazlar yapmanın gitgide maliyetleri artırıyor olması üretim metotlarında yeni arayışlar doğurmuştur. Uygun maliyetli üretim yöntemlerine dair talepler mikroelektronik, mikromekanik ve sensör uygulamaları gibi birçok alanda bulunmaktadır. Lazer aktifleştirilmiş akımsız kaplama metodu, geleneksel akımsız kaplamalardaki yüzey aktifleştirme işlemini ortadan kaldırarak bir alternatif oluşturmuştur. Geleneksel akımsız kaplamalarda yüzeyde seçmeli biriktirme yapmak için gereken işlemlere ihtiyaç duyulmaksızın yüzeyde seçmeli biriktirme yapabilme imkanı da bu yöntemi daha cezbedici kılmaktadır.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmanın genel amacı geleneksel akımsız kaplama metotlarını bir adım ileriye taşıyarak modern kaplama metotlarına bir alternatif sunmaktır. Çalışmanın hedefiyse herhangi bir yüzey aktifleştirme işlemi ve maskeleme olmaksızın iletken olmayan yüzey üzerinde seçmeli olarak alternatif sunulduğu yöntemlerle eşdeğer seviyede metal biriktirebilmektir.



2. LİTERATÜR İNCELEMESİ

2.1 Lazer

Lazer, Uyarılmış Radyasyon Emisyonu Işık Amplifikasyonu (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) adlandırmasının baş harflerinden yararlanılarak oluşturulmuş kısaltmadır [1]. Fakat bu ifade tam olarak doğru değildir. Lazer sadece yükseltme değil, aynı zamanda yükseltici ortam ile arasında pozitif geri beslemeli rezonans uygulayan bir optik boşluğa da ihtiyaç duyar. Işığın amplifikasyonu, uyarılmış emisyon olarak adlandırılan bir işlemle gerçekleştirilir [2]. Bir ışık kaynağından yayılan ışık demeti, lazer ortamında bulunan atomlarda bir uyarım oluşturmak için kullanılır [3]. Lazer, ışığın özelliklerinden faydalanılarak geliştirilmiş bir teknolojidir. Aslında basitçe kısa ışık atımlarından ibarettirler. Temelde parçacıkların yüksek enerjili fotonlar tarafından uyarılmasıyla başlar. Bu uyarılma atom veya moleküldeki elektronların daha yüksek enerji seviyelerine geçmelerine sebep olur. Sonrasında uyarılmış elektronlar enerjilerini serbest bırakırlar. Serbest bırakılan bu enerji daha fazla foton üretebilmek için diğer parçacıklardaki serbest bırakılma sürecine sebep olur. Oluşan bu sıralı reaksiyon hızla daha fazla foton üretir ve lazer oluşur.

Yüksek monokromatiklik, tutarlılık ve yönlülük gibi belirli özelliklere sahip, dar ve yoğun bir ışık huzmesi üreten bir tür optik osilatördür. Lazerin tek renklilik, yönlülük ve tutarlılık gibi özellikleri, birçok uygulama alanlarında tercih edilmesine sebep olmuştur. Lazer birçok uygulaması sayesinde teknoloji dünyasında yer bularak birçok yeniliğe katkıda bulunmuştur. Uygulama alanları, nanoaygıt ve mikroçip üretiminden cerrahi operasyonlara, askeri uygulamalardan metal işleme gibi büyük ölçekli operasyonlara kadar uzanır [4]. Her lazer tipinin kendine özgü özellikleri ve uygulamaları vardır.

Lazerler, lazer ışınını üretmek için kullanılan ortama bağlı olarak farklı türlere ayrılabilir. Bazı yaygın lazer türleri arasında katı hal lazerleri, gaz lazerleri, sıvı lazerler, kimyasal lazerler, yarı iletken lazerler bulunur [4]. Lazerin bir örneği,

geliştirilen ilk lazer olan ve bugün hala kullanılan yakut (ruby) lazerdir. Krom iyonları katkılı bir alüminyum oksit kristali kullanılarak çalışır. Kristal, harici bir ışık kaynağı tarafından uyarıldığında, dalga boyu yaklaşık 694 nanometre olan bir lazer ışını yayar [4]. Işımayı sağlayan ortam katı (örneğin yakut), sıvı (örneğin hidrojen florür) veya gaz (örneğin CO₂) olabilir [1].

Lazerler çeşitli alanlarda kendilerine geniş bir uygulama alanı bulmuşlardır. Tıbbi uygulamalarda, lazerlerden destek alınarak stapedotomi gibi cerrahi işlemlerde protez yerleştirilmesi sırasında ve lasik (laser assisted in situ keratomileusis) olarak adlandırılan kornea cerrahisi işlemlerinde kullanılmaktadır [5]. Diş hekimliği uygulamalarında ise yumuşak doku ameliyatları da dahil olmak üzere çeşitli diş prosedürlerinde de kullanılabilir. [6].

Endüstride ise lazerler; metallerin kaynak, delme, kesme ve yüzey temizliği gibi malzeme işleme proseslerinde kullanılır [7]. Örneğin düşük güçlü fiber lazerlerin metallerin yüzey temizliğinde, korozyon ürünlerinin ve boyaların temizlenmesinde etkili olduğu gösterilmiştir. Yüksek güçlü lazerler ise metallerin kesilmesi, kaynaklanması ve delinmesi gibi imalat süreçlerinde kullanılır [7]. Lazer teknolojisi ayrıca askeri uygulamalar ve savunma sanayi içerisinde de yer bulmaktadır. Hassas hedefleme ve saha ölçümleme amacıyla kullanılabilir. [8]. Lazerlerin tıp endüstri ve savunma sanayi gibi birçok alanda kendisine yer bulabilen geniş bir uygulama alanı vardır. Cerrahi işlemler, diş tedavileri, malzeme işleme ve askeri uygulamalar için sıklıkla kullanılırlar.

Bu lazerli ortamdaki bu malzemelerin atomları uyarılır ve bu da tutarlı tipte ışığın yayılmasına neden olur. Optik amplifikasyon, bu odadaki aynaların düzenlenmesi yoluyla bu atomların rezonansı ile elde edilir. Uyarılmış atomlar bu aynalar arasında ileri geri sıçrar ve bu da tutarlı, güçlendirilmiş bir ışık elde edilmesiyle sonuçlanır [1-3,9].

Lazer ışığı, tek bir dalga boyu, monokromatiklik olarak bilinen tek renkli bir ışık ışını, tutarlılık olarak bilinen aynı faz pozisyonu ve düşük sapma olarak bilinen ışığın paralel çizgiler halinde ilerlemesiyle karakterize edilir. Bu özellikler lazer ışınının temelde sahip olması gereken üç özelliktir [1].

Lazerin sahip olduğu bu özellikler, üretilen lazer ışınının yoğunluğunun artırılmasını ve böylece yüksek yoğunluklu bir lazer ışınının üretilmesini sağlar [10]. Lazerin bu

benzersiz özelliği, kullanıldığı tüm alanlarda uygulanmasına da bir gerekçe olmuştur. Lazer ışınının yalnızca ilgi duyulan noktaya selektif olarak yönlendirilebilmesi, lazerin daha çok tercih edilmesine neden olmaktadır. Lazer, geçmişte başarılması mümkün olmayan birçok şeyi mümkün kılarak, teknoloji dünyasına pek çok şey katmıştır.

2.2 Lazerin Tarihçesi

Max Planck'ın 1890'ların sonlarında ve 1900'lerin başlarındaki çalışmaları lazer teknolojisinin temelini oluşturmuştur [10-12]. Planck 1899 yılında kara cisim radyasyonu sorununa temel düzensizlik ilkesinden yola çıkarak bir çözüm önerisi sunmuştur. İdeal bir osilatörün entropisi hakkındaki varsayımlardan yola çıkarak Wien-Planck yasası adını verilen yasayı türetmiştir. Ancak bu yasanın deneysel sonuçlarla uyumlu olmadığı görülmüştür. Planck, Planck kara cisim radyasyonu yasası adı verilen yeni bir yasayı türetmek için enerji kuantizasyonunu ve istatistiksel mekaniği dahil ederek bu yasayı revize etmiştir. Revize edilen yasanın deneysel verilerle uyum içinde olduğu görülmüştür [11]. Yasa, kara cisim ışıınımı yasasının ardındaki ilkeleri daha iyi anlamak amacıyla termodinamiğin ikinci yasasını yorumlamak için Boltzmann'ın istatistiği kullanılarak revize edilmiştir. Elektromanyetik enerjinin yalnızca kuantumlanmış biçimde yayılabileceğini keşfedilmiştir.

Planck, radyasyon enerjisi ile radyasyon arasında var olan ilişkiyi keşfetmiştir. Enerjinin yalnızca kuantum adını verdiği parçalar halinde yayılabileceğini veya soğurulabileceğini fark etmiştir. Işığın bir tür elektromanyetik radyasyon olduğunun anlaşılmasını sağlamıştır. Bir kara cismin, ısıtılmadığında emdiği gibi ısıtıldığı durumda da radyasyonu yansıtması beklenmekteydi. Temel enerji kuantasını keşfi, kara cismin tüm farklı dalga boylarını soğurup hiç yansıtmyorken ısıtıldığında neden tüm ışık frekanslarını yaymadığını açıklamasına imkan vermiştir. Planck, bu keşifle kuantum teorisinin öncüsü olmuştur [13].

Albert Einstein, Mac Planck'ın çalışmaları doğrultusunda araştırmalarını sürdürmüş ve 1905 yılında fotoelektrik etki fikrini ortaya atmıştır. Işığın enerjisini parçalar halinde dağıttığını öne süren ve günümüzde fotonlar olarak adlandırılan çalışmayla Plank'ın çalışmasını desteklemiştir. Daha sonra 1917 yılında Einstein, uyarılmış emisyon süreci olarak adlandırılan bir fikri önermiştir. Bu fikir uyarılmış emisyonun mekanizmasını açıklamayı sağlamıştır [10, 13]. Uyarılmış emisyon teorisi, bir atomik sistemdeki üst

ve alt enerji seviyeleri arasındaki değişimden, uyarılmış emisyonu güçlendirmenin ne kadar mümkün olduğunu açıklamıştır. Üretilen güçlendirilmiş uyarılmış emisyon aynı frekansa ve fazlara sahip olmaktadır [13]. Bu lazerin temel çalışma mekanizması için gerekli olan teorik arka planı sağlamıştır.

Uyarılmış radyasyon emisyonunun (Maser-Microwave Amplification of Simulated Emission of Radiation) mikrodalga amplifikasyonu, Charles Townner tarafından 1980'lerin başında sunulmuştur [10, 14]. Townes bu çalışmasıyla 1964'te Nobel ödülü sahibi olmuştur. İlk mazer ile lazer arasındaki fark, mazerin görünmez bir dalgaboyunda olan mikrodalga radyasyonunu yükseltmek için kullanılmış olmasıdır. Üretilen mazer sürekli bir ışıma sağlayamamıştır. Optik pompalama yapılabilirse sürekliliğin sağlanabileceği öne sürülmüştür [15].

Sonrasında çalışmalar görünür bölgede devam etmiştir ve optik mazer denen kavram ortaya çıkmıştır. Bu daha yüksek frekans kullanarak artan enerjiyle daha güçlü ışın demeti elde edilmesine imkan vermiştir. Bu keşif daha sonra 1958 yılında Arthur Schawlow ve Charles Townner tarafından patentlenmiştir [16]. Lazer kelimesi ise 1959'da Gordon Gould tarafından ortaya atılmış ve günümüze kadar kullanılmıştır [10, 17].

2.3 Lazer Işınının Özellikleri

Lazer kendisini özel kılan üç temel özelliğe sahip bir elektromanyetik radyasyon şeklidir. Adının oluşmasına sebep olan kısaltma, lazerin çalışma mekanizmasını anlatmaktadır. Bu mekanizma lazerin bu özelliklere sahip olmasının nedenidir. [1]. Lazer adının oluşmasına sebep olan kısaltmaya bakıldığında basitçe ışığın veya herhangi bir elektromanyetik radyasyonun, uyarılmış radyasyon emisyonu süreci ile büyütüldüğü anlaşılmaktadır. Bu büyütmeyi elde etme süreci, lazerin birçok uygulamada yararlı olmasını sağlayan özelliklerin oluşmasına sebep olur. Lazeri diğer ışık veya radyasyon çeşitlerinden ayırıştıran monokromatiklik (tek renklilik), uyumluluk (coherency) ve yönlülük (directionality) olarak adlandırılan üç temel özellikler aşağıda açıklanmaktadır.

2.3.1 Monokromatiklik

Bir ışık kaynağı, geniş bir dalga boyu aralığına sahip ışık yayar ve ışık içerisinde görülen birçok rengin ortaya çıkmasına sebep olur. Beyaz ışık, gökkuşağı üzerinde

gözlemlenen yedi renginin tamamını içerir. Bunun sebebi 700 nm’de yer alan kırmızı ışık ve 400 nm’de yer alan mor ışık spektrumu aralığındaki dalga boylarından oluşmasıdır. Lazer ise oldukça dar ve belirli bir dalga boyu aralığındaki ışıktan oluşur ve normalde tek dalga boyunda kabul edilir [1-3,9]. Monokromatiklik sayesinde lazerden yüksek yoğunlukta bir enerji elde edilebilmesi mümkün olmaktadır. Bunun nedeni tüm enerjilerin tek dalga boyunda yoğunlaşmasıdır. Lazer dışındaki diğer ışıklar polikromatik ışık olarak adlandırılırken, lazer tek dalga boyu ve dolayısıyla lazerde görülen tek renk özelliği sebebiyle monokromatik ışık olarak adlandırılmaktadır. Bir lazerden çıkan ışık tipik olarak tek bir kesin dalga boyuna sahip tek atomik geçişten kaynaklanır. Bu sebeple lazer aktif ortamı farklı her bir lazerin kendine has karakteristik bir rengi ve enerjisi olmaktadır [1, 3].

Lazer ışını monokromatiklik derecesinin lazerden lazere değiştiği görülmektedir. Monokromatiklik derecesi lazerin dalgaboyu bant genişliğine bağlıdır. Lazerler tek bir dalga boyu etrafında dar bir bant genişliğinde ışık üretir fakat bu bant genişliği değişkendir [3, 10]. Bant genişliğinin dar oluşu, lazerin monokromatiklik derecesini artırır. Monokromatiklik aynı zamanda yüksek frekans kararlılığı olarak da adlandırılır. Bu durum yüksek kesinlik isteyen uygulamalarında çok önemlidir.

2.3.2 Uyumluluk

Uyumluluk (coherency) lazer ışının başka bir önemli özelliğidir [1]. Elektromanyetik radyasyon dalgasının aynı faza sahip olması uyumluluk olarak adlandırılır. Bir lazerdeki tüm dalgalar aynı fazdadır. Lazer dalgalarının hem zamansal hem de uzaysal tutarlılığı bulunmaktadır. Uzaysal tutarlılık, uzayın herhangi bir noktasında ve herhangi bir zamanda dalganın genliğini tahmin etme yeteneğidir [3, 10]. Bir dalganın belirli bir uzunluk aralığında belirli bir genliği varsa bu dalganın uzaysal olarak tutarlı olduğu söylenir. Zamansal tutarlılık ile uzaysal tutarlılık arasındaki fark, zamansal tutarlılığın herhangi bir zamanda bir ışının yolu boyunca herhangi bir noktadaki dalgalar arasında bir korelasyon olması, uzaysal tutarlılık için ise farklı dalgalar arasında bir korelasyon bulunmasıdır. Lazer ışını üretme süreci tutarlı ışının üretilmesi üzerine temellendirilir. Uyarılmış emisyon süreci, tutarlı ışın ile sonuçlanan fotonlarla belirli bir faz ilişkisine sahip fotonların emisyonunun ortaklanmasından sorumludur [1, 3].

Uyarılmış durumdaki atomlar lazer ışığını oluşturacak fotonlarla aynı fazda olan fotonları yaymak üzere üretilirler. Yayılan dalga, gelen dalgalarla birleştirildiğinde ve iki dalga aynı fazda olduğunda gelen dalgalardan daha büyütülmüş bir dalga üretirler [18]. Fotonlar normal ışığın atomlarından da üretilir. Ancak birbirleriyle herhangi bir faz uyumluluğu yoktur ve dolayısıyla uyumlu olarak adlandırılmazlar. Normal ışıkta fotonlar atomların doğal bozunması sonucu oluşur. Dolayısıyla fotonlar düzensiz bir şekilde yayılır ve dolayısıyla birbirleriyle fazları birbirlerini tutmaz.

2.3.3 Yönlülük

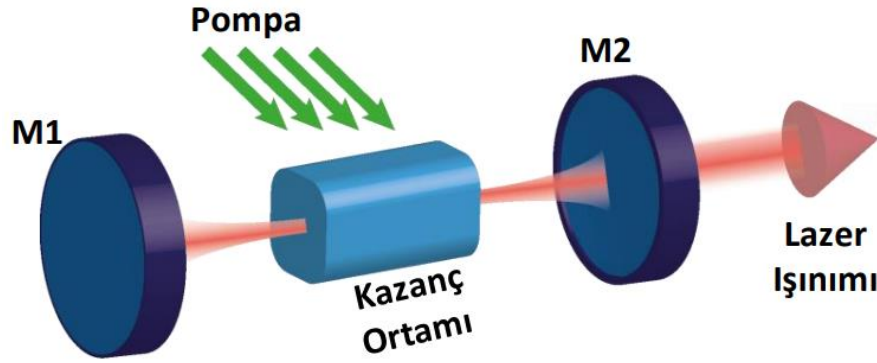
Yönlülük (directionality) lazer ışınının mesafe ile birlikte sapma davranışını tanımlayan özelliktir [1]. Normal bir ışık, düzensiz ve rastgele bir emisyon nedeniyle her yöne ışık yayar. Yayılan bu fotonlar her yere dağılır ve çok hızlı bir şekilde yayılır. Ancak lazerler mesafeye göre çok az yayılan ışık yayarlar. Lazer ışını uzayda hareket ettikçe birbirinden uzaklaşır ancak bu uzaklaşma oldukça sınırlıdır. Bu sayede lazer ışınının mesafe arttıkça normal bir ışık kaynağında olduğu gibi fotonların çoğunun birbirinden uzağa saçılması ve ışığın yoğunluğunun kaybolması gözlenmez. Bu durum normal ışıktan farklı olarak lazer ışınının mesafeyle yoğunluğunu kaybetmemesini mümkün kılar [3, 9-10].

Lazer ışını yönlülüğünü sağlayan durum üretilmesi esasında sağlanır. Lazer boşluğunun karşıt uçlarına yerleştirilen aynalar, ışının ileri geri hareket etmesine sebep olur ve aynı dalga boyunda daha fazla foton emisyonunun uyarılmasına neden olur. Böylelikle boşluğun duvarlarına paralel bir çizgide ilerleyen fotonların yayılımı gerçekleşir. Bu durum da birbiriyle yüksek derecede paralellik gösteren bir ışık demeti üretimini mümkün kılar.

2.4 Lazer Sisteminin Temel Bileşenleri

Lazer çok sayıda atomun çok sayıda fotonu aynı anda dışarı pompalamasını ve yoğun bir ışık oluşturmalarını sağlayan süreç ve bunu gerçekleştiren cihazın adıdır. Lazer ışığını üretmek için üç temel bileşen gerekmektedir. İlk olarak; katı, sıvı, gaz, kimyasal veya yarıiletken olabilen bir kazanç veya yükseltme ortamı denilen bir lazer aktif ortamı gereklidir. Sonrasında lazer aktif ortamındaki atomları uyaracak bir ışık kaynağı veya başka bir lazere ihtiyaç duyulmaktadır. Son olarak ise yansıtıcı ve odaklayıcı aynaların bulunduğu optik rezonatör denilen bileşen gerekmektedir. Şekil

2.1’de bir lazer sisteminin üç temel bileşeni olan lazer aktif ortamı, pompa ve optik rezonatörün bulunduğu temsili bir resim yer almaktadır.



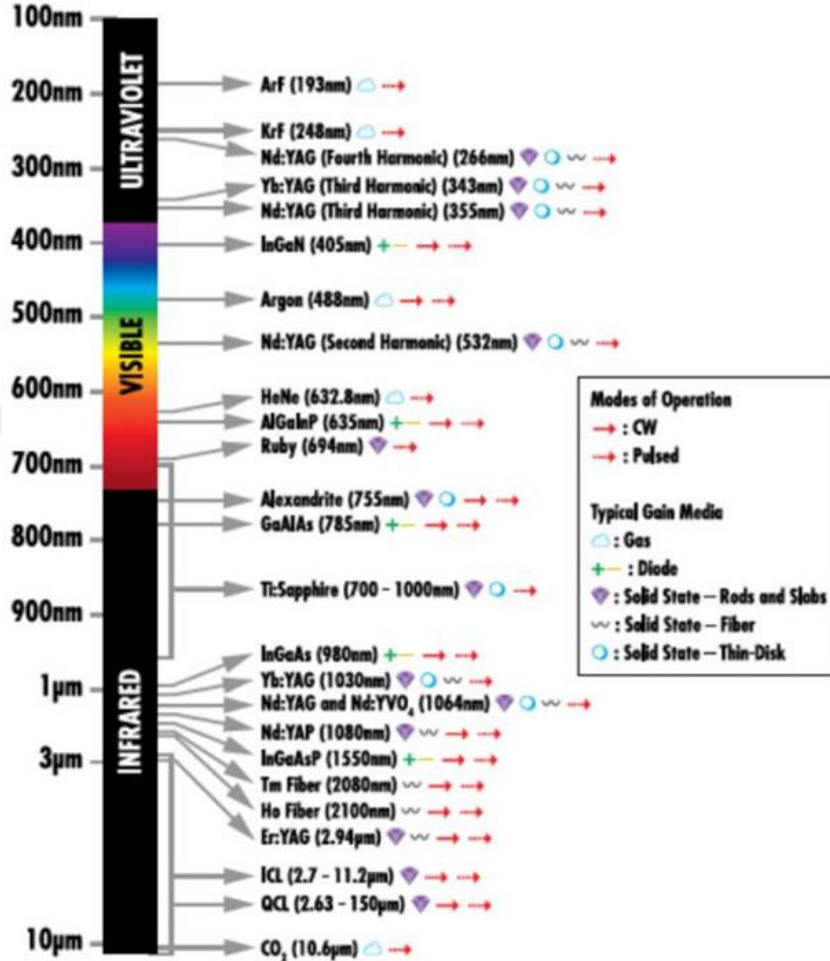
Şekil 2.1 : Lazer aktif ortamı, pompa ve optik rezonatörden oluşan bir lazer sistemi [19].

2.4.1 Lazer aktif ortamı

Lazer aktif ortamı, uyarılmış emisyon mekanizmasının gerçekleştiği bileşendir. Lazer aktif ortamı kavramına literatürde başka karşılıklar bulunduğu da görülmektedir. Bu kavram lazer aktif maddesi, amplifikasyon veya kazanç ortamı olarak da adlandırılabilir. [3,9,20]. Lazer aktif ortamı önemlidir çünkü lazer ışınlarını üretmek için kullanılan bu elektronlar buradan elde edilir. Elektronlar tarafından soğurulan enerji, atom yörüngesinin enerji seviyeleri arasındaki farklara karşılık gelen dalgaboyunda yayılan fotonlar biçiminde serbest bırakılır.

Bir elementteki elektronlar düşük enerji durumundayken karardır ve düşük enerji seviyesinde kalmayı tercih ederler. Bu seviye atomun temel durumu olarak adlandırılır. Bu temel durumdaki atomlara enerji verildiğinde, enerji bu atomlar tarafından soğurulur. Atom yeterli miktarda enerji emdiğinde uyarılır ve temel durum olarak adlandırılan düşük enerji seviyesinden daha yüksek bir enerji seviyesine geçiş yapar [10]. Bu yüksek enerji durumundaki atom uyarılmış atom olarak ve sürece de soğurma süreci denir. Uyarılmış durumdaki atom kararsız bir durumdadır ve atomlar bu durumdan her zaman temel durumuna dönmeye istemlidir. Uyarılmış atomlar bu temel durumlarına geri dönebilmek için fazlalık enerjilerini verirler. Uyarılan atom doğal bozunma yoluyla daha düşük enerji seviyesine döndüğünde, rastgele yönde fotonlar üreterek soğurduğu enerjiyi verir ve buna kendiliğinden emisyon süreci denir. Kendiliğinden emisyon, mum ışığı veya elektrik ampülü gibi normal ışıktaki meydana gelen bir süreçtir. Fakat uyarılmış atomun başka bir fotonla vurularak daha düşük

enerji düzeyine dönmesi sağlanırsa, uyarılmış atom vurulduğu fotonla aynı dalga boyunda aynı fazda fotonlar salacak şekilde uyarılır. Bu da uyarılmış emisyon olarak adlandırılır.



Şekil 2.2 : Lazerlerin aktif ortamları, çalışma modları ve dalgaboyları [21].

2.4.2 Pompalama sistemi

Pompalama (pumping) sistemi lazer içerisindeki lazer aktif ortamının atomlarını uyararak lazer ışınının oluşmasını sağlayan popülasyon tersinmesi olayını gerçekleştiren bileşendir. Lazer aktif ortamına gerekli enerjiyi vermek için gerçekleştirilen pompalama adlandırılan işlem kullanılmaktadır. Lazer işlemi sırasında atomları uyarmak ve uyarmayı sürdürmek için gerekli enerjiyi sağlayarak ışığın amplifikasyonunu sağlar [10,18]. Tungsten filamanlı lambalar gibi optik pompalar ve lazerler, elektrik lambası ve yarıiletkenler gibi elektrikli pompalar veya sistemi harekete geçirmek için ekzotermik reaksiyonlardan faydalanan kimyasal pompalar, kullanılan farklı pompalama sistemi türleri bulunmaktadır. Sürekliliği sağlayabilmek için yüksek enerji seviyesindeki atomların sayısı düşük enerji seviyesindeki atomların

sayısından daha fazla olmalıdır ve bu durum pompanın kullanılmasıyla mümkün olabilmektedir. Uyarılmış durumdaki atomların, daha düşük bir enerji seviyesindeki atomlardan daha fazla olması durumu popülasyon tersinmesi olarak adlandırılır.

Popülasyon tersinmesi, uyarılmış emisyonun gerçekleşmesi için bir koşuldur. Uyarılmış emisyon da lazer ışınının oluşabilmesi için bir önkoşuldur. Uyarılmış durumda, düşük enerji durumuna göre daha fazla uyarılmış atom bulunduğunda, bu durumun sürekliliğinin sağlanabilmesi gerekmektedir. İlk lazer ışını uyarılmış atomlardan birinin kendiliğinden emisyonu ile başlamaktadır. Kendiliğinden emisyon yapan atomun yayınladığı foton, uyarılmış başka bir atoma çarparak bu atomdan başka bir fotonun salınmasını sağlamaktadır. Uyarılmış emisyonu üretmek için sisteme giren bir foton sonrasında iki foton üretilmesine sebep olur ve böylece foton sayısı iki katına çıkarılır.

Bu iki foton diğer atomların kendi fotonlarını serbest bırakmasını sağlamak için kullanılır. Böylece bu etki zincirleme olarak devam eder ve birçok foton üretilir. Uyarılmış emisyonun bir sonucu olarak bu atomlardan yayılan fotonlar ve birbirleriyle aynı fazda olduğundan, yoğun ve uyumlu bir lazer ışınının elde edilmesi mümkün olur. Böylelikle uyarılmış emisyonu kullanılarak ışığın güçlendirilmesi sağlanır.

2.4.3 Optik rezonatör

Optik rezonatör, düz veya kavisli aynalar gibi bir çift yansıtıcı aynadan veya iki ayna tipinin karışımından oluşur. Bu aynalar, aralarındaki fotonların ileri geri sıçramasını sağlayacak şekilde yerleştirilmiştir. İki aynadan biri, fotonların bir kısmının ışın olarak çıkarılmasını sağlamak için üzerinde açıklığı olan bir çıkış aynası yapılıdır. Uyarılmış emisyon yoluyla salınan fotonlar, bu fotonların iki ayna boyunca ileri geri hareketiyle büyütülür. Bu ileri geri hareket, fotonların güçlendirilmesine yardımcı olur [10].

Lazer aktif ortamı ve pompalama sistemi kısımlarında, lazer oluşumu için gerekli olan fotonların nasıl oluşturulacağı anlatılmıştır. Lazer ışınının elde edilmesi için, lazer aktif ortamının pompalanarak popülasyon tersinmesi oluşturulması ve sonrasında uyarılmış emisyonun oluşturulması gerekmektedir. Ancak bu sırada oluşan fotonlar kendiliğinden veya uyarılmış emisyon ile salınmış olabilir [10].

Optik rezonatörün kullanılmasıdaki amaç, salınan fotonların ileri geri sıçramasına izin vererek, uyarılmış durumdaki atomları çok yüksek oranda uyarmak ve lazer işlemini başlatmak için kullanılan kendiliğinden emisyonların oluşumunun

önlenmesidir. Ortaklanmış bir foton, istenilen ışığı oluşturacak fotonları sağlamaya yardımcı olan emisyon olaylarını tetikler, yayılan bu fotonlar sürekli, aynı fazda ve yönlü bir foton oluşumuna neden olur. Bu süreç ışığın fazını ve yönünü korumaya yardımcı olur ve lazer ışınının yönlü ve tutarlı ışık demeti oluşturmasına yol açar.

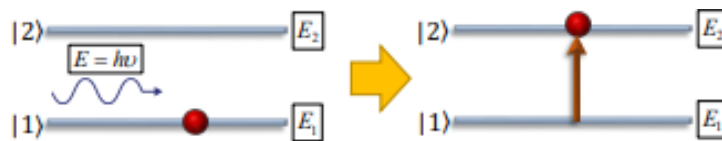
2.5 Lazer Işını Oluşumunun Temelleri

Lazer ışını belirli bir dalga boyundaki elektromanyetik bir radyasyondur. Foton olarak adlandırılan parçacıkların düzenli ve kontrollü yayılımı şeklinde ortaya çıkar. Temel olarak lazer aktif ortamındaki atomları harekete geçiren ve bu sırada çıkan atomları radyasyon yaymaya teşvik eden bir lazer aktif ortamının; bir ışıktan monokromatik, uyumlu ve yönlülüğü yüksek bir elektromanyetik radyasyonun üretilmesini sağlar [1,3,9]. Lazer ışını oluşumu için 4 temel şart bulunmaktadır;

- Atomların uyarılarak yarı kararlı hale geçirilmeleri sağlanmalıdır
- Popülasyon tersinmesi olayı gerçekleştirilmelidir
- Uyarılan atomların alt enerji seviyesine geçerken yayılan fotonların system içerisinde bulunduğu sürenin ışıma yapmaya yeterli olması gerekmektedir
- Negatif soğurmanın sağlanması gerekmektedir.

2.5.1 Uyarılmış soğurma

Atomlar temel olarak merkezlerinde yer alan çekirdeğin etrafını saran elektron bulutlarından meydana gelmektedir. Termodinamik kanunları gereğince atomlar enerjilerini minimum seviyede tutma eğilimindedirler. Bu temel enerji seviyesinde olma durumu taban enerji seviyesi olarak adlandırılır. Kararlı haldeki bir atom dışarıdan bir müdahale olmadığı sürece bu enerji seviyesinde kalmaya devam eder. Ancak dışarıdan bir müdahaleyle daha yüksek enerjili bir duruma geçiş yapabilir. Şekil 2.3'te görüldüğü gibi atoma ait elektronlar dış müdahaleyle alt enerji seviyesinden (E_1) üst enerji seviyesine (E_2) çıkarılmaktadır. Bu durum uyarılmış soğurma olarak adlandırılır.



Şekil 2.3 : İki enerji seviyeli bir sistemde uyarılmış soğurma [19].

Elektronun bu sırada E_2-E_1 kadar bir fotonun enerjisini soğurması gerekmektedir. Enerji seviyeleri arasındaki fark uyarılmayı sağlayan fotonun enerjisine eşittir ve denklem 2.1 ile hesaplanmaktadır.

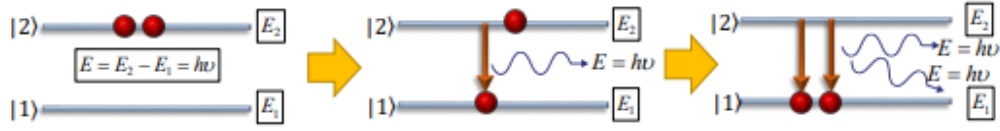
$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot C}{\lambda} = E_2 - E_1 \quad (2.1)$$

Buradaki denklemde; E fotonun enerjisi, h: Planck sabiti ($6,625 \times 10^{-34}$ Js/molekül), ν soğurulan fotonun frekanası, C ışık hızı (3×10^8 m/s), λ soğurulan fotonun dalga boyu, E_2 uyarılan elektronun bulunduğu enerji seviyesi ve E_1 temel enerji seviyesidir.

Temel enerji seviyelerinden üst enerji seviyelerine pompalanan elektronlar bu durumda kararsız olmalarından dolayı foton yayarak alt enerji seviyelerine tekrardan inebilir. Yani elektronun kaybettiği enerji, yayılan fotonun var olmasına sebep olan enerjidir. Fakat var olan bu fotonun enerjisi rastgele bir biçimde bırakabileceğinden faz uyumluluğu olmayan, farklı doğrultularda ve dalga boylarında bir foton üretilebilir. Elektronun düşük enerji seviyesine geçişinde iki seçenek bulunmaktadır. İlki bu rastgelelik durumunu içeren herhangi bir dış müdahalenin bulunmadığı kendiliğinden emisyon olarak adlandırılır. Diğer ihtimal ise bir dış müdahale ile oluşturulan ve lazer üretiminin de temelini oluşturan uyarılmış emisyonudur.

2.5.2 Kendiliğinden emisyon

Kendiliğinden emisyon, bir atomun ısı, basınç, ışık veya elektron bombardımanı gibi herhangi bir dış etki veya etkileşim olmaksızın kendiliğinden bozunmasını ifade eder. Bir elektron yüksek bir enerji durumundan daha düşük bir enerji durumuna geçtiği süreçte enerji açığa çıktığında meydana gelir. Atom kendisini termodinamik olarak kendini minimum enerji seviyesinde tutmak isteyeceği için E_2 seviyesine çıkan elektron sahip olduğu E_2-E_1 kadarlık enerjiyi ısı veya ışık olarak salarak düşük enerji seviyesine geçer. Şekil 2.4'te temsil edilen bu durum kendiliğinden emisyon olarak adlandırılır. Bu durum emisyon ömrü olarak adlandırılan 10^{-8} saniye gibi bir sürede kendiliğinden gerçekleşmektedir. Aralarında faz farkı bulunan, rastgele yönlende hareket eden, kontrolsüz bir yayılımdır. Kendiliğinden emisyon sırasında yayılan fotonun enerjisi de denklem 2.1 ile hesaplanmaktadır.



Şekil 2.4 : İki enerji seviyeli bir sistemde kendiliğinden emisyon [19].

2.5.3 Uyarılmış emisyon

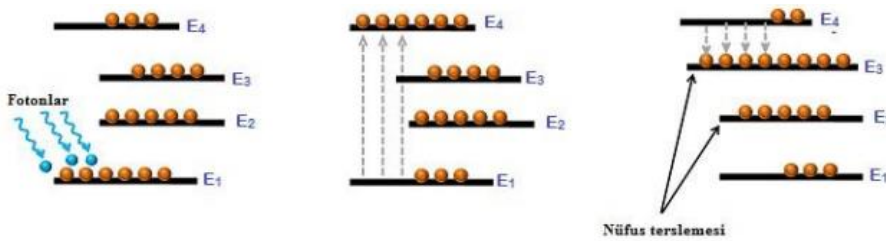
Uyarılmış emisyon, uyarılmış bir atomun harici bir fotonun etkisiyle bir ışık fotonu yaydığı bir süreçtir. Bir atomun bir fotonu enerjisini soğurduğu uyarılmış soğurma sürecinin tam tersidir. Dış bir etkiyle üst enerji seviyesi (E_2) geçen elektronlar yine dış bir etkiyle alt enerji seviyesine (E_1) geçiş yaparlar. Uyarılmış emisyonda yayılan foton, uyarıcı fotonla aynı enerjiye, dalgaboyuna ve faza sahiptir. Şekil 2.5'te temsil edilen bu durum uyarılmış emisyon olarak adlandırılır.



Şekil 2.5 : İki enerji seviyeli bir sistemde uyarılmış emisyon [19].

2.5.4 Popülasyon tersinmesi

Popülasyon bir enerji seviyesinde bulunan elektron sayısı olarak tanımlanabilir. Normal şartlarda elektronlar üst enerji seviyelerinden temel enerji seviyesinde bulunurlar. Bu durum dış müdahaleyle tersine çevirilebilir. Popülasyon tersinmesi üst enerji seviyelerindeki elektron miktarının alt enerji seviyelerindeki elektron miktarından fazla olma durumudur. Bu kavram literatürde nüfus terslenmesi olarak da geçebilmektedir [19,22].



Şekil 2.6 : Dört enerji seviyeli bir lazer sisteminde popülasyon tersinmesi (nüfus terslenmesi) [22].

2.6 Lazer Çeşitleri

İlk lazerin yapımından bu yana farklı tipte lazerler geliştirilmiştir. Literatüre bakıldığında lazerleri sınıflandırmada birden fazla kıstas göz önünde bulundurulabilir.

Bu sınıflandırma lazerin; dalga boyuna, oluşturmak için kullanılan aracın türüne, ışıyan malzemeye, pompalanma mekanizmasına ve operasyon moduna dayandırılabilir. Lazerlere dair en yaygın sınıflandırma lazerin kullanıldığı aktif ortamının durumuna bağlı olarak beş ana kategoriye ayrılır [23]. Bu ana kategoriler katı hal, sıvı hal, gaz hal, kimyasal ve yarı iletken lazerdir.

2.6.1 Katı hal lazerleri

Katı hal lazeri, aktif ortamının oda sıcaklığında katı olduğu lazerlerdir [1]. Katı hal lazeri kristal katılar veya iyon katkılı cam çubuk kullanır. Katı hal lazerleri genellikle bir flaş tüpü veya lazerli orta dalga boyundan daha kısa dalga boyuna sahip başka bir lazer kullanılarak optik olarak pompalanır. Katı hal lazerinde, lazer aktif ortamındaki elektronlar, elektronlara pompalanan fotonların soğurulması yoluyla ilk önce daha yüksek enerji durumlarına uyarılırlar. Uyarılmış elektron, uyarılmış durumlarından kurtulmak için fotonları kaybeder. Uyarılmış elektronlar tarafından salınan fotonların kalitesi, üretilen lazer ışığının kalitesini ve miktarını belirler [10]

Neodimyum (Nd), itriyum ortovanadat (YVO4), itriyum lityum florür (YLF) ve itriyum alüminyum garnet (YAG) gibi katı hal lazer kristalleri için kullanılan en yaygın kullanılan katkı (dopant) maddesidir. Katı hal lazeri, 1064 nm dalga boyunda kızılötesi ışık spektrumunda yüksek güçler üretme kapasitesine sahiptir. Genellikle metallerin kesilmesinde, işlenmesinde, metallerin ve diğer malzemelerin kaynaklanmasında kullanılmaktadırlar. Katı hal lazerlerinin ana sınırlaması, lazer aktif ortamını ısıtan ve kuantum verimliliğini azaltan aşırı pompa gücünden kaynaklanan aktif ortamdaki yüksek sıcaklıktır. İlk üretilen lazer olan yakut (ruby) lazer, bir katı hal lazeridir. Neodimyum katkılanmış İttriyum Alüminyum Garnet bazlı lazer (Nd:YAG lazer), İterbiyum bazlı İttriyum Alüminyum Garnet lazer (Yb:YAG lazer) ve Titanyum katkılı safir lazer (Ti:sapphire) de katı hal lazerlerine örnek olarak verilebilir [1,10].

2.6.1.1 Nd:YAG lazerler

Atımlı ve sürekli dalga Nd:YAG lazerler, kesme, düzeltme, ve delme gibi çeşitli lazerli imalat çeşitlerinde ve yüzey modifikasyonlarında kullanılmaktadır. Sürekli dalga ve atımlı lazer olarak kullanılabilirler. Atımlı lazerlerde yüksek ortalama güçler verebilirken, sürekli dalga lazerlerinde de yüksek güç sunabilmektedirler. Bu lazerlerin yüksek güç çıkışı ve odaklanmış ışını, hassas ve verimli malzeme işlemeye

imkan vermektedir. Nd:YAG lazerler özellikle paslanmaz çelik ve titanyum alaşımları gibi yüksek ergime noktasına sahip malzemelerin işlenmesinde kullanılmaktadır [24]. Nd:YAG lazerleri aynı zamanda markalama ve gravür gibi yüzey aşındırma alanlarında da kullanılmaktadır. Metaller, plastikler, seramikler ve cam dahil çok çeşitli malzemeler üzerinde kalıcı ve yüksek çözünürlüklü desenler oluşturulmasına imkan sağlar. Bu, Nd:YAG lazerleri yüzey aşındırma gerektiren uygulamalar için uygun bir tercih kılmaktadır [24].

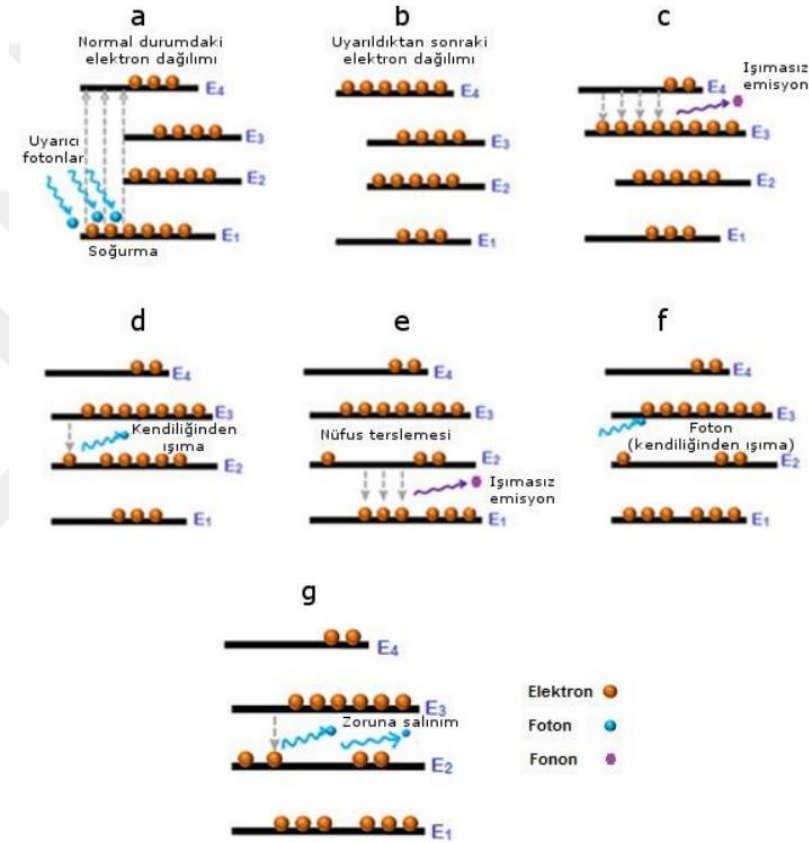
Lazerin enerji seviyeleri bir atom içinde meydana gelen elektron geçişleriyle alakalıdır. Bir atom, tipik olarak foton formundaki enerjiyi emdiğinde, atomdaki elektronlar daha yüksek enerji seviyelerine uyarılabilir. Bu uyarılmış atomlar bulundukları enerji seviyesinde kararlı değildir ve elektronlar sonunda foton yayarak temel durumlarına geri dönerler. Burada gerçekleşen foton emisyonu, atomun uyarılmış durumu ile temel durumu arasındaki enerji farkına karşılık gelen belirli dalga boylarında meydana gelir.

Uyarılmış emisyon, aktif ortama gelen bir fotonun uyarılmış bir elektronla etkileşime girdiğinde ve onun gelen fotonla uyumlu ikinci bir foton yaymasına neden olduğunda oluşur. Bu durum ışığın amplifikasyonuna ve bir lazer ışınının üretilmesine yol açar. Lazer ışınının dalga boyu, atomun uyarılmış durumu ile temel durumu arasındaki enerji farkına göre belirlenir. Farklı atomlar farklı enerji seviyesi yapılarına sahiptir, bu da lazerlerin farklı dalga boylarında ışın üretmesine sebep olur [25].

Nd:YAG lazerin çalışma prensibi, lazer aktif ortamı olarak kullanılan neodimyum iyonunun (Nd^{+3}) 4f elektronlarının enerji geçişlerine dayanmaktadır [1]. Nd:YAG lazerler dört seviyeli lazer olarak adlandırılırlar. Işımanın oluşumu dört aşamada gerçekleşir. İlk aşama pompalamadır. Pompalama aşamasında neodimyum iyonları bir ışık kaynağı kullanılarak optik olarak pompalanır. Pompalandığında, elektronlar daha yüksek bir enerji seviyesine yükseltilir ve burası pompalama bandı olarak adlandırılır. Bu işleme popülasyon tersinmesi (population inversion) denir. Uyarılmış durumda temel duruma göre daha fazla elektron bulunmasını sağladığı için lazer ışını için gereklidir.

Nd:YAG lazeri temsilen 4 seviyeli bir lazer için bir enerji seviyesi şematiği Şekil 2.7'de gösterilmektedir. E_1 olarak adlandırılan temel enerji seviyesinden E_4 üst enerji seviyesine geçiş pompa ile elektronların uyarımı sayesinde sağlanır. Bu durum

uyarılmış soğurma sürecidir. E_4 seviyesinden E_3 seviyesine geçiş ışımasız olarak gerçekleşir. Fonon hareketi sebebiyle burada ısı ortaya çıkar. E_3 seviyesinden E_2 seviyesine geçiş lazer ışınlarının var olmasını sağlayan fotonları üreten süreçtir. Elektronlar E_3 enerji seviyesinden E_2 enerji seviyesine geçerken, yaklaşık $1,064 \mu\text{m}$ dalga boyuna sahip fotonlar yayarlar. Nd:YAG lazerlerde lazer ışınını üreten şey bu geçiştir. E_2 seviyesinden E_1 seviyesine geçiş de bir ışımasız geçiştir. Burada elektronlar tekrar temel seviyelerine dönerek uyarılmayı beklerler.



Şekil 2.7 : Dört seviyeli bir lazer sisteminin enerji seviyeleri [22].

2.6.2 Sıvı hal lazerleri

Sıvı hal lazeri, lazer aktif ortamının oda sıcaklığında sıvı olduğu bir lazer türüdür [26]. Sıvı hal lazeri, lazer ortamından geniş bir emisyon dalga boyu ve polarizasyon seçimine olanak tanır. Yakın ultraviyoteden yakın kızılötesi radyasyona kadar geniş bir spektruma uzanır. Bu tip lazerde kullanılan sıvı temel olarak, aynı zamanda ayarlanabilir sürekli bir lazer spektrumu üreten sıvı kristalin içine katkılanmış (dopantlanmış) bir boyadır [10]. Sıvı hal lazerini atımlı modda çalıştırmak da mümkündür. Akış hücresine yerleştirilen boya optik pompa ile uyarıldığında, organik moleküller daha yüksek frekanslarda uyarılır ve bu tip lazerin karakteristik geniş banda

sahip olması sağlanır. Sıvı hal lazerlerinin ana avantajları, daha yüksek verimlilikleri ve çeşitli frekanslara ayarlanabilmeleridir. Bu da onları bilimsel, tıbbi ve spektroskopik uygulamalar için ideal kılar.

2.6.3 Gaz hal lazerleri

Gaz lazerlerinde lazer aktif ortamı bir gazdır. Helyum-Neon lazer üretilen ilk gaz lazeridir ve icadından bu yana çok sayıda gaz lazeri de geliştirilmiştir [1,10]]. Gaz lazerleri, gaz moleküler bağlarının titreşim ve dönme durumları arasındaki düşük enerjili geçişlerden uyarılmış emisyon üretir. Gaz lazerlerinin temel avantajı diğer lazer türlerine göre nispeten daha ucuz olmalarıdır. Gaz lazerleri ayrıca derin ultraviyole dalga boyları üretmek için helyum-gümüş lazerlerinde olduğu gibi buharlaştırılmış metal iyonundan da faydalanabilir.

2.6.4 Kimyasal lazerler

Kimyasal lazerlerde lazer aktif ortamı büyük miktarda enerjinin hızlı bir şekilde serbest bırakılmasına izin veren kimyasal reaksiyonlarla güçlendirilir. Kimyasal lazerler megawatt seviyelerinde yüksek güç üretebilmektedir. Bu sebeple sanayi ve askeri uygulamalarda önem arz etmektedirler. Bu lazerin örneklerinden bazıları arasında oksijen iyot lazeri, döteryum florür lazeri, hidrojen florür lazerleri yer almaktadır [1,3,10].

2.6.5 Yarı iletken lazerler

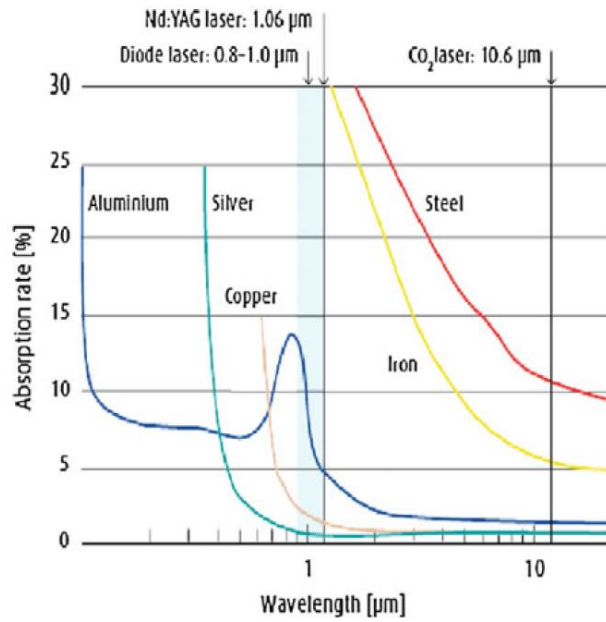
Yarı iletken lazerler, lazer aktif ortamı yarı iletkenlerden oluşan lazer türüdür [10,26]. Bu tip lazerler, lazer ortamının, bantlar arası geçişin elektriksel olarak pompalanmasıyla uyarılır. Farklı fiziksel süreçleri içerir. Yarı iletken lazerler diyot lazer olarak da adlandırılabilirler. Optik kazanç, uygulanan akımın yarattığı elektronların ve elektron deliklerinin yeniden birleşimiyle elde edilir. Yarı iletken lazerlerin yapımı daha ucuzdur ve ihtiyaç duyulan kadar küçük üretilir. Lazer işaretleyicilerde, yazıcılarda ve CD/DVD oynatıcılarda kullanılabilmektedirler.

2.7 Lazer Malzeme Etkileşimleri

Lazer ışınının sahip olduğu özellikler sayesinde, lazerlerle malzemeler üzerinde çalışabilmeyi mümkün kılar. Lazerin yüksek yönlülüğü ve hassasiyetle çalışabilme kabiliyeti, malzemenin tüm yapısında önemli bir değişikliğe neden olmadan işlemlerin

gerçekleştirilebilmesini sağlar. Lazer bir enerji kaynağı olarak malzemeyi belirli bir sıcaklığa kadar ısıtmak veya ergimesini sağlamak için kullanılabilir [27].

Lazerin dalga boyu, ışın demetinin çapı, güç gibi lazer ışını parametrelerin yanında yansıtma, termal iletkenlik gibi malzemeye bağlı özellikler; malzeme ile lazer arasındaki etkileşimde belirleyici olmaktadır. Lazer ışınının dalgaboyu, malzemenin türüne bağlı olarak malzemelerde soğurulacak lazer enerjisi üzerinde etkilidir. Lazerin dalga boyuna göre çeşitli malzemelerdeki bazı soğurulma oranları Şekil 2.8'de gösterilmektedir.



Şekil 2.8 : Farklı dalgalırlarındaki lazer ışınlarının farklı malzemeler tarafından soğurulma oranları [27].

Lazer ışını, malzeme ile iki temel yolla etkileşime girer. Bunların ilki lazer ışınlarının malzeme tarafından soğurulması, diğeryse malzemenin ısıtılması veya ergitilmesidir.

Lazer ışını malzemenin yüzeyine çarptığında malzemeye bağlı olarak bu ışının bir kısmı soğurulurken bir kısmı da yansıtılır. Malzeme tarafından soğurulan ışının yeterli enerjiyi sağlaması durumunda malzemeye ait atomlar uyarılır. Atomlar yüksek bir enerji seviyelerine geçmek için düşük enerji seviyelerini terk eder ve bu durum uyarılmış atomlar arasında titreşime neden olur. Atomların titreşimleri sırasında oluşan çarpışmalar enerji açığa çıkarır ve atomlar daha düşük enerji durumuna geri döner [1,3]. Çarpışmalar sırasında ortaya çıkan enerji ısı olarak dağılır ve bu da malzemenin sıcaklığının artmasına sebep olur. Malzemenin sıcaklığındaki artış, yansıtma ve termal iletkenlik gibi malzemenin özelliklerine bağlı olmasının yanında

ergime noktasına yakın bir malzemede katıdan sıvıya faz geçişindeki gizli ısıya da bağlıdır [27]. Soğurulan enerjinin ışımasız geçişlerinin yanında bu durum malzemenin ışıma yapmasına da sebep olabilir. Bu durumda malzemeye fotonlarla aktarılan enerjinin bir kısmı kendiliğinden emisyon sayesinde malzemedan foton olarak geri salınabilir.

2.8 Kaplama Yöntemleri

Kaplama yöntemleri, özelliklerini geliştirmek veya belirli işlevsellikler sağlamak amacıyla altlık malzeme üzerinde ince bir malzeme katmanı oluşturmak için kullanılan yöntemleri ifade eder. Bu yöntemler kaplanacak altlık malzemenin ve kaplama malzemesinin türüne göre değiştiği gibi istenilen sonuca bağlı olarak da değişkenlik gösterebilir. Farklı amaçlara hizmet etmesi için birçok kaplama yöntemi geliştirilmiştir. Günümüzde kaplama yöntemleri temel olarak iki alt başlığa ayrılmaktadır. Bunlardan ilki geleneksel kaplama yöntemleri olarak adlandırılır. Geleneksel kaplama yöntemlerine örnek olarak akımlı kaplama ve akımsız biriktirme örnek verilebilir. Gelişmiş kaplama yöntemleri ise çalışma sistemler ve enerji kaynakları çok çeşitlilik gösterebildiği için çok daha fazla alt başlığa ayrılabilir. Ayrıca gelişen teknolojiyle birlikte kaplamalardan artan beklentilerin artışı her gün yeni metotların türetilmesine sebep olmaktadır. Kimyasal buhar biriktirme ve fiziksel buhar biriktirme de gelişmiş kaplama yöntemleri altındaki iki önemli başlıktır. Her iki başlıkta kendi içerisinde birçok alt kırıma uğramaktadır. Altındaki başlıklarda tez çalışmasına konu olan lazer aktifleştirilmiş akımsız biriktirme yöntemiyle literatürde kıyaslanan lazer destekli kimyasal buhar biriktirme ve atımlı lazerle biriktirme yöntemlerinden bahsedilecektir.

2.8.1 Lazer destekli kimyasal buhar biriktirme (LACVD)

Lazer destekli kimyasal buhar biriktirme, proses sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyona yardımcı olmak için lazerin kullanılan bir kimyasal buhar biriktirme yöntemidir. Lazer destekli kimyasal buhar biriktirme malzemelerin yüzeylerinin kaplamada sunduğu olanaklar sebebiyle tercih edilen bir yöntemdir [28]. LACVD'nin en önemli avantajı seçmeli olarak bir alanda kaplama yapabilme kabiliyetidir. Biriktirme işlemi, altlık malzemenin belirli bölgelerinde sınırlandırılabilirken kaplama kalınlığı da hassas olarak ayarlanabilir. Diğer kimyasal buhar biriktirme yöntemleriyle

karşılaştırıldığında daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilebildiğinden, bu özellikle termal olarak hassas altlık malzemelerle çalışabilmeyi sağlar [29]. Örneğin birçok geleneksel kimyasal buhar biriktirme sistemi için gereken sıcaklıklarda seramikler çatlayabilir, polimerler ayrışır.

LACVD'de, öncü gazlar ile altlık malzeme yüzeyi arasında kimyasal reaksiyonları başlatmak için lazerden faydalanılır. Lazer, öncü moleküllerdeki kimyasal bağları kırmak için enerji sağlayarak bunların reaksiyona girmesine ve altlık malzeme üzerinde istenen kaplamayı oluşturmaya olanak sağlar [28]. Lazer ışını sayesinde, aynı öncü molekülleri kullanmasına rağmen diğer kimyasal buhar biriktirme yöntemlerinde hiç bulunmayan veya düşük oranlarda ara ürün olarak mevcut olan atomik veya moleküler yapıları yüksek oranda üretmeye imkan sağlar. Böylece termodinamik olarak mümkün olan ancak kinetik olarak engelli veya dengede olmayan ürünlerin üretilmesini sağlar. Kaplama kalınlığının tek katmanlı kontrolünün sağlanabilmesi sebebiyle çok katmanlı kaplamalardan oluşan heteroyapıların yüksek hassasiyetle oluşturulmasına imkan verir. Lazer kullanımı reaksiyon kinetiğini geliştirebilir ve kristal yapıların oluşumunu teşvik ederek film kalitesini iyileştirebilir [29].

LACVD'deki biriktirme prosesi, lazerin gücü, atım süresi ve tekrarlama oranı gibi lazer parametrelerine bağlı olarak çalışır. Bu parametreler altlık malzeme yüzeyindeki sıcaklığı ve enerji dağılımını etkileyerek biriktirilen kaplamanın büyüme hızını ve morfolojisini etkileyebilir [28]. Lazer parametrelerini optimize ederek bileşim, kristal yapı ve yüzey pürüzlülüğü gibi özelliklere istenildiği şekilde sahip kaplamalar elde edilebilir [30].

2.8.2 Atımlı lazerle biriktirme (PLD)

Atımlı Lazer Biriktirme (Pulsed Laser Deposition), odaklanılmış bir hedefe vakum ortamında lazer atımlarının yüksek gücünden faydalanılarak malzeme biriktirilmesini mümkün kılan bir fiziksel buhar biriktirme yöntemidir. Hedef (target) olarak kullanılan kaplama malzemesini buharlaştırmak veya ablasyon yaparak için darbeleri bir lazerin kullanılarak altlık malzeme üzerinde biriktirilmesiyle gerçekleştirilir [31]. Atımlı lazer biriktirme sayesinde geniş bir malzeme grubunun üzerinde biriktirme yapılabilmektedir. İletkenler, yarı iletkenler ve yalıtkanlara uygulanabilmektedir. Atımlı lazerle biriktirme, polimerler, nanoyapılar, bakır kaplamalar da dahil olmak

üzere çeşitli malzemelerin biriktirilmesi için kullanılmıştır [32-34]. Seçilmiş altlık malzemeye istenilen ölçülerde seçimli ince film oluşturmaya imkan vermektedir. Farklı stokiometrilere aynı kaplamada oluşturabilmesi sebebiyle heteroyapıların üretimini olanak sağlaması önemli bir tercih sebebidir. Lazer ışınının kısa süreli etkileşimi sayesinde dengede olmayan ürünlerin üretibilmesini imkan verir. Diğer fiziksel buhar biriktirme yöntemlerine kıyasla daha yüksek biriktirme hızına sahip olduğu için avantajlıdır. Ayrıca düşük maliyeti de bu yöntemi tercih edilebilir kılmaktadır.

2.8.3 Geleneksel akımsız kaplama metotları

Akımsız biriktirme, metallerin ve alaşımların ince film kaplamalarının üretiminde kullanılan bir yöntemdir. Polimer, seramik veya cam gibi yalıtkan altlıklar üzerinde malzeme biriktirebilmesine imkan veren bu süreç akımsız kaplama olarak da adlandırılmaktadır [35]. Akımsız biriktirme, elektrolitik kaplamalarda olduğu gibi dışarıdan bir elektrik akımı kullanmak yerine, çözelti içindeki metal iyonlarının bir altlık yüzeyine kontrollü bir kimyasal tepkimeyle indirgenerek biriktirilmesi temeline dayanır. Akımlı kaplamalar ile karşılaştırıldığında, şekil ve elektrik iletkenliğine bakılmaksızın tüm yüzeylere eşit şekilde kaplanabilir. Biriktirilen metal veya alaşıma bağlı olarak, akımsız biriktirme için çeşitli uygulamalar vardır. Örneğin, akımsız nikel fosfür (Ni-P) biriktirme elektronik mikro devrelerde, aşınma önleyici kaplamalarda ve paketlemede yaygın olarak kullanılmaktadır. Akımsız bakır biriktirme baskılı devre kartlarının üretimi, elektromanyetik kalkanlama gibi yüksek teknoloji uygulamalarda kendine yer bulmaktadır [36]. Yüksek kaplama alanına imkan vermesi, akımlı kaplamalarda olduğu gibi elektrik akımının değişim gösterdiği uzak noktalar, kenarlar ve köşelerde farklı kaplama kalınlığıyla karşılaşılması, çeşitli uygulamalar için tercih edilmesine neden olmaktadır. Geleneksel akımsız kaplamalar altlık malzemenin yüzeyinde metal veya alaşım biriktirmeyi amaçlarlar. Bu biriktirme otokatalitik akımsız biriktirme esasına dayanmaktadır. İlk çekirdeklerin altlık yüzeyine yerleşmesinden sonra tepkime otomatik olarak devam eder. Bu sebeple otokatalitik ve akımsız olarak adlandırılırlar. Zira dışarıdan bir elektrik akımı uygulanmamaktadır. Elektron kaynağı olarak çözelti içerisinde yer alan redükleyiciler kullanılır [37].

İndirgeme ve oksidasyon tepkimelerinin standart redoks potansiyellerinin toplamı (E°) pozitif olduğunda bu yöntemin termodinamik olarak mümkün olacağını

göstermektedir [38]. Denklem 2.2’de Gibbs serbest enerjisinin değişimi denklemi görülmektedir.

$$\Delta G^{\circ} = -n \cdot F \cdot E^{\circ} \quad (2.2)$$

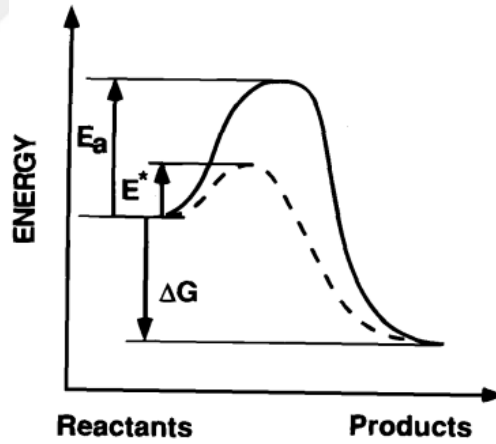
ΔG° = Gibbs serbest enerji değişimi

n = redoks tepkimelerinde kullanılan elektronların sayısı

F = Faraday sabiti (96485 C/mol)

E° = standart redoks potansiyeli

Standart redoks potansiyellerinin toplamı (E°) pozitif bir değer olduğunda, Gibbs serbest enerji değişimi (ΔG°) negatif olmaktadır. Bu da reaksiyonun termodinamik olarak istemli olduğunu göstermektedir. Şekil 2.9’da Gibbs serbest enerji diyagramında da görülebileceği üzere, tepkimelerin kendiliğinden oluşmasını engelleyen, E_a ile temsil edilen bir aktivasyon enerjisi bulunmaktadır. Aktivasyon enerjisi, bir katalitik yüzey oluşturarak E^* ile temsil edilen daha düşük aktivasyon enerjisine sahip reaktif ara ürünler sayesinde azaltılabilir.



Şekil 2.9 : Gibbs serbest enerji diyagramı [37].

Akımsız biriktirme, yüzey hazırlama, aktivasyon ve biriktirme olmak üzere temel olarak üç adımdan oluşur. Yüzey hazırlama, kaplanacak altlık malzeme ile biriktirilen metal veya alaşım arasında uygun adhezyonu sağladığından, akımsız biriktirmede önemli bir adımdır. Altlık malzemenin yüzeyi, biriktirme işlemini engelleyebilecek kirlenici maddelerin uzaklaştırılması için temizlenir. Bu temizleme kimyasal, mekanik aşınma veya plazma gibi çeşitli seçenekler kullanılarak gerçekleştirilebilir [39]. Yüzey temizlemenin sonrasında, biriktirme işlemini başlatabilmek için kaplanacak altlık malzemenin yüzeyi etkinleştirilir. Aktivasyon, altlık malzeme yüzeyinde metal veya

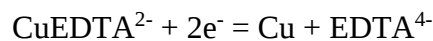
alaşımın biriktirilebilmesi için bir çekirdeklenme alanı görevi gören katalitik bir tabakanın oluşumudur. Kimyasal aktivasyon, elektrokimyasal aktivasyon veya tohumlama gibi yöntemlerle gerçekleştirilebilir [40]. Altlık malzemenin yüzeyi etkinleştirildikten sonra biriktirme işlemi başlayabilir. Akımsız biriktirmede metal iyonları, kompleksleştirici bir maddenin (ligand) varlığında kimyasal bir indirgeyici madde sayesinde indirgenir. İndirgeyici ajan, metal iyonlarına elektronlar sağlayarak metal iyonunun indirgenmesine ve altlık yüzeyinde birikmesine sebep olur. Kompleks oluşturuşu madde, çözeltideki metal iyonlarının stabilize edilmesine ve çökmesinin önlenmesine yardımcı olur. [37]. Metalin birikme hızı ve özellikleri, metal iyonlarının konsantrasyonu, çözeltinin pH'ı, sıcaklık ve indirgeyici ve kompleksleştirici maddelerin bileşimi dahil olmak üzere birçok faktörden etkilenebilir. Bu parametrelerin optimizasyonu, istenen biriktirmeyi elde etmek için önemlidir.

Akımsız biriktirmenin diğer biriktirme teknikleriyle birleştirilmesine dair çalışmalar da bulunmaktadır. Örneğin akımlı kaplama ve akımsız biriktirmeyi tek bir işlemde yeniden birleştiren hibrit elektro-elektriksiz biriktirme üzerine çalışmalar mevcuttur (Hybrid Electro Electroless Deposition - HEED) [41].

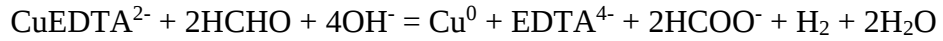
2.8.4 Akımsız bakır biriktirme

Akımsız bakır biriktirme, bakırın dışarıdan bir potansiyel fark uygulanmaksızın altlık malzeme üzerinde biriktirildiği prosestir. Akımsız bakır biriktirme, bir indirgeyici maddenin oksidasyon reaksiyonu ve bakır iyonlarının indirgeme reaksiyonunu içeren iki reaksiyonun katalitik bir yüzey üzerinde eş zamanlı olarak meydana gelmesiyle gerçekleşir. Denklem 2.2'den yararlanarak akımsız bakır kaplamanın da termodinamik olarak mümkün olduğu hesaplanabilmektedir. Ancak bu tepkime kinetik olarak zincirlidir. Tepkimenin başlaması için gerekli enerji yaklaşık olarak 0.68 eV'dur [38].

Akımsız biriktirmenin mekanizmaları halen araştırma konusudur. Akımsız bakır biriktirme üzerine birçok çalışma olmasına rağmen kesin bir mekanizma tanımlanamamıştır [42]. Genel olarak metaller ve yarı iletkenler üzerindeki akımsız biriktirmenin aşağıdaki örnekteki gibi iki yarı hücre reaksiyonu yoluyla gerçekleştiğine düşünülmektedir [43].



Bu iki yarı hücre reaksiyonunun oluşturduğu redoks tepkimesi aşağıdaki şekildedir.



Mekanizma üzerinde yapılan başka tartışmalarda mekanizmanın; metilen glikol anyonlarının oluşumu, metal (Cu, Pt, Rh, Au, Pd) kullanımı ile katalitik yüzey dehidrojenizasyonu, hidrojen oluşumu ve bakır-ligand (EDTA) kompleksinin indirgenmesi olarak gösterilmiştir [44-46].

Akımsız bakır biriktirme temel olarak katalitik bir yüzey üzerinde zamanla değişen mikro düzeyde yerel anotlar ve katotlara sahip bir galvanik hücredir. Altlık malzemenin yüzeyindeki indirgenme ve yükseltgenme tepkimeleri sayesinde gerçekleşir. Akımsız bakır birikimini başlatmak için katalitik katmana ihtiyaç duyulur. Paladyum, platin, renyum, platin ve altın gibi katalizör elementler bu görevi üstlenir. Katalitik yüzey, dehidrojenasyon tepkimesini ve hidrojen oluşum tepkimesini katalize etmenin yanı sıra, elektronları indirgeyici madde yükseltgenmesinden metal iyonu indirgemesi tepkimesine taşımak için iletken malzeme olarak da gereklidir [38]. Bundan dolayı, katalitik ve iletken özellik gösteren bir katman olarak çalışabilmesi için tabakanın oksitlenmemiş ve kirlenmemiş olması gerekir. Akımsız biriktirme çözeltisindeki formaldehit gibi bir indirgeyici elektronun kaynağı olarak kullanılır ve yükseltgenir. Ortaya çıkan bu elektronlar sayesinde bakır iyonları indirgenerek altlık üzerinde biriktirilir.

2.8.5 Lazerle aktifleştirilmiş akımsız biriktirme

Lazerle aktifleştirilmiş akımsız bakır biriktirme, bakırın yüzeyler üzerine seçmeli olarak biriktirilmesi için kullanılan bir yöntemdir. Normal akımsız biriktirmelerden farklı olarak burada yüzeyin aktivasyonu katalizör metallerle değil, lazer ışınının enerjisiyle sağlanır. Yöntem çözelti içerisinde yer alan altlık malzemenin lazer ile uyarımı, lazer ile uyarılan bölgelerin kimyasal aktivasyonu ve bu alanlarda akımsız bakır biriktirmesiyle gerçekleşir. Lazerle uyarılan alanlar kimyasal olarak etkinleştirildikten sonra akımsız bakır biriktirme kendiliğinden ilerleyecek şekilde gerçekleşir. Çözeltideki indirgenen bakır iyonları yalnızca lazer ile uyarılan alanlarda biriktirilerek seçmeli olarak belirli bir alanda bakır tabakasının oluşması sağlanır.

Lazer aktif kaplama metodlarında, lazer hem enerji hem de foton kaynağı olarak değerlendirilebilir. İletimi için vakum ortamı gerekmeyişi, onu elektron demeti, ark gibi diğer enerji ve elektron kaynaklarından ayırır. Lazer ışınları ile bombardıman

edilen altlık malzemelerin yüzey ve yüzeye yakın noktalarında serbest elektronlar ve serbest radikaller gibi tanecikler oluşur. Lazerin taşıdığı enerjinin bir kısmının ısıya dönüşmesinden sebeple sıcaklık artışı da gözlemlenir. Tüm bu şartlar kimyasal reaksiyonların gerçekleşmesi için imkan tanımaktadır. Ancak bu şartlar içerisinde geleneksel sonuçlardan farklı sonuçlarla karşılaşılabilir [37]. Akımsız kaplamalarda çözeltideki yük dengesi çözeltiye konulan bir redükleyici ajan ile sağlanır. Bu sayede kaplama yüzeye zarar vermeden yüzey üzerinde birikebilir. İndirgenmek için ihtiyaç duydukları elektronu altlık malzemeden değil, redükleyiciden sağlarlar ve redükleyici oksidasyona uğrar. Lazer ışını bu prosesi başlatabilir veya ilerlemesini sağlayabilir. Tepkime başladığında, biriken metal bir katalizör gibi davranır ve tepkime kendiliğinden ilerler.

Literatürde kullanılan birçok lazer destekli ileri düzey kaplama yöntemi mevcuttur. Bunlara lazer destekli kimyasal buhar biriktirme (LACVD) ve atımlanmış lazer biriktirme (PLD) örnek verilebilir. Fakat çalışmaları için vakum ortamı gerekliliği bu proseslerin dezavantajıdır. Lazer aktif akımsız kaplamaların avantajı ise burada ortaya çıkmaktadır. Vakum gerektirmeyişiyle hem LACVD hem de PLD'ye karşı avantajlı bir prosestir. Ayrıca fotorezist gerektirmeksizin selektif olarak metal biriktirebilmesi sayesinde LCVD'ye karşı daha tercih edilebilir olmaktadır [47-48].

2.8.6 Lazer aktifleştirilmiş akımsız kaplama

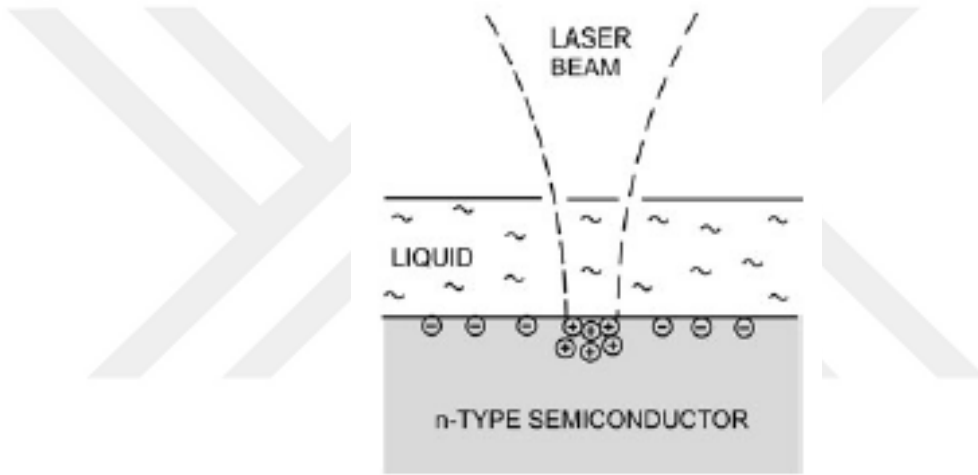
Lazer aktif akımsız kaplama yüzey ve yüzeye çok yakın alanlarda lazer ışınlarının taşıdığı enerjinin serbest elektronlar oluşturması esasına dayanır. Bu sayede yalnızca lazer ışınlarının çarptıkları yerlerde reaksiyonların gerçekleşmesi beklenir. Lazer ışınlarının yüzeye çarpmasıyla başlayan reaksiyonlar otokatalitik olarak devam eder. Yüzeyde metal birikmesi için gerekli olan metal iyonları ve redükleyici ajanlar çözeltinin içinde bulunmasından ötürü tepkimeler banyo konsantrasyonundaki düşüşten etkilenmedikleri sürece devam ederler.

Dışarıdan herhangi bir elektron kaynağı sağlayacak etki uygulanmadığında lazer aktif akımsız kaplamaların temeli elektrokimyasal, elektrotermal ve termal etkilere dayanır.

Örneğin termal etkilerden bahsedecek olursak lazer ışını suyun pirolizine sebep olup ortamda serbest elektron varlığına sebep olabilir. Elektriksel etkileşimler ihmal edildiğinde, lazer ışını altlık malzemeye ulaştığı zaman çözelti ve altlık malzeme arasındaki sınırlı bir alanda, çözeltide yer alan bileşenlerin ayrıştığı gözlemlenecektir.

Bu ortamda var olan sıvıların buharlaşması ve pirolizi gibi uğrayacakları her değişimin optik özelliklerine edeceği etkilerden ötürü hesaplanabilirliği düşüktür.

Lazer ışını sahip olduğu enerjiden ötürü elektron ve elektron boşluğu çiftleri oluşmasına sebebiyet verir. Elektron ve elektron boşluklarının mobilitelerinin farklı oluşu yarı iletken yüzeyinde bir yük taşıyıcı varlığına sebep olur. Bu etki Dember Efektı olarak adlandırılır. Dember efekti, ışıkla vurulan bir yarıiletkenin üzerinde yük taşıyıcıların oluşmasını sağlayan ve bunun sonucunda foto-elektromotor kuvvetin (EMF) ortaya çıktığı bir olgudur [51,52]. Bu bir anda yüzey ile çözelti arasında yük transferine sebep olur. Lazer ışınının gönderildiği alanda seçmeli olarak biriktirme yapabilmesine imkan veren de budur.



Şekil 2.10 : Dember efekti sebebiyle EMF oluşumu [27].

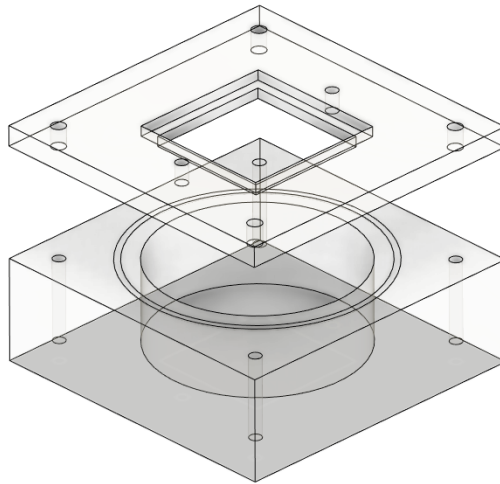
Eğer ki p-tipi bir yarı iletkenden bahsediliyorsa, lazer ışınına maruz kalan alanda elektron miktarı artarken, etrafındaki alanda elektron miktarı azalacaktır. Bu durum lazerin vurduğu alanlarda metalin birikmesini sağlayacaktır. Şekil 2.10’da görüldüğü gibi diğer durumda, n-tipi bir yarı iletkende ise lazerin vurduğu alanda elektron miktarı azalacak, etrafında elektron miktarı artacaktır. Bu sebeple lazer ışınına maruz kalan alan bir pil gibi davranacaktır. Bu sebeple ışının vurduğu alan değil de etrafı kaplanacaktır. Ayrıca elektron ve elektron boşluğu çiftleri lazerin termal etkilerinden ötürü de oluşabilir.



3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 Hazne Tasarımı

Deneylerin gerçekleştirilmesi için Şekil 3.1’de yer alan bir özgün bir deney haznesi tasarlanmıştır. Bu hazne tasarımı sayesinde deney sırasında buharlaşacak çözeltinin ve gerçekleşecek tepkimeler sonucunda oluşacak gazların insan sağlığına olumsuz etkileri açısından solunmaması ve lazer merceğini korozyona uğratmaması amaçlanmıştır. Deney sırasında buharlaşacak çözeltinin ve tepkimeler sonucunda oluşacak gazların tahliyesi için hazne kapağında iki adet delik bulunmaktadır. Bu delikler vasıtasıyla var olan gazlar hazneden tahliye edilebilmekte ve içeriye temiz hava verilebilmektedir. Hazne ve kapağı arasında sızdırmazlığın sağlanması için haznenin üst yüzüne o halkalı conta (o-ring) kanalı açılmıştır. Hazne ve kapağının dört köşesinde yer alan deliklerden geçen vidalar sayesinde sıkıştırılarak sızdırmazlık sağlamak amaçlanmıştır. Deneylerin gerçekleştirilebilmesi, lazer ışınlarının numuneye ulaşması için haznenin kapak kısmında 50x50 mm boyutlarında bir pencere kısmı oluşturulmuştur. Haznenin imal edileceği malzeme seçimi çalışılacak banyo koşulları göze alınarak literatürden destek alınarak polimetil metakrilat (PMMA) olarak seçilmiştir [53-54]. Haznenin çözelti koyulabilir hacmini oluşturan kısım 50 mm çapa, 80 mm derinliğe sahiptir.



Şekil 3.1 : Deneylerin gerçekleştirilmesi için tasarlanan hazne ve kapağının üç boyutlu görüntüsü.

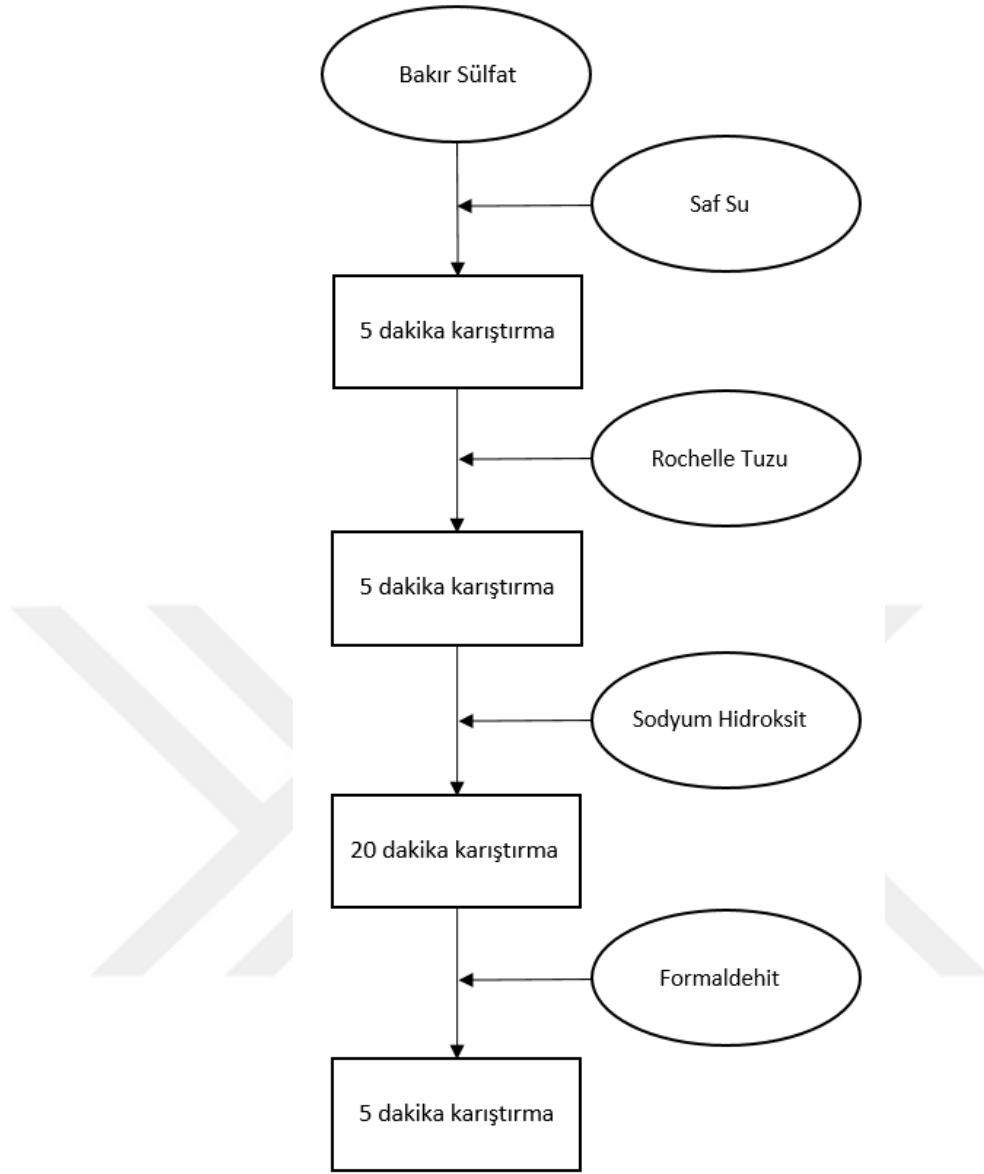
3.2 Silikon Altlıkların Hazırlanışı

Yüzeyin safsızlıklardan giderilmesi ve deney sonuçlarının etkilenmemesi adına silikon altlık yüzeyine temizlik prosedürü uygulanmıştır. Bu amaçla silikon altlık asetonla yıkanmıştır. Ardından etil alkolle tekrardan yıkanmıştır [55-56]. Sonrasında saf su ile durulanarak kullanılan kimyasalların banyo içerisinde yer alan kimyasallarla tepkimeye girip potasyum tuzları ve bakır sülfatın çökmesi engellenmek amaçlanmıştır.

3.3 Banyo Hazırlanışı

Çalışmada tek bir banyo kompozisyonu kullanılmıştır. Çalışmada kullanılacak banyo literatürde yer alan akımsız bakır kaplama banyolarından edinilen bilgilere göre kurgulanmıştır [53,57-64]. Banyo hazırlanışında molar oranlar esas alınmış ve her deney için 50 mililitrelik çözeltiler taze olarak hazırlanmıştır. Banyo kompozisyonu 0.05 M CuSO_4 , 0.1 M $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6$ (Rochelle tuzu), 1.25 M NaOH , 2 M CH_2O (formaldehit) ibarettir. Şekil 3.2’de banyonun hazırlanış aşamaları bir akış içerisinde verilmiştir. Her aşamada manyetik karıştırıcı ve balık yardımıyla belirtilen sürelerde karıştırılmış ve bileşenlerin tamamen çözünmesi gözlemlenmiştir.

Literatürde yer alan birçok akımsız bakır kaplama banyosunda bulunan EDTA yerine Rochelle tuzu seçimi, Rochelle tuzunun suda daha iyi çözünmesinden kaynaklanmaktadır [57]. NaOH ise banyo pH’ını 12.5 seviyesine getirip çözeltinin bazik olmasını sağlayarak bakırın birikmesini sağlamak amacıyla eklenmektedir. Çözeltiye NaOH eklendikten sonra pH kontrolleri yapılmıştır. Formaldehit ise bakırın kendiliğinden çökmesini ve banyo kompozisyonunun korunması amacıyla çalışmada kullanılacak 50 mililitrelik çözeltiye en son eklenmektedir. Şekil 3.3’te banyonun hazırlanış aşamalarına dair görüntüler verilmiştir. Çözeltilerin pH değerini belirlemek için hem turnusol kağıdı ile hem de dijital pH metre ile ölçüm yapılmıştır. Çözeltilerin pH değerleri 12.47-12.59 aralığında kalmıştır.



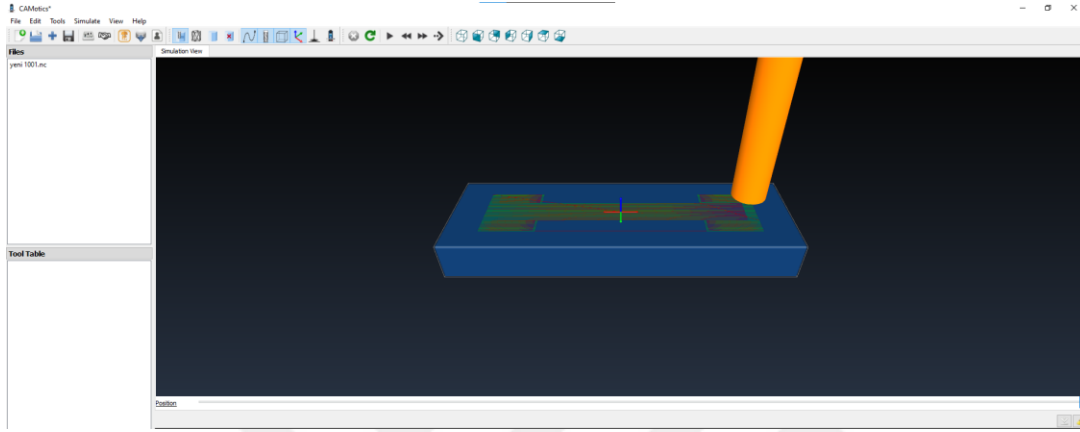
Şekil 3.2 : Banyo hazırlama aşamaları.



Şekil 3.3 : a) CuSO_4 + Saf Su karışımı, b) Rochelle tuzu eklenmesi, c) NaOH eklenmesi.

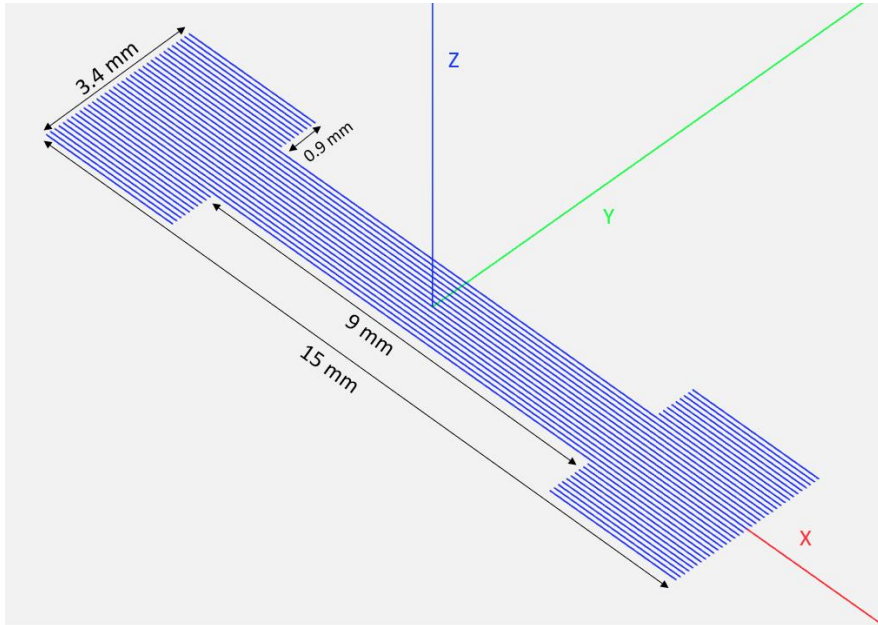
3.4 Desen Tasarımı

Lazerin tarayacağı alanın belirlenmesi için Şekil 3.4'te yer alan desen tasarlanmıştır. Tasarlanan desenin lazer tarafından silikon altlık yüzey üzerinde oluşturulabilmesi için bir .nc dosyası oluşturulmuştur. Oluşturulan .nc dosyası açık kaynak kodlu CAMotics programı ile simüle edilmiş ve doğru çalıştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.4 : Desenin simülasyonu.

Şekil 3.5'te görüleceği üzere desen tümüyle birbirine paralel çizgilerden oluşmaktadır. Başta ve sonda yer alan 3 mm'lik kulakçık kısımlarında kalınlığı 3.4 mm olmak üzere sonrasında daralarak 1.6 mm'ye düşmektedir. Desende yer alan çizgiler arası mesafe 0.1 mm'dir. Bu mesafe olabildiğince kısa tutularak lazer ışınlarının birbirine mümkün olduğunca yakın vurulması ve kaplamanın sürekliliği amaçlanmıştır.



Şekil 3.5 : Desen.

3.5 Lazer Parametreleri

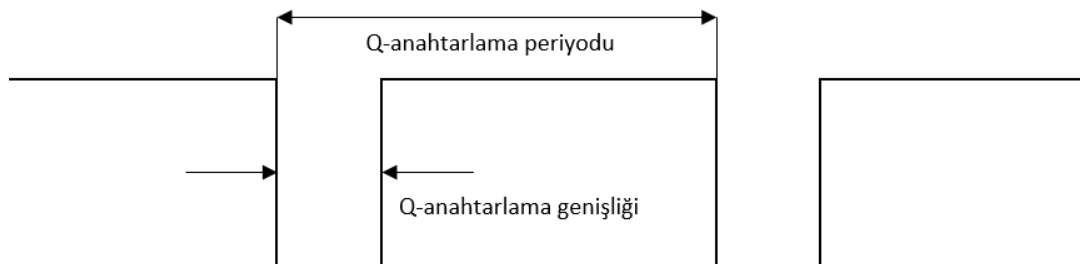
Deneyin temeli banyo içerisinde yer alan mekanik sınıf silikon altlığın lazer atışına tutulması ve tasarlanan desenin yüzeye uygulanmasına dayanmaktadır. Lazerin parametrelerinin belirlenmesi süreci lazerin modülasyon frekansı değerinden başlayarak ilerler. Modülasyon frekansı Q-anahtarlama parametrelerinin belirlenmesini sağlar. Q-anahtarlama atımlar arasındaki süreyi, lazerin pik ve ortalama güç değerlerinin belirlenmesini sağlayarak yüksek enerjili ve kısa süreli lazer atımların elde edilebilmesini sağlar.

3.5.1 Q-Anahtarlama periyodu (Q-Switch period)

Q-anahtarlama periyodu bir lazer sisteminde elde edilen atımların tekrarlama aralığını ifade etmektedir. Atımlar arasındaki süre olarak da adlandırılabilir. Q-anahtarlama periyodu, lazer modülasyon frekansının periyodunu ($1/\text{frekans}$) ayarlamak için kullanılır. Bu değer modülasyon frekansının çarpmaya göre tersi alınarak girildiğinde senkronize lazer atımları elde edilir. Bu değer sıfıra eşit olursa atım (pulse) değil, sürekli dalga (continuous wave-CW) elde edilir.

3.5.2 Q-Anahtarlama genişliği (Q-Switch width)

Q-anahtarlama genişliği lazerin aktif olduğu süreyi ifade eder. Bu süre içerisinde lazer yoğun atım üretir. Bu sürenin azalışı üretilen fotonları kısa bir zaman aralığında serbest bırakarak daha yüksek pik enerjileri elde edilmesini sağlarken, daha düşük ortalama enerji seviyesi elde edilmesine sebep olur. Bu sürenin artışıyla daha düşük pik enerjileri elde edilirken, daha yüksek ortalama enerjiler elde edilir. Q-anahtarlama genişliği üzerinde yapılacak değişiklikler atımlar arasındaki süreyi değiştirir. Şekil 3.6'da Q-anahtarlama periyodu ve Q-anahtarlama genişliği sinyali temsilen verilmiştir.



Şekil 3.6 : Q-anahtarlama komut sinyali.

Aşağıda yer alan Çizelge 3.1’de deneyler sırasında uygulanan Q-anahtarlama parametreleri görülmektedir. İlk 5 parametre için Q-anahtarlama genişliği, Q-anahtarlama periyoduna %80 karşılık gelen değere eşitlenerek pik enerjisi daha yüksek, ortalama enerjisi ise düşük atımlar elde edinmek istenmiştir. Diğer 5 parametrede ise Q-anahtarlama genişliği, Q-anahtarlama periyoduna eşit tutularak (%100) atımın periyot boyunca gerçekleşmesi ve daha düşük pik enerjileri ve daha yüksek ortalama enerji elde edinmek istenmiştir. Bu parametrenin bir uygulanış nedeni de yapılan ön deneylerde sürekli dalga (continuous wave-CW) parametrelerinde çalışıldığında kaplamayı sağlayacak yeterli enerjilerin aktarılamaması olmuştur. Atımlar arasında zamansal boşluk bırakılmayarak sürekli dalga benzeri bir atım elde edilmeye çalışılmıştır. Q-anahtarlama periyodunun azalması ile birim zamanda yapılan atış sayısı ilk parametreye oranlanarak Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 : Lazer parametre seti.

Numune Numarası	Modülasyon Frekansı (kHz)	Q-Anahtarlama Periyodu (μ s)	Q-Anahtarlama Genişliği (μ s)	Birim Atım Sayısı
1	2	500	400	1
2	3	333.3333333	266.6666667	1.5
3	4	250	200	2
4	5	200	160	2.5
5	8	125	100	4
6	2	500	500	1
7	3	333.3333333	333	1.5
8	4	250	250	2
9	5	200	200	2.5
10	8	125	125	4

3.6 Atış Tekrar Sayısı

Tüm parametreler için atışı yapılacak desenin tekrar sayısı 5, 10 ve 20 olacak şekilde deneyler tekrarlanmıştır. Böylelikle atış tekrar sayısının kaplama üzerindeki etkisi görülmek istenmiştir.

3.7 Banyo Süresi

Tüm parametreler ve atış tekrar sayıları için numunelerin banyoda kalma süresi 30 dakika ve 60 dakika olacak şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Böylelikle banyoda kalma süresinin kaplama üzerindeki etkileri görülmek istenmiştir.

3.8 Banyo Sonrası Numunelerin Temizliği

Banyodan çıkan silikon altlıkların çözeltiden temizlenmesi için öncelikle saf suyla 1 dakika boyunca yıkanmış ve ultrasonik temizleyicide 10 dakika bekletilmiştir. Ardından etil alkolle yıkanarak tüm yabancı maddelerin uzaklaşması amaçlanmıştır.



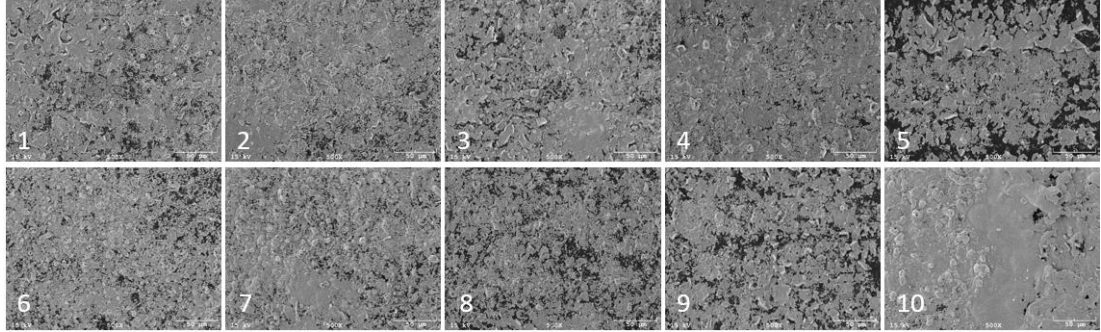


4. SONUÇLAR

4.1 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri

4.1.1 30 dakika banyoda kalan 5 atış tekrarlanan numuneler

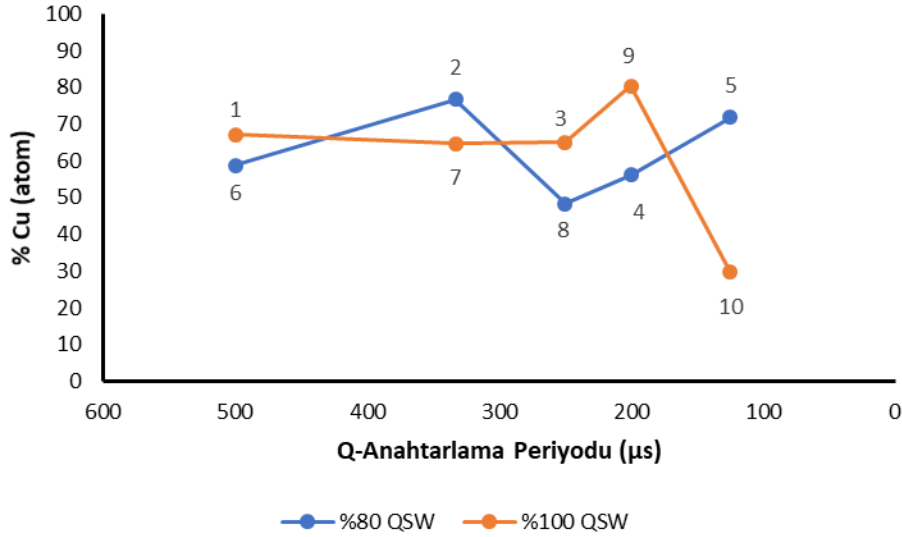
Tasarlanan desenin silisyum altlığı 5 kez atış yapılarak tekrarlandığı ve 30 dakika banyoda kalan numuneler Şekil 4.1’de görülmektedir. Tüm numunelerde silisyum altlık üzerine değişik morfolojilerde olmak kaydıyla bakırın kaplandığı görülmektedir. Morfolojik açıdan yüzeyde en sürekli ve tekdüze bakır biriken numune Şekil 4.1’deki 10 numaralı numunede görülmektedir. Süreksizliklerin en fazla olduğu ve tekdüze yapının en az gözlemlendiği numune ise Şekil 4.1 5’te yer almaktadır. Yüksek pik gücü-düşük ortalama güç ile düşük pik gücü-yüksek ortalama güç arasındaki fark en bariz bu iki numune arasında görülmektedir. 8 kHz lazer modülasyon frekansında çalışılan bu numunelerde yüksek pik gücü-düşük ortalama güç kombinasyonu morfolojik açıdan daha iyi sonuç vermiştir.



Şekil 4.1 : 30 dakika banyoda kalan 5 atış tekrarlanmış numuneler; 1) 2 kHz, QSP: 500 μ s, QSW: 400 μ s 2) 3 kHz, QSP: 333 μ s, QSW: 267 μ s 3) 4 kHz, QSP: 250 μ s, QSW: 200 μ s 4) 5 kHz, QSP: 200 μ s, QSW: 160 μ s 5) 8 kHz, QSP: 125 μ s, QSW: 100 μ s 6) 2 kHz, QSP: 500 μ s, QSW: 500 μ s 7) 3 kHz, QSP: 333 μ s, QSW: 333 μ s 8) 4 kHz, QSP: 250 μ s, QSW: 250 μ s 9) 5 kHz, QSP: 200 μ s, QSW: 200 μ s 10) 8 kHz, QSP: 125 μ s, QSW: 125 μ s.

Şekil 4.2’de yer alan grafikte 30 dakika banyoda kalan 5 atış tekrarlanmış numunelerin, Q-anahtarlama genişliğinin (QSW), Q-anahtarlama periyoduna (QSP) yüzdesel olarak tanımlanmış biçimde kimyasal kompozisyon değişimi verilmiştir. Bu kompozisyon bilgileri Şekil 4.1’de görüntüleri paylaşılan mikroyapı bölgeleri için

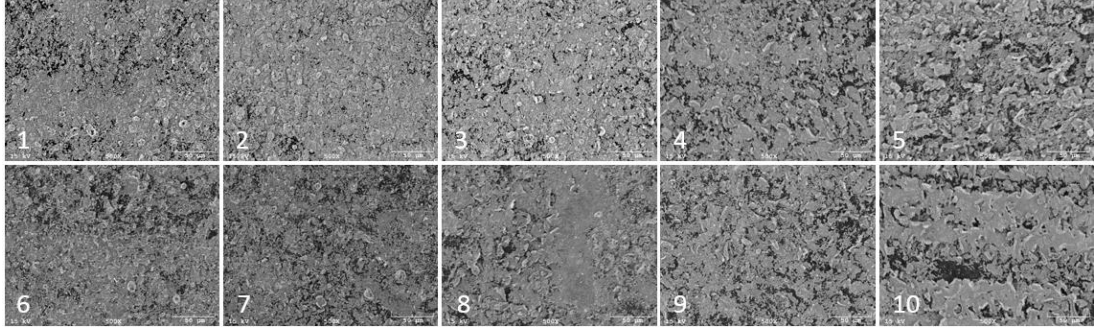
alınmıştır. Grafik incelendiğinde lazer parametrelerinin değişimine göre kaplamanın gerçekleştiği bölgedeki davranış oldukça karmaşıktır. Yer yer iki parametrenin de birbirinden iyi sonuç verdiği görülmektedir. Güç veya birim atım sayısının artışı düzenli bir eğilim göstermemektedir.



Şekil 4.2 : 30 dakika banyoda kalan 5 atış tekrarlanmış numunelerin kimyasal kompozisyonları.

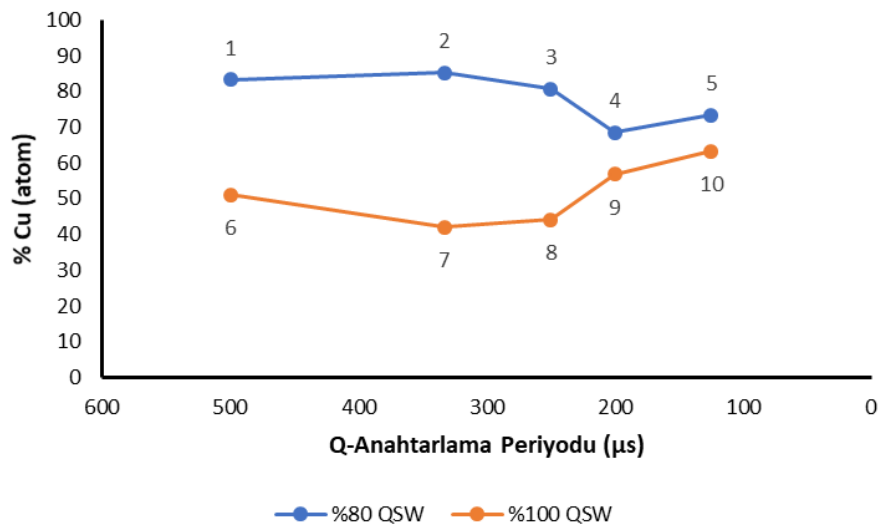
4.1.2 30 dakika banyoda kalan 10 atış tekrarlanan numuneler

Tasarlanan desenin silisyum altığa 10 kez atış yapılarak tekrarlandığı ve 30 dakika banyoda kalan numuneler Şekil 4.2’de görülmektedir. Tüm numunelerde silisyum altlık üzerine değişik morfolojilerde olmak kaydıyla bakırın kaplandığı görülmektedir. Bu parametre setinde artan atış sayısının kaplamalar arasındaki morfolojik farklılıkları azalttığı görülmektedir. Morfolojik açıdan yüzeyde en sürekli ve tekdüze bakır biriken numune Şekil 4.3’deki 3 ve 8 numunesinde görülmektedir. 4 kHz lazer modülasyon frekansında atış yapılan bu numunelerde, bu parametre seti için kaplama sürekliliği ve tekdüzeliği en üst seviyededir. Diğer parametreler arasında yapılacak kıyaslamada yüksek pik gücü-düşük ortalama güç çalışılan numunelerde yer alan 1 numunesinden 3 numunesine kadar olumlu etki göstermiştir. 3 numunesinden sonra birim atım sayısı olumsuz etki göstermiş ve kaplama morfolojisinde bozulmaların 5 numunesine kadar arttığı gözlemlenmiştir. Süreksizlikler artış göstermiş ve tekdüzelik azalmıştır. Düşük pik gücü-yüksek ortalama güç kombinasyonunda da benzer bir durum gözlemlenmektedir. 6 numunesinden 8 numunesine kadar morfolojide iyileşme söz konusudur. Ancak 8 numunesinden 10 numunesine gidişte sonuçlar tam tersini göstermektedir.



Şekil 4.3 : 30 dakika banyoda kalan 10 atış tekrarlanmış numuneler; 1) 2 kHz, QSP: 500 μ s, QSW: 400 μ s 2) 3 kHz, QSP: 333 μ s, QSW: 267 μ s 3) 4 kHz, QSP: 250 μ s, QSW: 200 μ s 4) 5 kHz, QSP: 200 μ s, QSW: 160 μ s 5) 8 kHz, QSP: 125 μ s, QSW: 100 μ s 6) 2 kHz, QSP: 500 μ s, QSW: 500 μ s 7) 3 kHz, QSP: 333 μ s, QSW: 333 μ s 8) 4 kHz, QSP: 250 μ s, QSW: 250 μ s 9) 5 kHz, QSP: 200 μ s, QSW: 200 μ s 10) 8 kHz, QSP: 125 μ s, QSW: 125 μ s.

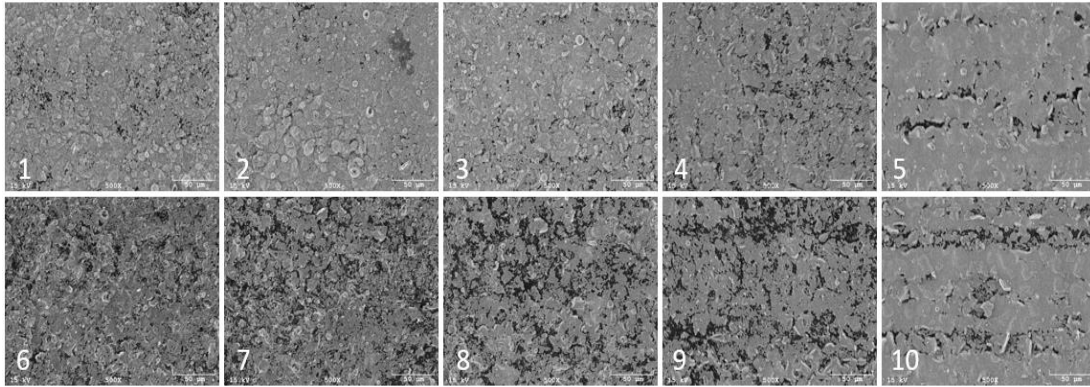
Şekil 4.4’de yer alan grafikte 30 dakika banyoda kalan 10 atış tekrarlanmış numunelerin, Q-anahtarlama genişliğinin (QSW), Q-anahtarlama periyoduna (QSP) yüzdesel olarak tanımlanmış biçimde kimyasal kompozisyon değişimi verilmiştir. Bu kompozisyon bilgileri Şekil 4.3’de görüntüleri paylaşılan mikroyapı bölgeleri için alınmıştır. Atışın 10 defa tekrarlanmasının kimyasal kompozisyona etkisi radikal bir biçimde gerçekleşmiştir. Grafik incelendiğinde lazer parametrelerinin değişimine göre kaplamanın %80 QSW ve %100 QSW için ayrıştığı görülmektedir. %80 QSW ile çalışılan tüm parametrelerde daha sürekli bir kaplama elde edilmiştir. Güç veya birim atım sayısının artışı iki güç parametresi için zıt etki göstermiştir. Güç ve birim atım sayısının artışı %80 QSW parametrelerinde 200 μ s sonrası önemli bir azalmaya yol açarken, %100 QSW parametrelerinde artış gözlenmektedir.



Şekil 4.4 : 30 dakika banyoda kalan 10 atış tekrarlanmış numunelerin kimyasal kompozisyonları.

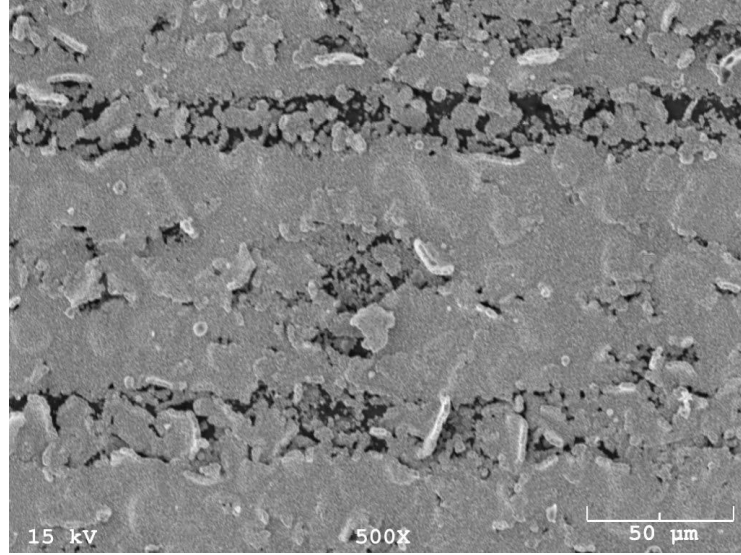
4.1.3 30 dakika banyoda kalan 20 atış tekrarlanan numuneler

Tasarlanan desenin silisyum altlığı 20 kez atış yapılarak tekrarlandığı ve 30 dakika banyoda kalan numuneler Şekil 4.5'te görülmektedir. Tüm numunelerde silisyum altlık üzerine değişik morfolojilerde olmak kaydıyla bakırın kaplandığı görülmektedir. Bu parametre setinde artan atış sayısı, yüksek pik gücü-düşük ortalama güç ile düşük pik gücü-yüksek ortalama güç etkilerinin morfolojiye etkileri farkını artırmıştır. Yüksek pik gücü-düşük ortalama güç parametreleri ile çalışılan Şekil 4.5 1-5 numuneleri kaplamanın sürekliliği açısından daha başarılı olmuştur. Düşük pik gücü-yüksek ortalama güç kombinasyonunda yer alan 6-10 numuneleri süreksizlik göstermekte ve birim atım sayısı ile anlamlı bir değişim gözlemlenmemektedir.



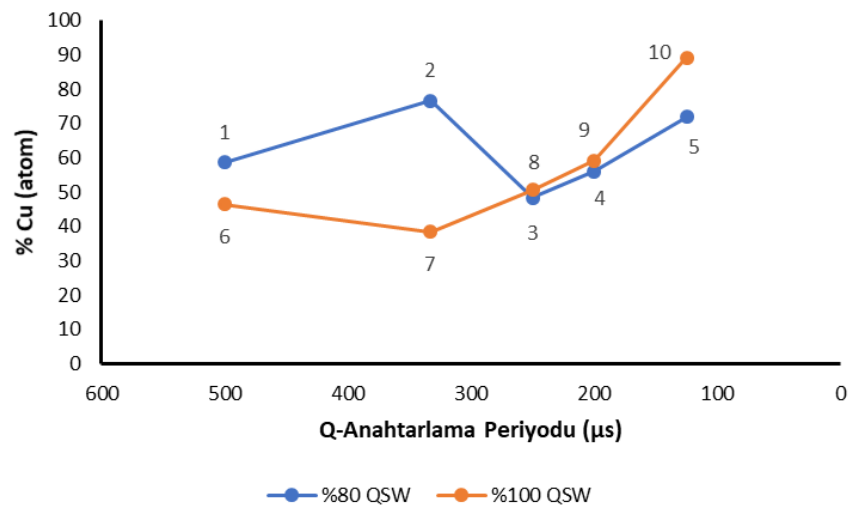
Şekil 4.5 : 30 dakika banyoda kalan 20 atış tekrarlanmış numuneler; 1) 2 kHz, QSP: 500 μ s, QSW: 400 μ s 2) 3 kHz, QSP: 333 μ s, QSW: 267 μ s 3) 4 kHz, QSP: 250 μ s, QSW: 200 μ s 4) 5 kHz, QSP: 200 μ s, QSW: 160 μ s 5) 8 kHz, QSP: 125 μ s, QSW: 100 μ s 6) 2 kHz, QSP: 500 μ s, QSW: 500 μ s 7) 3 kHz, QSP: 333 μ s, QSW: 333 μ s 8) 4 kHz, QSP: 250 μ s, QSW: 250 μ s 9) 5 kHz, QSP: 200 μ s, QSW: 200 μ s 10) 8 kHz, QSP: 125 μ s, QSW: 125 μ s.

Yalnızca Şekil 4.6'da yer alan birim atım sayısının en yüksek olduğu numunede kaplama morfolojisinin iyileştiği gözlemlenmektedir. Bu numunede lazerin ışınının atış yaptığı çizgilerin üzerinde kaplama süreksizliği görülmüştür. Çizgilerin arasında yer alan bölgeye ise bakırın kaplandığı görülmektedir.



Şekil 4.6 : 8 kHz, QSP: 125 μ s, QSW: 100 μ s parametrelili numune.

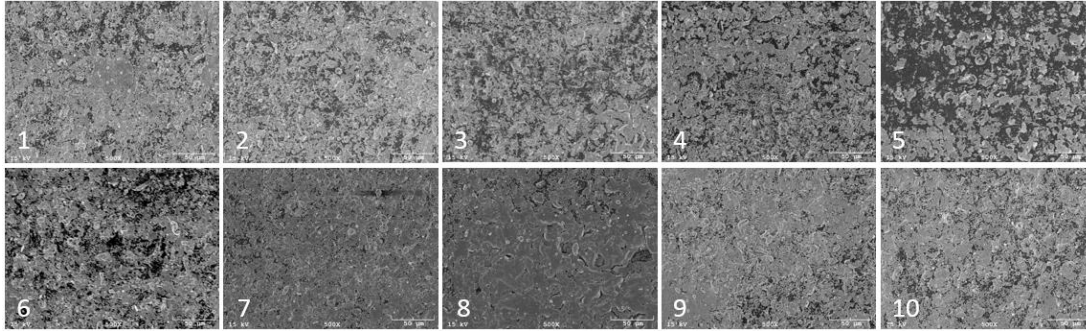
Şekil 4.7’de yer alan grafikte 30 dakika banyoda kalan 20 atış tekrarlanmış numunelerin, Q-anahtarlama genişliğinin (QSW), Q-anahtarlama periyoduna (QSP) yüzdesel olarak tanımlanmış biçimde kimyasal kompozisyon değişimi verilmiştir. Bu kompozisyon bilgileri Şekil 4.5’de görüntüleri paylaşılan mikroyapı bölgeleri için alınmıştır. Atışın 20 defa tekrarlanmasının kimyasal kompozisyona etkisi karmaşıktır. Grafik incelendiğinde lazer parametrelerinin değişimine göre kaplamanın %100 QSW için 500 μ s değeri haricinde düzenli bir artış eğilimine girdiği söylenebilir. %80 QSW ile çalışılan tüm parametrelerde düzenli bir artış veya azalış söz konusu değildir. Güç ve birim atım sayısının artışı iki güç parametresi için zıt etki göstermiştir. Güç ve birim atım sayısının maksimum olduğu 100 μ s için %100 QSW en büyük değerine, %80 QSW ise en büyük ikinci değerine ulaşmıştır.



Şekil 4.7 : 30 dakika banyoda kalan 20 atış tekrarlanmış numunelerin kimyasal kompozisyonları.

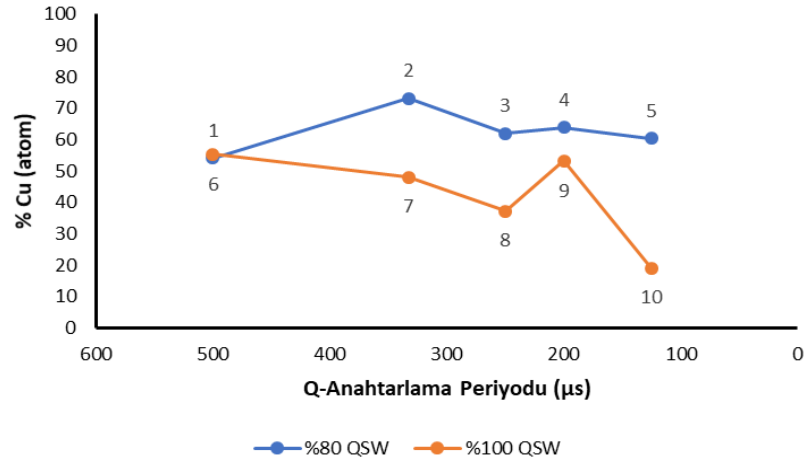
4.1.4 60 dakika banyoda kalan 5 atış tekrarlanan numuneler

Tasarlanan desenin silisyum altlığı 5 kez atış yapılarak tekrarlandığı ve 60 dakika banyoda kalan numuneler Şekil 4.8'te görülmektedir. Tüm numunelerde silisyum altlık üzerine değişik morfolojilerde olmak kaydıyla bakırın kaplandığı görülmektedir. Bu parametre setinde 1 ve 5 numuneleri arasında yer alan yüksek pik gücü-düşük ortalama güç kombinasyonu artan birim atım sayısı ile olumsuz morfolojik sonuçlar elde etmiştir. Birim atım sayısı arttıkça kaplamanın süreksizliği artmıştır. 6 ve 7 numuneleri arasında yer alan düşük pik gücü-yüksek ortalama güç kombinasyonunda ise birim atım sayısı ile 8 numunesine kadar olumlu, sonrasında ise olumsuz sonuç göstermiştir. Ancak 9 ve 10 numunelerinde görülen kaplama sürekliliği 6 numunesinden iyi durumdadır.



Şekil 4.8 : 60 dakika banyoda kalan 5 atış tekrarlanmış numuneler; 1) 2 kHz, QSP: 500 μ s, QSW: 400 μ s 2) 3 kHz, QSP: 333 μ s, QSW: 267 μ s 3) 4 kHz, QSP: 250 μ s, QSW: 200 μ s 4) 5 kHz, QSP: 200 μ s, QSW: 160 μ s 5) 8 kHz, QSP: 125 μ s, QSW: 100 μ s 6) 2 kHz, QSP: 500 μ s, QSW: 500 μ s 7) 3 kHz, QSP: 333 μ s, QSW: 333 μ s 8) 4 kHz, QSP: 250 μ s, QSW: 250 μ s 9) 5 kHz, QSP: 200 μ s, QSW: 200 μ s 10) 8 kHz, QSP: 125 μ s, QSW: 125 μ s.

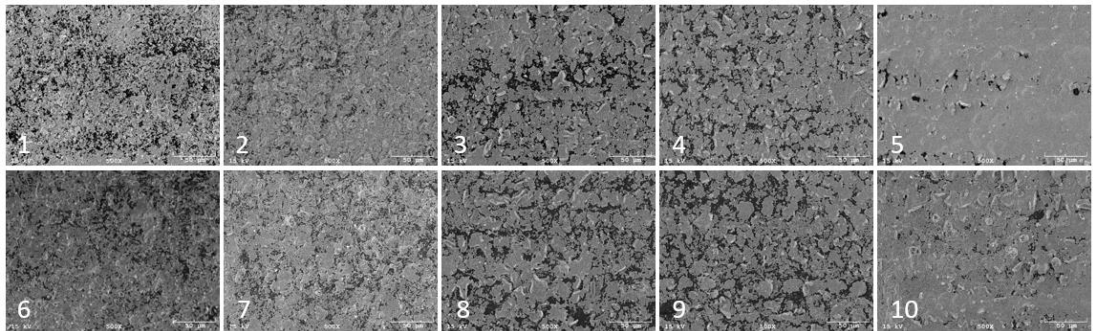
Şekil 4.9'da yer alan grafikte 60 dakika banyoda kalan 5 atış tekrarlanmış numunelerin, Q-anahtarlama genişliğinin (QSW), Q-anahtarlama periyoduna (QSP) yüzdesel olarak tanımlanmış biçimde kimyasal kompozisyon değişimi verilmiştir. Bu kompozisyon bilgileri Şekil 4.8'de görüntüleri paylaşılan mikroyapı bölgeleri için alınmıştır. Banyoda kalma süresinin kimyasal kompozisyona etkisi iki güç parametresinin sonuçlarındaki ayrışımından görülmektedir. Grafik incelendiğinde lazer parametrelerinin değişimine göre kaplamanın 500 μ s değeri için yaklaşık sonuçlar verdiği görülmektedir. Ancak artan güç ve birim atış sayısı ile %80 QSW parametreleri artan bir eğilime, %100 QSW parametreleri ise azalan bir eğilime girmiş ancak bunu sürdürememişlerdir. Çalışılan tüm parametrelerde düzenli bir artış veya azalış söz konusu değildir.



Şekil 4.9 : 60 dakika banyoda kalan 5 atış tekrarlanmış numunelerin kimyasal kompozisyonları.

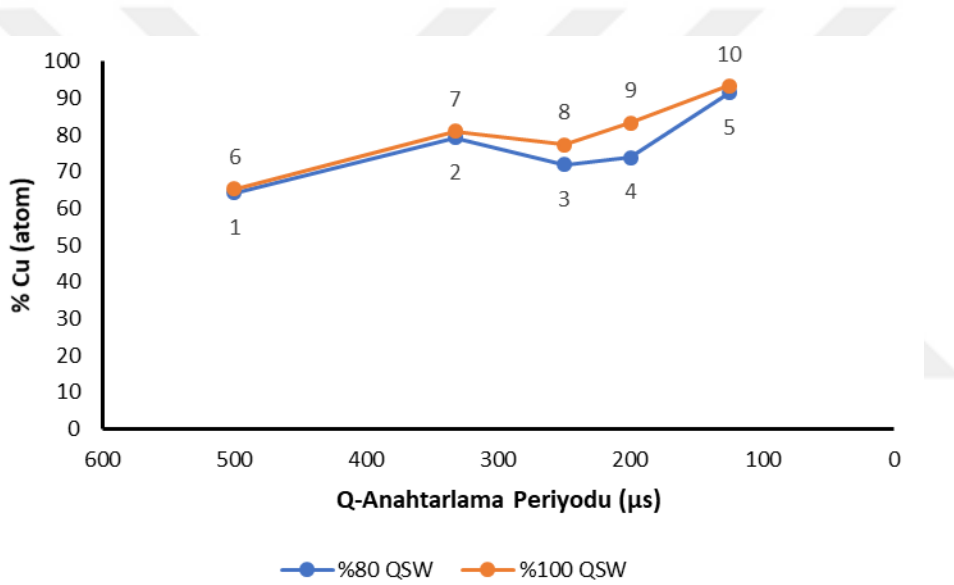
4.1.5 60 dakika banyoda kalan 10 atış tekrarlanan numuneler

Tasarlanan desenin silisyum altlığı 10 kez atış yapılarak tekrarlandığı ve 60 dakika banyoda kalan numuneler Şekil 4.10'da görülmektedir. Tüm numunelerde silisyum altlık üzerine değişik morfolojilerde olmak kaydıyla bakırın kaplandığı görülmektedir. Bu parametre setinde artan birim atım sayısının her iki güç parametresi için de benzer etkileri gözlenmektedir. Maksimum birim atım sayısına sahip olan 5 ve 10 numuneleri kaplamaların süreksizliği ve morfolojileri açısından en iyi durumdadır. Genel olarak bakıldığında yüksek pik gücü-düşük ortalama güç kombinasyonu, düşük pik gücü-yüksek ortalama güç kombinasyonuna göre kaplama sürekliliği ve tekdüzeliği açısından daha iyi sonuç göstermiştir. Her iki güç kombinasyonunda da ikinci sırada yer alan numuneler (2 ve 7), 5 ve 10 numunelerinden sonra en iyi sürekliliğe sahip numunelerdir.



Şekil 4.10 : 60 dakika banyoda kalan 10 atış tekrarlanmış numuneler; 1) 2 kHz, QSP: 500 μs, QSW: 400 μs 2) 3 kHz, QSP: 333 μs, QSW: 267 μs 3) 4 kHz, QSP: 250 μs, QSW: 200 μs 4) 5 kHz, QSP: 200 μs, QSW: 160 μs 5) 8 kHz, QSP: 125 μs, QSW: 100 μs 6) 2 kHz, QSP: 500 μs, QSW: 500 μs 7) 3 kHz, QSP: 333 μs, QSW: 333 μs 8) 4 kHz, QSP: 250 μs, QSW: 250 μs 9) 5 kHz, QSP: 200 μs, QSW: 200 μs 10) 8 kHz, QSP: 125 μs, QSW: 125 μs.

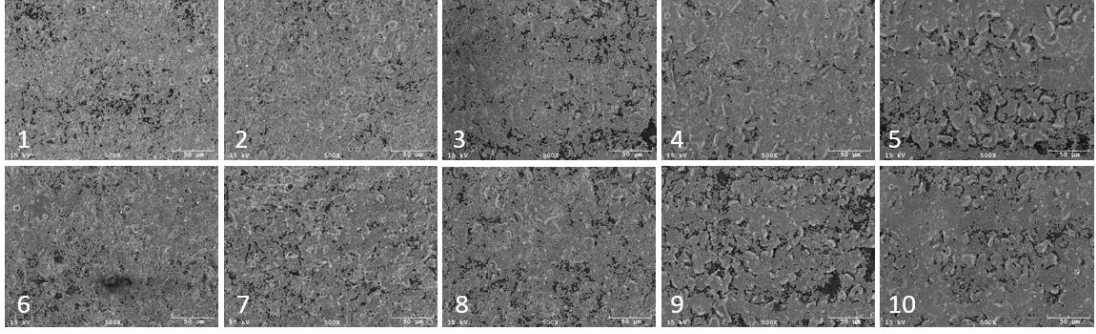
Şekil 4.11’de yer alan grafikte 60 dakika banyoda kalan 10 atış tekrarlanmış numunelerin, Q-anahtarlama genişliğinin (QSW), Q-anahtarlama periyoduna (QSP) yüzdesel olarak tanımlanmış biçimde kimyasal kompozisyon değişimi verilmiştir. Bu kompozisyon bilgileri Şekil 4.10’da görüntüleri paylaşılan mikroyapı bölgeleri için alınmıştır. Banyoda kalma süresinin ve atış tekrarının artışı kaplama davranışına etkisi net bir şekilde görülmektedir. Artan güç ve birim atım sayısı, her iki güç parametresi için de kaplamanın sürekliliğini 333 μ s değerine kadar artırmış ve ardından 200 μ s değerine kadar platoya girmiştir. 200 μ s değerinden sonra artış sürmüştür ve süreklilik artmıştır. Ara değerlerde ufak farklılıklar gözükse de minimum ve maksimum QPS değerlerinde her iki güç parametresi için de elde edilen sonuçlar birbirine oldukça yakındır.



Şekil 4.11 : 60 dakika banyoda kalan 10 atış tekrarlanmış numunelerin kimyasal kompozisyonları.

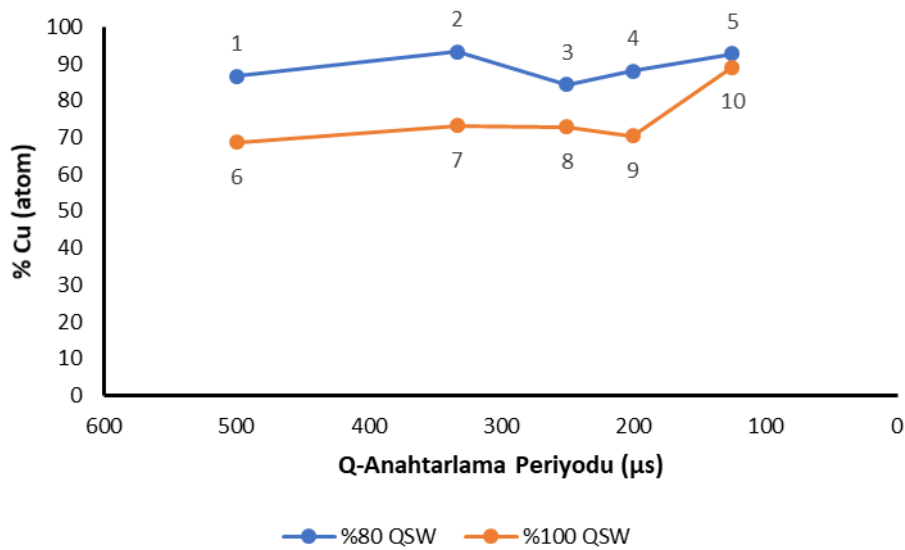
4.1.6 60 dakika banyoda kalan 20 atış tekrarlanan numuneler

Tasarlanan desenin silisyum altlığa 20 kez atış yapılarak tekrarlandığı ve 60 dakika banyoda kalan numuneler Şekil 4.12’de görülmektedir. Tüm numunelerde silisyum altlık üzerine benzer morfolojilerde bakırın kaplandığı görülmektedir. Bu parametre setinde numuneler arasındaki farklılıklar oldukça azalmıştır. Yüksek pik gücü-düşük ortalama güç kombinasyonunda yer alan 2 ve 4 numunelerinin diğer numunelerden daha olumlu sonuçlar verdiği söylenebilir. Düşük pik gücü-yüksek ortalama güç kombinasyonunda ise 6 ve 10 numunelerinin daha iyi sonuç verdiği söylenebilir. Birim atım sayısının, atış sayısı ve banyo süresi arttıkça etkisinin gözlemlenmesinin zorlaştığı söylenebilir.



Şekil 4.12 : 60 dakika banyoda kalan 20 atış tekrarlanmış numuneler; 1) 2 kHz, QSP: 500 μ s, QSW: 400 μ s 2) 3 kHz, QSP: 333 μ s, QSW: 267 μ s 3) 4 kHz, QSP: 250 μ s, QSW: 200 μ s 4) 5 kHz, QSP: 200 μ s, QSW: 160 μ s 5) 8 kHz, QSP: 125 μ s, QSW: 100 μ s 6) 2 kHz, QSP: 500 μ s, QSW: 500 μ s 7) 3 kHz, QSP: 333 μ s, QSW: 333 μ s 8) 4 kHz, QSP: 250 μ s, QSW: 250 μ s 9) 5 kHz, QSP: 200 μ s, QSW: 200 μ s 10) 8 kHz, QSP: 125 μ s, QSW: 125 μ s.

Şekil 4.13’de yer alan grafikte 60 dakika banyoda kalan 20 atış tekrarlanmış numunelerin, Q-anahtarlama genişliğinin (QSW), Q-anahtarlama periyoduna (QSP) yüzdesel olarak tanımlanmış biçimde kimyasal kompozisyon değişimi verilmiştir. Bu kompozisyon bilgileri Şekil 4.12’de görüntüleri paylaşılan mikroyapı bölgeleri için alınmıştır. Atış tekrarının artışı kaplama davranışında iki güç parametresi arasında bir fark oluşturmuştur. Her iki güç parametresinde de kaplamanın sürekliliği artmıştır. Ancak %80 QSW özellikle düşük güç ve birim atım sayısı parametrelerinde radikal bir artış elde etmiştir. %80 QSW parametreleri artan QSP değeri ile iyileşme göstermiş ve maksimum değer olan 100 μ s değerinde en iyi sonucu vermiştir. Bu sonuçlar göz önünde bulundurularak bu deney seti en iyilenmiş deney seti olarak değerlendirilebilir.

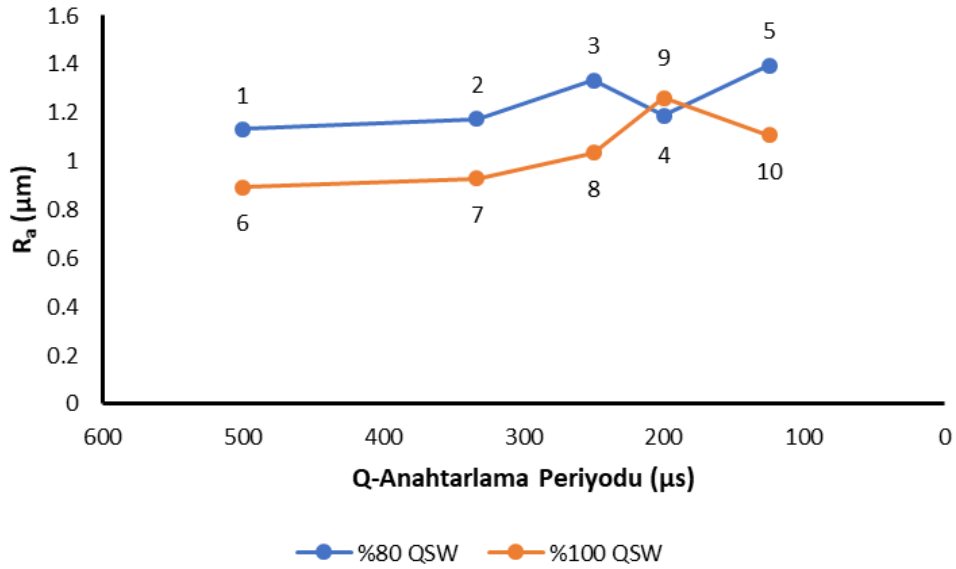


Şekil 4.13 : 60 dakika banyoda kalan 20 atış tekrarlanmış numunelerin kimyasal kompozisyonları.

4.2 İğneli Profilometre Analizleri

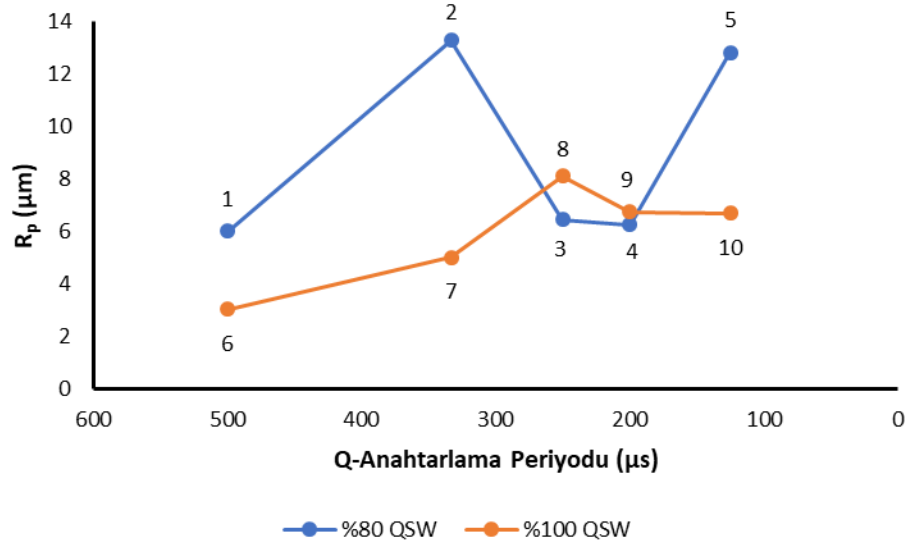
Bu kısımda iğneli profilometre analizleri verilmektedir. Analizler yalnızca 60 dakika banyoda kalan 20 atış tekrarlanan en iyilenmiş set için yapılmıştır. Analizler numunelerin üzerindeki lazer desenin ortasından y yönünde alınmıştır. Kaplamanın yüzey pürüzlülüğünün anlamlandırılabilmesi için ortalama pürüzlülük, tepelerin pürüzlülüğü ve tepe değerleri paylaşılmıştır.

Şekil 4.14’de ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri (R_a) görülmektedir. R_a değerleri incelendiğinde numuneler arasında büyük farklılıklar görülmemektedir. %80 QSW güç parametresinde 200 μs QSP değeri haricinde R_a artan güç ve birim atım sayısı ile artmıştır. %100 QSW güç parametresinde ise artış 200 μs QSP değerine kadar devam etmiş ama sonrasında düşüş göstermiştir.



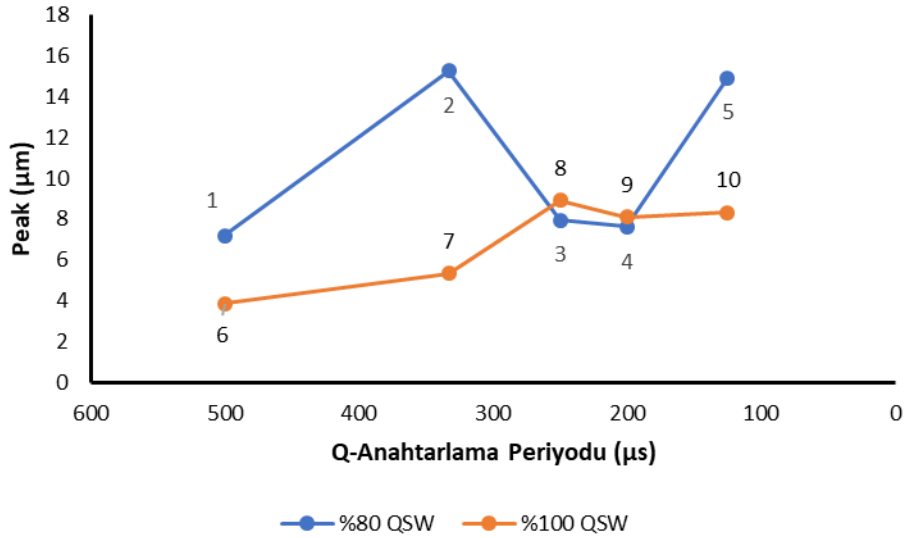
Şekil 4.14 : Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri.

Şekil 4.15’te tepelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_p) değeri verilmiştir. Burada iki güç parametresi arasında belirli farklılıklar görülmektedir. %80 QSW parametrelerinde çok yüksek R_p değerleri görülebilmektedir. Artan güç ve birim atım sayısı ile arasında düzenli bir eğilim görülmemektedir. Maksimum R_p değerlerine %80 QSW parametrelerinde 333 ve 125 μs noktalarında ulaşılmıştır.



Şekil 4.15 : Tepelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_p) değerleri.

Şekil 4.16’da tepelerin (Peak) değeri verilmiştir. Bu değer altlık üzerinde kaplamanın ne kadar yükseldiği konusunda fikir vermektedir. Ancak lazer ışınlarının altlık yüzeyini deforme ederek kopardığı malzemeler sebebiyle tam olarak kaplama kalınlığı olarak ifade edilemez. Burada iki güç parametresinde de R_p değerlerine benzer bir davranış görülmektedir. Maksimum tepe yüksekliği değerlerine %80 QSW parametrelerinde 333 ve 125 μs noktalarında ulaşılmıştır.



Şekil 4.16 : Tepelerin yüksekliği (Peak) değerleri.

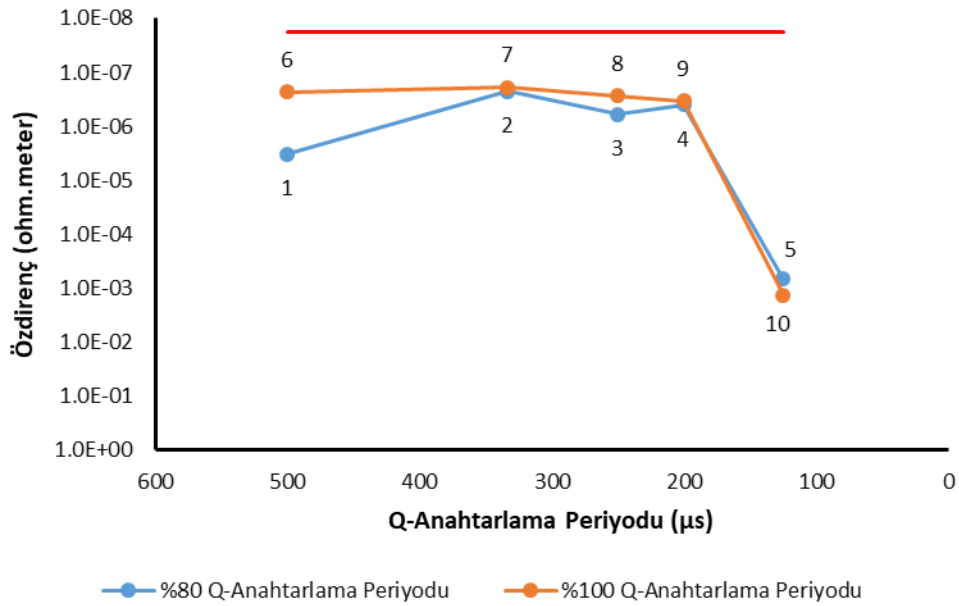
4.3 Dört Noktalı Prob Cihazı (Four Point Probe) Ölçülen Özdirençler

Literatürden edinilen bilgiye göre elektrik iletkenliğinin önemli olduğu uygulamalarda kullanılan bakır alaşımlarının özdirenci 1.72×10^{-8} ohm.metre olduğu görülmüştür [65].

Üretilen numunelerin öz direnç değerleri ile yapılan karşılaştırmalarda bu değer referans alınmıştır. Bu alt başlıkta yer alan tüm grafiklerde bakırın öz direnci kırmızı bir çizgi ile işaretlenip temsil edilmiştir. 60 dakika banyoda kalan 20 atış tekrarlanan set haricinde, kaplama kalınlıklarını doğru olarak ölçmek zor olduğundan yalnızca bu setin öz dirençleri kaplama kalınlıklarına göre hesaplanmıştır. Bu set dışındaki banyoda kalma süresi ve tekrarlanan atış sayısı parametrelerinde kaplama kalınlığı 1 μm olarak kabul edilerek hesaplama yapılmıştır.

4.3.1 30 dakika banyoda kalan 5 atış yapılan numuneler

5 kez atış yapılan ve 30 dakika banyoda kalan numunelerin öz dirençleri Şekil 4.17’de yer almaktadır. İki güç parametresinde de benzer bir davranış görülmektedir. Banyo süresinin ve yapılan atış sayısının az oluşunun etkileri öz direnç değerlerinde görülmektedir. Referans öz direnç seviyesinden bir hayli uzakta olduğundan kaplama kalınlığının 1 μm kabul edilmesi sonuçları fazla değiştirmeyecektir.

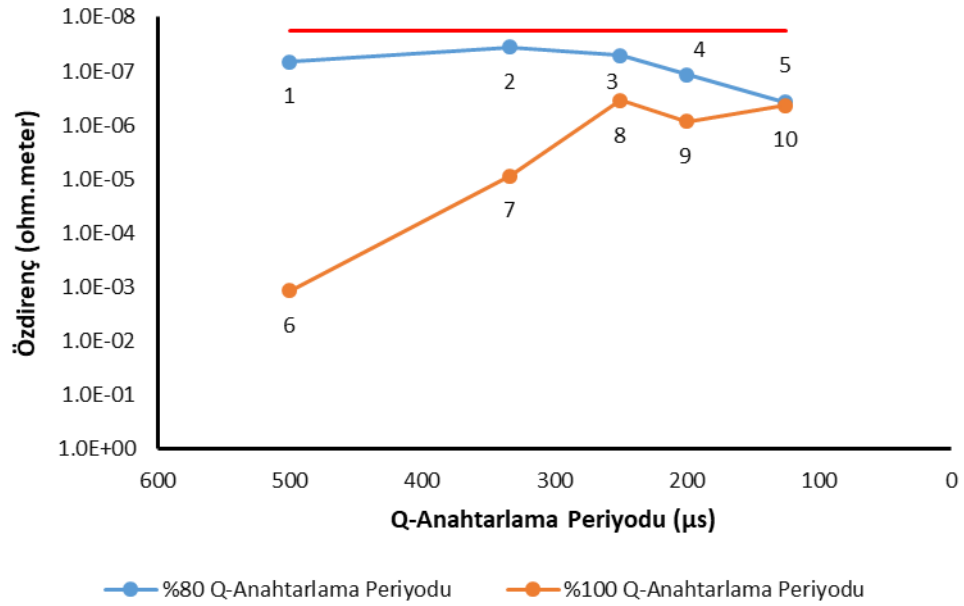


Şekil 4.17 : 30 dakika banyoda kalan 5 atış yapılan numunelerin öz dirençleri.

4.3.2 30 dakika banyoda kalan 10 atış yapılan numuneler

10 kez atış yapılan ve 30 dakika banyoda kalan numunelerin öz dirençleri Şekil 4.18’de yer almaktadır. İlk kez, %80 QSP parametrelerinde referans değerle aradaki öz direnç farkı 10 kattan aza düşürülebilmıştır. Bu değer 250 μs QSP’de 2 katından biraz fazla elde edildikten sonra öz direnç seviyelerinde bir artış görülmektedir. %100 QSP

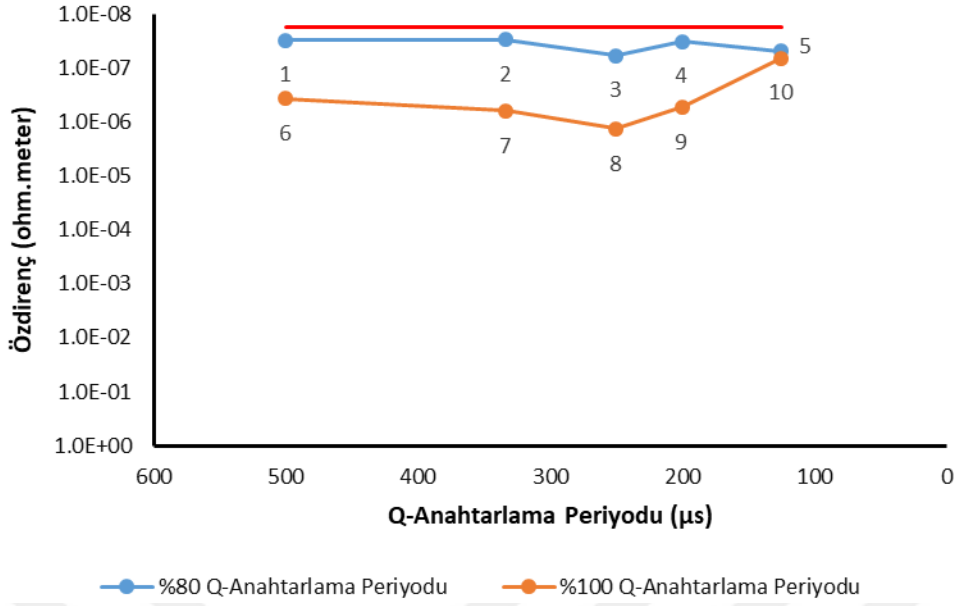
parametreleri genellikle artış göstermiştir ancak maksimum güç ve birim atım sayısında aynı değerler yakalanabilmiştir.



Şekil 4.18 : 30 dakika banyoda kalan 10 atış yapılan numunelerin öz dirençleri.

4.3.3 30 dakika banyoda kalan 20 atış yapılan numuneler

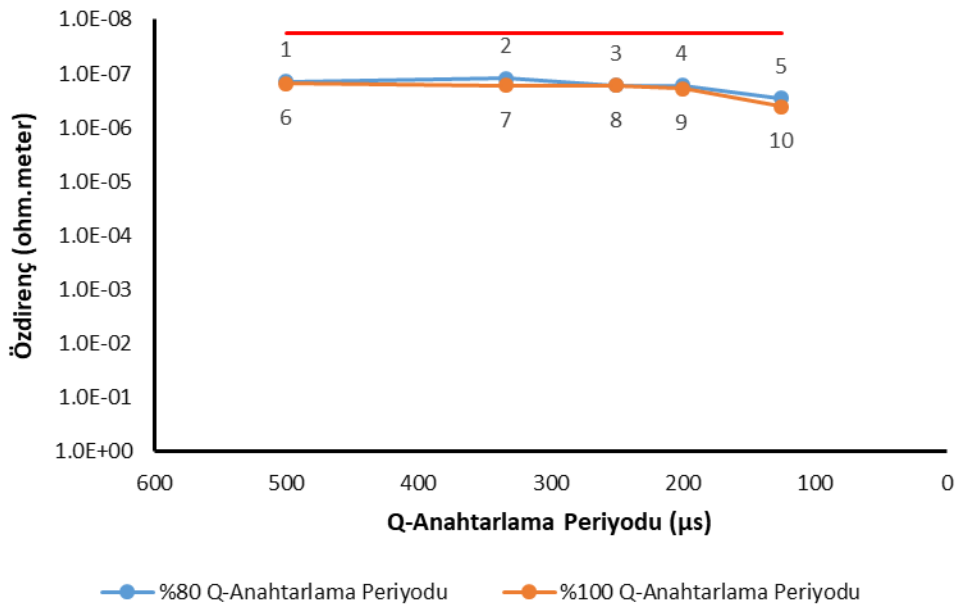
20 kez atış yapılan ve 30 dakika banyoda kalan numunelerin öz dirençleri Şekil 4.19'da yer almaktadır. Yapılan tekrarlı atışların etkisi görülmektedir. Her parametrede belirli bir standart öz direnç değeri yaklanmıştır. %80 QSP parametrelerinde elde edilen değerler referans değere oldukça yaklaşmıştır ve bunu koruyan bir davranış sergilemektedir. %100 QSP ile aradaki fark 10-20 kat farklılık göstermektedir. Maksimum güç ve birim atım sayısında %80 QSP değeri yakalanabilmiştir.



Şekil 4.19 : 30 dakika banyoda kalan 20 atış yapılan numunelerin öz dirençleri.

4.3.4 60 dakika banyoda kalan 5 atış yapılan numuneler

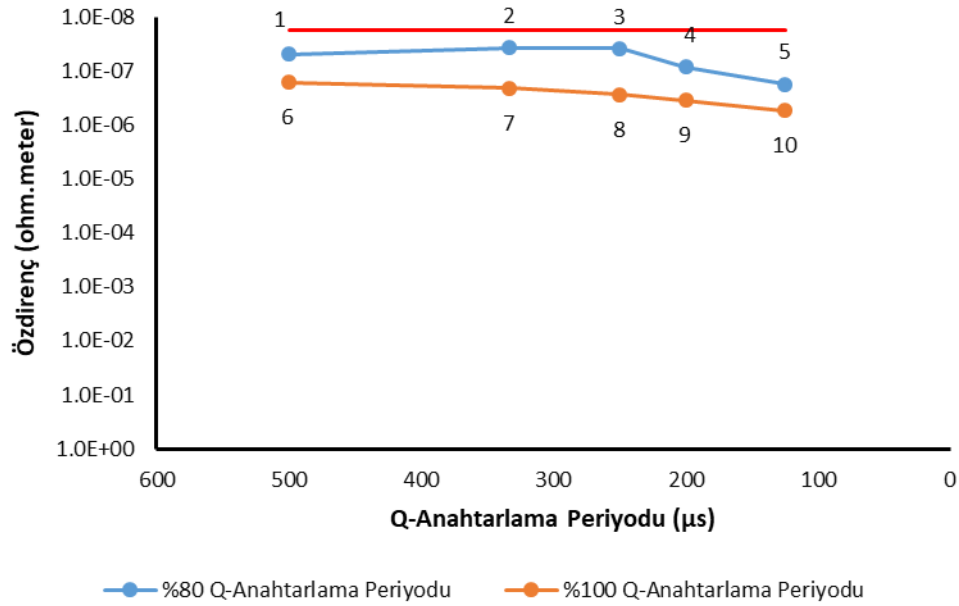
5 kez atış yapılan ve 60 dakika banyoda kalan numunelerin öz dirençleri Şekil 4.20’de yer almaktadır. Her iki güç parametresinde de benzer bir davranış görülmektedir. Birbirlerine oldukça yakın değerler elde edilmiştir. Öz direnç değerlerinde radikal bir artış veya azalış söz konusu değildir. Artan güç ve birim atım sayısı ile birlikte öz direnç değerlerinde hafif bir artış görülmektedir. Banyo süresinin artışı standart bir öz direnç değerinin elde edilmesini sağlamıştır. Referans değer ile arada yaklaşık 10 kat fark bulunmaktadır.



Şekil 4.20 : 60 dakika banyoda kalan 5 atış yapılan numunelerin öz dirençleri.

4.3.5 60 dakika banyoda kalan 10 atış yapılan numuneler

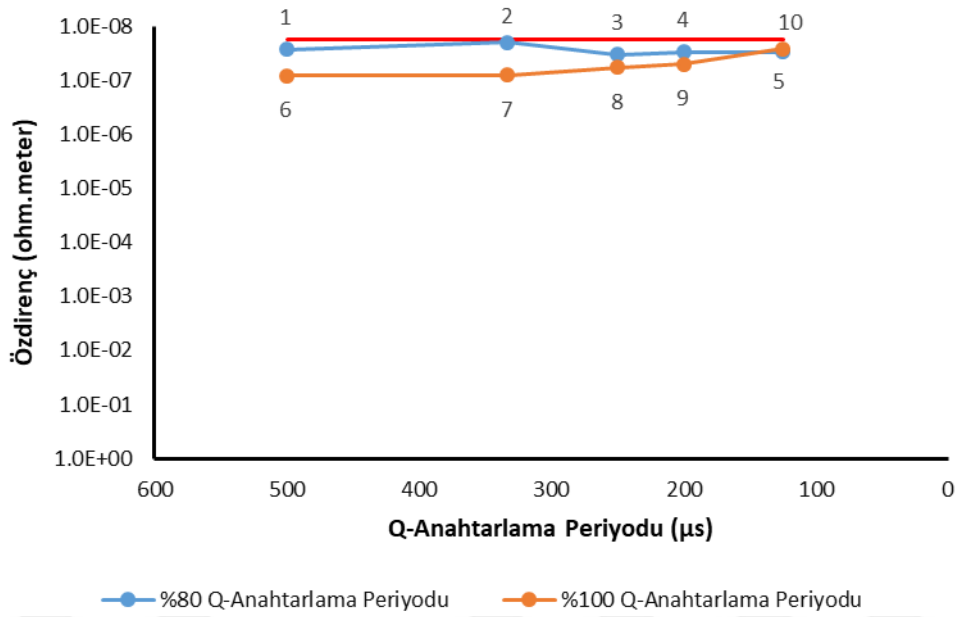
10 kez atış yapılan ve 60 dakika banyoda kalan numunelerin öz dirençleri Şekil 4.21’de yer almaktadır. Artan atış tekrarının etkisi %80 QSP parametrelerinin öz direnç seviyelerinde bir azalış olarak görülmektedir. Bu güç parametresinde referans değeri aradaki fark 10 kattan aza düşürülebilmektedir.



Şekil 4.21 : 60 dakika banyoda kalan 10 atış yapılan numunelerin öz dirençleri.

4.3.6 60 dakika banyoda kalan 20 atış yapılan numuneler

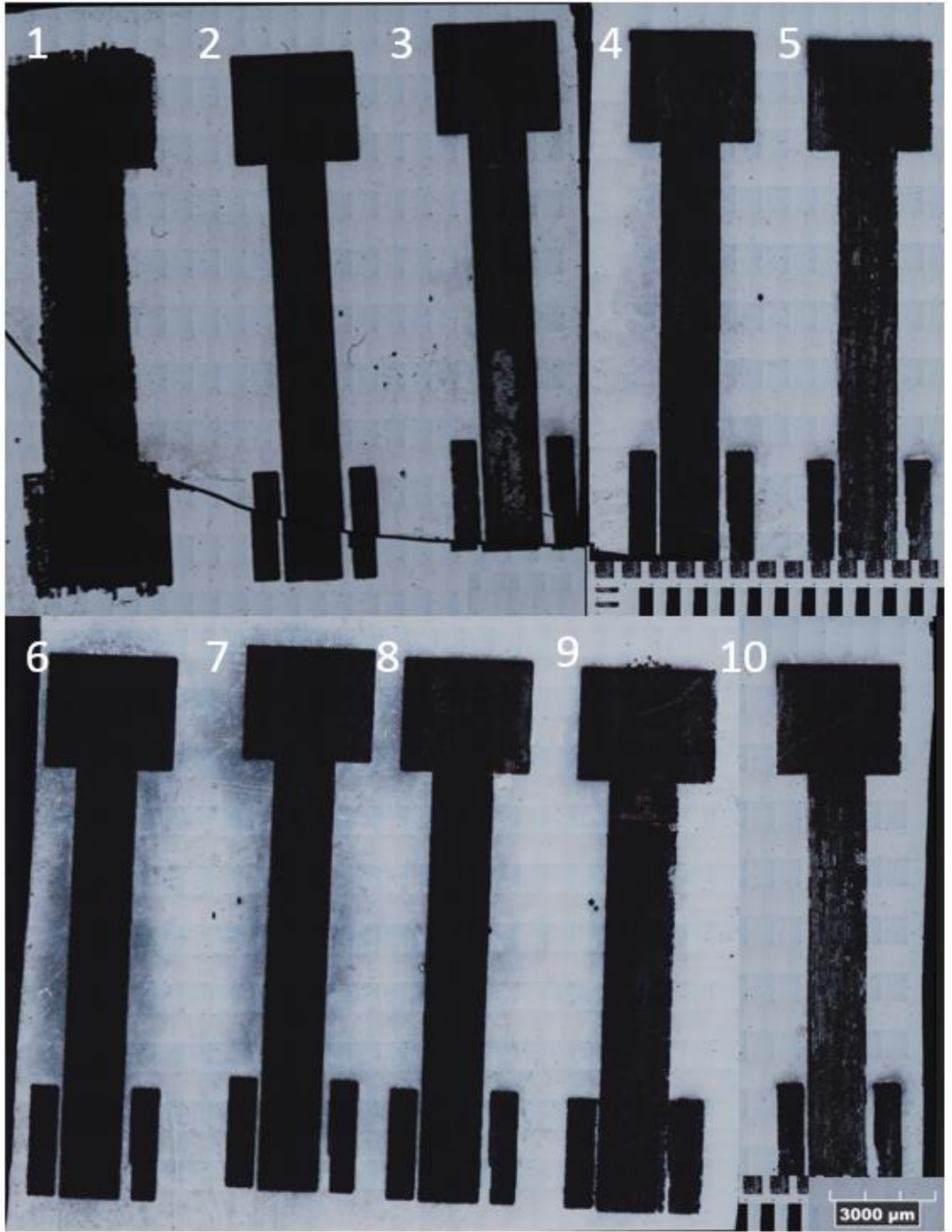
20 kez atış yapılan ve 60 dakika banyoda kalan numunelerin öz dirençleri Şekil 4.22’de yer almaktadır. Öz direnç konusunda en başarılı sonucu bu parametre seti vermiştir. Tüm numunelerin literatür verisiyle farkı 10 kattan azdır. Bu setteki tüm değerler neredeyse diğer tüm setlerin en düşük öz dirence sahip parametrelerinden daha düşük öz dirence sahiptir. %80 QSP parametreleri oldukça iyi sonuç vermiş ve hatta en düşük öz direnç değeri olan 2.10^{-8} ohm.metre değeri 333 µs noktasında elde edilmiştir. Referans değeri aradaki fark %13’ten azdır. Artan güç ve birim atım sayısı öz direnç üzerinde radikal değişikliklere sebep olmamıştır ancak %100 QSP parametrelerinde bir iyileşme görülmektedir.



Şekil 4.22 : 60 dakika banyoda kalan 20 atış yapılan numunelerin özdirençleri.

4.4 Optik Mikroskop Analizi

En iyilenmiş set olarak kabul edilen banyoda 60 dakika kalan 20 atış tekrarlanan numuneler Şekil 4.23'te görülmektedir. Numunelerin görüntüsü 1000 büyütmede alınmıştır. Lazer ile vurulan alanların tamamen kaplandığı görülmektedir. 6 ve 7 numunelerinde lazer ile vurulan alanların etrafında bir kaplanma da görülmektedir. Fakat bu durumun silisyum altlıkla ilgili olmadığı, altlık parçanın o bölgesinde yüzey temizliğiliğinin başarılı yapılamaması sebebiyle lazer ışını ile düzgün olarak vurulamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.23 : 60 dakika banyoda kalan 20 atış yapılan numunelerin optik mikroskop görüntüleri.



5. TARTIŞMA

Çalışma kapsamında üretilen 60 numune de detaylıca incelenmiştir. Bakır biriktirme işlemleri, silisyum altlıkların p-tip mi n-tip mi olduğu bilinmeden gerçekleştirilmiştir. Bölüm 2.7.6’da anlatılan Dember Efektı mekanizması üzerinden değerlendirildiğinde yalnızca lazer ışınına maruz kalan bölgelerde bakır biriktiği ve altlıkların p-tip olduğu belirlenmiştir. Lazer ile çizdirilen desenin tüm kenarları incelendiğinde lazer ışınına maruz kalan ve kalmayan bölge arasındaki geçişin keskin olduğu gözlenmiştir.

Lazer ışınının çizdiği deseni oluşturulan paralel çizgiler arasındaki mesafenin uygun banyoda kalma süresi ve lazer parametrelerine bağı olarak kaplanabildiği gözlemlenmiştir. Paralel çizgiler arasındaki 0.1 mm’lik lazer ışınına maruz kalmayan bölgenin kaplanabilmesi için yeterli çekirdeklenme sağlanabilmiş ve biriktirme işlemi doğrultudan bağımsız bir karakter sergilemiştir. Bu duruma 30 dakika boyunca banyoda kalan bazı numunelerde istisnalar görülmüştür. Ancak banyoda kalma süresi 60 dakikaya çıkarıldığında aynı lazer parametreleri doğrultudan bağımsız biriktirme davranışı gözlemlenmiştir.

Çalışma kapsamında esas olarak lazer parametrelerinin etkisi incelenirken, numunelerin banyoda kalma süresi ve tekrarlanan lazer atış sayısının bu parametreler üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Banyoda kalma süresi ve tekrarlanan atış sayısındaki artışın genel olarak özellikleri iyileştirdiği görülmüştür ancak tekil olarak ikisinin de etkisi belirli limitleri aşmamaktadır. İkisinin de aynı anda artırıldığı kombinasyon en iyilenmiş set olarak seçilmiştir. En iyi numune olarak referans bakır alaşımının özdirenci ile %13’ten az farkı olan bir numune elde edilmiştir. En iyilenmiş set içerisinde yer alan 7 numunenin referans bakır ile arasındaki özdirenç farkı 2 kattan azdır. Bu set içerisindeki en fazla özdirenç farkı gösteren numunenin ise özdirenç farkı yaklaşık 4,78 kattır. Tüm numunelerin özdirenç değerleri göz önüne alındığında; 24 numunenin 10 kattan az, 30 numunenin 100 kattan az özdirenç farkı gösterdiği görülmüştür.

Banyoda 30 dakika kalan numunelerin kimyasal kompozisyon ve süreklilik açısından davranışı karmaşık gözükmemektedir. Bu karmaşıklık banyoda kalma süresi

artırıldığında kaybolmaktadır. Bu sebeple biriktirme için 30 dakikanın yetersiz olduğu düşünülmektedir. Tekrarlanan atış sayılarındaki artış kimyasal kompozisyon ve sürekliliği olumlu biçimde etkilemiştir.

60 dakika boyunca banyoda kalan numuneler incelendiğinde Q-anahtarlama genişliği (QSW), %80 Q-anahtarlama periyoduna (QSP) eşitlenen güç parametresi genellikle %100 Q-anahtarlama periyoduna eşitlenenden daha iyi sonuçlar vermiştir. Yani yüksek tepe-düşük ortalama güç kombinasyonunun, düşük tepe-yüksek ortalama güç kombinasyonuna kıyasla daha iyi sonuç vermiştir. Düşük tepe-yüksek ortalama güç kombinasyonu çoğu noktada altta kalmıştır. %80 QSW parametrelerinde, atımlar arasındaki zamansal boşluğun kaplama sürekliliğine olumsuz bir etkisi gözlemlenmemiştir. Ancak bu genelleme 30 dakika banyoda kalan numuneler için geçerli değildir. %80 QSW parametrelerinin yüzey üzerinde oluşturduğu dağlama etkisinin daha fazla olması sebebiyle kendiliğinden birikmeyi sağlayacak çekirdeklerin yüzeyden kaldırıldığı düşünülmektedir. %100 QSW parametrelerinin 30 dakika banyoda kalan numunelerde birçok noktada daha iyi sonuçlar verebildiği görülebilmektedir. Farklı banyoda kalma süreleri, tekrarlanan atış sayıları da değerlendirildiğinde Q-anahtarlama periyodunun 333 mikrosaniyeye eşit olduğu koşullar lazer parametreleri için en iyi seçenek olduğu düşünülmektedir. Bu etki %80 Q-anahtarlama periyodu ile çalışılan koşullarda daha net gözlemlenmektedir.

En iyilenmiş set olarak belirlenen 60 dakikada banyoda kalan 20 atış tekrarlanan numunelerde ortalama yüzey pürüzlülüklerinin %80 QSW parametrelerinde daha büyük olduğu ancak %100 QSW parametrelerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Aynı zamanda her iki güç parametresi için de azalan QSP değerleri ile ortalama yüzey pürüzlülüklerinde ufak artışlar görülmektedir. Bu sonuç azalan QSP değerleri ile lazer ışınının dağlayıcı etkisinin artışına bağlanmıştır. Tepelerin ortalama yüzey pürüzlülük değerleri ve en yüksek tepe değerleri birbirleriyle benzerlik göstermektedir. %80 QSW parametrelerinde 333 ve 125 μ s noktalarında maksimum R_p ve tepe değerleri elde edilmiştir. Bu numuneler özdirenç ölçümleri de yüzey pürüzlülüğü özellikleriyle paralellik göstermektedir. Tepe değerleri biriken bakırın yüzeyden en yüksek noktasını temsil etmektedir. Ancak bu değer, lazer ışınının altlık malzeme yüzeyini dağlayarak malzeme koparması sebebiyle kaplamanın en kalın noktası olarak ifade edilemez. Ölçüm orijinal altlık yüzeyi referans alırken, bakır biriktirme malzeme

koparılan yüzeyden başlamaktadır. Bu sebeple en kalın noktanın en az bu kalınlıkta olduğu söylenebilir.





KAYNAKLAR

- [1] **Haken, H.** (1983) Laser theory. Springer, Berlin Heidelberg.
- [2] **Yamashita K, Taniguchi H, Yuyama S, Oe K, Sun J, Mataki H** (2007) Continuous-wave simulated emission and optical amplification in europium (III)-aluminum nanocluster-doped polymeric waveguide. Appl Phys Lett 91(8):081115–081117
- [3] **Siegman AE** (1986) Lasers. USA, University Science Books, Maple-vail group Manufacturing Group
- [4] **Svelto, O.** (1989). Types of lasers. Principles of Lasers, pp.287-377. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7670-9_6
- [5] **Kamalski, D. M. A., Wegner, I., Tange, R. A., Vincent, R. N., Stegeman, I., Heijden, G. J. M. G. v. d., ... & Grolman, W.** (2014). Outcomes of different laser types in laser-assisted stapedotomy. Otology & Neurotology, 35(6), 1046-1051. <https://doi.org/10.1097/mao.0000000000000270>
- [6] **Dhayanidhi, A., Mudiarasu, N., Mathivanan, A., Gopalkrishnan, J. R., Nagarajan, S. K. K., & Bharathan, K.** (2020). “laser dentistry”—the need of the hour: a cross-sectional study. Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences, 12(5), 295. https://doi.org/10.4103/jpbs.jpbs_89_20
- [7] **Kayahan, E., Candan, L., Aras, M., & Gundogdu, O.** (2018). Surface cleaning of metals using low power fiber lasers. Acta Physica Polonica A, 134(1), 371-373. <https://doi.org/10.12693/aphyspola.134.371>
- [8] **Titterton, D. H.** (2005). Requirements for laser devices used in countermeasure applications. SPIE Proceedings. <https://doi.org/10.1117/12.638188>
- [9] **Silfvast WT** (1996) Laser fundamentals. Cambridge: Cambridge University Press
- [10] **Mahamood, R. M.** (2018). *Laser metal deposition process of metals, alloys, and composite materials* (pp. 119-141). Cham: Springer.
- [11] **Planck M.** (1900) Über eine Verbesserung der Wien’schen Spectralgleichung. Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 2:202–204. Translated in ter Haar D (1967) On an Improvement of Wien’s Equation for the Spectrum. The Old Quantum Theory (PDF). Pergamon Press, pp 79–82. LCCN 66029628
- [12] **Planck M.** (1901) Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspektrum. Annalen der Physik. 4:553. Bibcode:1901AnP...309..553P. doi:10.1002/andp.19013090310. Translated in Ando K, On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum (PDF).

- [13] **Mehra J, Rechenberg H.** (1982) The historical development of quantum theory, vol 1. Springer. Chapter 1. ISBN:978-0-387-90642-3
- [14] **Bertolotti M.** (2015) Masers and lasers, second edition: an historical approach. CRC Press, pp 89–91. ISBN:9781482217803
- [15] **Townes CH.** (1999) How the laser happened: adventures of a scientist. Oxford University Press, Oxford, pp 69–70. ISBN:9780195122688
- [16] **Pakhomov AV, Molevich NE, Krents AA, Anchikov DA** (2016) Intrinsic performance-limiting instabilities in two-level class-B broad-area lasers. *Opt Commun* 372(1):14–21
- [17] **Gould RG** (1959) The LASER, light amplification by Stimulated emission of radiation. In: Franken PA, Sands RH (eds) *The Ann Arbor Confer*
- [18] **Thomas G, Isaacs R** (2011) Basic principles of lasers. *Anaesth Intensive Care Med* 12 (12):574–577
- [19] **Morova, Y.** (2021) Femtosaniye lazer ile işlenen yapıların katıhal lazerlerde uygulamaları ve üst çevrim pompalı Tm³⁺: KY3F10 lazerleri (Doctoral dissertation, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- [20] **Kukul, F.** (2013). Farklı Parametrelerde Er,Cr: YSG ve Diyot Lazer Uygulamasının Mine ve Dentin Erozyonunu Önleme Üzerine Etkisinin İn Vitro olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 11655.
- [21] **Yılmaz, Ş.** (2023). AISI 316 L paslanmaz çeliğin lazer kaynağında lazer kaynak parametrelerinin metalurjik yapıya etkisi ve ısı dağılımının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 791256.
- [22] **Kahraman, İ.** (2017). Katıhal Lazerlerin Özelliklerine Sıcaklığın Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 47060
- [23] **Jelínková, H.** (2013). *Lasers for Medical Applications: Diagnostics, Therapy and Surgery*. Woodhead publishing, Cambridge: Elsevier.
- [24] **Dong, J., Rapaport, A., Bass, M., Szpöcs, F., & Ueda, K.** (2005). Temperature-dependent stimulated emission cross section and concentration quenching in highly doped Nd³⁺:YAG crystals. *Physica Status Solidi (A)*, 202(13), 2565-2573. <https://doi.org/10.1002/pssa.200421122>
- [25] **Gupta, P. K. and Khare, R. L.** (2015). *Laser physics and technology*. Springer Proceedings in Physics. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2000-8>
- [26] **Stoker MR** (2005) Basic principles of lasers. *Anaesth Intensive Care Med* 6(12):402–404
- [27] **Bäuerle, D.** (2013). *Laser processing and chemistry*. Springer Science & Business Media.
- [28] **Lipateva, T., Lipatiev, A., Lotarev, S., Shakhgil'dyan, G., Fedotov, S., & Sigae, V.** (2022). One-stage femtosecond laser-assisted deposition of gold micropatterns on dielectric substrate. *Materials*, 15(19), 6867. <https://doi.org/10.3390/ma15196867>

- [29] **Sousa, P., Silvestre, A., & Conde, O.** (2011). Cr₂O₃ thin films grown at room temperature by low pressure laser chemical vapour deposition. *Thin Solid Films*, 519(11), 3653-3657. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2011.01.382>
- [30] **Cai, Y., Chan, S., Sou, I., Chan, Y., Su, D., & Wang, N.** (2007). Temperature-dependent growth direction of ultrathin ZnSe nanowires. *Small*, 3(1), 111-115. <https://doi.org/10.1002/smll.200600266>
- [31] **Samarasekara, P., Rani, R., Cadieu, F., & Shaheen, S.** (1996). Variable texture NiOFe₂O₃ ferrite films prepared by pulsed laser deposition. *Journal of Applied Physics*, 79(8), 5425-5427. <https://doi.org/10.1063/1.362327>
- [32] **Fardel, R., Nagel, M., Lippert, T., Nüesch, F., Wokaun, A., & Luk'yanchuk, B.** (2007). Influence of thermal diffusion on the laser ablation of thin polymer films. *Applied Physics A*, 90(4), 661-667. <https://doi.org/10.1007/s00339-007-4334-9>
- [33] **Henley, S., Mollah, S., Giusca, C., & Silva, S.** (2009). Laser-induced self-assembly of iron oxide nanostructures with controllable dimensionality. *Journal of Applied Physics*, 106(6). <https://doi.org/10.1063/1.3224854>
- [34] **Yang, L., Wang, C., Ni, X., Wang, Z., Jia, W., & Chai, L.** (2006). Microdroplet deposition of copper film by femtosecond laser-induced forward transfer. *Applied Physics Letters*, 89(16). <https://doi.org/10.1063/1.2364457>
- [35] **Shacham-Diamand, Y., Osaka, T., Okinaka, Y., Sugiyama, A., & Dubin, V.** (2015). 30 years of electroless plating for semiconductor and polymer micro-systems. *Microelectronic Engineering*, 132, 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2014.09.003>
- [36] **Chen, C. and Lin, K.** (1999). The Deposition and Crystallization Behaviors of Electroless Ni-Cu-P Deposits. *Journal of the Electrochemical Society*, 146(1), 137-140. <https://doi.org/10.1149/1.1391576>
- [37] **Nánai L, Kordás K, Leppävuori S, and George TF** (2002) *Chemistry of Materials*
- [38] **Dubin, V. M., Shacham-Diamand, Y., Zhao, B., Vasudev, P. K., & Ting, C. W.** (1997). Selective and blanket electroless copper deposition for ultralarge scale integration. *Journal of the Electrochemical Society*, 144(3), 898-908. <https://doi.org/10.1149/1.1837505>
- [39] **Dixit, N., Srivastava, R., & Narain, R.** (2017). Improving surface roughness of the 3d printed part using electroless plating. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L Journal of Materials Design and Applications*, 233(5), 942-954. <https://doi.org/10.1177/1464420717719920>,
- [40] **Lee, C., Cho, S., & Kim, J.** (2005). Electroless Cu bottom-up filling using 3-n,n-dimethylaminodithiocarbamoyl-1-propanesulfonic acid. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 8(11), J27. <https://doi.org/10.1149/1.2063291>

- [41] **Petro, R. and Schlesinger, M.** (2014). Development of hybrid electro-electroless deposit (heed) coatings and applications. *Journal of the Electrochemical Society*, 161(10), D470-D475. <https://doi.org/10.1149/2.0331410jes>
- [42] **Lu, P. and Walker, A.** (2007). Investigation of the mechanism of electroless deposition of copper on functionalized alkanethiolate self-assembled monolayers adsorbed on gold. *Langmuir*, 23(25), 12577-12582. <https://doi.org/10.1021/la702268a>
- [43] **Shacham-Diamand, Y.; Dubin, V.; Angyal, M.** (1995). *Thin Solid Films* pp. 93-103.
- [44] **V. V. Sviridov, T. N. Vorobjeva, T. B. Gaevski, and L. I. Stepanova,** (1987). *Electroless Metal Deposition in Aqueous Solutions*, Belorussian State University, Minsk, Belarus.
- [45] **J. J. Pesek and O. R. Melroy,** (1985).1. *Phys. Chem.*, 89, 4338.
- [46] **Paunovic M.** (1968). *ibid.*, 55, 1161.
- [47] **Heszler P, Mogyorósi P, and Carlson JO** (1995) Phosphorescence from Tungsten Clusters During Laser-Assisted Chemical-Vapor Deposition of Tungsten. *Journal of Applied Physics* 78: 5277-5282.
- [48] **Remes J, Moilanen H, and Leppävuori S** (1997) Laser-Assisted Chemical Vapor Deposition of Nickel and Laser Cutting in Integrated Circuit Restructuring. *Physica Scripta* T69: 268-272.
- [49] **Szörényi T, Kántor Z, Tóth Z, and Heszler P** (1999) Pulsed Laser Deposition from Solid and Molten Metals. *Applied Surface Science* 138-139: 275-279.
- [50] **Teghil R, D'Alessio L, Simone MA, Zaccagnino M, Ferro D, and Sordelet DJ** (2000) Pulsed Laser Ablation of Al-Cu-Fe Quasicrystals. *Applied Surface Science* 168: 267-269.
- [51] **Meriuts, A. and Gurevich, Y.** (2014). Novel approach to the dember effect. *Annalen Der Physik*, 526(11-12), 533-540. <https://doi.org/10.1002/andp.201400117>
- [52] **Wu, D., Fan, F., & Li, C.** (2022). Unraveling charge-separation mechanisms in photocatalyst particles by spatially resolved surface photovoltage techniques. *Angewandte Chemie*, 134(16). <https://doi.org/10.1002/ange.202117567>
- [53] **Han, T., Nag, A., Afsarimanesh, N., Mukhopadhyay, S. C., Kundu, S., & Xu, Y.** (2019). Laser-assisted printed flexible sensors: a review. *Sensors*, 19(6), 1462.
- [54] **Ali, U., Karim, K. J. B. A., & Buang, N. A.** (2015). A review of the properties and applications of poly (methyl methacrylate)(PMMA). *Polymer Reviews*, 55(4), 678-705.
- [55] **Kern, W.** (1990). The evolution of silicon wafer cleaning technology. *Journal of the Electrochemical Society*, 137(6), 1887.
- [56] **Cleaning procedures for silicon wafers - University of California, Irvine.** (n.d.). <https://www.inrf.uci.edu/wordpress/wp-content/uploads/sop-wet-silicon-solvent-clean.pdf>

- [57] **Bai, S.; Zhang, S.; Zhou, W.; Ma, D.; Ma, Y.; Joshi, P.; Hu, A.** (2017) Laser-assisted reduction of highly conductive circuits based on copper nitrate for flexible printed sensors. *Nano-Micro Lett.* 9, 42.
- [58] **Xu, J., Liao, Y., Zeng, H., Zhou, Z., Sun, H., Song, J., ... & Midorikawa, K.** (2007). Selective metallization on insulator surfaces with femtosecond laser pulses. *Optics Express*, 15(20), 12743-12748.
- [59] **Ratautas, K., Jagminienė, A., Stankevičienė, I., Sadauskas, M., Norkus, E., & Račiukaitis, G.** (2020). Evaluation and optimisation of the SSAIL method for laser-assisted selective electroless copper deposition on dielectrics. *Results in Physics*, 16, 102943.
- [60] **Zehnder, S., Schwaller, P., von Arx, U., & Neuenschwander, B.** (2012). Laser-induced chemical liquid-phase deposition of copper on transparent substrates. *ALT Proceedings*, 1.
- [61] **Manshina, A., Povolotskiy, A., Ivanova, T., Kurochkin, A., Tver'yanovich, Y., Kim, D., ... & Kwon, S. C.** (2006). Laser-assisted metal deposition from CuSO₄-based electrolyte solution. *Laser Physics Letters*, 4(2), 163.
- [62] **Kim, H. G., & Park, M. S.** (2021). Fast fabrication of conductive copper structure on glass material using laser-induced chemical liquid phase deposition. *Applied Sciences*, 11(18), 8695.
- [63] **Zhou, R., Huang, T., Chen, L., Chen, S., Lin, S., & Zhuo, Y.** (2017). Electroless Deposition of Confined Copper Layers Based on Selective Activation by Pulsed Laser Irradiation. *Journal of Laser Micro Nanoengineering*, 12(2), 169.
- [64] **Seo, J. M., Kwon, K. K., Song, K. Y., Chu, C. N., & Ahn, S. H.** (2020). Deposition of durable micro copper patterns into glass by combining laser-induced backside wet etching and laser-induced chemical liquid phase deposition methods. *Materials*, 13(13), 2977.
- [65] **ASM International Handbook Committee.** (1992). Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials. *ASM international*, 2, p. 923.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Sergen Halim AYHAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2023, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2021 – Halen TRMOTOR Güç Sistemleri Sanayi A.Ş. / Malzeme Teknolojileri Mühendisi

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Ayhan S. H.**, Kazmanlı K. 2023. Laser-activated Electroless Copper Deposition on Silicon Substrate. 2nd *International Graduate Research Symposium*, May 16-18, 2023 Istanbul, Turkey.