

**KUANTUM KADEMELİ LAZERLERDE TERAHERTZ
IŞIĞI İÇİN NANOMETRE İNCE FİLM
METAL-METAL BİRLEŞTİRİLMESİ**

Sina ROUHI

Doktora Tezi

Nanobilim ve Nanomühendislik Ana Bilim Dalı

Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

Prof. Dr. Lütfi ÖZYÜZER

2020

(Her hakkı saklıdır)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
NANOBİLİM VE NANOMÜHENDİSLİK ANA BİLİM DALI

**KUANTUM KADEMELİ LAZERLERDE TERAHERTZ IŞIMA İÇİN NANOMETRE
İNCE FİLM METAL-METAL BİRLEŞTİRİLMESİ**

(The Metal-Metal Thin Films Thermo-Compression in Nanometric Scale for Terahertz
Radiation Used in Quantum Cascade Lasers Structure)

DOKTORA TEZİ

Sina ROUHI

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL
İkinci Tez Danışmanı: Prof. Dr. Lütfi ÖZYÜZER

Erzurum

2020



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**KUANTUM KADEMELİ LAZERLERDE TERAHERTZ IŞIMA İÇİN
NANOMETRE İNCE FILM METAL-METAL BİRLEŞTİRİLMESİ**

Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL danışmanlığında, Lütfi ÖZYÜZER ortak danışmanlığında, Sina ROUHI tarafından hazırlanan bu çalışma 13/07/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı Nanomalzeme Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Gülnur AYGÜN

İmza :

Üye : Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

İmza :

Üye : Prof. Dr. Lütfi ÖZYÜZER

İmza :

Üye : Prof. Dr. Tevhit KARACALI

İmza :

Üye : Prof. Dr. Sevil KARACA

İmza :

Üye : Prof. Dr. Ayşe BAYRAKÇEKEN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Çağrı ÇIRAK

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// tarih ve/
nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, (TÜBİTAK) projeleri kapsamında desteklenmiştir.

Proje No: 215E113_ETERA

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak *Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL* danışmanlığında sunulan “Kuantum Kademeli Lazerlerde Terahertz Işıma İçin Nanometre İnce Film Metal-metal Birleştirilmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	%1	30
Kuramsal Temeller	%1	30
Materyal ve Yöntem	%1	35
Bulgular	%1	20
Tartışma	%0	20
Tezin Geneli	%7	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Sina ROUHI	Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL
17.8.2020	17.8.2020
İmza:	İmza:

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma sürecinde her türlü desteklerini esirgemeyen danışman hocalarım, Atatürk Üniversitesinden bana doktora eğitimi fırsatı tanıyan Sayın Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsünden, bana üst seviyede çalışma olanağı sağlayarak gerçek anlamda bilimsel ve pratik açıdan destek olan değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Lutfi ÖZYÜZER ve her zaman kıymetli önerileri ile bana yol aydınlatan değerli danışmanım Sayın Prof. Dr. Gülnur AYGÜN ÖZYÜZER'e sonsuz teşekkür ederim.

Ayrıca bu tez çalışmasında emeği geçen değerli gurup arkadaşlarım, Dr. Mehtap ÖZDEMİR KÖKLÜ, Dr. Hasan KÖSEOĞLU, Dr. Fulya TÜRKOĞLU, Merve EKMEKÇİOĞLU ve Y.E. Martinez MADİNA'ya teşekkürlerimi sunar başarılarının devamını dilerim.

Bu tez çalışmasını 215E113_ETERA isimli proje çerçevesinde destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, (TÜBİTAK) a da sonsuz teşekkürlerimi iletirim.

Sonuç olarak bu çalışmanın tümünü, beni vücut sıcaklıkları umuduyla hayata bağlayan ve sabırla sonsuz destek olan ve hayatım boyu borçlarını ödeyemeyeceğim gerçek sahiplerine Sevgili Anne-Babama takdim ederek, Allahtan kendilerine uzun ömür ve hayat boyu sağlıklı yaşam dilerim.

Sina ROUHI

ÖZET

DOKTORA TEZİ

KUANTUM KADEMELİ LAZERLERDE TERAHERTZ IŞIMA İÇİN NANOMETRE İNCE FİLM METAL-METAL BİRLEŞTİRİLMESİ

Sina ROUHI

Danışman: Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

Ortak Danışman: Prof. Dr. Lütfi ÖZYÜZER

Amaç: Bu doktora tez çalışmasında, kuantum kademeli lazerler (QCL) yapısında kullanılan dalga kılavuzlarının vakum ortamında üretilmesi ve oksit fazı gibi her türlü safsızlık içermeyen arayüzey elde etmek ve bu yapıların karakterizasyonunun yapılması amaçlanmıştır.

Yöntem: Bu çalışma sürecinde kaplama ile elde edilen metalik katmanlar arasında özgün bir termal baskı vakum sistemi tasarlanmıştır. Bu sistemde yapılan kaplamalar, yüksek vakum ortamında DC mıknatısal saçtırma ve termal buharlaştırma teknikleri ile gerçekleştirilmiştir.

Bulgular: Bu süreçte Ta ve Cu metal katmanlar sırasıyla GaAs taban malzemesinin yüzeyine kaplandıktan sonra, 430°C ve yaklaşık 40N mekanik basınç uygulanarak yapıştırılmıştır. GaAs taban malzemesi dalga kılavuzu için hem reseptör hem de aktif bölge alt taşı olarak rol almaktadır. Ek olarak 30 nm kalınlığındaki Tantalum tabakası, yapı içindeki Cu ve GaAs tabakaları arasında yapışma kabiliyeti sağlamak ve kuantum kuyusu yoğunluğunun artmasıyla görev almaktadır.

Sonuç: Sonuç olarak, yaklaşık 1 mikrometre kalınlıkta görünen bir saf ve homojen bağlantı katmanı sahip olan dalga kılavuzu üretilmesi amaçlanmıştır. Bu Doktora tez çalışması sonucunda ortaya çıkan sonuçlara istinaden Cu-Cu arayüzey safsızlığı ve kontaminasyon oranını düşmesi bir yandan atom geçişleri ve foton yayılımını kolaylaştırırsa da ortaya çıkan bağın güçsüz olması lazer performansında negatif etki yaratmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Terahertz, Kuantum kademeli lazerler, Mıknatısal saçtırma

220, 108 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

THE METAL-METAL THIN FILMS THERMO-COMPRESSION IN NANOMETRIC SCALE FOR TERAHERTZ RADIATION USED IN QUANTUM CASCADE LASERS STRUCTURE

Sina ROUHİ

Supervisor: Prof. Dr. Mehmet ERTUGRUL

Co – Advisor: Prof. Dr. Lutfi OZYUZER

Purpose: Nowadays detection of chemical and biological substances, medical and safety applications, astrophysics, etc. are possible by the development of the Terahertz (THz) frequency range radiation. Quantum Cascade lasers (QCL), are one of the Terahertz radiation sources and impurities such as oxide combinations or unwanted phases that formed in (QCL) interface structure results in high operating temperature and causes to increase in operational costs and lower performance of the laser.

Method: In this thesis, a metal-metal thermo-compression system was designed and prepared for 3D integration of metal claddings, used in (QCL) structure in-situ conditions. The process occurs by DC magnetron sputtering and thermal evaporation technique, so the metal layers as, Ta and Cu are deposited on GaAs double surface and bonded by applying mechanical pressure under high vacuum state (10^{-6} torr), near 430°C and about 40 N of mechanical pressure, play role as both receptor and active region for waveguide.

Findings: Tantalum layer at 30 nm of thickness provides a good bonding ability between Cu and GaAs layers inside the structure. As a result, we tried to make a good compatibility homogenous layer junction, which appears approximately in 1 micrometer of thickness.

Results: As the result, although the Cu-Cu interfacial impurity and contamination rate decreases and facilitates the atomic transitions and photon propagation, on the other hand, that results in weak bonding capability and causes a negative effect on laser performance.

Keywords: Terahertz; GaAs; metal-metal bonding; Magnetron Sputtering

2020, 108 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
SİMGELER DİZİNİ	xiv
GİRİŞ.....	1
Amaç ve Kapsam	5
KURAMSAL TEMELLER.....	7
İnce Film Teknolojileri ve Kullanım Alanları	7
İnce Film Kaplama Yöntemleri.....	7
PVD Teknikleri Gruplandırması	8
DC magnetron sıçratma yöntemi	8
Termal Buharlaştırma Yöntemi	9
Bakır İnce Filmler	9
Tantalum İnce Filmler.....	10
Yarıiletkenler.....	11
MBE Yöntemi	12
Galyum Arsenide Taban Malzemesi	13
Galyum Arsenide Örgü Yapısı.....	15
Galyum Arsenide Faz Diyagramı	17
GaAs Termal Geçirgenlik Etkenleri	18
Optik Spektrum ve Çeşitli Bölgelere Sınıflandırılması	19
Terahertz Işıması ve Özellikleri	20
Kuantum Kademeli Lazerler (QCL)	21
Restrehalen Bölgesi ve Yayılım Etkisi	22
3D İntegrasyon	23
MATERYAL ve YÖNTEM	25
DeneySEL Tasarım Aşamaları	25
Sistem Tasarımı ve Konfigürasyonu	25

Vakum Odacığı	25
Vakum Pompaları.....	26
Mekanik pompa.....	26
Turbo moleküler pompa.....	26
Vakum pompaları çalışma süresi	26
Vakum Ölçüm Aygıtı ve Parçaları.....	26
DC Güç Kaynağı.....	27
AC Güç Kaynağı.....	27
Soğutma Sistemi ve Fonksiyonu.....	27
Isıtma Sistemi ve Parçaları.....	27
Quartz lamba	27
Thermocouple	27
Vakum Odacığı İç Özellikleri	28
Yapıştırma aparatı	28
Feedthrough'lar	29
Pota ve özellikleri.....	29
Sputter gun	30
Vakum odacığı dış özellikleri	30
Ön giriş flanşı ve gözetleme penceresi.....	31
Alt flanş özellikleri.....	31
Üst flanş özellikleri	31
Arka flanş özellikleri.....	32
Sağ taraf flanş özellikleri	32
Mass Flow Controller (MFC)	32
Genel Ölçüm Cihazları.....	33
Pans ampermetre	33
Multimetre.....	34
Kalınlık ölçüm cihazı	35
Mikrometre.....	36
Termal Baskı Aparatı ve Sistem İçerisinde Konumlamalar.....	36
Sistem İçerisinde Hareketli Parçalar	36
Deneysel Üretim Aşamaları	37
Numune hazırlama	37
Numune hazırlama için gereken ekipmanlar ve ölçüm cihazları	37
Numune Hazırlama İşlemler ve Aşamaları	37

Alıcı pul hazırlaması	37
Aygıt numunesi üretimi ve özellikleri	38
Alıcı pul hazırlaması	38
Numune temizleme aşaması.....	39
Taban Malzeme Konumlaması ve Uygulaması	40
Deney ve Üretim Aşamaları.....	40
Mekanik pompa çalışma süreci.....	40
Turbo moleküler pompa çalışma süreci	41
Tantalum hedef malzemesi buharlaştırılması.....	41
Bakır Termal buharlaştırması ve parametreleri.....	42
Konumlama ve ısıtma işlemi.....	42
Numune yapıştırma operasyonu.....	42
Yapıştırma Düzenegi.....	43
Yapıştırma operasyonu ve mekanik baskı.....	44
Konumlama ve hizalama.....	44
Isıtma işlemi ve sıcaklık ayarlamaları ve ölçümleri.....	45
Numune yapıştırma operasyonu aşamaları	45
Mekanik baskı uygulama	46
Deneme Çalışmaları ve Kalibrasyon Faaliyetleri	46
Cam üzeri Tantalum kaplamaları ve kalınlık ölçümleri.....	47
Cam üzeri Bakır kaplaması ve kalınlık ölçümleri	47
Cam üzeri Tantalum-Bakır çift aşamalı kaplamaları ve kalınlık ölçümleri.....	48
Cam numunesi yapıştırma testleri.....	48
Aygıt numune yapıştırılması	48
Normal Galyum-Arsenide numuneleri yapıştırması	49
Galyum – Arsenide orijinal numuneleri yapıştırması	49
İnceltilmiş Galyum-Arsenide numunelerinin yapıştırılması.....	49
Çalışma sonucu olarak kullanılan numuneler	49
ARAŞTIRMA BULGULARI	51
Kalınlık Ölçümleri ve Profilometre Sonuçları	51
Taramalı Elektron Mikroskopu İle Yüzey Morfoloji Analizleri.....	53
DC Magnetron sputtering ile kaplanan Tantalum yüzeyi	53
Termal buharlaştırma ile gerçekleşen Bakır kaplaması	54
Mıknatıssal saçtırma ile yapılan Tantalum üzerine bakır kaplaması	54
Arayüzey optik mikroskop ve SEM görüntüsü.....	55

Yapışma Arayüzeyin EDX Kimyasal Analizleri	59
Aygıtların Arayüz ve Yapısal Karakterizasyonu	62
Tantalum kaplaması XRD karakterizasyonu	62
Cu-Mıknatıssal Saçtırma XRD Karakterizasyonu	62
Cu-buharlaştırma ile yapılan yüzeyin XRD Karakterizasyonu.....	63
Yapılan Kaplamaların Aşamalı AFM Analizi.....	64
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65
Bakır-Bakır <i>self diffusion</i> Katsayısı	65
Matano Arayüzey Difüzyonu.....	66
Difüzyon Olayında Kontaminasyonlar ve Safsızlıkların Etkisi	67
Difüzyon Prosedüründe Gerçekleşen Sıcaklık Etkisi	67
Vakum Ortamında Tavlama Etkisi	68
Bakır ve Tantalum Arasında Oluşan Arayüzey Özellikleri	69
Vakum Ortamında Görünür Işık Vasıtasıyla Sıcaklık Uygulaması	69
5.8. Araştırmalar ve Tartışmalar Sonrası Elde Edilen Tez Sonucu.....	71
KAYNAKLAR.....	73
EKLER	76
EK 1. Tez sürecinde tüm çalışma parametreleri	76
EK 2. Kaplama operasyonları sırasında gerçekleşen ısıtma ve soğutma düzeneği kayıtları	81
EK 3. Operasyonlar sırasında yapılan sistem modifikasyonları	87
EK 4. Kalınlık ölçümlerinde Veeco Dektak 150 profilometre cihazından elde edilen eğriler ve R _a değerleri	90
ÖZGEÇMİŞ.....	92

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. DC mıknatıssal saçtırma işleminde uygulanan parametreler	41
Tablo 2. Termal buharlaştırma yönteminde uygulanan parametreler	42
Tablo 3. Yapıştırma sonucunda elde edilen kimyasal elementler yüzdesi	61
Tablo 4. Thermocouple (ENDA) ve gerçek sıcaklık arasında olan tolerans oranı ve farklı sıcaklıklarda gerçekleşen işlemler	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. a) QCL'nin bant yapısı ve ışıma işleminin QCL'nin şematigi b) QCL yapısının SEM ve TEM görüntüleri.....	3
Şekil 2. Ara-bantlar ve foton geçiş ve <i>injection barrier</i> şematik görüntüsü	4
Şekil 3. $\nu = 3$ THz te a) Yarı-yalıtkan yüzey plazmonu dalga kılavuzlarının ve b) metal-metal dalga kılavuzlarının şematigi iki boyutlu elektromanyetik mod profilleri.....	5
Şekil 4. Termal buharlaştırma potalarının şematik görüntüsü	9
Şekil 5. GaAs katmanlarının SEM görüntüsü. a,b ve c 2.8 Å kalınlığında monolayer katmanları halinde	11
Şekil 6. MBE cihazının şematik görüntüsü ve parçaların isimlendirilmesi	12
Şekil 7. HRTEM ile alınmış olan GaAs örgüsünün epitaksiyel yapısı	14
Şekil 8. As kusurlu yapı oluşumu enerji seviyesinin (a) Ga miktarının artışına göre ve (b) doping koşullarına göre değişimi.....	15
Şekil 9. GaAs konvansiyonel birim küp, hacimi A^3 olan bu örgü ilkel bir hücreden 4 kat daha büyüktür	16
Şekil 10. GaAs yapısındaki kristalografik yönelmeler. $\{111\}$ düzlemindeki yan kesitler sadece 1 türlü atom içermektedir.....	16
Şekil 11. GaAs geleneksel biner faz diyagramı. Diyagram yaklaşık %0.5 As noktasında eutectic yapısına ve maksimum 1513 K ergime noktasına ulaşmaktadır.....	18
Şekil 12. GaAs deki örgü yapısına göre değişen termal geçirgenlik miktarı	19
Şekil 13. Farklı malzemelerin bant aralığına bağlı olan enerji miktarı.....	20
Şekil 14. Terahertz dalga boyunun elektromanyetik spektromda şematik konumu	21
Şekil 15. Bakır-bakır dalga kılavuzu içeren bir lazer cihazının SEM resmi. (b) 25 μm genişliğinde ve 1.04 mm uzunluğunda bir lazer cihazından darbeli (üst panel) ve CW (alt panel) işlemlerinin ışık-akım ($L - I$) ilişkileri	22
Şekil 16. (a) Restrehalen bölgesi şematigi ve (b) dalga yayılım şiddetine etkisi.....	23
Şekil 17. Pasivasyon yöntemi ile bakır-bakır ince film yapıştırma şematigi	24
Şekil 18. Termal baskı sistemi ve konfigürasyonu ve ayrıntıları	25
Şekil 19. Termal feedthrough elektrik kontakları	29
Şekil 20. Molebdenyum termal buharlaştırma potası.....	30
Şekil 21. Atom saçırma tabancası (Sputter gun)	30
Şekil 22. Sağ taraf flanş ve rezistans tel ısıtma sistemi içeren plaka	32
Şekil 23. Gaz akım sistemi parçalar ve konfigürasyonu	33
Şekil 24. Pansampermetre akım ölçüm cihazı.....	34

Şekil 25. Voltaj ölçüm cihazı (multimetre).....	35
Şekil 26. Veeco Dektak 150 kaplama kalınlık ölçüm cihazı.....	35
Şekil 27. Alttaş kalınlık ölçümü için mikrometre	36
Şekil 28. n+ GaAs numunesi.....	37
Şekil 29. n+ 5mm ² boyutunda kesilmiş GaAs numuneleri.....	38
Şekil 30. Zımpara cihazı ve inceltme malzemeleri	39
Şekil 31. Optik mikroskop altında (a) ilker numune, (b) temizlenmiş numune	40
Şekil 32. DC mıknatıssal sıçratmasının görüntüsü.....	41
Şekil 33. Hotplate üzerinde numune yapıştırma prosedürü.....	43
Şekil 34. Yapıştırma düzeneği ve operasyonu	44
Şekil 35. Isıtma işlemi görüntüsü	45
Şekil 36. Isıtma ve soğutma işlemi ve basınç değerleri	46
Şekil 37. Cam üzerine yapılan kaplama ve yapıştırma	48
Şekil 38. Active region numuneleri.....	50
Şekil 39. Elde edilen sonuç numunenin şematik görüntüsü.....	51
Şekil 40. Tantalum hedef malzemesinin kaplama zamanına göre alınan nm cinsinden kalınlık ölçümleri grafiği	52
Şekil 41. Bakır buharlaştırma malzemesinin ağırlığına göre alınan nm cinsinden kalınlık ölçümleri grafiği	52
Şekil 42. Ta ince filme ait SEM görüntüsü üzerindeki bar skalaları a) 2 µm b) 200 nm.....	53
Şekil 43. Buharlaştırma ile büyütülen Cu filmlere ait SEM görüntüleri a) 25000x b) 50000x	54
Şekil 44. Mıknatıssal saçtırma ile büyütülen Cu filmlere ait SEM görüntüleri a)5000x b)15000x.....	55
Şekil 45. Cu-Cu Arayüzeyinin optik mikroskop görüntüleri. Soldaki resim iki ara yüzey sağdaki resim yüksek büyütme karşılık gelmektedir.	56
Şekil 46. Cu-Cu Arayüzeyinin SEM görüntüleri a) 5w 25000 büyütmede lokal ve kısmi yapışmalar. B) 15 w ve 7500 büyütmede ayrılmış bakır katmanı	57
Şekil 47. GaAs üzerine yapılan bakır kaplaması birleşmesi	58
Şekil 48. Kalın kaplama da oluşan ara yüzey bağ düzlemi	58
Şekil 49. 15w ve 1000 büyütmede çekilen yapışmamış yüzey SEM görüntüsü.....	59
Şekil 50. Yapışma yüzeyi kimyasal analizi.....	59
Şekil 51. Alttaş malzemenin kimyasal analizi.....	60
Şekil 52. Yapıştırma sonucunda elde edilen oksitsiz yapışma arayüzeyi (a) yapışan numune (b) sıkıntılı yapıştırma	60

Şekil 53. EDX elemental dağılım analizi	62
Şekil 54. Mıknatıssal Saçtırma sistemi ile büyütülen Bakır ince filmin XRD grafiği	63
Şekil 55. Buharlaştırma sistemi ile Bakır ince film kaplanmış malzemenin XRD grafiği	63
Şekil 56. Kaplama aşamaları AFM analizleri ve rms değerleri	64
Şekil 57. Malzeme kompozosyonuna bağlı Matano arayüzeyi ve ayırım çizgisi	66
Şekil 58. Bakır bileşimleri arasında zamana göre tavlama etkisi.....	68
Şekil 59. Tablo 4'e göre elde edilmiş olan sıcaklık profile eğrisi ve denklik noktaları.....	71

SİMGELER DİZİNİ

Ar	Argon gazı
CVD	Kimyasal buhar fazından kaplama yöntemi
CW	Sürekli dalga cihazları
eV	Elektron volt
GaAs	Galyum Arsenide
InP	İndiyum fosfat
K	Kelvin sıcaklık derecesi
MBE	<i>Molecular beam epitaxy</i>
meV	Mili elektron volt
mm	Milimetre
MQM	Kontak tabakaları arasındaki aktif bölge
N+	Reseptör ya alt kontak tabakası
n+	Üst kontak tabakası
nm	Nanometre
PVD	Fiziksel buhar fazından kaplama yöntemi
QCL	Kuantum kademeli lazerler
RT	Oda sıcaklığı
SISP	Yarı yalıtkan yüzey plazmonları
THz	Terahertz elektromanyetik dalgaları
UHV	Ultra yüksek vakum ortamı (10^{-12} Torr)
α_w	Dalga kılavuzu kayıpları
Γ	Sınırlama faktörü
λ	Dalga boyu
°C	Santigrat sıcaklık derecesi
μm	Mikrometre

GİRİŞ

Kimyasal ve biyolojik maddelerin saptanması, tıbbi ve güvenlik uygulamaları bulunan Terahertz (THz) frekans aralığının (0.1–10 THz, $\lambda \approx 0.03\text{--}3\text{ mm}$) gelişmesine, güçlü, kompakt ve tek fazlı ışıma kaynaklarının eksikliği engel olmaktadır. Bu frekans aralığının gelişmesinde Terahertz ışıma kaynaklarından biri olan kuantum kademeli lazerler (QCL) önemli rol oynamaktadır. Yüksek kullanım performans göstermesine rağmen Terahertz dalga üretici kuantum kademeli lazerler hala gelişim süreçlerinin ilk aşamasını geçirmektedirler. Bu aygıtların ilerleme yönünü engelleyen iki genel problem bulunmaktadır. Bu iki problemin birincisi atom kütesinin efektif şekilde aktif bölgeden enjekte bölgesine geçmesi yani atom dağılım inversiyonu imkanı sağlamak ve diğeri enerji bant aralığı 4-40 meV olduğu için saçılan fotonların emilme oranının çok yüksek olması dolayısı ile serbest taşıyıcıların emilmesidir (Szerling *et al.* 2015).

Geleneksel olarak, THz üretimi fotoiletken antenlerdeki fotokarışım gibi doğrusal olmayan teknikler kullanılarak görünür bölgeden frekans azalımı (McIntosh *et al.* 1995; Matsuura *et al.* 1997; Verghese *et al.* 1998) ya da frekans çarpanları zincirlerini kullanarak mikrodalga rejiminden frekans yükseltimi gibi dolaylı tekniklere dayanmaktadır (Raisanen 1992). Bu alandaki gelişmeler Galyum-Arsenide (GaAs) (McIntosh *et al.* 1995) veya tek taraflı taşıyıcı Fotodiyodlardan (Rouvalis *et al.* 2010) mikrodalga frekansından 3.8 THz'e kadar eş fazlı sürekli dalga (CW) Terahertz ışıması üretme yeteneğine sahip olan fotomikser/optik heterodin dönüştürücülerin geliştirilmesine yol açmıştır. 2.7 THz gibi yüksek frekanslarda yüksek çıkış gücü seviyelerine sahip frekans çarpanı tabanlı katı hal elektronik kaynakları bulunmaktadır (Maestrini *et al.* 2011).

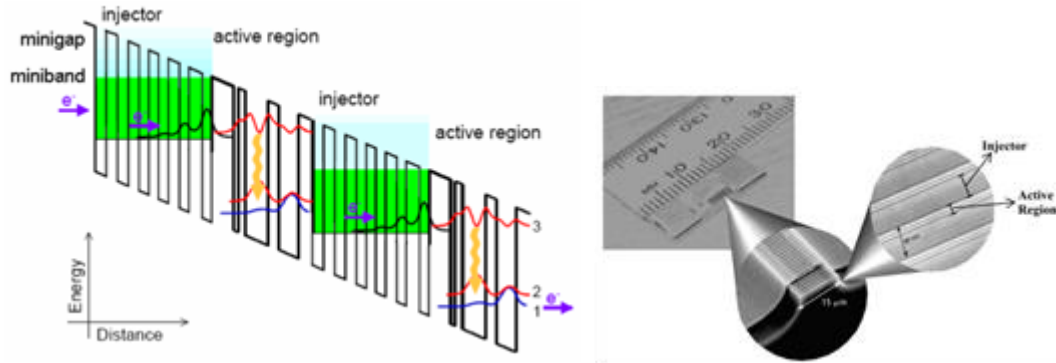
QCL ilk olarak 1971 yılında Kazarinov ve Suris tarafından ortaya atılmıştır (Hu *et al.* 2005). Bell laboratuvarlarında 1994 yılında gerçekleştirilen ilk deneysel gösterimde, pik güçleri 8 mW dan daha yüksek 4.26 μm dalga boyunda ışıyan QCL'ler üretilmiştir (Faist *et al.* 1996). Kroyojenik sıcaklıklarda atımlı modda çalışan ilk QCL cihazdan sadece 2 yıl sonra oda sıcaklığında (RT) çalışan QCL üretilmiştir (Faist *et al.* 1996). O zamandan beri, QCL teknolojisi büyük ölçüde gelişmiştir. 3.5 ile 24 μm arasında orta kızılötesi ile uzak kızılötesi dalga boyu aralığını kapsayan (Colombelli *et al.* 2001; Bandyopadhyay *et al.* 2012), pik güçleri watt seviyesinde olan (Lyakh *et al.* 2008; Bandyopadhyay *et al.* 2012), termo-elektriksel olarak soğutulan, atmalı ve 16 μm kadar dalga boyları için oda sıcaklığında çalışan, sürekli dalga (CW)

cihazlar geliştirilmiştir (Hofstetter *et al.* 2001). Ancak daha uzun dalga boyları için hala kroyojenik soğutma gereklidir (Bandyopadhyay *et al.* 2012).

Terahertz kuantum-kademeli lazerler (Williams and Benjamin 2007) 1.2-5 THz'e denk gelen çalışma frekansları ile en uzun dalga boylu yarıiletken lazer kaynaklardır (Walther *et al.* 2006; Kumar and Lee 2008). Manyetik alan uygulanması ile 0.6 THz kadar düşük frekanslara ulaşılabilir (Walther *et al.* 2007; Wade *et al.* 2009). 2001 yılında ki keşiften bu yana, 100 mW tan daha yüksek güce sahip sürekli dalga Terahertz kuantum-kademeli lazerler üretilmiştir. Ancak, çalışma sıcaklığı ($T_{max} \sim 200$ K) (Deutsch *et al.* 2012), lazer verimi ve gücü, ışın kalitesi, frekans kararlılığı ve frekans ayarlanması karşılaşılan bazı zorluklardır. QCL çoklu kuantum kuyusu yapısı oluşturmak üzere, farklı bant aralıklarına sahip ince film katmanlardan oluşan periyodik bir dizi ile yapılır. Her periyot aşama olarak adlandırılan birçok katman içerir. Her aşamada, elektron-enjektör bölge (enjektör) ve optik emisyonun meydana geldiği bir aktif bölge içerir. Şekil 1'de gösterilmiş olan şematik bant yapısı ve iki başarılı ardışık ışınım işlemi gösterilmektedir. Önceki aşamadan gelen ve sol uca enjekte olan elektron, ilk olarak ışımasız saçılmalar aracılığıyla çeşitli geçişlere maruz kalır ve alt mini banda ulaşır. Daha sonra aktif bölgede lokalize olan üst ışınım seviyesi 3'ü (üst kırmızı çizgi) doldurmak için enjektör ucundaki nispeten kalın bariyerden tünelleme yapar. Üst ışınım seviyesi 3 ve alt ışınım düzeyi 2 arasındaki güçlü optik birleşme gücü nedeniyle elektronunun iki seviye arasında ışınım (sarı dalgalı çizgiler) yapma olasılığı çok yüksek olup sonunda foton yayınlanmasına neden olur. Alt ışınım düzeyi 2'de ki elektron hızla 1 seviyesine iner, bu durum fonon ışımasını yönlendirebilir. Son olarak, elektron bir sonraki aşamada enjektöre tüneller ve başka foton ışımasını tetikler. Bu süreç her aşamada tekrarlanır. QCL, optik geçişlerinin bantlar arası niteliği ve kademeli yapısı sayesinde birçok temel avantaja sahiptir (Colombelli *et al.* 2001).

İlk olarak, emisyon dalga boyu malzemenin bant aralığı yerine yapının geometrisine bağlıdır. Diğer bir deyişle, GaAs veya InP'ye dayalı heteroyapılar gibi geliştirilmiş malzeme sistemleri kullanılarak, uygun bir tasarımla QCL'den geniş yelpazeli frekanslar elde edilebilmektedir. İkinci olarak, kademeli yapısı sayesinde elektron başına birden fazla foton emisyonu elde edilebilir ve bu lazerlerin optik gücünü büyük ölçüde artırır. QCL'lerde, THz kuantum kuyusu GaAs/AlGaAs heteroyapılarda bant içi ışınımlı geçişlerden elde edilir. Bant içi optik geçişler doğada doğal olarak tek kutupludur ve tamamen iletim bandının (ya da valans bandının) alt bantları arasında gerçekleşir. Bu, bir taşıyıcı başına çok sayıda foton elde etmek için süperörgü heteroyapıların (modül) birçok kez tekrarlanmasını sağlar. Bantlararası lazerlerin foton enerjisi temel olarak kuantum kuyu malzemesinin bant aralığına (1 eV mertebesinde) bağlıdır. Bu nedenle, bipolar lazer teknolojisinin uzak kızılötesine uzanması, 40

meV den daha az bant aralıklı malzeme gerektirdiğinden pratik değildir. Işığın dalga boyu malzemenin bant aralığı tarafından belirlenmediğinden kuantum-kademeli lazerler genellikle bant mühendisliğinin başlıca örneği olarak da adlandırılır (Hu *et al.* 2005).

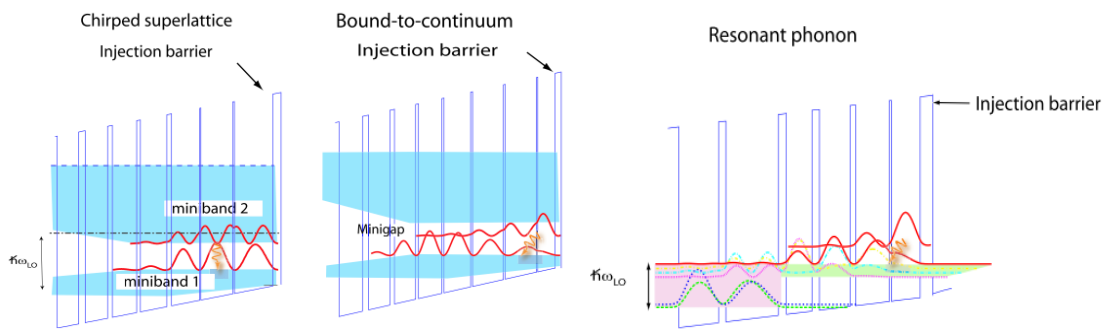


Şekil 1. a) QCL'nin bant yapısı ve ışıma işleminin QCL'nin şematiği b) QCL yapısının SEM ve TEM görüntüleri (Colombo *et al.* 2010)

Terahertz QCL'ler 2001 yılında ortaya çıktığından beri birçok tasarım tanıtılmıştır, bunlar temelde daraltılmış süperörgü (Chirped-Superlattice), bound-to-continuum ve rezonans fonon (Resonant Phonon) olmak üzere üç aktif bölge ile karakterize edilebilir ki Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu çalışmadaki amaç, THz moduna sınırlandırılmış düşük kayıplı bir dalga kılavuzu kullanmaktır. Ancak, QCL üretiminin en zor kısımlarından biri budur. THz QCL'ler için şu anda iki tip dalga kılavuzu kullanılır: yarı-iletken yüzey plazmonları (SISP) ve metal-metal (MM) dalga kılavuzları. İlk Terahertz QCL yarı-yalıtkan yüzey plazmon kılavuzlarında gösterilmiştir (Kohen *et al.* 2005).

Yapının bir şeması ve SISP dalga kılavuzu için tipik mod dizisi Şekil 3(a)'da gösterilmiştir. Bu dalga kılavuzunda mod yukarı metalik tabaka ve ince yoğun katkılı yarıiletken (n^+) kontak tabakası arasında, MQM aktif bölgesinin hemen altında bir yarı-yalıtkan GaAs alttaşı üzerinde sınırlandırılmıştır. N^+ tabakasının inceliği nedeniyle mod büyük ölçüde alttaşı içine sızar ve böylece aktif malzeme ile üst üste binme, sınırlama faktörünün $\Gamma \sim 0.2 - 0.5$ arasında olmasına neden olur. Dalgakılavuzu kayıpları (αw) asıl olarak alt kontak tabakası ile ilgilidir. Aktif bölge çekirdeğindeki serbest taşıyıcı Emilimi uzun dalgaboylarında kayda değer hale gelir ($\alpha_{fc} \propto \lambda^2$). SISP dalga kılavuzuna alternatif metal-metal (MM) dalga kılavuzu (Williams *et al.* 2003, 2006; Williams and Benjamin 2007; Deutsch *et al.* 2012) olarak adlandırılan n^+ GaAs tabakası, Şekil 3(b)'de gösterildiği gibi metalik bir tabaka yerine yerleştirilir. Bu tarz dalga kılavuzlama konsept açısından mikrodalga frekanslarındaki mikro şerit geçirgenlik hattı teknolojisiyle benzerdir. SISP dalga kılavuzu ile karşılaştırıldığında metaldeki çok küçük yüzey derinliğiyle (birkaç yüz Angstrom) dalgakılavuzu kayıpları daha da minimize edilmiştir. Dahası çift yüzey plazmon modunun iki metalik tabaka (genellikle Cu

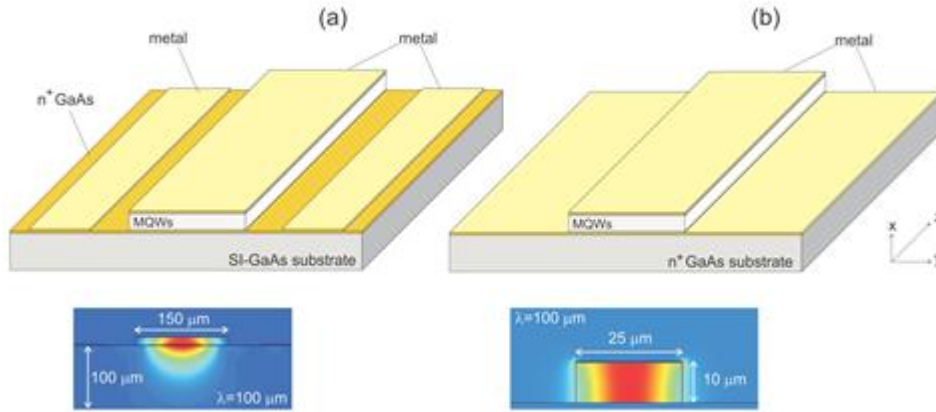
veya Au) arasına alınması birbirine benzer birleşik sınırlandırma faktörlerine neden olur. Halihazırda böyle bir yapı metalik sıcaklıkla sıkıştırma ile pul bağlamayı izleyen alttaşı kaldırılması ile epitaksiyel ince filmin metale bağlanması sağlanarak üretilebilir ve böylece de bilinen mikroüretim teknikleri ile işlenebilir hale getirilir (Lyakh *et al.* 2008). Genelde MM dalga kılavuzları genel dalga kılavuzu kaybı, lasing eşiği (J_{th}) ve en üst çalışma sıcaklığı T_{max} açısından SISP dalgakılavuzlarına göre üstün performans gösterirler. Bugüne kadar kaydedilen en yüksek sıcaklık MM dalgakılavuzları için gösterilmiştir ve bu çalışmalar maksimum sıcaklığın 200 K (Deutsch *et al.* 2012) ve 117 K (Gong *et al.* 2006) olması belirlenmiştir. SISP dalga kılavuzlarında atmalı için 110 K ve sürekli durumda < 70 K en yüksek çalışma sıcaklıkları olarak rapor edilmiştir (Hu *et al.* 2005; Kohen *et al.* 2005). Sıvı azot sıcaklıklarının üzerindeki sürekli dalga bileşenlerinin çalışabilmesi MM dalga kılavuzlarıyla alt dalga modunda uygulanabilirliği gösterir. Metal-metal dalga kılavuzu teknolojisinde 2-5 μm incelikte ve 13 – 20 μm darlıkta QCL sıralar gösterilmiştir (Kumar 2007) ve bunlar aktif bölgede ısınmanın önlenmesini kolaylaştırır ve güç yitimini azaltır. SISP teknolojisinde modun tamamen alttaşa geçmesi olası değildir. Aynı özellikte metal-metal teknolojisi 2 THz altında çalışan THz QCL'lerini göstermiştir (1.69 THz resonant fononda (Deutsch *et al.* 2012) (Fathololoumi *et al.* 2012) ve bağlı-sürekli aktif bölgelerde 1.2 THz kadar düşük (Walther *et al.* 2006, 2007). Yüksek dalgakılavuzu kaybının neden olduğu kötü sıcaklık performanslarından dolayı, SISP dalgakılavuzları (> 100 mW), MM dalgakılavuzlarıyla (< 10 mW) karşılaştırıldığında önemli ölçüde daha yüksek çıkış gücü elde edilmektedir. SISP dalgakılavuzlarında kaydedilen en yüksek optik çıkış gücü, atmalı çalışmada 248 mW ve cw çalışmada 138 mW olarak gözlemlenmiştir (Williams and Benjamin 2007).



Şekil 2. Ara-bantlar ve foton geçiş ve *injection barrier* şematik görüntüsü (Kohen *et al.* 2005)

Bu SISP dalga kılavuzlarında alt taşı büyük ölçüde mod geçişine bağlanır ve bu geniş bir aralıkta ışıma sağlar, böylece terahertz gücü ve yol gösterici ışınların eşleşmesini sağlar. Yüzeyi ayrılmış Fabry-P'erot MM dalga kılavuzları için ışıma alt dalga aralığı boyuncadır. İki metal kısım arasında sınırlandırılmış, yol gösterici Terahertz modu, ışıma aralığında geniş modal uyumsuzluk, yüksek oranda yüzey yansıması, zayıf dış ikili verimlilik ve uzak alanda

güçlü girişim saçaklı tamamen ıraksak ışın şekilleri gösterir (Baryshev *et al.* 2006; Adam *et al.* 2006). Sonuçta, MM dalga kılavuzları genellikle SISP dalga kılavuzlarından daha büyük yüzey yansımalarıyla ve daha küçük yansıma kayıplarıyla karakterize edilir (α m, MM / Γ = 0.5 – 2 cm⁻¹ yüzey birimi başına α m, SISP / Γ = 15 – 30 cm⁻¹ 1 mm uzunluğunda deliğin yüzeyine göre) (Hu *et al.* 2005). Hali hazırda, MBE ile büyütülen GaAs/AlGaAs hetero yapıları THz QCL’ler için en başarılı seçenektir.



Şekil 3. $\nu = 3$ THz te a) Yarı-yalıtkan yüzey plazmonu dalga kılavuzlarının ve b) metal-metal dalga kılavuzlarının şematığı iki boyutlu elektromanyetik mod profilleri (Lyakh *et al.* 2008)

Bu düşük iletim bandının offset değerlerinden kaynaklanmaktadır ki ışınlam geçişlerinin düzgün olmasını sağlar. Daha yakın zamanda, performansı düşük InGaAs/AlGaAs//InP- ve InGaAs/GaAsSb/InP- tabanlı QCL’ler geliştirilmiştir (Ajili *et al.* 2005; Deutsch *et al.* 2012). Bu alan hızla gelişmekte ve yakın gelecekte daha fazla terahertz lazeri ticari uygulamalar için umut vaat edici olacaktır (Dean *et al.* 2011; Strupiechonski *et al.* 2011; Mahler *et al.* 2012).

Amaç ve Kapsam

Bu çalışmadaki amaçlarımızdan biri oda sıcaklığına yakın olan sıcaklıklarda çalışabilen THz QCL’lerin iç katman yapılarının üretilmesidir. Çünkü günümüzde QCL’ler için en yüksek çalışma sıcaklığı 200K civarındadır, ve ayrıca kriyojenik soğutma gereksiniminin olması ise QCL’lerin yaygın kullanımını engellemektedir. Bu sebeple, bir termoelektrik soğutucu kullanılarak, kontrol edilebilen sıcaklıklarda çalışabilen THz QCL’lere ihtiyaç vardır ve bu çalışmada GaAs/AlGaAs QCL’lerin sıcaklık performansı dalga kılavuz kaybı düşük olan Cu-Cu dalga kılavuzlarını kullanarak geliştirilmiştir. GaAs/AlGaAs kuantum kademeli lazerler geliştirilmiş birleştirme teknolojisi ile cihazların performansı artırılmaya çalışılmıştır. Deneyisel olarak Tantalum miknatıssal saçırma ve bakır ısı buharlaştırma yöntemleri ile büyütülmüştür ve büyütülen filmlerin yapısal özellikleri incelenmesi sonucunda ve karakterizasyonlar neticesinde beklenilir kaplama kalitesine ve yapışma sonucuna varması istenilmektedir. Bu teze özel tasarlanan termal baskı aparatı, in-situ miknatıssal saçırma sistemi üretilmiştir. Bu sistem

sayesinde tüm metal katmanlarının miknatıssal saçtırma tekniğiyle ara arda kaplanıp, vakumdan çıkarılmadan aynı vakum odacığı içerisinde birleştirilmesi sağlanmıştır. Çalışma aşamalarında her iki sistemle kaplama yapma olanağımız bulunmaktadır. Termal buharlaştırma ile kaplama sırasında miknatıssal saçtırmada olduğu gibi ortama gaz gönderilmediği için daha yüksek vakum değerinde kaplama yapılır. Bu nedenle çok yüksek saflıkta ince filmler üretilebilir ve kaplama hızı daha yüksek olup ince film kalınlığı, aşamalı şekilde kontrol edilebilir.

KURAMSAL TEMELLER

İnce Film Teknolojileri ve Kullanım Alanları

Nanobilim ve nanoteknoloji sayesinde ortaya çıkan ince film teknolojileri günümüzdeki teknolojik alanlarda çok geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Yeni nesil üretim ve tasarım teknikler içeren malzemeler ve aygıtların büyük bir yüzdesi ince film üretim tekniklerinden faydalanmaktadır (Hwang 2016).

İnce film malzemeler grubu 1 nanometreden birkaç mikrometreye kadar, bir aralığı kapsamaktadır. İnce film malzemeleri özellik açısından bulk malzemelere göre tamamen farklılık göstermektedir. Bu malzemelerin içerdiği özellikler üretim koşulları ve ona bağlı kullanılan yöntemlerle doğrudan ilişkilidir. Bu koşulların bazıları, taban malzeme yüzey kalitesi, vakum çemberi içindeki işlem sırasındaki sıcaklık, büyütme esnasında kullanılan gazın türü ve akım basıncı, buharlaştırma veya saçırma yöntemlerinin hızı ve sonuçta hedef malzemenin saflık oranı olarak sıralanır ki koşulların kombinasyonuna göre elde edilen filmin optik, mekanik, termal vs. özellikleri meydana çıkmaktadır (Chopra and Maini 2010).

İnce filmler günümüzdeki sivil ve askeri üretimlerde önemli roller almaktadır. Mesela yüzeysel korozyon korumaları, oksidasyon önleyiciler, optik geçirgenlik ve ya refleksyon, yangına dayanıklılık, süper termal ve elektrik iletkenlik ve hafızalı aygıtlar, ince film özelliklerinden yararlanmaktalar. Nanoteknoloji alanına bağlı olan sensörler, küçük piller ve ilker solarceller ve ayrıca mikromekanik sistemler (MEMS), bu uygulamaların iyi örneklerindendir (Chopra and Maini 2010).

İnce Film Kaplama Yöntemleri

İnce film kaplamalar genel olarak iki gruba ayrılmaktadır. Bu iki grup PVD yada fiziksel olarak buhar fazından kaplama ve CVD kimyasal olarak buhar fazından kaplama şeklinde tanımlanır. Ama detaylı olarak her grup farklı alt gruplara sahiptir.

Buharlaştırma yöntemi ile oluşan metalik filmlerin yapısı, büyük ölçüde yığın metallerden farklılık göstermektedir. Örneğin öz dirençleri ile kapsamlı çalışmalar, ince bir filmin öz dirençinin yığın metalden çok daha büyük olduğunu ve bir filmin öz direnç ile dökme metalin öz direnç oranının kalınlığa ve film tipine bağlı olduğunu göstermiştir. Yığın ve film arasındaki yapıdaki varyasyonun yanı sıra, değişen deneysel koşullar altında oluşturulan filmler arasında önemli farklılıklar vardır. En sık çelişkili sonuçların nedeni olarak belirtilen değişkenler,

altlığın tipi, biriktirme sırasındaki sıcaklık, atomların altlığa çarpma hızı ve hızı ve buharlaştırma vakum derecesidir (Levinstein 2006).

PVD Teknikleri Gruplandırması

Fiziksel buharlaştırma yöntemi genel olarak birkaç genel grup içermektedir ki bunlardan Katodik-Ark biriktirmesi, Lazer ile biriktirme (PLD),elektron demeti ile biriktirme ve İyon kaplama projelerde gözüken alternatiflerdendir. Fiziksel buharlaştırma vasıtasıyla biriktirme yönteminin ana prosedürü genel bir şekilde üç kademedен oluşmaktadır.

İlk aşama özellikle iki aşamaya bölünür,

(I) Hedef malzemenin katıdan buhara faz değişimi ki bu işlem rezistans ısıtmalı, lazer, elektron ve iyon demeti ve ya indüksiyon vasıtasıyla gerçekleşir. Bu olayların neticesinde katı fazdaki hedef malzeme sıcaklığa maruz bırakılıp buharlaşma seviyesine geçirilir ve enerji almış olan atomlar ana malzemeden koparak vakum ortamında serbest kalır.

(II) Serbest kalan hedef malzeme atomlarının ortamdaki gaz veya hazır bulunan diğer atomlar ile reaksiyona girer. Eğer ortam sadece vakum ortamıysa, vakum derecesi yüksekliği icabı reaksiyonlar oluşur. Etkileşim ve reaksiyon oranı vakum ağırlığı yükselmesi ile sıfıra doğru yönelir.

İkinci aşama hedef malzeme yüzeyinden alınmış olan atomların her türlü reaksiyondan sonra, taban malzeme yüzeyine taraf yol kat etmesinden ibarettir. Bu aşamada farklı taşınma rejimleri gerçekleşmektedir. Bu olayın gerçekleşme koşullarından en önemlisi, hedef malzeme ve taban malzeme arasındaki uzaklık, atomik serbest mesafe (*mean free path*) ile kıyasta daha az olmasıdır. Ortamda vakum kalitesi ve ya özel olarak gönderilmiş olan gazların vakuma göre basınç oranı, hedef ve taban arasındaki gözlem hattından sorumludur. Tipik bir buharlaştırma işleminde, akıcı bir taşınım 20 ile 120 militorr vakum ortamında başlamaktadır. Ayrıca içeri gönderilmiş olan soy gazın, inert olma derecesi artımı taşınma hızının artasına sebep olmaktadır. Son aşama taban malzeme üzerinde gerçekleşmektedir. İyon haline gelmiş olan atomlar yüzeye çarparak bir tabaka oluşturur. Yapı oluşumu (I) atom ve ya iyon çarpımı hız ve enerjisine, (II) taban malzeme sıcaklığına bağlıdır. Tipik olarak bu enerji termal buharlaştırma için 0.5 eV ve sıçratma için 10 ila 100 eV olarak alınır. Yüzeyde oluşan örgü yapısı ve stres malzeme yapısına bağlı olarak değişir (Vossen 1980).

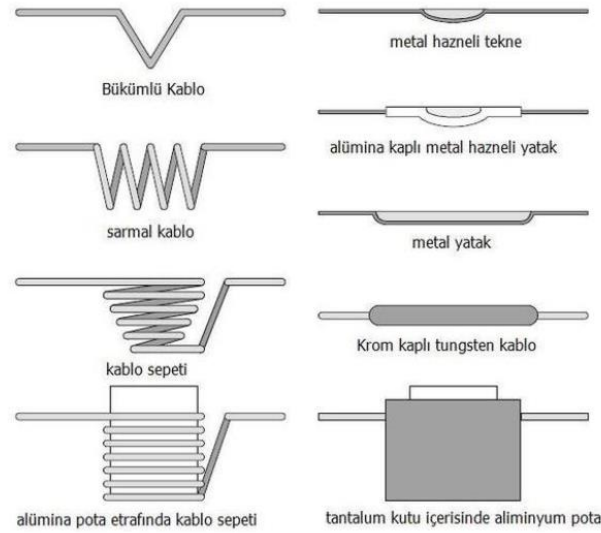
DC magnetron sıçratma yöntemi

DC magnetron sputtering yöntemi atom sıçratma gurubunda yer almaktadır. Bu yöntem vakum ortamında bir asal gazın atomlarının hızlandırması ve hedef yüzeye çarpmasıyla gerçekleşir. Bu işlem tek veya birden çok hedef malzeme buharlaştırması ve kaç katmanlı

kaplama yapılmaktadır. Mesela Aluminum-doped Zinc Oxide (AZO) bileşimi 2 aşamalı DC atom sıçratması ile yapılmaktadır. Bu tür kaplamada transparan elektrik iletken yüzey üretilmektedir (Turkoglu *et al.* 2018). DC miknatıssal saçtırma düşük sıcaklıkta kaplama yöntemi olarak bir çok uygulama imkanı sağlamaktadır mesela elektronik endüstrisi firmalarında kullanılan Antistatik kumaş ile yapılan iş üniformalarında kullanılan iplikler bu yöntem vasıtasıyla bir elektrik iletken metal ile kaplanarak üretilmektedir (Ozyuzer *et al.* 2017)

Termal Buharlaştırma Yöntemi

Bu gruplandırmaların iki temel parçası Termal buharlaştırma yöntemi ile biriktirme ve Saçtırma yöntemi ile biriktirme olarak öne çıkmaktadır. Genel olan termal buharlaştırma yöntemi farklı şekillerde ama temel olarak aynı esasta yapılmaktadır (Ezirmik and Rouhi 2014). Şekil 4 termal buharlaştırma prosedüründe kullanılan potaların genel şekillerini göstermektedir.



Şekil 4. Termal buharlaştırma potalarının şematik görüntüsü (Shah *et al.* 2009)

Bakır İnce Filmler

Bakır ince filmlerin çeşitli teknolojilerde farklı uygulamaları bulunmaktadır. Cu ince filmler spektrumun kırmızı ve kızılötesi bölgesinde yüksek bir yansıtma gücüne sahip olduğundan, bu tür ince filmler optik ve lazer bilminde birçok kullanıma sahiptir, ancak bakır ince film ve nanoteknolojide yaygın olarak kullanılmaktadır ve çok sayıda çalışma rapor edilmiştir. Bakırın mikro yapısını makroskopik özelliklere bağlayabilen çalışmalarda tüm bu özelliklerin, Cu ince filmlerin biriktirme ve oluşum yöntemine ve ayrıca büyüme durumuna bağlı olmasını göstermektedir. Önceki çalışmalarımızda, altlık sıcaklığı ve Cu'nun püskürtme parametresi ile elektriksel özellikleri ile ilgili özen gösterilmiştir ve ince filmlerin diğer birçok davranışını etkileyen en önemli özelliklerinden biri yapışma, sürtünme, elektriksel özellikler, yansıma veya saçılma ve adsorpsiyon vb., biriktirme durumuna (yüzey sıcaklığı, biriktirme

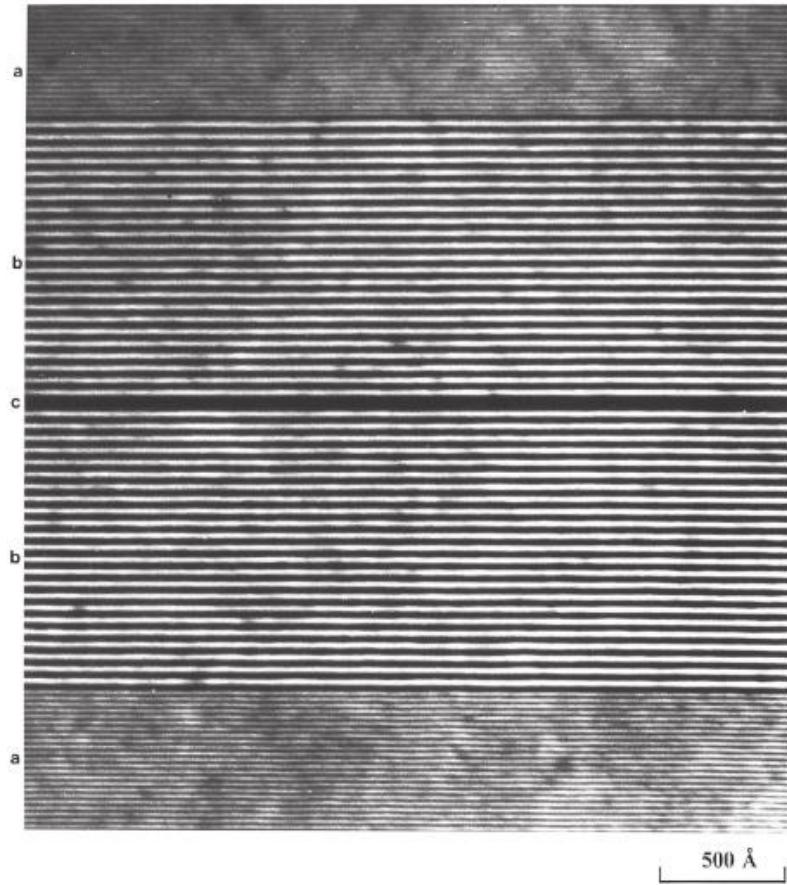
yöntemi, kalınlık veya biriktirme süresi...) bağılı olan yüzey pürüzlülüğünün çok önemli olması öne sürülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü, araştırdığı ölçeğe bağılı olarak oldukça farklı görünebilir (Zendehtnam *et al.* 2007).

Tantalum İnce Filmler

Tantalum (Ta) atomik numarası 73, ergime ve kaynama sıcaklığı yüksek (3017, 5458°C) olan bir geçiş metali olarak sayılmaktadır. Bu elementin ergime noktası yüksekliğinden dolayı, buharlaştırılması mıkmatıssal saçtırma gibi yöntemler ile yapılması tercih edilir. Bu metalin elektrik direnci düşüktür ve 150°C altında mükemmel kimyasal inertlik gösterir. Sahip olduğı bu özellikler bu metali, manyetik ince filmler ve disk depolamalar ve tümleşik devre (IC) lerde nüfuz ve dağılım bariyeri olarak tanımlatmıştır. Bu element kütle şeklinde olduğı zaman hacim merkezli kübik (BCC) yapısı yani α -phase almaktadır ama ince film boyutlarına indiğı zaman *Meta Stable Tetragonal* yani β -fazı gözükür ki β fazı α fazına göre daha kırılğandır ama özdirenci yüksektir ve süper iletkenlik fazına geçme sıcaklığı daha düşüktür. Ayrıca ince film halindeyken aldığı fazın şekli, taban malzemenin yapısından etkilenmektedir. Mesela normal olarak Silisyum taban malzemesi β fazı ve Alüminyum (Al) ve ya krom (Cr) malzemeleri α fazı oluşturmaktadır. Yüzeyde oluşan kırılğanlık, oluşum esnasında biriken streten kaynaklanmaktadır ki makaleye göre bu stres 600-800°C aralığında tavlamaıyla giderilmektedir (Alami *et al.* 2007).

Tantalum ve Tantalumun alaşımları ince film teknolojisinde *resistor* bir katman olarak tanınmaktadır. Bu malzemenin ince film halindeyken asıl görevi, iki farklı katman arasında bağ kurup birbirine yapıştırmaktır. Mesela Silisyum (Si) üzerine farklı malzeme dop etmek için kullanılır ve ya iki metal tabaka arasında yapıştırıcı bağlayıcı olarak kullanılmıştır (Al, Cu vs) ve ya yarıiletken teknolojisinde Si ve GaAs Arasında yüzeysel bağ oluşturmaktadır ve bu işlevlerde yüksek termal dayanıklılığı raporlanmıştır. Yapılan çalışmalara göre Tantalum RF, saçtırma işlemi Argon, Azot ve Oksijen gazlarıyla yapılmaktadır ve bu yöntemlerin sonucunda elde edilen Ta-N gibi ürünler yüksek termal ve mekanik dayanıklılık göstermektedir (Stavrev *et al.* 1997; Riekkinen *et al.* 2002).

Bazen Ta₂O₅ gibi Tantalum kimyasal bileşimleri kimyasal buhar fazından indirgenme (CVD) ve *Atomic Layer Epitaxy* (ALD) yöntemiyle yapılır ki (ALD) yöntemi daha kontrollü şekilde tabaka kalınlığı oluşturmaya sağlamaktadır (Mihailescu *et al.* 2002; Ochs 1995). Şekil 5 GaAs yapısındaki katmanları göstermektedir.



Şekil 5. GaAs katmanlarının SEM görüntüsü. a,b ve c 2.8 Å kalınlığında monoleyer katmanları halinde (Mihailescu *et al.* 2002).

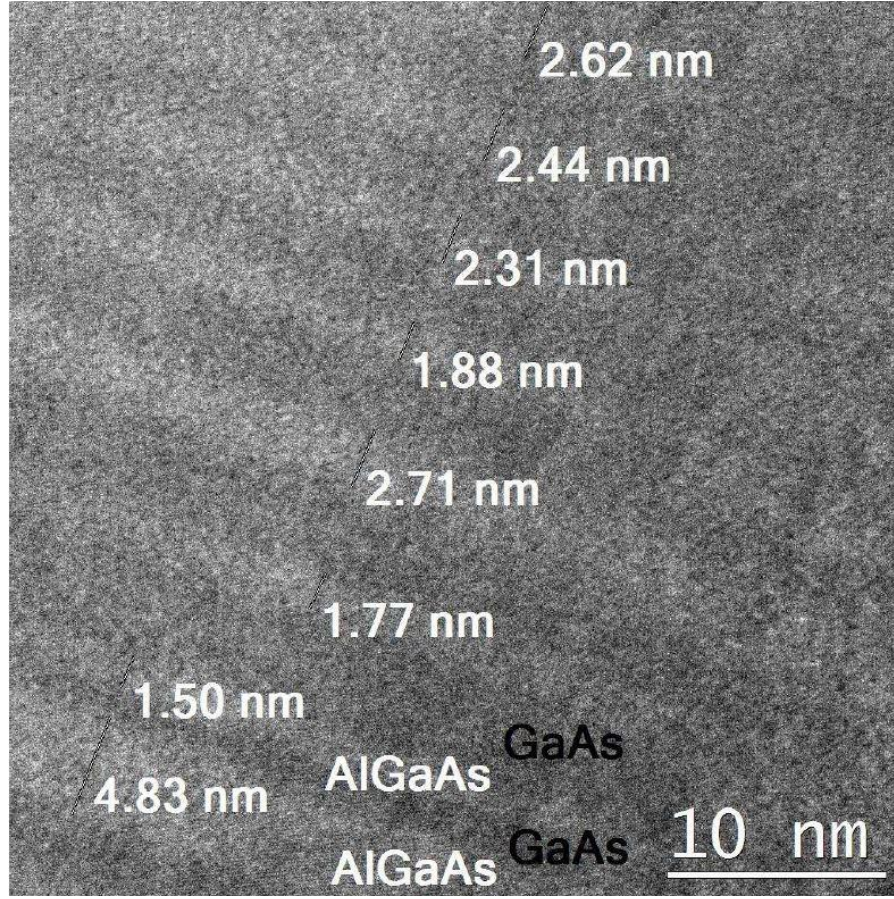
Yarıiletkenler

Yarıiletken farklı bant aralığına sahip bir heteroyapı olarak, iki veya daha fazla katmanlı malzemeden oluşan bir periyodik yapıdan oluşur. Ortaya çıkan bant kenarı süreksizliği, elektronik hareket için etkili bir potansiyel profil (kuyu ve bariyerlerle) sağlar. Katman kalınlıkları elektron dalga boyundaysa, kuantum haps etme, toplu bantları bir dizi ayrı alt banda böler. Alt-bantlar arası optik geçişler daha sonra mümkün olur, örneğin sadece ilk iletim bandına ait elektronları içerir. Geçiş enerjisi esas olarak elektron dalga fonksiyonlarının bulunduğu kuantum kuyusunun genişliği ile belirlenir. Bantlar arası geçişlerde çalışan tek kutuplu bir yarıiletken lazer oluşturma fikri Kazarinov ve Suris'e bağlı eski yıllara dayanıyor. Konsept, özelliklerinin (enerji, dipol matris elemanı, radyasyon olmayan saçılma oranı, vb.) tasarımıyla tam kontrol sağlayan geçişin yapay doğası nedeniyle lazer uygulamalarına cazip bir seçim haline getirmiştir. Ayrıca, bir lazerin uygulanması için özellikle iki temel husus söz konusudur. İlgili her iki alt bant da aynı yığın iletim bandından kaynaklanır ve bu nedenle ideal olarak aynı etkili kütle ile karakterize edilir. Bu, maksimum seviyeye çıkma, sıcaklığa bağımlılığını azaltan neredeyse foton yoğunluğu üretir. Ayrıca, foton emisyon işleminin sonunda, elektron hala iletim bandındadır ve daha sonra, nokta sayısına eşit sayıda başka bir foton yaymak için bir sonraki aktif bölgede geri dönüştürülebilir. Birçok pratik öneri ve

Galyum Arsenide Taban Malzemesi

GaAs bileşiminin iki yönü olan Galyum ve Arsenik arasında olan etkileşim 1975 yılında öne sürülmüştür. Bu etkileşim {100} yüzey kristalize olma yönünde gerçekleşmektedir ve sıcaklık rejimlerine göre 450 K altında ve üstünde olarak ayırt ettiler. As₄ molekülü düşük sıcaklık bölgesindeki, zayıf bir şekilde yüzeysel olarak GaAs atomlarıyla bağ kurmasına rağmen, atomların ayrışmasına karşı gelerek örgü yapısına doğru koruyucu bir davranış göstermektedir. Bu üretim tekniğinde kemisorpsiyon süreci şeklinde olmak üzere disosiyatif olmadığı için, GaAs yapısı büyümesi gerçekleşmemektedir çünkü molekülün kalıcı olarak dahil edilmesi halinde atomlara ayrılması esastır. Yüzey yapısında Galyum atomları yokluğunda öncül olarak fizyonorpsiyon gerçekleşir ve bu durumda ayrışma aktivasyon enerjisi tipik olarak bir zayıf bağ için $ED = 0.38$ eV olarak farz edilir. As₄ molekülünün 300 K ila 400 K sıcaklığı arasındaki dayanım süresi 10^{-4} ila 3×10^{-3} saniye ve yapışma katsayısı sıfır olarak ölçülmüştür. Gerçekleşen bu durumda bağlanma enerjisi nispeten küçük olsa bile, yüzey detektör geçiş sürelerinin ölçülmesine göre, As₄ moleküllerinin GaAs yüzeyine termal olarak yerleşmiş olduğu ilgi çekicidir. Yüzeyde galyum atomları mevcut olduğunda, As₄ yapışma katsayısının 0,5 ile 1,0 arasında olduğu ve sıcaklık miktarı artınca daha sık bir şekilde ayrışıp özgül bağ kurmaları tespit edilmiştir (Foxon and Joyce 1977).

Sinyal analizi uygulamalarında Fourier dönüşüm teknikleri en önemli faktörlerden olup kesin olarak uygulamaların deneysel kabiliyetini arttırmaktadır ama bu bölümün en önemli endişe verici yönü, kristal büyümesinin anlaşılması ve kaydedilen ilerlemeyi özetlemektir. Bu üretim aşamasında en önemli büyütme yöntemi bilindiği gibi buharlaştırmadan ibaret olarak her iki faz farklı koşullarda üretilir. Galyum, bir sıvı kaynağından buharlaşarak monomer olarak tedarik edilir ve nispeten düşük altlık sıcaklıklarında galyumun GaAs üzerinde birleşik yapıştırma katsayısına sahiptir ve bu katsayı raporlandığı gibi 750 K gerçekleşmektedir. Ancak birleşğin diğer yönünü olan Arsenik üzerinde sıcaklık önemli ölçüde daha az olarak, As₂ moleküllerinden veya hatta GaAs yapısında veya yüksek sıcaklıklarda As₄ molekülü şeklinde bulunan katı arsenikten buharlaşarak sağlanabilir (Orton and Foxon 2015).

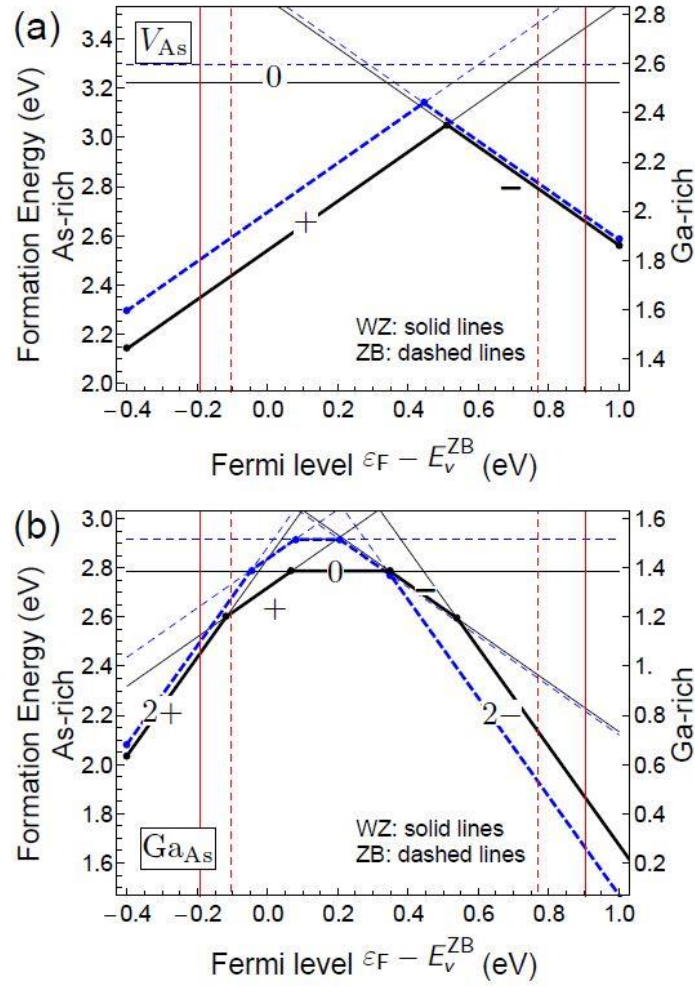


Şekil 7. HRTEM ile alınmış olan GaAs örgüsünün epitaksiyel yapısı (Walther and Krysa 2017)

Şekil 7 AlGaAs/GaAs epitaksiyel örgü yapısını göstermektedir. GaAs yapısal oluşumunda zati örgü kusurları öne çıkmaktadır. Kusurlar ve daha doğrusu boşluk yapılar GaAs örgüsünü doping yöntemi ile As ve ya Çinko gibi farklı elementler ile zenginleştirmek için مناسب bir hale getirmektedir. Boşluk oluşumu Fermi enerjisi seviyesinin değişimi ile meydana gelir ve ya kontrol altına alınmaktadır ama öte yandan operasyon sırasında bulunan Galiyum elementi oranı ve ya diğer bileşenler ve ya kontaminasyonlar da önemli etkenlerden sayılmaktadır. Bu kusurlar oluşumu için gereken fermi enerjisi miktarı (E_f) aşağıdaki formülden hesaplanmaktadır.

$$E_f [X_Y^q, \varepsilon_F] = E [X_Y^q] - E_{host} - \sum_i n_i \mu_i + q(\varepsilon_F + E_v) + E_{corr}.$$

Formülde gözükten q supercell lerin elektriksel yük (sabit değer) ve X, Y konumunda safsızlık oranı Fermi enerjisi seviyesinin birer fonksiyonudur. $E[X_Y^q]$ kusurlu supercell lerin total enerjisi ve E_{host} aynı koşullar içeren kusursuz örgü yapısının enerjisini sergiler. Ayrıca n_i alınmış olan numune sayısı ve μ_i numunelerin kimyasal etkileşim potansiyel değerlerinden ibarettir. Burada Fermi enerjisi (E_f) doping yada yerleşme koşullarına bağlıdır ve E_v valans bandının en yüksek enerji seviyesi olarak GaAs balk yapısının oluşumundan sorumludur (Du *et al.* 2013).



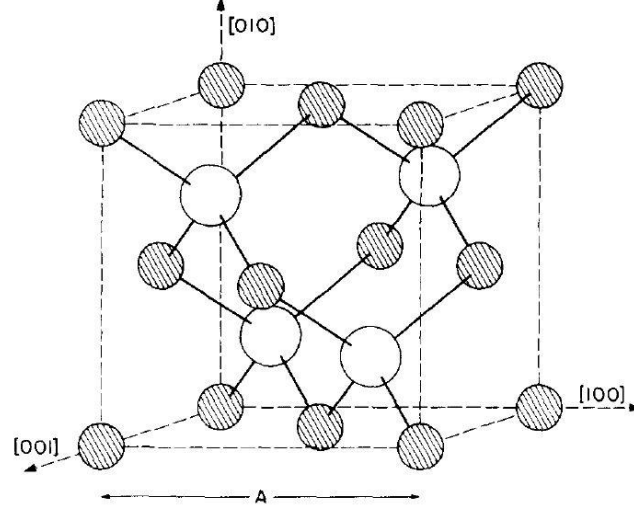
Şekil 8. As kusurlu yapı oluşumu enerji seviyesinin (a) Ga miktarının artışına göre ve (b) doping koşullarına göre değişimi (Du *et al.* 2013)

Yukarıda verilmiş olan Şekil 8 GaAs yapısında oluşan boşluk yapılanma etkenlerinin bir misali olarak değişen Fermi enerji seviyesini açıklamaktadır. Bu figürde GaAs dın (ZB) zinc blended yani Çinko doplanmış ve (WZ) wurtzite (Çinko- Sulfite-Demir karışımı) yapıları ve onlarla ilgili çeşitli segmentlerin istifleme hatalarını (stacking faults) ifade etmektedir. As yapısında herhangi az miktarda boşluk oluşumu enerji seviyesi örgü yapısını etkilemektedir. Boşluk oluşum enerjisi de fermi enerjisinin bir fonksiyonu olarak, Ga elementi miktarı ve doping koşullarına göre değişmektedir. As yapısında bulunan boşluk oluşum enerjileri ZB GaAs'lar ve WZ GaAs'lar için sırasıyla kesikli ve düz çizgiler olarak gösterilir. Kalın çizgiler, kararlı yüklenme seviyesinde olan durumlarını temsil eder ve dikey çizgiler, içindeki HOMO ve LUMO seviye farklarını gösterir. Şekil 8 temsil ettiği duruma göre boşluksuz ve kusursuz supercell oluşumu enerji aralığını göre sınırlanır (Du *et al.* 2013).

Galyum Arsenide Örgü Yapısı

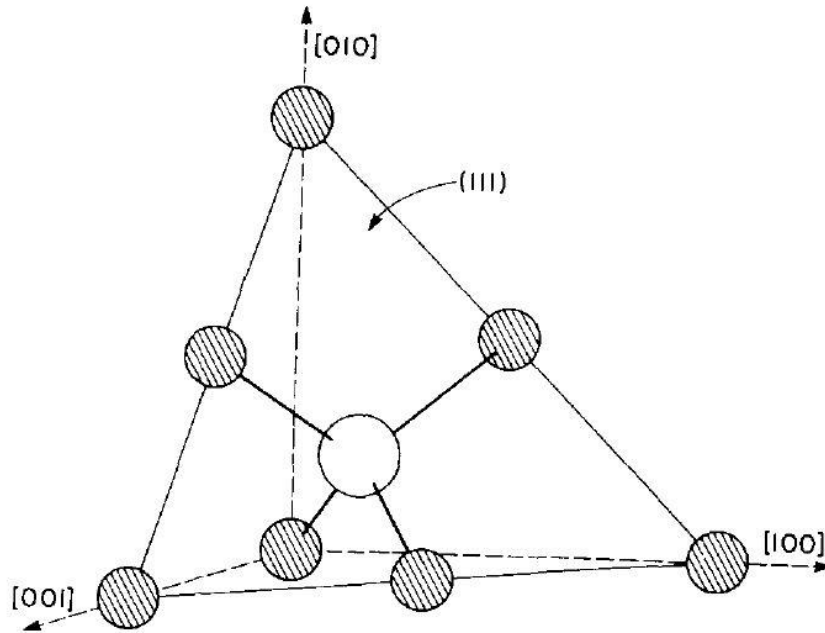
GaAs kombine yapısı ilk olarak Goldschmidt tarafından 1920 li yıllarında kubik *sphalerite* (zincblende) örgü yapılı olarak keşif edilmiştir. Bu örgü yapısı FCC *translational*

symmetry esaslı olarak atomlar arası bağ uzunluğu $r_0 = (\sqrt{3}A/4)$ değerindedir ve atomik bağ arası açısı $\varphi = \cos^{-1}(-1/3) = 109.47^\circ$ olarak hesaplanmaktadır. Şekil 9 verilen özelliklerdeki örgü yapısını ifade eder. Şekil 9. örgünün konvansiyonel yapısını ifade etmektedir (Szweda 2000).



Şekil 9. GaAs konvansiyonel birim küp, hacimi A^3 olan bu örgü ilkel bir hücreden 4 kat daha büyüktür (Szweda 2000)

GaAs orta gri bir görünüme sahiptir ve orta zorlukta mekanik olarak cilalanabilir. Ayrıca kimyasal aşındırma için parlak bir görünüm verebilir. Bu bileşimde oluşan düzlemsel yönelme en düşük miktardadır ve sertlik derecesi orta düzeydedir. Knoop'un piramitini kullanarak ölçülmüş olan mikro-sertlik derecesi $750 \pm 40 \text{ kg / mm}^2$ olarak ölçülüp bölünmeler genelde $\{110\}$ düzey ailesinde meydana gelir.



Şekil 10. GaAs yapısındaki kristalografik yönelmeler. $\{111\}$ düzlemindeki yan kesitler sadece 1 türlü atom içermektedir (Szweda 2000)

Yukarıda yer alan Şekil 10 GaAs hücresel yapısının düzlemsel yönlenmelerini ifade etmektedir. Bu yapı 8 tane {111} düzlemini içermekte olup her düzlem sadece 1 türlü atom içerir. Bu düzlemlerin 4 tanesi tamamen Galyum ve kalan 4 lü Arsenit atomlarından oluşmuştur. O yüzden her türlü kimyasal aşınmaya maruz kaldığı zaman karşılaştığı düzleme göre farklı türlü davranış sergilemektedir. Genelde Galyum içeren düzlemler daha az ve heterojen şekilde aşınır.

Galyum Arsenide Faz Diyagramı

Ga-As ikili faz diyagramı için geleneksel metalürjik format, Arsenik fraksiyonlu X_A , doğrusal bir ölçek olarak görünmektedir. Arsenik zenginleşmesi yönünde üç tane otektik katılma noktası gözükmektedir. Normal ergime noktası (T_m) Koster ve Thoma tarafından 1511 K olarak raporlanmaktadır ama Van Den Boomgaard ve Schol, $T_m = 1513 \pm 1$ K olarak tespit etmekteledir.

Başka bir bakışla, ergime noktasının hidrostatik basınçtan etkilenmesi öne sürülmektedir.

$$T_m \approx 1513 - 3.5P \text{ K } (0 < P < 45 \text{ kbar})$$

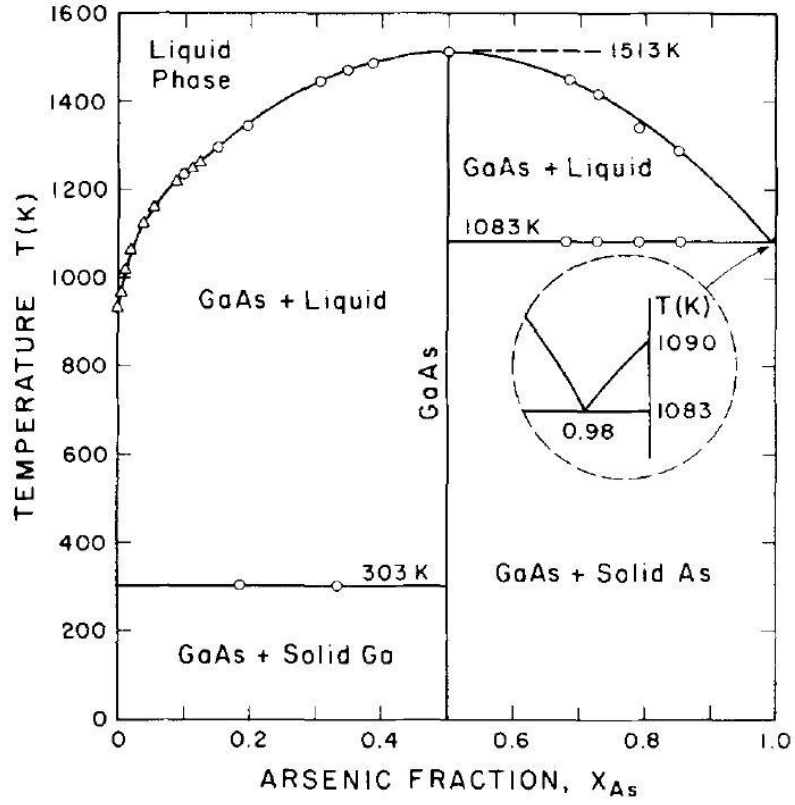
Lichter ve Sommelet 1982 stoichiometric GaAs sıcaklık dağılım miktarını direkt calorimetry ile ölçerek elde ettikleri enthalpy denklemi

$$\Delta H_m = 25.2 \pm 0.6 \text{ kcal/mole} = 728 \pm 17 \text{ J/g}$$

Ve aynı şekilde elde edilmiş olan entropy denklemi

$$\Delta S_m = 16.64 \pm 0.40 \text{ cal/mole K}$$

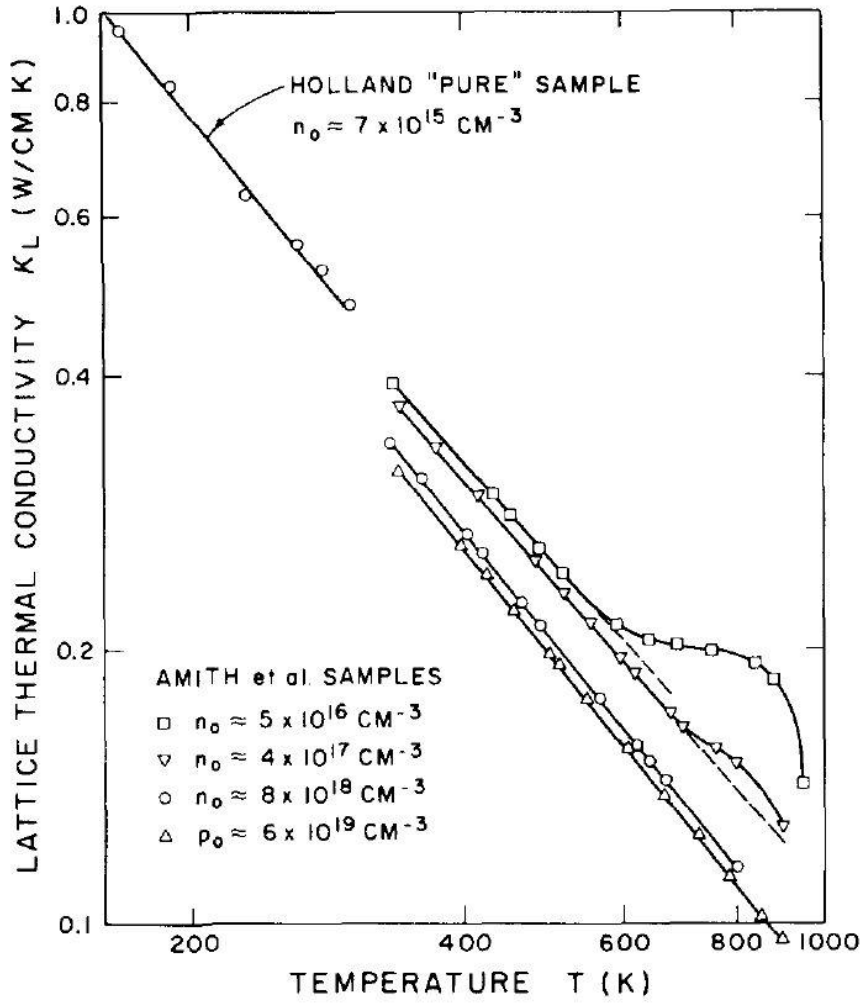
şeklinde raporlanmıştır. Elde edilen faz diyagramına göre Eutectic noktası itibariyle Arsenide miktarı artışıyla sistemdeki ergime noktası düşüş göstermektedir (Ghasemi and Johansson 2017). Şekil 11 GaAs dın geleneksel faz değişimlerinin etkili sıcaklık noktalarını göstermektedir.



Şekil 11. GaAs geleneksel biner faz diyagramı. Diyagram yaklaşık %0.5 As noktasında eutectic yapısına ve maksimum 1513 K ergime noktasına ulaşmaktadır (Ghasemi and Johansson 2017)

GaAs Termal Geçirgenlik Etkenleri

GaAs dın kübik olan örgü yapısından dolayı normal olarak termal geçirgenlik isotropic haline yönlenmesi beklenmektedir ve hatta taban olarak foton, photon ve electron-hole yapılarının yönlenmesi de aynı şekilde gerçekleşmektedir. Ama Marucha *et al.* tarafından öne sürülen çalışmada homojen bir şekilde katkılama GaAs yapısının Anisotropic şekilde davranışı ispatlanmıştır. Aynı halde sıcaklıkla uyarılmış olan fotonlar bile yapıdan geçerken anisotropic örgü eserinde gerçekleşen elastik modülden etkilenererek yönlendirmeye maruz kalır ve foton dağılımı güçlü bir şekilde örgü yönlenmesi ve polarizasyonundan etkilenmektedir. Şekil 12 (340-950 K derecesi aralığında 3 tane n-type ve bir tane p-type GaAs yapısının termal geçirgenliğini saf numune ile kıyaslamaktadır (Blakemore 1982).



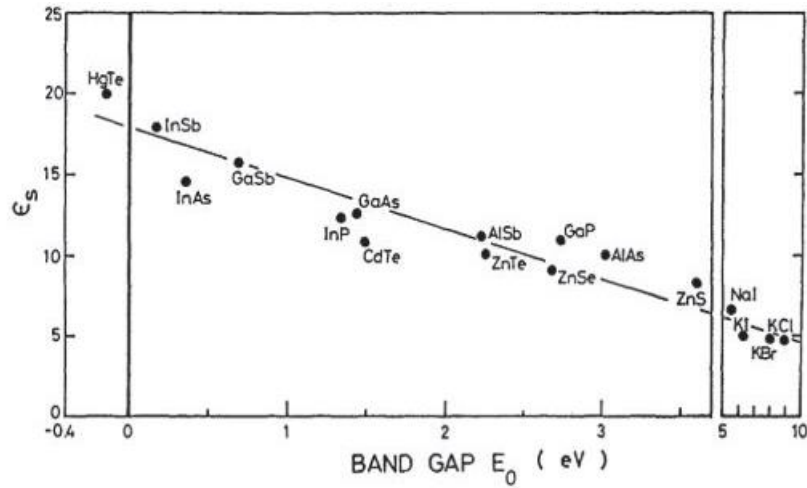
Şekil 12. GaAs deki örgü yapısına göre değişen termal geçirgenlik miktarı (Blakemore 1982)

Optik Spektrum ve Çeşitli Bölgelere Sınıflandırılması

Kristal yapısı içeren malzemeler optik spektroma uygun malzemeler sınıfında yer almaktadır. Şekil 13 farklı malzemelerin bant aralıklarına görünen enerji miktarlarını göstermektedir. Bu esasta kristalize yarıiletken malzemeler kendi optik geçiş mekanizmalarına dayanarak birkaç foton-enerji bölgesine sahiptir. Bu bölgeler spektral aralığı olarak bilinir ve üç spektral bölgeye ayırt edilir. Birinci bölge reststrahlen bölgesidir. Reststrahlen bölgesi radyasyon alanının temel kafes titreşimleri ile etkileşime girdiği bölgedir ki bu etkileşim sırasında 2 olay meydana gelir. (1) kafes titreşimlerinin oluşturulması veya yok edilmesi nedeniyle elektromanyetik dalganın emilmesi veya yayılması ve (2) kafes titreşim modları tarafından elektromanyetik dalganın saçılması. Si ve Ge gibi kovalent-elmas tipi yarıiletkenlerde, temel titreşimin dipol momenti olmadığı ve daha sonra IR'nin inaktif olduğu belirtilmektedir. İkinci bölge, malzemenin birincil olarak iletmediği kabul edilen bölgedir (yani, temel emme kenarının yakınında veya altında). Uygun şekilde katkılı numuneler, bu spektral bölgede serbest taşıyıcı, ara iletim ve aralık bandı emilimini gösterebilir. Bu spektral bölgedeki

kırılma indeksleri ve absorpsiyon katsayıları bilgisi, çeşitli optik ve optoelektronik cihazların tasarımında ve analizinde özellikle önemlidir (Adachi 1999).

Üçüncü bölge kuvvetle emici veya opak bölgedir. Çeşitli karşıt doğrudan elektron deliği çifti oluşturma grupları bu bölgede dağılım ve emilimin güçlü olmasını sağlar. Bu bölge üç alt bölgeye ayrılabilir. Birinci alt bölge (A), iletim bandı geçişlerine değerlik ile ilişkili keskin yapılarla karakterize edilir. İkinci alt bölge (B), anımsatan yansımada hızlı bir azalma ile işaretlenmiştir. Reststrahlen bandı iki komşu iyonun titreşimine atfedilebiliyorsa veya bir diğerine göre bir türden tüm iyonlar, amorf formda gözlemlemeyi beklenir. Ayrıca, amorf malzeme. Daha sonra kristalinden amorf duruma geçme (1) kristalde izin verilen optik benzeri modların emilimini genişletme ve (2) yasak olan diğer foton modları tarafından ek bir emme bandı sokma etkisine sahiptir (Adachi and Wasa 2012).



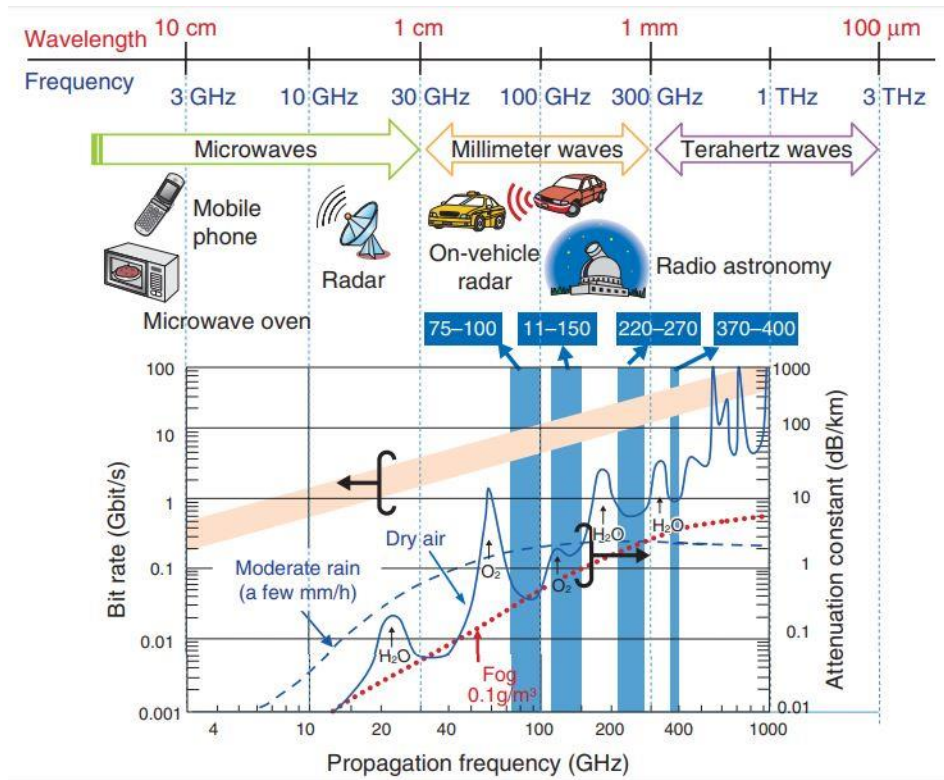
Şekil 13. Farklı malzemelerin bant aralığına bağlı olan enerji miktarı (Adachi 1999)

Terahertz Işıması ve Özellikleri

Terahertz radyasyonundan bahis edildiğinde elektromanyetik spektrumda kızılötesi ve mikrodalga radyasyonu arasında yer alıp ve bunların her biriyle bazı özellikleri paylaşan bir dalga boyunu ifade etmektedir. Şekil 14 şematik olarak Terahertz ışımalarının bazı kullanım alanlarını ifade eder. Terahertz radyasyonu iyonlaştırıcı etkisi göstermemektedir ama birçok çeşitli iletken olmayan maddelere nüfuz edebilir. Terahertz radyasyonu kâğıt, karton, ahşap, duvar, plastik, seramik malzemeler ve insan kıyafetlerinden geçebilir. Bu geçiş sırasında penetrasyon derinliği genellikle mikrodalgadan daha az ve sınırlıdır. Mesela sis ve bulutlardan geçerek sıvı suya nüfuz edemez. Genel olarak fizikte Terahertz dalgaları, Terahertz ışığı, T-ışınları, T-dalgaları, Tlight, T-lux veya THz milimetre altı radyasyon, olarak da adlandırılır. İsimleri böyle geçen bölgenin dalga boyu 0.3 ila 10 Terahertz (THz) frekanslardaki elektromanyetik dalgalar aralığı için geçerlidir. Başka bir deyimle milimetre dalga bandının kenarı (300) GHz ve uzak kızılötesi ışık bandının düşük frekanslı kenarı (3000 GHz) bant

aralığında karşılık gelen radyasyon dalga boyları 1 mm'den 0,1 mm'ye (veya 100 μm) arasındadır. Dünyanın atmosferi güçlü bir Terahertz emicisi olsa bile bu ışınlar astronomik bilimlerde baya yaygın kullanılmaktadır. Uzun mesafeli iletişim teknolojilerinde pek çok yararlı olmadığına rağmen de 10 metrelik mesafelerde hala birçok yüksek görüntüleme, kablosuz ağ sistemleri, özellikle iç mekân uygulamalarında iyi kabiliyete sahiptir. Bu frekans aralığında üretim ve uyumlu elektromanyetik sinyallerin modülasyonu kullanılan geleneksel elektronik cihazlar ile mümkün değildir ve yeni cihazlar ve teknikler gerektirir. Ancak Terahertz bölgesi 0.3-10 THz dalga boyu ile çok az gelişmiştir (Kukutsu and Kado 2009).

Terahertz ışıması meta-malzeme detektörleri gibi aygıtlarla algılanmaktadır. Meta materyaller elektromanyetik spektrum emicisi olarak belirli dalga boylarında THz dalgalarına maruz kalınca 0-2 THz e kadar algılama gücüne sahiptir (Sabah *et al.* 2018). Terahertz ışıması çeşitli kaynaklardan gerçekleşir. Bu kaynaklardan en önemli olanları Diyot lazerler ve yarıiletken lazerlerdir ki sırasıyla 1.2 THz dalga boyu altı ve üstünü yaymaktadırlar (Ozyuzer *et al.* 2007). Ayrıca Terahertz radarı dediğimiz detektörler biyolojik silahlar ve zehirleyici gazlar algılaması içinde kullanılır (Demirhan *et al.* 2017).

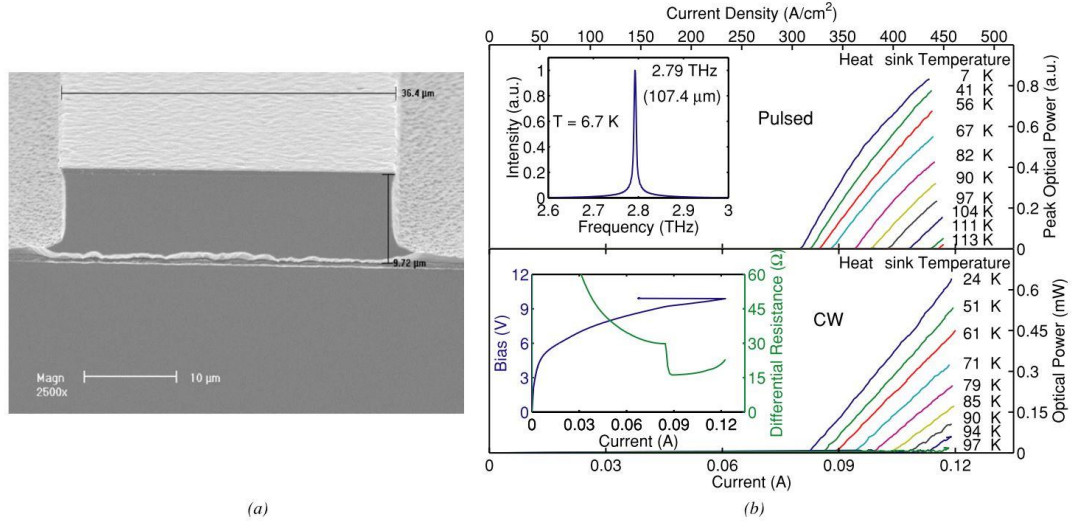


Şekil 14. Terahertz dalga boyunun elektromanyetik spektromda şematik konumu (Kukutsu and Kado 2009)

Kuantum Kademeli Lazerler (QCL)

Terahertz quantum kademeli lazerler (QCL'ler) son zamanlarda 1,9–5,0 THz frekans aralığını kapsayan sürekli dalga (cw) koherent radyasyon kaynakları olarak kullanılabilir hale

gelmiştir. Terahertz QCL'leri için en iyi sıcaklık performansı rezonans-foton depopülasyon şeması ile metal-metal dalga kılavuzları kullanılarak, pulse modda 164 K ve (cw) modunda 117 K çalışması mümkündür. Diğer lazer türler ile karşılaştırıldığında oda sıcaklığı cw operasyonunun sergilendiği reststrahlen bandından foton popülasyonu sağlaması düşük radyasyon etkisi yaratmaktadır (Williams *et al.* 2006). Şekil 15'de lazerin sıcaklığına göre göstermiş olduğu performans ifade edilmektedir.



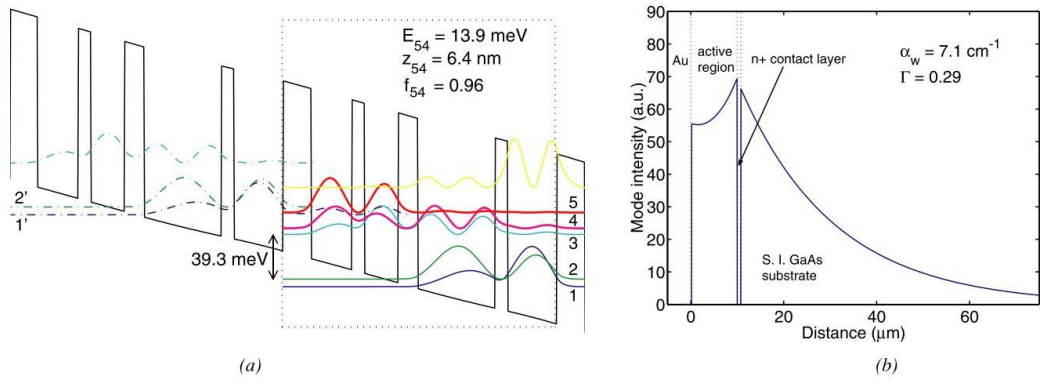
Şekil 15. Bakır-bakır dalga kılavuzu içeren bir lazer cihazının SEM resmi. (b) 25 μm genişliğinde ve 1.04 mm uzunluğunda bir lazer cihazından darbeli (üst panel) ve CW (alt panel) işlemlerinin ışık-akım ($L - I$) ilişkileri (Williams *et al.* 2006)

Restrehalen Bölgesi ve Yayılım Etkisi

8 yıl QCL lerin üretiminden sonra Ekim 2001, ilk kuantum kademeli lazer *Reststrahlen* bant aralığında çalışma performansı göstererek 4.4 THz, dalga boyunda ışınlama yapmıştır. Bu lazerler chirped-superlattice örgü yapısında orta infrared frekans aralığında yüksek performans göstermektedir ve kuantum sınırlama etkisine dayanarak, ikili dalga kılavuzu vasıtasıyla GaAs altlık üzerine uygulanmıştır. Kısa adım ilerlemeleri (Şekil 16) ile çok benzer lazer yapıları 4.6 THz bant aralığında yayınlama yapmaya uygun hale gelmiştir. Yeni gelişmeler *bound-to-continuum* esaslı çalışmalar üzerine kurulumuyla beraber yapı içerisinde *intersubband transition*, yani suni alt bant geçişleri sağlayarak operasyonda gerekli enerji seviyesi ve ona bağlı çalışma sıcaklığını ve ayrıca yayılan frekansın enerjisini arttırarak, QCL lerin göstermiş olduğu performans seviyesini artmıştır. 2004 yılından itibaren Kuantum Kademeli Lazerler (QCL'ler) Terahertz ışını kaynağı olarak rapor edilmiştir. Bu süreçte, *reststrahlen* bandı genişliği, Foton parçacıklarının geçişinde zorluk yaratarak daha düşük emisyonlar ve Terahertz frekansları yaymasına neden olur ve bu sıkıntı çözümüne uygun bir dalga kılavuzunun geliştirilmesi gereği duyulmuştur. Terahertz aralığı içindeki uzun dalga boyunun ışığını, moleküler ışın epitaksi teknolojisiyle uyumlu ve lazer moduna düşük emilim kayıpları ile

uyumlu bir epi-layer ile sınırlamayla gerçekleştirilmiştir. Moleküler ışını epitaksi teknolojisi ile uyumlu ve lazer moduna düşük emme kayıpları ile uyumludur. Son zamanlardaki yeni tasarım konseptleri CW operasyonuna ve yüksek frekans yayılımına neden olmuştur (Hu *et al.* 2005).

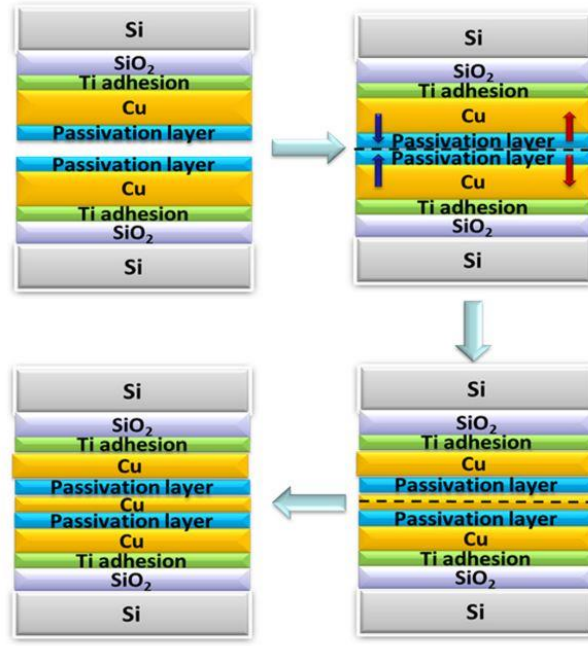
Başka bir deyişle reststrahlen bölgesinde *inelastic* foton yayılımı parametreleri daha düzgün ve direk optik etki sağladığını göstermektedir. Reststrahlen bölgesinde *subband* lar vasıtasıyla yapılan reflekt ve disorpsyon etkisi GaAs yapısından natürel bir lazer yayılımı göstermektedir ki bu yayılım katyon ve anyonların ters dağılımına sebep olarak meydana gelmektedir. Eski deneyimlerde Helmholtz, tarafından 1874 yapılan ilkler lazer yayılımı "single oscillator" modeli ve tek yönlü *absorption/dispersion* dağılımıyla gerçekleştirilmiştir (Blakemore 1982).



Şekil 16. (a) Restrehalen bölgesi şematigi ve (b) dalga yayılım şiddetine etkisi (Hu 2005)

3D İntegrasyon

Termal baskı yöntemlerinde yaygın kullanılanlardan birisi Pasivasyon ile Bakır – Bakır bağları oluşturma mekanizmalarıdır. Şekil 17’de şematik olarak gösterildiği gibi 3D, IC teknolojisinin başarılı bir şekilde uygulanmasını sağlayan temel faktör, basit bir düşük sıcaklık ve düşük basınçlı Cu – Cu bağlama tekniğini uygulamaktır. Tüm yöntemler arasında, Cu – Cu termal baskı bağı, uygulanabilir bant aralığı düşük temas direnci, daha iyi mekanik mukavemet sayesinde tercih edilerek yapışmadan önce Cu yüzeyinin uygun şekilde pasifleştirilmesi ile elde edilebilir. Cu – cu termal baskı bağlaması ile ilgili en önemli sorun, ortam sıcaklığında ve daha yüksek sıcaklıklarda Cu yüzeyinde oksit tabakası oluşmasıdır. Yapıştırma işlemi sırasında, bu doğal oksit bir bariyer görevi görür ve Bakırın arayüz boyunca homojen karışmasını önler, böylece güvenilir bir bağ elde etmek için daha yüksek sıcaklık veya basınç gerektirir. Ancak, böyle kalite Cu – Cu bağı elde etmek için daha yüksek sıcaklık veya basınç gereksinimleri performans bozulmasına, hassas cihazların altında hasara neden olabilir ve potansiyel olarak güvenilirlik sorunlarına yol açabilir. Bu nedenle, düşük sıcaklık ve düşük basınç Cu – Cu kararlı ve güvenilir bağlamaya ihtiyaç vardır (Okoro *et al.* 2010; Panigrahy and Chen 2018).



Şekil 17. Pasivasyon yöntemi ile bakır-bakır ince film yapıştırma şematığı (Panigrahy and Chen 2018)

MATERYAL ve YÖNTEM

Deneyisel Tasarım Aşamaları

Yapılmış olan tasarım esas PVD teknolojisi üzerine kurulmuştur ama bu projeye özel bir tasarımı olan PVD sistem üretilmiştir. Bu sistemin özelliği iki türlü kaplama ve aynı anda ısıtma mekanizmasını, tek bir operasyonda ve hiç vakum ortamı bozulmadan, yapabilmektedir. Bu sistemin buharlaştırma yönteminden ziyade, dışardan mekanik baskı uygulama imkânında bulunmaktadır.

Sistem Tasarımı ve Konfigürasyonu

Termal baskı veya Thermal-Compression sistemin konfigürasyonu genel bir bakış itibariyle 11 asıl parçadan oluşmaktadır ve bunun yanı sıra modifikasyon amaçlı yan parçalar sistemde yer almaktadır. Bu sistem özel olarak multi-operasyon görevi için tasarlanmıştır ve vakum ortamında kaplama ve ısıtma ve mekanik baskı uygulama ve yapıştırma görevlendirilmiştir. Şekil 18 Sistemde yer alan iç ve dış asıl parçaları göstermektedir. Bu parçalar ayrıntılı olarak sıralanmıştır.



Şekil 18. Termal baskı sistemi ve konfigürasyonu ve ayrıntıları

Vakum Odacığı

Bu sırada ilk aşamada vakum odası üretilmiştir. Gerekli olan odanın teknik özellikler açısından: 45 cm yükseklik ve yan taraflardan 20 cm ve 15 cm lik geniş çıkışlara sahiptir. Bu oda tamamen 3 mm kalınlıkta paslanmaz çelikten yapılmıştır ve 5 kapağa (flanşa) sahiptir. Odacığın kapaklarının bir tanesi kapı şeklinde menteşe ile çembere tutunmaktadır ve üzerinde

bir 10 cm çaplı cam pencereye sahiptir. Odacık sol taraftan Turbo Moleküler Pompa vidalanmıştır ve tam karşısında da 5cm çaplı cam pencere bulunmaktadır. Sağ kapak (Flanş) gözetleme ve yan mili içermektedir. Arka kapak vakum Sensoru veya *Baratron* ve *Vent* vanası ve termal lamba milini tutmaktadır. Üst kapak basma aparatı ve *Thermocouple* ve *Feedthrog* bağlantısını içermektedir. Ama alt kapak operasyon işleminden sorunludur. Bu bölge 2 tane *Thermal Evaporation Feedthrog* ve bir *Sputter gun* aparatını ve gaz girişini tutmaktadır. Tüm kapaklar 8 mm kalınlıkta vidalarla çemberin flanşlarına vidalanmaktadır.

Vakum Pompaları

Yapılacak izlek gereği odacığın içindeki vakum seviyesi 10^{-2} Torr miktarına düşürmek gerekmektedir. Bu işlem seri bağlanmış olan iki pompayla yapılmaktadır.

Mekanik pompa

Mekanik pompa ilk aşamada kaba vakum seviyesine çalışmaktadır. Bu pompanın asıl görevi vakum seviyesini düşük vakum (*low vacuum*) seviyesine kadar indirmektir. Bu pompa *Piffifer* firması tarafından üretilmiştir.

Turbo moleküler pompa

Turbo moleküler pompa: bu pompa mekanik pompanın ardından çalıştırılır ve görevi yüksek vakum seviyesi yaratmaktır. Bu pompanın görevi vakum değerini 2.0×10^{-2} Torr dan 10^{-6} Torr seviyesine düşürmektir. Turbo pompa 3 elektronik parçadan oluşmaktadır. Bu parçalar güç kaynağı (*power supplier*), pompa ünitesi ve elektronik anahtarlardır.

Vakum pompaları çalışma süresi

Vakum ortamı uygulama aşaması genel olarak 1 saat mekanik pompa ve 2 saat Turbo pompa çalışmasıyla gerçekleşmektedir. İki pompa seri şeklinde vakum hortumuyla birbiriyle irtibattadır ve ortada bir vakum vanası yer almaktadır. Vakum vanasının asıl görevi Turbo pompanın devre dışı olduğu zaman, vakum seviyesini korumaktır ve mekanik pompanın çalışmasının başlamasıyla iki aşamada açılmaktadır.

Vakum Ölçüm Aygıtı ve Parçaları

Vakum ortamı başlangıç seviyesinden itibaren ölçülmektedir. Vakum ölçümleri INFICON vakum sensörü ve göstergesi ile Torr değeri cinsinden yapılmaktadır. Bu gösterge KF25 kelepçe bağlantısıyla arka flanşa monte edilmiştir. Torr değerinden ölçülmekte olan vakum değeri normal hava basıncında 750 olarak ölçülür.

DC Güç Kaynağı

Proseste kullanılan kaplama yönteminin ilk aşaması DC *Magnetron Sputtering* yöntemidir. Bu aşamada Tantalum malzemesi 10 ile 30 nanometre kalınlık oranında GaAs katmanını üzerine kaplanır. Bu kaplamanın gerçekleşmesi için sıçratma tabancasına (*Sputter Gun*) DC akım uygulanır. Bu voltajı uygulamak için *Advanced Energy (model: MDX-1.5K)* güç kaynağı kullanılmaktadır. Uygulanan güç oranı tipik olarak 30 watt ve uygulanan voltaj 330 volt değerindedir. Uygulanan güç ve diğer değerler cihazın üzerindeki elektronik panellerden okunmaktadır.

AC Güç Kaynağı

Yapılan kaplama işleminin ikinci aşamasında *Thermal Evaporation* yapılmaktadır. Bu işlem AC akımı uygulamasıyla yapılmaktadır. AC akımı uygulaması normal manuel bir cihazla gerçekleşir. Cihazın iki kutbu 300 Amper kapasiteli standart kaynak kablolarıyla alt flanş üzerinde monte olan iki tane *Feedthrog* parçasına bağlanmaktadır. AC akımı direkt olarak cihaz üzerinde mevcut olan bir volüm vasıtasıyla manuel bir şekilde gönderilir ve voltaj ve akım nominal değeri cihazın göstergelerinden okunur.

Soğutma Sistemi ve Fonksiyonu

Her iki kaplama işlemi sırasında oluşan yüksek sıcaklık cihazda mevcut olan parçalara ve bağlanan orinklere zarar verebilir. Her türlü termal hasardan kaçınmak için *PolyScience* markalı bir soğutucu sistemi kullanılmaktadır. Soğutucu sistem seri bir şekilde Turbo pompa, feedthrough lar ve atom tabancasına bağlıdır. Soğutma su dolaşımıyla yapılır ve su bir dönüşte tüm parçalardan geçer. İşlem süresinde su sıcaklığı 14°C üzerine ayarlanır.

Isıtma Sistemi ve Parçaları

Quartz lamba

Kaplama sonrası yüzey ısıtma işlemi yapılmaktadır. Isıtma işlemi 24V, 250W ve ya 36V, 400W lık *OSRAM (Halogen Display/ Optic Lamp)* markalı bir termal ampul vasıtasıyla yapılmaktadır. Lamba seramik parçalarıyla yalıtılmış olan kablolar ile arka flanş üzerindeki bir *Electrical Feedthrough* parçasına bağlıdır ve dışarıdaki kılamentsler ile akım almaktadır. Lambanın çalışma süreci normal AC manuel güç kaynağıyla gerçekleşir.

Thermocouple

Isıtma işlemi tamamen kontrollü bir şekilde yapılmaktadır. Bu işlem aşamalı olarak 2 ve 5 dakika aralıklarla sıcaklık uygulamasıyla kontrole alınır ve 3 aşamadan ibarettir. Aşamalar

başlangıç güç uygulama, ısınma süreci ve soğutma süreci olarak isimlendirilir. Bu arada proses süreci 3 aygıt vasıtasıyla yapılır ve tüm süreç *Thermocouple* cihazıyla kontrole alınır. Bu 3 aygıt AC güç kaynağı, Multimetre ve Pens ampermetre den ibarettir. Kullanılan *Thermocouple* K tipi *bağlantı*, vakum ortamı CF 1.25, K tipi elektrik güç bağlantısı ve *ENDA-EPC9420* göstergesi setinden oluşmaktadır. Thermocouple uç bölgesi cihaz içinde yer alan alıcı pul ve ya plakası üzerine vidalanmıştır.

Vakum Odacığı İç Özellikleri

Vakum çemberi içinde çift PVD esaslı kaplama sistemi bulunmaktadır. Çemberde alt flanşla kapatılan çıkış kaplama sistemlerinin taşınması ve dış kontaklarını sağlamasıyla görevlidir. Üst çıkış ise basma ve yapıştırma aparatını sabit şekilde tutarak yapıştırma işlemlerini sağ ve arka taraftan üslenir. Çemberdeki sol çıkış ise Turbo Moleküler pompa çıkışıdır.

Yapıştırma aparatı

Bu sistem üst ve sağ tarafta Y ve Z düzleminde hareket eden plakaları üst üste getirmek ve hizalama milleri vasıtasıyla dikkatini artırarak numuneleri birbiri üzerine oturtur. Ancak yapışma için gereken mekanik baskı çember dışından uygulanmaktadır. Üretilen yapıştırma aparatı paslanmaz Çelikten üretilerek her türlü oksitlenme önlenmesi amacıyla dokunu vakum çemberinin içerisine yerleştirilmiştir. Bu tür paslanmaz çelik her türlü korozyonla yüksek koruma yetkisine sahip olduğu için vakum değişikliklerinde ısınma soğuma gibi operasyonlarda şekil değişimine uğramadan deneyde yapılan her türlü operasyona iyi bir seçenek haline gelmektedir. Şekilde 3.1’de görüldüğü gibi paslanmaz çelik aparat asılı bir şekilde üst flaşa bağlanmaktadır. Aparat dört adet metrik sekiz vida vasıtasıyla flanşın tam ortasında konumlanarak yan taraftan alıcı pul girişine göre ayarlanmaktadır. Bu aparat için konumlanmasında hareket yeri bırakılarak, operasyon sırasında esnek bir vaziyete gelebilmesini sağlamak istenmektedir. Aparat üst ve aşağıdan vakum çemberinin tam ortasına kadar uzanıp aynı uzaklıkları içerir. Merkezleme yapıştırma operasyonunda yüksek önem taşımakta olduğu için aynı şekilde yandan yerleşen alıcı pul üzerinde yer alan tutucular gereken esnekliğe sahiplerdir. Operasyon sırasında yerleştirilen alıcı pul döndürülme kabiliyeti de içerir. Aparatın uzunluğu 22 cm ve içerdiği giriş yuvası ebadı 60 × 40 olarak tasarlanmıştır. Aparatın gereken parçaları krom kaynağıyla birbirine kaynatılarak şekil almışlardır. Bu aparat tamamen bu sisteme özgün bir şekilde yapılmış olup yerinde sabitlenerek iki aşama kaplama imkânı sağlamaktadır. Bu sistemin üstünde üç adet mil geçişi sağlayan delik bulunmaktadır ve bu delikler flanş yüzeyine kadar devam edip flaştan çıkarak dışarıdan vakum tutucu *Oring* sistemi

ile kapatılır ve vakum oluşumunu sağlar. Ayrıca yerleştirmiş olan bu parça *Termocouple* geçmesine ve aygıt pulunu bağlanmasını ve gerçek Çember iç sıcaklığı göstermesine imkan sağlamaktadır.

Feedthrough'lar

Feedthrough ismini verdiğimiz bakır silindirler (Şekil 19), termal buharlaştırma yöntemi için kullanılan elektrik kontak görevini almaktadır. Bu aygıtlar torna işlemi ile bakır alaşımından yapılarak AC güç kaynağı ve kaplama aracı olan potanın arsında akım geçişi sağlamakla yükümlüdür. Yapılma sürecinde üst tarafta açılan kılavuzu M6 vida yeri potanın sabit bir şekilde *Feedthrough*ün yüzeyine tutunmasını sağlar. Yüksekliği 50 mm olan bu bakır parçası taban tarafından çap değişimine uğrayarak vakum tutucu *Oring* çentiği yeri içermektedir. potadaki 2000°C değerini aşan sıcaklığın oring lere hasar vermemesi için sisteme dahil edilmiştir. Besleyiciler 500 Amper kadar akım geçimi kapasitesine sahiptir ve potanın iki ucuna sıkıştırılır.



Şekil 19. Termal feedthrough elektrik kontakları

Pota ve özellikleri

Pota (*Thermal Evaporation Boat*) sıcaklık vasıtasıyla eriyebilen elementleri buharlaştırmak için kullanılır. Hedef malzeme amaçlanmış miktarda potanın haznesinde yerleştirilip, akım besleyiciler vasıtasıyla ısıtılıp eritilir ve kaynama vaziyetini alana kadar akım şiddetini artırılır. Hedef olan her malzemenin özelliklerine göre potanında cinsi değişir yani pota hedef malzemesiyle kimyasal reaksiyona girmesi pek istenilir bir olay değildir. Ayrıca

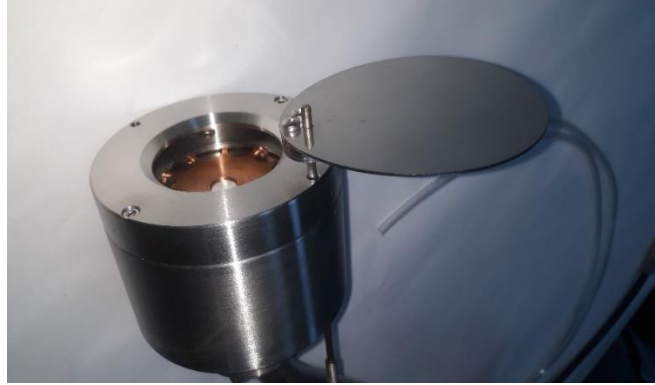
potada akın geçimine karşılık oluşan direnç ve arkasından öne çıkan sıcaklık, hedef malzemenin fiziksel özelliklerine uygun olması gerekmektedir. Potalar Şekil 20’de gösterilmiş olduğu gibi 0.2, 0.3 ve 0.5 mm kalınlıkta, Molibdenyum elementinden yapılmıştır.



Şekil 20. Molebdenyum termal buharlaştırma potası

Sputter gun

Atom tabancası ve ya *sputter gun*, *DC magnetron sputtering* denilen yöntemde, ergime sıcaklığı yüksek olan malzemeler için buharlaştırma aleti olarak görev almaktadır. Bu sistemin içinde yer alan magnetler, hedef malzeme üzerinde manyetik alan sağlayıp iyonlarını yüzeye yönelmesini hızlandırarak operasyonun daha düşük voltajda yapılmasını sağlar. Şekil 21 bir atom tabancasının kafa yapısını göstermektedir.



Şekil 21. Atom saçtırma tabancası (Sputter gun)

Vakum odacığı dış özellikleri

Vakum çemberi içinde sağlanan her türlü yer değişimi ve yerel hareketler odacıkta bulunan flanşların dışından kontrol edilmektedir. Dış kısımda bulunan miller ve elektrik kontakları göze çarpan en önemli kısımlardır. Odacığın toplam 6 çıkışından 5 tanesi gereken flanşlarla kapatılmıştır ve soldaki çıkışa turbo pompa sabitlenmiştir. Flanşlardan bir tanesi ön taraftaki giriş kapısı ve gözetleme camı olarak görev alır.

Ön giriş flanşı ve gözetleme penceresi

Ön giriş sistemin vakum bozma sırasında açılması ayrıca numune montajı sonrası ayarlamalar, sistem içi temizlikler ve parça değişimleri için kullanılır. Bu Flanş 3 kollu vidalama sistemi ile kapanmaktadır ve ortasında bulunan termal cam iç operasyon görüntüsünü sağlar. Operasyon esnasında gerçekleşen yan taraf hareketler ve kaplama aşamaları gözetleme vesilesiyle kontrol edilir. Bu flanş kapı şeklinde dışarıya açılıp kapanmaktadır ve standart boyut olarak CF8 ebat içermektedir.

Alt flanş özellikleri

Bu flanş kaplama operasyonu görevini alıp üzerinde toplam 4 tane 10 cm çaplı delik yer almaktadır ki bu deliklerin 2 tanesi akım besleyici kontakların girişi ve 2 tanesi atom tabancası ve onun shutter girişidir. Boyutu standart olarak CF8 olan bu flanş 25 cm çapında ve 25 mm kalınlığında paslanmaz çelikten üretilmiştir ve odacığa metrik 8 vidalarla kapatılır. Aynı anda alt kapak görevi yapan bu parçadan dışarı çıkan *DC magnetron Sputtering* tabancası güç kaynağına bağlanmak üzeri bir kablo ve 2 tane soğutma su giriş/çıkışı barındırır. Ayrıca termal buharlaştırma için iki adet *Electrical Feedthrough* nın her birinden kablo pabuç ve kontağa bağlı kablo ve ona ek 2 su giriş/çıkışı yer almaktadır.

Üst flanş özellikleri

Yapı özellikleri alt flanşla aynı olan üst flanş basma aparatı ve thermocouple çıkışlarını barındırmaktadır. Numune yapıştırması için gerekli olan mekanik baskı gücü üst flanşta tabiye olan sistemden uygulanır. Flanşın orta kısmında yer alan 3 tane 4 mm çapında delik baskı mili ve 2 tane hizalama milini yönlendirir. Ayrıca baskı sistemi 2 tane Alüminyum taban parçası bu kapağın üzerine montalanır. Diğer yandan kapaktan CF 2.75 çıkış vasıtasıyla 10 amperlik bir *Electrical Feedthrough* bağlanmaktadır. Bu parça *Thermocouple* bağlantısı olarak görevlenip sistemin operasyon sırasında iç sıcaklığını kontrol amaçlı kullanılır. Üst üste sistemdeki termal baskı operasyonun mekanik bölümleri bu parçadan yöneltir. Hatırlatmalıyız ki baskı ve hizalama milleri sadece Z ekseninde hareket etme kabiliyeti gösterir.

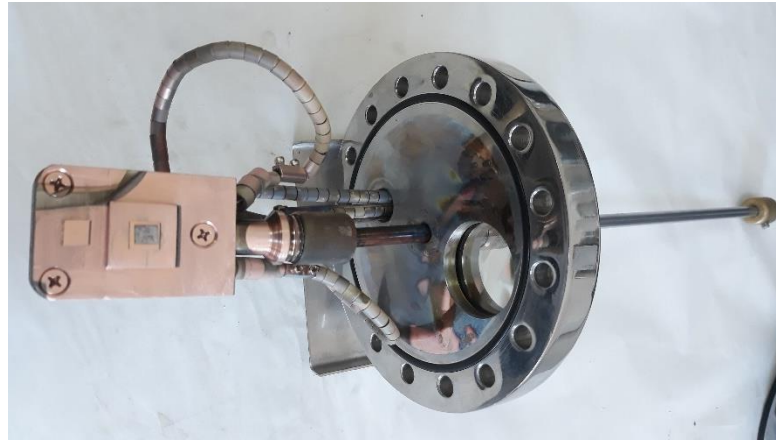
Çember iç kısmından ise baslı aparatı üst flanşa asılı şekilde montelenmiştir. Bu aparat M6 vidalar ile modifiye olur ve doğru pozisyona getirilir. Baskı aparatı çemberin merkezine kadar uzanan yapıştırma için bir yuvadır. Yuvanın sağ tarafı açık şekilde aygıt pulun girmesi ve hizalanıp sabitlenmesini sağlar.

Arka flanş özellikleri

Alt flanş ebatlarında olan arka flanş ısıtma sistemi ve kapaticısı, vakum ölçer sensor ve hava verme vanasını içermektedir. Isıtma sistemine ait olan miller Y düzleminde hareket kabiliyetine sahiptir ve gereken noktada döndürülerek uygun pozisyona getirilir.

Sağ taraf flanş özellikleri

Sağ taraftan sistemdeki ikinci plaka, Y düzleminde hareket ederek uygun konuma yerleştirilir ve operasyon kontrolü için flanş üzerinde bir cam bulunmaktadır. Sağ flanştaki fiziksel özellikler diğerleriyle farklıdır. Bu flanş 15 cm yarıçapında ve 25mm kalınlığında paslanmaz çelikten üretilmiştir. Bu flanş açıklanacak olan alıcı pul numunesinin tutucusunu barındırmaktadır ve holderın iç ısıtıcı sistemini de içerir. Şekil 22. olarak holderın içinde yer alan termal rezistansın bağlantıları ve üzerinde yer alan bir nihai numune tutan plakayı göstermektedir.



Şekil 22. Sağ taraf flanş ve rezistans tel ısıtma sistemi içeren plaka

Mass Flow Controller (MFC)

MFC ya *Mass Flow Controller* hacimsel gaz geçişinin miktarını kontrol etmektedir. Gaz geçişinden kasıt Argon, Oksijen ve ya diğer gaz dolusu tüplerden vakum odacığına doğru akımda olan gazların hareketidir. Bu gazlar vakum içine çok düşük miktarlarda enjekte edilince ardından iyonik bombardıman oluşumu gereken plazma olayını oluşturmaktadır. Plazma yoğunluğu gazın ve uygulanan bias voltajın miktarı ile doğru orantılıdır. Gaz akım kontrol sistemi parçaları elektronik gaz vanası, gaz akım dijital göstergesi manuel gaz vanası ve akım geçişi sağlayan hortumlardan oluşmaktadır. MFC sisteminin göndermekte olan gaz miktarı standart kübik santimetre (SCCM) birimindedir. Cihazın operasyon esnasında uygulanmış olan ayarları, akımı gerçekleşen gaza göre değişmekte olup gereken uygulamalar her gazın kendi standart değerleri üzerinden yapılır. Bu sistem kombinasyonu gazın daha dikkatli ve gereken miktara daha yakın olması için tasarlanmıştır. Gaz kaynağı olan tüpler genel olarak

birkaç yüz bar miktarında gaz gönderme kapasitesine sahiptir ve bu yüzden sistemin ortada çok ince şekilde kontrol sağlaması gerekmektedir. Şekil 23 tüm gaz akım sisteminin şematik bağlantı görüntüsünü ifade etmektedir.

Şekil 23. Gaz akım sistemi parçalar ve konfigürasyonu.

Kaplama ve ısıtma operasyonları sırasında her türlü güç kaynaklarından uygulanan her elektrik potansiyeli ve ya gaz akımı belirli zamanlarda ölçülüp ani verim miktarı sistem kalibrasyonuna göre kontrol edilmektedir. Bu kontrol prosedürleri kaplama kalitesi, hızı ve ekipmanların sağlıklı çalışması ve korunması için önemlidir. Ölçüm cihazları vakum odacığı dışından kullanılıp verileri monitör etmektedir.

Operasyon sırasında her türlü akım yükselmesi, kaplama hızı ve sıcaklık artışıyla doğru orantılı olup kaplamanın optimum bir akımda gerçekleşmesi istenilmektedir. Optimum akım değeri ise ince film özelliklerine göre değişim gösterir. Operasyonda yer alan pompalar ve soğutma gibi sistemlerden geçen akım miktarı, sistemin çalışma standardına göre ayarlanmış olup sabit bir şekilde kalmaktadır ama atom saçtırma ve termal buharlaştırma ve aynı şekilde numune ısıtma sistemleri direk elektrik akım kontrolü ile gerçekleşmektedir. Dolayısıyla bu işlemlerde elektrik akım ölçümü büyük bir önem taşımaktadır. Elektrik akımı numune ısıtma 0-20 ve termal buharlaştırma da 0-300 Amper arası değişmektedir. Bu işlemler sırasında Pans ampermetre akım ani değişimleri ve mevcut değerini ölçme amaçlı kullanılır. Ayrıca AC ve DC güç kaynakları üzerinde tabiye olmuş akım göstergeleri mevcuttur. Bu akımölçer cihazlar manyetik alan esaslı çalışmaktadır. Yani temel fizik kanunlarına göre akım geçiren uzun bir kablunun etrafında oluşan (B) manyetik alanı aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \oint B \cos \theta \, ds = B \oint ds = B(2\pi r)$$

(r) değeri kablo ve ya telin yarıçapı ve (ds) kısmi akım geçişi miktarıdır ve formülde yer alan (μ_0) sabiti aşağıdaki şekilde verilmektedir.

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \frac{\text{m}}{\text{A}} \approx 1.26 \times 10^{-6} \text{ T} \cdot \text{m/A}$$

UT 202 modelli Pans Ampermetre (Şekil 24) genel olarak taşınabilir bir cihaz şeklinde kabloların etrafına kilitlenerek akım gerçek akım göstergesi olarak güvenilir bir ölçüm sağlamaktadır. Bu cihaz sadece AC akımları ölçmekle sorumludur ve güç kaynakları üzerinde yer alan akım göstergeleri ile zaman zaman kısmi farklılıklar gösterebilir.



Şekil 24. Pansampermetre akım ölçüm cihazı

Multimetre

Operasyon sırasında uygulanmış olan potansiyel değişimi veya voltaj (V) gereken akım miktarının geçişini sağlamaktadır. Voltaj miktarı kablo kalınlığı ve uzunluğundan etkilenmez ve sadece güç kaynağından uygulanır. Uygulana potansiyel değişimi kabloların direnç miktarı ile doğru orantılıdır ve hedeflenen akım miktarına varmaya kadar ayarlanır. Termal buharlaştırma ve numune ısıtma işlemleri esnasında AC voltaj uygulanarak elektrik akımı sağlanır. İşlem sırasında (watt) cinsinden elektrik güç ölçüme yapma amaçlı uygulana voltaj miktarı her aşamada ölçülür. Bu işlem cihazların kritik Power miktarını geçmeme amacıyla yapılmış olup karşılaştırmalı şekilde her türlü akım uyumsuzluğunu ve operasyonu denetime almaktadır. Ölçümler Volt değerinde alınır ve akım değerine çarpılarak Watt şeklinde kayıt edilir. Şekil 25’de tüm görevleri üslenen multimetre gösterilmiştir.

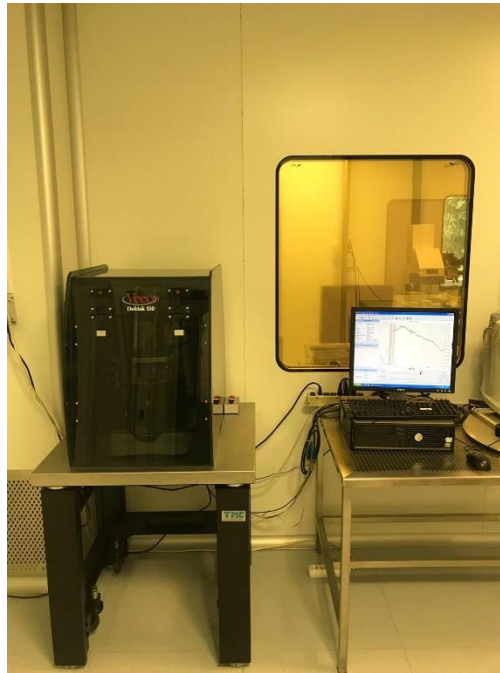


Şekil 25. Voltaj ölçüm cihazı (multimetre)

Kalınlık ölçüm cihazı

İstenilen ve dikkatli bir kaplama üretimi sırasında her kaplama aşamasından sonra cam numuneler kalınlık ölçümü için Profilometre cihazına yönlendirilen ölçümleri sağlanmaktadır. Bu cihaz nanometre cinsinden kalınlık ölçmektedir. Bu kalınlıklar *DC Magnetron Sputtering* kaplamasının ne kadar süre kaplanması gerçekleşmesi ve ayrıca termal buharlaştırmanın ne kadar kaplama malzeme içermesini belirlemektedir. Kalınlık Ölçme cihazı Dektak 150 (Şekil 26) Olarak adlandırılmaktadır. Bu cihaz tabiye Olmuş bir prob ve optik mikroskop vesilesiyle R ağı değerini ölçmektedir. R ağı değeri iki yüzey arasındaki sertlik miktarı farklılığı Esasında çalışarak gerçekleşen kalınlık miktarını ölçmektedir.

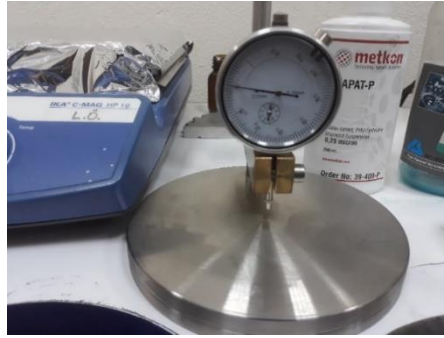
Kaplama sonrasında *fotorezist* aseton yardımıyla kaldırılarak oluşan basamağın derinliğine *Veeco Dektak 150 profilometre* ile bakılmıştır. Bu şekilde oluşturulan basamak ve profilometrede ölçülen yüzey profili ölçülmektedir.



Şekil 26. Veeco Dektak 150 kaplama kalınlık ölçüm cihazı

Mikrometre

İşlem görmemiş ve aynı şekilde inceltilmiş olan Galyum arsenik ait numuneleri ilk önce mikrometre ile kalınlık ölçümü ne alınır. İşlem görmüş olan numuneler Zımpara vesilesi ile inceltilmiş olup İstenilen kalınlığa getirilmektedir. Mikrometre (Şekil 27) ile kalınlık ölçümü numune hazırlama aşamalarından birisi olarak sayılmaktadır. Bu aşamada söylendiği gibi numune zımpara ve poliş Kullanılarak İnceltilmektedir. Bu işlemin her aşamasında numune zımpara cihazından açılıp zaman zaman mikrometre ile kalınlık ölçümünü alınır. İşlem istenilen kalınlığa gelmesine kadar devam eder.



Şekil 27. Alttaş kalınlık ölçümü için mikrometre

Termal Baskı Aparatı ve Sistem İçerisinde Konumlamalar

Isıtma ampulü ya Quartz lambası cihazın arka flanşından mil vasıtasıyla aparatın merkez noktasına yönlendirilir. Lambanın kendi için elektrik besleyici ve istenmez kaplamadan korunması için ön tarafında *shutter* veya koruyucu / kapatıcı parça yerleştirilmektedir. Aparatın konumu iki milim yan ve arka taraftan aynı noktada birleşmesini sağlamaktadır. Vakum çemberinde toplam iki *shutter* birbirine dik bir şekilde yer almaktadır. İkinci *shutter*, *sputter gun* kapatıcısı olarak görev almaktadır.

Sistem İçerisinde Hareketli Parçalar

Çember içinde bulunan *Shutter* lar ve ısıtıcı mekanizma dışarıdan kontrol edilir ve mekanik bir güç ile el vasıtasıyla çevrilir. Reseptör numunesini barındıran alt numune tutucusu X ekseninde hareket edip ve 180°'lik bir açıyla dönme kabiliyetine sahiptir. Dairesel konumlama olarak kaplama sırasında 270° ve yapıştırma sırasında 90° açısı konumuna getirilir.

Quartz lamba ısıtıcısı ve koruyucu mekanizması birbirine bağımsız bir şekilde Y ekseninde hareket ederek konumlanma ve 180° dönme kabiliyetleri vardır. Active region numunesini tutan numune tutucusu Z ekseninde kayarak kaplama ve yapıştırma konumlarını almaktadır. Bu hareketler mil vasıtasıyla yapılır ve onun yanı sıra 2 tane hizalama mili aynı şekilde hareket ederek iki holderı birbirine paralel olarak konumlandırmaktadır. Ayrıca *sputter gun* manuel bir şekilde dışardan z ekseninde hareket ettirilmektedir.

Deneysel Üretim Aşamaları

Numune hazırlama

Numune hazırlaması genellikle üretilmiş ve kesilerek hazırlanmış olan hazırlanmış olan Galyum-Arsenide parçalarını parlatma anlamındadır. Bu parçalar özenli bir şekilde ilk etapta 5 mm² ve ikinci etapta 2 mm² boyutlarında cam kesici elmas ile kesilir. Numuneler her etapta çiftli şekilde operasyona alınmaktadır. Normal GaAs parçaları 650 mikron kalınlıktayken, prosedürde kullanıma alınan parçalardan birisi *reseptör* olarak yerleştirilmektedir. Yerleştirilen *reseptör* parçasının kalınlığı, hazırlama işlemi sırasında ortalama 450 mikrona indirilir.

Numune hazırlama için gereken ekipmanlar ve ölçüm cihazları

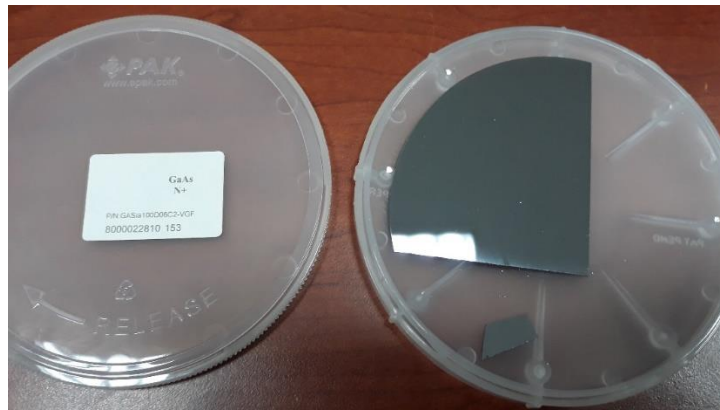
Numune hazırlama için kullanılan cihazlar kaç parçaya bölünmektedir ve Isıtma, parlatma ve ölçüm cihazlarından ibarettir. Bu işlemde kullanılan malzemeler ise termal tutkal ve ya yapıştırıcı, parlatma suspansyonları ve temizleme ve yıkama sıvılarından oluşmaktadır.

Parlatılacak numune elektrikli döner *STRUERS LaboPol-1* modellenli zımpara makinesiyle yapılmaktadır. Numuneleri makineye uygun şekilde tuttura bilme amaçlı özel bir tutucu kol üretilmiştir. Numune termal WAX ile tutucu kol üzerine yerleştirilme amaçlı Hotplate makinesi kullanılır.

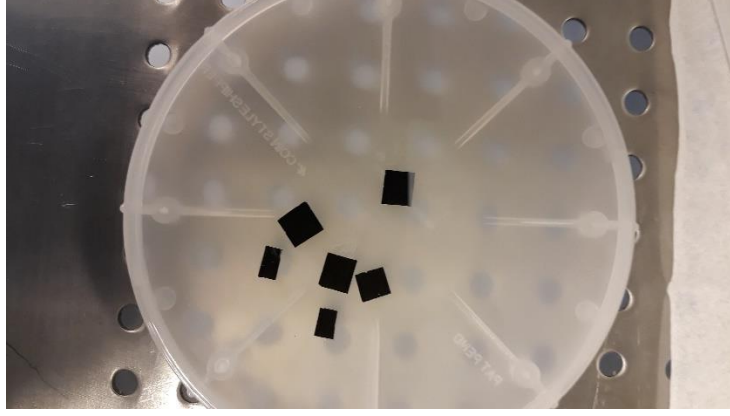
Numune Hazırlama İşlemler ve Aşamaları

Alıcı pul hazırlaması

Aygıt pul İşlem görmemiş olan Galyum Arsenide taban malzemesi olarak bilinmektedir. Bu parça yapılacak olan aygıtın alt tarafında yer alır ve cihaz içerisinde gözüken yan tutucuya monte edilir. Aygıt pul kalınlığına göre mekanik olarak daha dayanıklıdır ve ayrıca element vasıtasıyla taban malzeme olarak alttan sürekli ısıtılır. Bu parçanın kalınlığı 650 µm dir ve (n+) olarak isimlendirilmiştir. Şekil 28 ve 29 GaAs numunesini ifade eder.



Şekil 28. n+ GaAs numunesi



Şekil 29. n^+ 5mm² boyutunda kesilmiş GaAs numuneleri

Aygıt numunesi üretimi ve özellikleri

Bu tez çalışmasında kullanılacak olan pullar Prof. Dr. John Reno (ABD'nin Sandia Ulusal Araştırma Laboratuvarı CINT) tarafından üretilmiştir. Bu proje kapsamında pullar Williams vd. 2003 de ki tasarıma göre Sandia Ulusal Laboratuvarı'nda Dr. John Reno tarafından büyütülmüştür. GaAs altlık üzerine moleküler ışın epitaksiyel (MBE) yöntemi ile büyütülen 2 aktif sıralı GaAs/AlGaAs malzeme sisteminde aktif bölgeler 4 sıra resonant foton boşaltım dizaynına dayanmaktadır. Bu yapı toplam 15 μ m kalınlığında olacak şekilde 207 kez tekrar ettirilmiştir ve dizayn edilen ışınma frekansı 3.6 THz dir.

Alıcı pul hazırlaması

Hazırlamanın ilk etabı olarak özel hazırlanan numune tutucu ve ya holderın üst parçası mekanizmadan ayrılarak aseton malzemesi ile yıkanır ve Hot-plate cihazı tepsisi üzerine yerleştirilir. Sonra cihazın güç düğmesi basılarak açılır ve cihazın nihai sıcaklık oranı 90°C üzerine ayarlanır. Cihazın ısımaya başlama süresinde yaklaşık 20 dakika sonra istenilen sıcaklığa gelmiş olmaktadır. Bu aşamada katı şekilde bulunan termal tutuşturucu malzemeden küçük bir parça ayırarak, tutucu kolun yuvarlak şekilde olan sayfa şekilline parçası üzerine koyularak eritilir ve ortada topaklandırılır. Bu aşamada kesilmiş şekilde önce Aseton ve sonra Etanol ile yıkanmış ve kurutulmuş olan GaAs parçası, cımbız ile vaksın topaklandığı alana yerleştirilir ve soğuyana kadar bekletilir. Soğuyunca tutkalın sertleşmesi ile beraber GaAs parçası yüzeye tutunmuş bir şekilde sabit hale gelmektedir. Numunenin tutunması ile beraber, tutucudan açılmış olan parça döner bir şekilde tekrardan tutucu üzerine yerleştirilip sıkıştırılıyor. Daha sonra mekanizmanın tümü zımpara makinesi üzerine monte edilir.

Numunenin parlatılma işlemi zımpara cihazının (Şekil 30) çalıştırmasında itibaren başlamaktadır. Zımpara cihazında kullanılan aşındırma amaçlı parçalar 20, 9 ve 0.29 mikronluk keçeler ve onlara uygun hazırlanan alüminyum-oksit ve elmas solüsyonları içermektedir. Bu işlem sırasında numunenin 650 mikron kalınlıktan 3 aşındırma aşamasında sırayla 490, 400, ve

250 mikron kalınlığına indirilmesi planlanmaktadır. Numune aşındırılma sırasında her aşama sonrası ilk başta yapılan şekilde tutucu koldan ayırarak Mikrometre cihazı vesilesiyle, numunenin dört köşesi ve orta alan kalınlığının aşamaya uygun hale gelmiş olması ölçülür ve tekrardan poliş cihazına yerleştirilir. Parlatma sırasında kullanılan sıvı solüsyonlar 20 ve 9 mikron boyutunda Alüminyum-Oksit ve 0.29 mikron boyutunda elmas parçalar içeren suspansyonlardır. Poliş işlemi sırasında numune işleme göre beklenen kalınlığa gelmesi beklenmektedir. Üstüne vurgulandığı gibi aşamaların tamamlanması Mikrometre cihazıyla sürekli kontrol edilir. Ayrıca her aşama sonrasında yüzeyde renk değişimi ve daha parlak bir hale gelmesi gözle görünebilir. Özellikle her aşama sonrası numunenin yüzeyi ve kullanılan keçeler, töz birikimi engellenmesi amaçlı Etil-Alkol ve saf su ile yıkanması gerekmektedir.

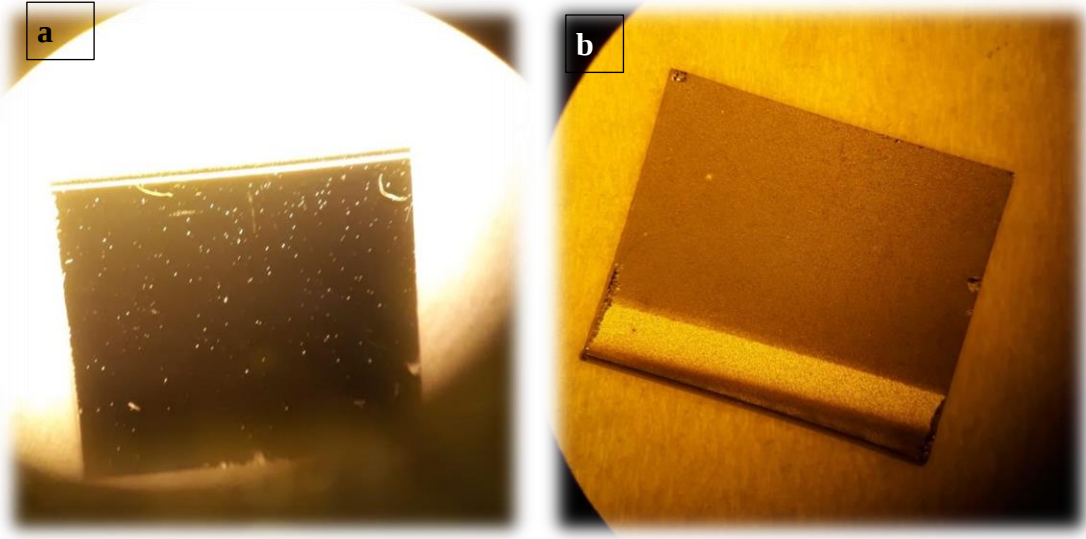
En son aşamada mikrometre ölçümlerinde alınan datalara göre, Numunenin beklenen kalınlığa gelmesi halde, tutucuda açılmış olan sayfa tekrardan Hot-plate cihazı üzerinde ısıtma işlemine maruz bırakılarak termal tutucunun ergimesi sağlanmaktadır. Tutkalın sıvı hale geldiğinde numune cımbız ile alınarak, Aseton içeren beher içerisine yerleştirilir ve yaklaşık 5 dakika Ultrason titreştirici cihazında temizlenir. Termal tutkal Aseton ile çözülür. Bu aşamadan sonra numune kurutulup Etil-Alkol ve sıradan saf su ile yıkanıp tozsuz peçete ile kurutulur. Bu aşama dan sonra numune hazırlama süreci bitmiştir ve numune cihaza koymak için hazırdır.



Şekil 30. Zımpara cihazı ve inceltme malzemeleri

Numune temizleme aşaması

Numuneler işlem sırasında gerçekleşen kaç aşamada mikroskopik görüntüleme ile (Şekil 31) kontrol edilir. İlk başta alınan görüntüler numune hazırlama sırasında optik mikroskop görüntüleridir. Bu görüntüler kaplanacak yüzeyin temiz ve sağlam olması açısından önemlidir. Numuneler sıvı çözeltiler ve saf su ile temizlenir ve mikroskop altında holderler üzerine yerleştirilir.



Şekil 31. Optik mikroskop altında (a) ilker numune, (b) temizlenmiş numune

Taban Malzeme Konumlaması ve Uygulaması

Taban malzeme ve ya altlık olan GaAs malzemesi hazırlama sonrası tutucu üzerine yapıştırılır. Bu tutucular termal baskı işlemi için baskı aparatı içine yerleştirilir. Bu malzeme iki parça olarak *Active region* (Aygıt pul) ve Reseptör (alıcı pul) parçaları olarak adlandırılmıştır. İki parça bakır kaplaması sırasında konumlamalarından ve potaya olan açılarına göre farklı kalınlıklarla kaplanmaktadır.

Deney ve Üretim Aşamaları

Üretim aşamalarına yönelik özet verilirse, ilk olarak GaAs altyapısı MBE yöntemi ile üretilmektedir ve yukarda vurgulandığı gibi hazırlanır. Hazırlama ve temizleme sonrası tutucu plakalar üzerine yerleştirilir ve vakum çemberine yerleştirilmeden dikkatli bir şekilde birbirine paralel bir konuma getirilir. Sonra sistem parametreleri ayarlanarak buharlaştırma bakır malzemesi ayarlı olarak pota içerisine yerleştirilir. Sistemdeki bulunan parçalar kaplama öncesi gereken konumuna gediği durumda, flanşlar yerine konularak gereken şekilde kapatılıp numune tutucuları kaplama pozisyonu alır. En son aşama da ön kapak yani gözetleme penceresi dış aparatıyla kapatılıp sıkıştırılır.

Mekanik pompa çalışma süreci

Bu durumda sistem vakumlama pozisyonuna gelmiş olması için sistemin tüm gaz ve hava girişlerinin kapalı olduğu kontrol edilir ve kapatılır. Tüm liste yerine getirildiğinden sonra mekanik pompanın ana güç tuşunu aktifleştirme ve merkez vanayı açmadan sonra sistem vakuma alınır ve vakum derecesinin yükselmesi göstergeden kontrol edilir. Mekanik pompanın

Çalışma süresi 60 dakika civarındadır ve bu süreçte vakumu 750 Torr dan 2.0×10^{-2} Torr a kadar indirmektedir.

Turbo moleküler pompa çalışma süreci

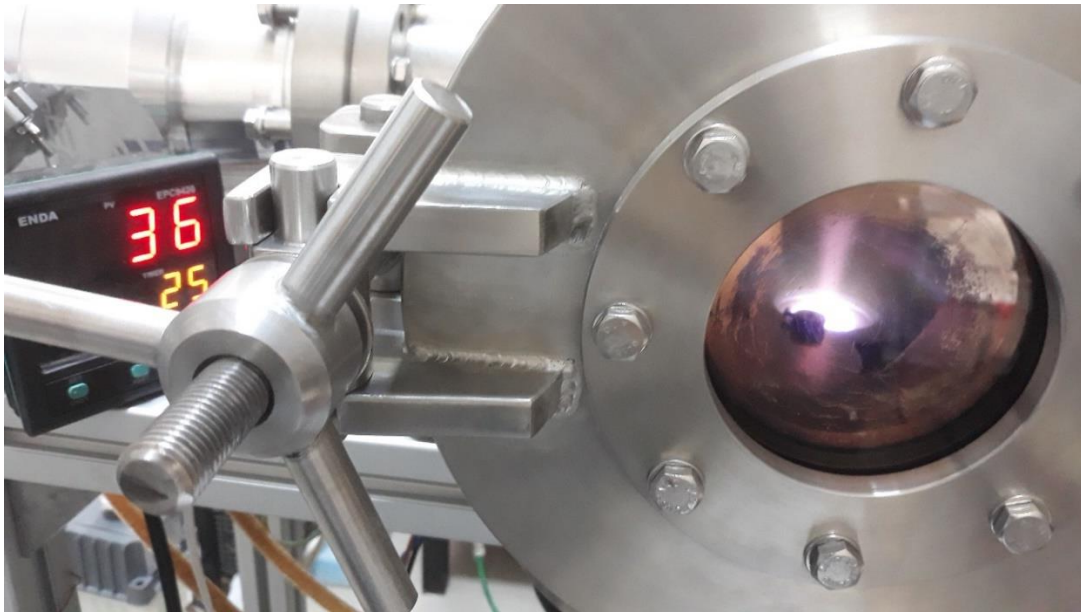
Mekanik pompa işlem sırasında vakum değeri gereken noktaya gelmesiyle beraber vakumlama düzeneğinin arasında yer alan turbo moleküler pompa devreye girerek vakum derecesinin (10^{-6} torr) seviyesine indirmesini sağlar. Bu pompanın çalışma süresi 120 dk civarındadır ve döner su sistemi ile soğutulur.

Tantalum hedef malzemesi buharlaştırılması

Vakumun (10^{-6} Torr) seviyesine gelmesi ile DC magnetron saçtırma yöntemi ile Tantalum kaplaması gerçekleştirilir (Şekil 32). Bu düzenekte öncelikle MFC cihazı vasıtasıyla gaz tüpünden yeterli miktarda Argon gazı sisteme gönderilir ve vakum değerin (10⁻³ Torr) seviyesine inip stabil bir hale gelmesi bekletilir. Sonra DC göç kaynağı aktif duruma getirilir ve iki aşama kaplama süreci gerçekleştirilir. 1.aşama hedef malzemenin yüzey temizliği ve 2. aşama kaplama için yapılır. İki aşama arasındaki geçiş kapatıcının açılmasıyla gerçekleşir. Bu iki aşamaya ait Parametreler Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. DC mıknatıssal saçtırma işleminde uygulanan parametreler

İşlem	Süreç	Voltaj (V)	Akım (A)	Güç (W)	Gaz (sccm)	Basınç (Torr)
Ön saçtırma	2 dk	312	0.08	30	40	10^{-3}
Kaplama	2 dk	330	0.08	30	40	10^{-3}



Şekil 32. DC mıknatıssal saçtırmasının görüntüsü

Bakır Termal buharlaştırması ve parametreleri

Tantalum kaplaması sonrası Bakır buharlaştırma işlemi gerçekleştirilmesi gerekmektedir ki bu işlem belirli bir aralıktan sonra yapılır. Bu zaman aralığı gaz kesiminden sonra sistemin kaplama öncesi vakum değerine yeniden dönmesi amaçlıdır ve bu süreçte MFC ve tüp devre dışı bırakılmıştır.

İşlem AC güç kaynağını aktifleştirmeye başlar ve buharlaştırma malzemesinin bitmesine kadar devam eder. Bu süreç Multimetre ve Pans Ampermetrenin yanı sıra gözetleme vasıtasıyla kontrol edilir. Bu işleme ait olan tipik parametreler Tablo 4’de verilmiştir ayrıca detaylı kaplama parametreleri **EK 1** de yer almaktadır.

Tablo 2. Termal buharlaştırma yönteminde uygulanan parametreler

İşlem	Süreç (dk)	Voltaj (V)	Akım (A)	Güç (W)	Basınç (Torr)
Termal buh.	30	1.2	200	240	10 ⁻⁶

Konumlama ve ısıtma işlemi

Kaplama aşaması sonrası termal buharlaştırma güç kaynağı kapatılarak ısıtma prosedürü başlamaktadır. Bu aşama aygıt pulun yükselmesi ve alıcı pulun 180 derecelik dönüşü ile aygıt pulun tam hizasına gelmek sürecini ifade eder. Numunelerin hizalanması esnasında iki tutucu arasına Quartz lamba yerleştirilir ve alıcı numune tutucusunda yer alan ısıtma teli AC güç kaynağına bağlanır. Lamba ve telin ikisinin birlikte çalışması numunelerin sıcaklığını artmaktadır.

Numune yapıştırma operasyonu

Cihaz içindeki parçaların doğru konumlanması, yerleştirilmesi ve uygun şekilde çalışması önem taşımaktadır. Bu etapta basma aparatı yukarıdan asılı bir konumda tam reseptör tutucuyu taşıyan milin hizasına gelmesi için yukarıdaki vidalarla ayarlı bir konuma getirilmesi ile gerçekleştirilir.

İndiyum elementiyle yapıştırma

İndiyum düşük erime noktasına sahip (156°C) yumuşak metalik bir elementtir ve yüzey yapışkanlığının sıvı halde çok yüksek olduğundan, tutkal olarak kullanılır. İndiyum kullanması için, plakalar hot-plate üzerinde 200°C’de kadar ısıtılır. Sonra çok küçük bir miktar (yaklaşık 0.1 gram) plaka üzerinde eritilip homojen şekilde dağıtılır ve numuneler, üzerine yerleştirilir ve soğumasıyla yapışma gerçekleşir. Bu yöntem ile yapışan numuneler yapışma operasyonundan sonra sıcaklık 200°C’de geldiğinde plakadan ayrılır. Bu yöntemin

avantajlarından temiz olması ve numune yüzeyine bulaşmaması ayrıca plakadan ayrılırken yapışan yüzeylerin hasar girmemesidir. Ama saf indiyumun pahalı olması, operasyonun uzaması ve her şeyden önemli olan operasyon sırasında ısıtmadan dolayı tutuşma gücünü kaybedip numunelerin düşmesi, bu malzemenin kullanımını kısıtlıyor.

Gümüş pasta ile yapıştırma

Gümüş pasta diğer alternatif olarak sistemde görev almaktadır. Bu malzemenin kullanımı ön hazırlık gerektirmeden plaka üzerine ince bir şekilde yaydırılarak, numuneler üzerine yerleştirilir. Şekil 33’de gösterilmiş olduğu gibi pastanın kurulması için Hotplate cihazı kullanılır. Söylenildiği gibi zaman tasarrufu söz konusudur ve malzeme daha ucuz ve elde edilir bir maddedir. Kullanımı kolaydır ama kuruma süresi çok kısadır ve o yüzden numune konumlama dikkatini kısıtlamaktadır. Ayrıca istenmeyen yerlere yayılması çok muhtemeldir. Kaplama ve ısıtma sırasında iyice sabitleme gücüne sahip olması bir avantaj ise, aynı anda bu yapışma gücü yapışmış numunenin plakadan ayrılma sırasında, ara yüzeye hasar verebilir. Yapıştırma işlemi genel olarak gümüş pastayla yapılmaktadır.

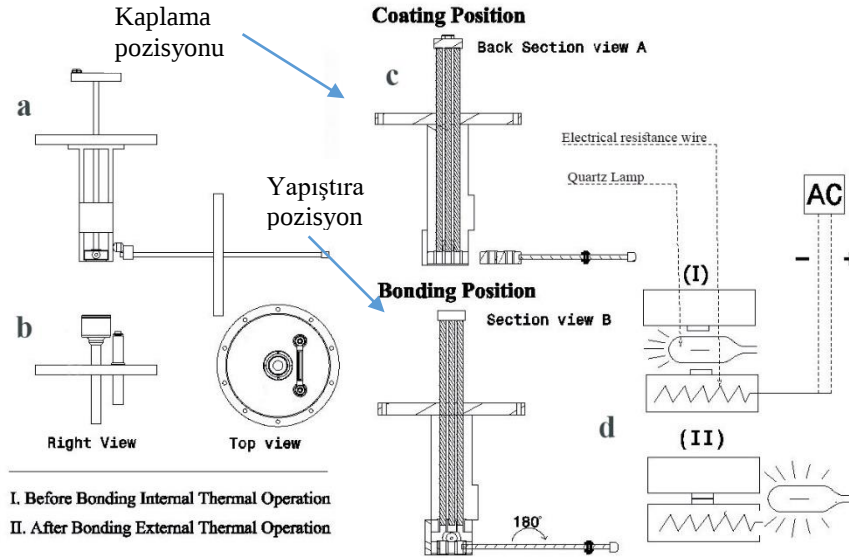


Şekil 33. Hotplate üzerinde numune yapıştırma prosedürü

Yapıştırma Düzenegi

Yapıştırma operasyonu sistem içerisinde bulunan 4 hareketli koldan yararlanarak yapılır. İki başta buluna kollar hem aygıt pulunu tutmak hem de birleştirme esnasında yönlendirmeyi (*alignment*) düzgün yapmak amacı ile tasarlanmıştır. Ortadaki kol aşağı yukarı doğru hareket ederek aygıt pulunun yüksekliğini ayarlamak ve baskı yapmak amacı ile

tasarlanmıştır. Aygıt pulu ve alıcı pul olan GaAs, öncelikle sisteme yerleştirilip ince film Cu kaplaması yapılmaktadır. Daha sonra hareketli kol sayesinde alıcı pul önce 180o döndürülmekte ve aygıt pulunun tam altına gelecek şekilde itilmektedir. Bu esnada sabit kollardan ortadaki kol sayesinde aygıt pulu yukarı çekilerek alıcı pulun tam karşısına gelmesi sağlanmaktadır. Yönlendirme sağlandıktan sonra aygıt pulu aşağıda doğru itilerek alıcı pulun yüzeyi ile birleşmesi sağlanmakta daha sonrada 400°C çıkarılarak yüzeylerin yapışması sağlanmaktadır. Şekil 34 operasyonda gerçekleşmiş olan düzeneği göstermektedir.



Şekil 34. Yapıştırma düzeneği ve operasyonu

(a) alıcı pul kaplama modu.(b) kaplama için gereken atom tabancası ve pota (c) yapıştırma aparatı ve numune konumlaması (d) ısıtma işlemi ve yapıştırma operasyonu şematik görüntüsü

Yapıştırma operasyonu ve mekanik baskı

İki aşamalı kaplama operasyonu sonucunda, çift numune üzerinde toplam 4 katmanlı ince film oluşmaktadır. Yapılan projenin asıl amacı katmanların yapışarak birleştirilmesinden ibarettir. Katmanlar mekanik bir kaynaşma ve sonucundan yapışma şeklini birleştirecektir. Bu amaçla vakum ortamında birleşme koşullarını sağlamak gerekmektedir. Gençken koşullar 3 genel aşamada sağlanır.

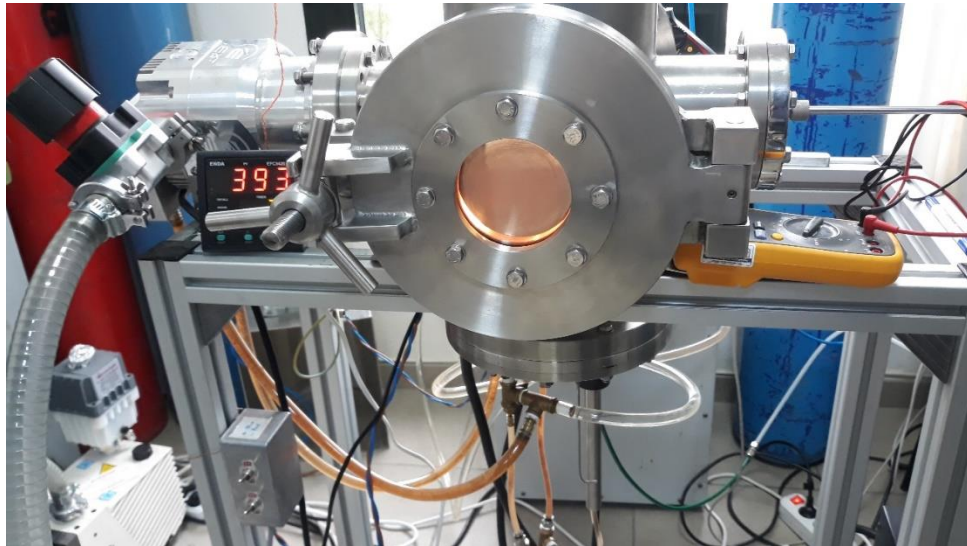
Konumlama ve hizalama

Kaplama sırasında operasyon gereği her iki numunenin kaplanacak yüzeyi çemberin alt tarafına bakacak şekilde ayarlanması gerekir. Ama yapıştırma sırasında bir yüzey diğerine karşı olmaktadır. Bu amaçla alıcı pulun 180 derecelik bir dönüm sağlaması şarttır. Döndürme işlemi ve konumlama, alıcı pula bağlı olan mil ile dışardan yapılır. Mil ve flanş arasında hava geçişi yalıtımı sağlayan oring, milin döndürülüp Y düzleminde rahatlıkla yer değişimini, vakum değeri bozulmadan desteklemektedir. Aynı şekilde aygıt pulun konumlaması gereksinimi

duyularak, pulun Z ekseninde oynaması sağlanmıştır. Konumlama ve hizalama aşamalı bin şekilde aygıt pulu yükselmesi, alıcı pulun 180 derece dönmesi ve Y ekseninde içeri doğru itilmesi ve ardından hizalama milleri ile, tamamen karşı karşıya getirilmesi ve işlem bittikten sonra hizalama millerinin yükseltilmesi ile sonuçlanmaktadır.

Isıtma işlemi ve sıcaklık ayarlamaları ve ölçümleri

Numunelerin yüzeysel kaynaşma ve çiftleşmesi amacıyla yapılmış olan ısıtma işlemi bahis edilmiş olan OSRAM halojen ampul lamba ile yapılmaktadır. Lambanın gereken enerjisi 220 voltluk AC güç kaynağından sağlanır. Bu sırada lambanın kaldırabileceği maksimum voltaj oranı 36 olmasından dolayı, her türlü zarar verici işlemden kaçınmak amaçlı, güç kaynağı ve tüketici arasında bir azaltıcı transistor yerleştirilir. Bu transistorun giriş ve çıkış limitleri 220-50 voltur. Isıtma operasyonu aşamalı şekilde 2 dakika ve 5 dakika aralıklarla yapılmaktadır. Ek 2 de verilen grafik ısıtma aşamalarını ve operasyon sürecini göstermektedir. Şekil 35 ısıtma anında olan cihazı temsil eder.



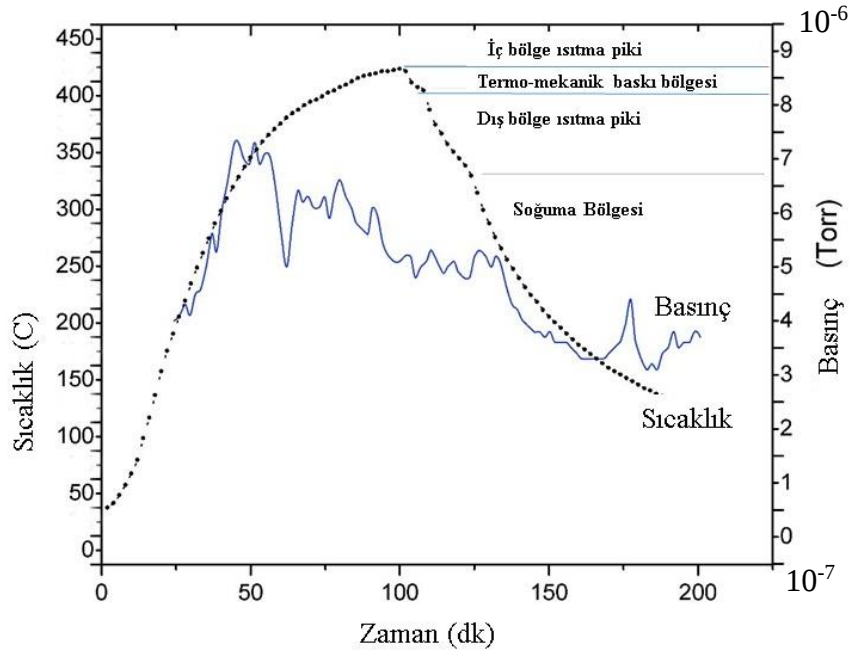
Şekil 35. Isıtma işlemi görüntüsü

Numune yapıştırma operasyonu aşamaları

Kontrolsüz ısıtma işlemi, lamba patlaması ve ya iç filamentinin erimesi ve ona bağlı tüm operasyonun iptali ile numunelerin ziyan olmasına neden olmaktadır. Operasyon sırasında tüm aşamalar Pans Ampermetre ve Multimetre ile ölçülür ve verim değeri hesaplanır. Verim değeri quartz lambanın %80 oranından geçmemesi sağlanır.

Isıtma ampulünün yüksek verim sağlaması lambanın temiz tutulmasına bağlıdır. Lambanın yüzeyi operasyon sırasında kaplanmaması amaçlı, lambanın önünü shutter yerleştirilmiştir. Lambanın kaplanması, içyapıdan yansıma ve ergimeye neden olur. Ampulün iç vakum değeri çember vakumundan düşük olduğundan, içyapı ısınmasıyla dışarıya patlama

yaşanır. Şekil 36 komple operasyon anında gerçekleşen sıcaklık ve basınç değerlerinin değişimini göstermektedir ve EK 2 olarak tüm operasyonların termal grafiği verilmiştir.



Şekil 36. Isıtma ve soğutma işlemi ve basınç değerleri

Mekanik baskı uygulama

Mekanik baskı uygulaması özel tasarlanmış aparatıyla yapılmaktadır. Baskı sabit şekilde ve iki tane yay ve somunlar vasıtasıyla uygulanır. Yaylar 40 N güç uygulaması amacıyla yerleştirilmiştir. Uygulanan baskı yay sabitine göre hesaplanmıştır. Mekanik baskı uygulama sırasında, termal lamba sistemden geri alınır ve konumuna en yakın yerde sabitlenip açık tutulur. Aparattaki orta mil aşağı tarafa Z ekseninde numunelerin dokunacağı ana kadar kaydırılır ve aparatın basma parçasıyla aşağıya bastırılır.

Baskı uygulama işlemi 40N basma gücü üzerine ayarlanmıştır.

Deneme Çalışmaları ve Kalibrasyon Faaliyetleri

Deneme ve kalibrasyon testleri genel olarak 5 aşamadan oluşur.

- 1- Cam üzeri Tantalum kaplaması ve kalınlık ölçümleri.
- 2- Cam üzeri Bakır kaplaması ve kalınlık ölçümleri
- 3- Cam üzeri Tantalum-Bakır çift aşamalı kaplamalar ve toplam kalınlık ölçümleri
- 4- Cam numunesi yapıştırma testleri
- 5- Yapıştırma operasyonu ve mekanik baskı uygulaması

Cam üzeri Tantalum kaplamaları ve kalınlık ölçümleri

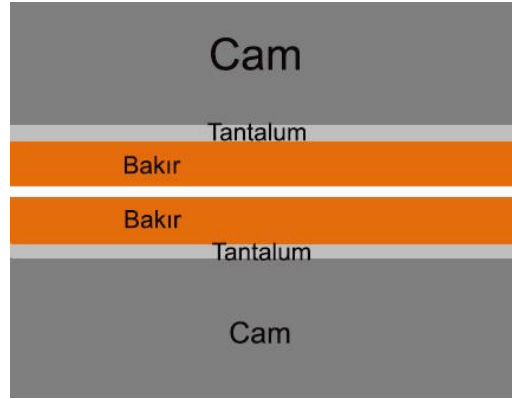
Yapılan kaplama prosedürleri, saf malzeme ve ekipman açısından çok maliyetlidir. Onun için asıl deneyleri yapımından önce test aşamaları gerçekleştirilmektedir. Bahis edilen test aşamalar kaplaması yapılan malzemenin, kaplanması için ayarlanmalı parametreleri öne çıkarmak amaçlı yapılmaktadır. Bu prosedürde taban malzeme olarak 1 mm kalınlıkta olan SGL termal laboratuvar camı ve hedef malzeme olarak Tantalum Kullanılır. Bu deneyde ki tek kullanılan Kaplama yöntemi DC Magnetron sputtering yöntemidir, kullanılan cam malzemeleri 0.5mm 2 şeklinde kesilip gümüş pasta vasıtasıyla, ikili olarak, iki tarafta da bulunan basma plakaları üzerine yapıştırılır. Gümüş pastanın yapışma kabiliyeti olması için ve başka bir değişle her türlü vakum ortamında çalışman amaçlı operasyonda, parçaların her türlü yağ ve kir ve kalıntılardan arındırılması yüksek bir önem taşımaktadır. Temizlik aşamalarında, kaba yağ ve kirlilikler sırasıyla, Teknik Aseton, Metil Alkol (Methanol) ve saf su ile aşamalı olarak temizlenir. Bu sıralama tüm aşamalar için aynıdır. Test amaçlı gerçekleşen kaplamaların sırasında 0.5 mm 2 çapında kesilmiş olan SGL camlar alıcı ve aygıt plakası ya pulu denilen parçaların üzerine yapıştırılıp ve orta noktadan, Photo-resist sıvısıyla işaretlenir. Alıcı pulu üzerinde Thermocouple kontaktı metrik 3 vidayla sıkıştırılmıştır.

Bininci aşama test sürecinde ortalama 10 nm Tantalum kaplaması elde edilme amaçlanarak farklı zaman aralıklarında kaplama işlemleri MDX-1.5K, DC güç kaynağıyla yapılmıştır. Kaplama sonrası elde edilen numuneler, ultrason titreştirici ile Photo resist çözülene kadar aseton içerisinde titreştirilir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen ortalama kalınlık grafiği aşağıda verilmiştir. Tam tulumun oluşturduğu kaplama kalınlığı, buharlaştırma zamanı ile doğru orantılıdır. Ayrıca vakum değerinin yeterince aşağı tutulması kaplama oranı ve kalitesini artır.

Cam üzeri Bakır kaplaması ve kalınlık ölçümleri

Prosedür gereği yapılacak olan ikinci kaplama katmanı bakırdır. Bakır kaplaması hemen Tantalum üzerine yapılacaktır ama ilk önce bakırın oluşturduğu katmanın kalınlığı tek başına ölçülecektir. Bakır termal buharlaştırma yöntemi ile kaplanacağı için potada yer alan target malzemesinin ağırlık oranı, kaplama kalınlığının en önemli faktörüdür. Her kaplama yönteminde olduğu gibi vakum değerinin yüksek olması istenilen faktörlerdendir. Bu kaplamada aranan kalınlık oranları 150 ve 500 nanometre oranındadır. Bu iki değer birbirinden farklı, iki pulun vakum çemberinde konumlanmasından kaynaklıdır. Çember içerisinde yer alan alıcı pul potaya dik ve aygıt pulu potaya 45 derecelik bir açıyla bakmaktadır. Bu tasarım aslında prosedürde sıkıntılı bir olay olarak algılanmıyordur ve aygıt pulunun daha

ince kaplanması beklenmektedir. Şekil 37 kaplama sonrası elde edilen konfigürasyonu göstermektedir.



Şekil 37. Cam üzerine yapılan kaplama ve yapıştırma. Tantalum 20 nm ve Bakır 500 nm

Cam üzeri Tantalum-Bakır çift aşamalı kaplamaları ve kalınlık ölçümleri

Yapılan tek aşamalı farklı hedef malzemesi kaplamaların aşamasından sonra, ikili kaplanan yapılması öngörülür. Kaplamaların her iki aşaması vakum ortamı kırılmadan gerçekleşir. Bu aşamalar ilk önce Tantalum kaplamasıyla başlar ve bitişinde buharlaştırma tabancası XZ düzleminde konum değiştirir ve Bakır malzemesinin yerleştirildiği potanın, tüm kaplama odacığını kapsamasını ve her türlü gölgelenmeyi engeller. İki aşama arasında vakum oranı değişimi çok azdır ve genel olarak göz ardı edilebilir ve kaplamalar 10^{-6} torr vakum ortamında yapılır. Kaplama sonrası elde edilen iki numunenin toplam kalınlığı bir birinden farklıdır. Bu fark buharlaştırma potasının, vakum odacığında konumlanmasından kaynaklanmaktadır.

Cam numunesi yapıştırma testleri

Çift aşamalı kaplama testlerinin sonucunda elde edilen kalınlıklarının optimum değeri alınarak kaplamanın zamanı ve malzeme miktarı istenilen miktarda ayarlanır. Ayarlanan optimum miktarlarda beklenen kalınlık oranları, aygıt pulu için (150+30) ve alıcı pulu için (500+30) nanometre olması koşuluyla iki pulun yapıştırılması gerçekleşir. Yapıştırılması gereken cam numuneleri, iki tutucu pul veya plakanın üzenine tamamen örtüşebilecek şekilde konumlanır.

Aygıt numune yapıştırılması

Bu işlem asıl numune üretimi operasyonudur ve 3 etaptan oluşmaktadır.

- 1- Galyum-Arsenide normal numune yapıştırma aşaması
- 2- Galyum-Arsenide inceltirilmiş numune yapıştırma aşaması
- 3- Galyum-Arsenide aygıt numune yapıştırma aşaması

Normal Galyum-Arsenide numuneleri yapıştırması

Cam numuneleri yapıştırması sıkıntısız aşamaya geldiği zaman Galyum-Arsenide numuneleri sıraya girmektedir. Projenin alttaş malzemesi olan GaAs, ilk önce yüzeysel yapışma ve mekanik dayanım amaçlı aşamalı bir şekilde denetime alınmaktadır. Numuneler tamamen cam numuneleri mantığıyla konumlandırılır ama iki farklı şekilde yapıştırılır. Yapıştırma şekilleri numunelerin son aşamada plaka üzerinden rahatlıkla ayrılması ve yapışmış olan yüzeylerin hasar görmemesi amacıyla denetlenir. Numune yerleştirme metotları iki malzemeyle ayrılır.

Galyum – Arsenide orijinal numuneleri yapıştırması

GaAs numuneleri normal veya genel şekilde 10 cm çaplı ve 650 μ kalınlığında diskten kesilmiş olan (5×5) mm lik parçalardır. Söz konusu QCL pullar Dr. John Reno tarafından üretilmiş ve gönderilmiştir. Bu numuneler herhangi bir işlem görmeden sadece sıvı temizleyiciler ile yıkanıp, ayarlı bir şekilde gümüş pastayla plakaya yapıştırılır. Bu işlem ve aslında bu yapıştırma işleminde alttaş yapısı en güçlü haldedir ve yapışma kalitesi ve ara yüzey SEM görüntülerini alma amaçlı kullanılır. Yapıştırma sonrası ortalama aygır kalınlığının maksimum 1.1 μ civarında olması beklenir. Deney parametrelerinde cam numunesiyle kıyasta farklılık yoktur.

İnceltilmiş Galyum-Arsenide numunelerinin yapıştırılması

Normal numune aşamasından elde edilen elektron mikroskopu datalarına göre yapıştırma işlemi inceltilmiş numune ile devam ettirilir. İnceltilmiş numuneler gerçekte yapılması gereken aygıt numunelerinin boyutunu getirilin ve yapışma testine ilaveten, mekanik baskı esnasında ince numunenin kırılmaya karşı dayanımı denetime alınır.

Çalışma sonucu olarak kullanılan numuneler

Bu etapta aygıt pulu olarak gerçek *Active region* numunesi kullanılır ve bu numuneler yapıştırma işlemi sonrası Terahertz yayılım testine dahil edilecektir. Bu numuneler özel olarak MBE ve MOCVP yöntemi ile ince şekilde aktif bölge olarak üretilmiştir ve Golaycell gibi Terahertz yayılım test cihazlarında uygulanabilir bilme imkanı bulunmaktadır. Bu numunelerinde yapıştırma düzeneği aynı test numuneleri gibi devam etmektedir. Şekil 38’de aktif bölge (*Active region*) numunelerinin korumalı bir şekilde tutulduğu kabı göstermektedir.



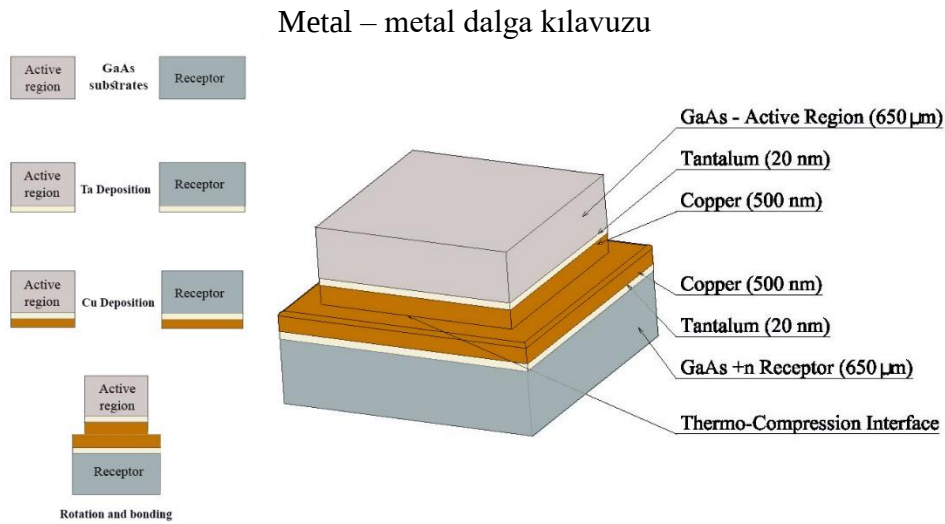
Şekil 38. Active region numuneleri

ARAŞTIRMA BULGULARI

Tüm tez prosedürü neticesinde gereken kaplamalar sonucu elde edilmesi beklenen Bakır –Bakır katmanların yapışması ve ona bağlı dalgakılavuzu üretimi gerçekleşmiştir. Bu süreçte GaAs (n+) reseptör taban malzemesi *Argon Lab USA* ve GaAs Active region altlık Polonyalı çalışma ortağı gurup tarafından MBE yöntemi ile tasarlanıp termal baskı vasıtasıyla Kuantum kademeli lazer (QCL) lerin dalgakılavuzu üretimi amaçlı İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsüne gönderilmiştir. Enstitümüzde yer alan laboratuvarlarımız içerisinde, dalgakılavuzunun üretimine özgün sistem tasarlanıp gereken parçalar konfigürasyonu gerçekleşmiştir.

Özet olarak üretim işlemi taban malzemenin küçük ebatta parçalara kesilmesi, inceltirilip parlatılması, vakum çemberi içine yerleştirilmesi, DC mıknatıssal saçtırma ile Tantalum ve Ardından Termal buharlaştırma ile Bakır kaplaması ve sonra kontrollü şekilde ısıtma, yapıştırma ve soğutma aşamalarından ibarettir.

İşlem sonucunda ortaya çıkan numune tek parçalı yapışmış bir dalga klavuzudur. Aşağıdaki Şekil 39 çıkan numunenin şematığı ve katmanların kalınlık oranını göstermektedir. Yapıştırma işlemi sonucu çıkan numune katmanların kalınlığı, bağlanma gücü ve ara yüzey kimyasal kalitesi açısından tartışılır.

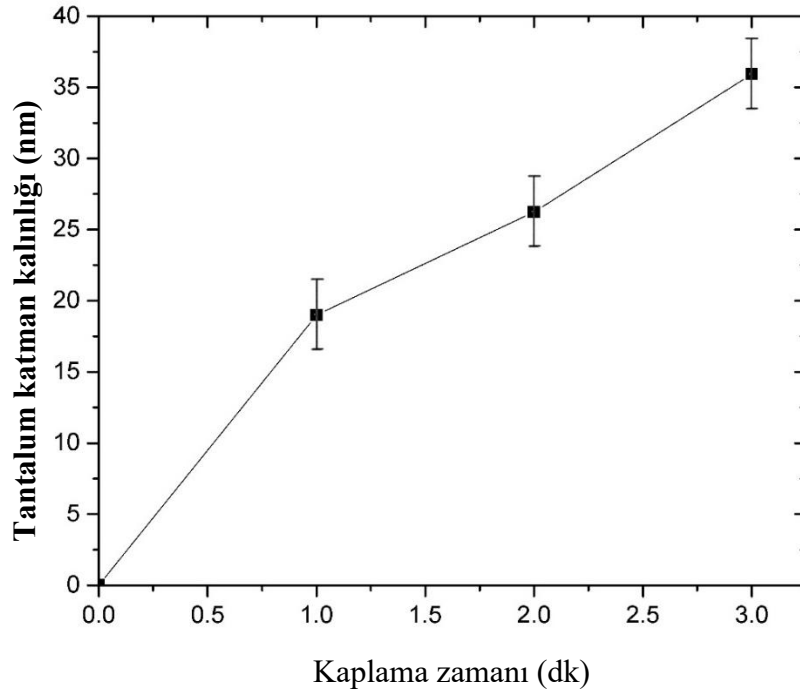


Şekil 39. Elde edilen sonuç numunenin şematik görüntüsü

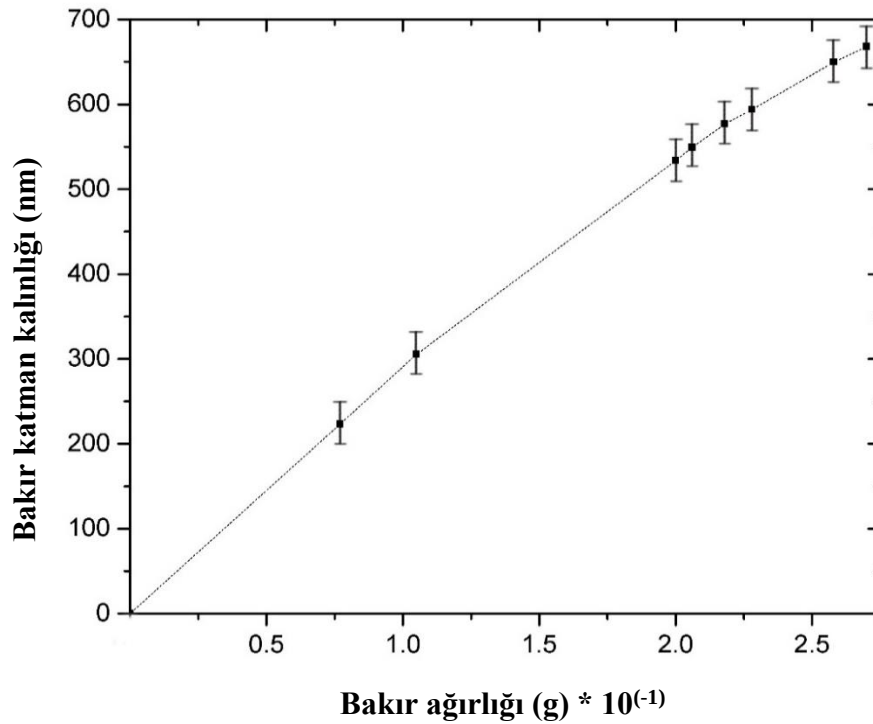
Kalınlık Ölçümleri ve Profilometre Sonuçları

Araştırmaların ilk bulguları kalınlık ölçümleri ile raporlanmaktadır. Raporlanan kalınlıklar Tantalum ve bakırın tek tek kalınlık ölçümleri ve iki katmanın birlikte ölçümü ile gerçekleşir. Altta verilen figürler ve şekiller Dektak 150 profilometre kalınlık ölçüm cihazının raporlarıdır ve farklı kalınlıklara göre sıralanmaktadır. Ayrıca Ek 4 bölümünde cihazdan alınan

kalınlık sonularındakı pik göstergeleri ve R_a değerleri mevcuttur. Aşağıda verilen grafikler sırayla Tantalum kaplaması kalınlığını zamana göre ve Bakır kaplaması kalınlığını buharlaştırma malzemesi miktarına göre ifade etmektedir. şekil 40 farklı zaman aralıklarla Tantalum kaplama süresi ve kalınlığın bağlantısını ifade eder. şekil 41 ise Bakır buharlaştırma malzemesinin ağırlığına göre elde edilen kaplama kalınlıklarını göstermektedir.



şekil 40. Tantalum hedef malzemesinin kaplama zamanına göre alınan nm cinsinden kalınlık ölçümleri grafiği



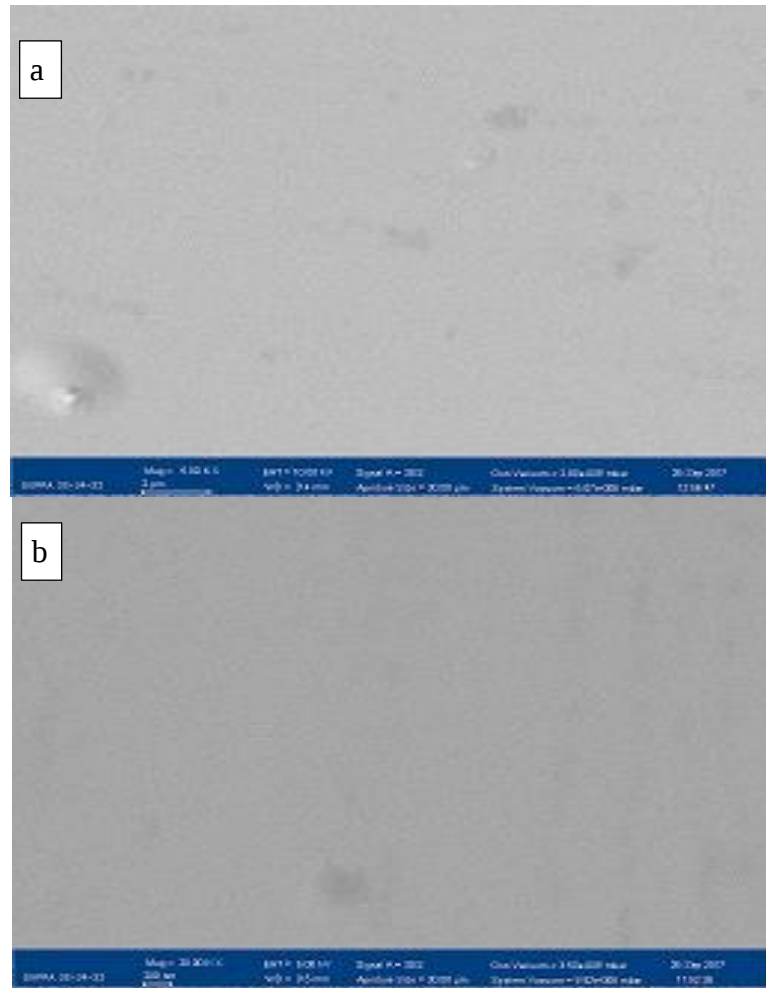
şekil 41. Bakır buharlaştırma malzemesinin ağırlığına göre alınan nm cinsinden kalınlık ölçümleri grafiği

Elde edilen grafiklerde Ta için kalınlık değeri 18-36 nm ve Cu için 455-870 nm arasında değişmektedir. Çalışmalar esnasında iki grafiğinde orta noktası baz alınarak yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Taramalı Elektron Mikroskobu İle Yüzey Morfoloji Analizleri

Deneyler sırasında yapıştırma yüzeyi ne ilave kaplanmış yüzeylerin tek tek SEM görüntüleri alınmıştır. Bu görüntüler yüzey morfolojisinin yapışma sürecinde etkileme oranının analizi amaçlı gerçekleştirilmiştir.

DC Magnetron sputtering ile kaplanan Tantalum yüzeyi

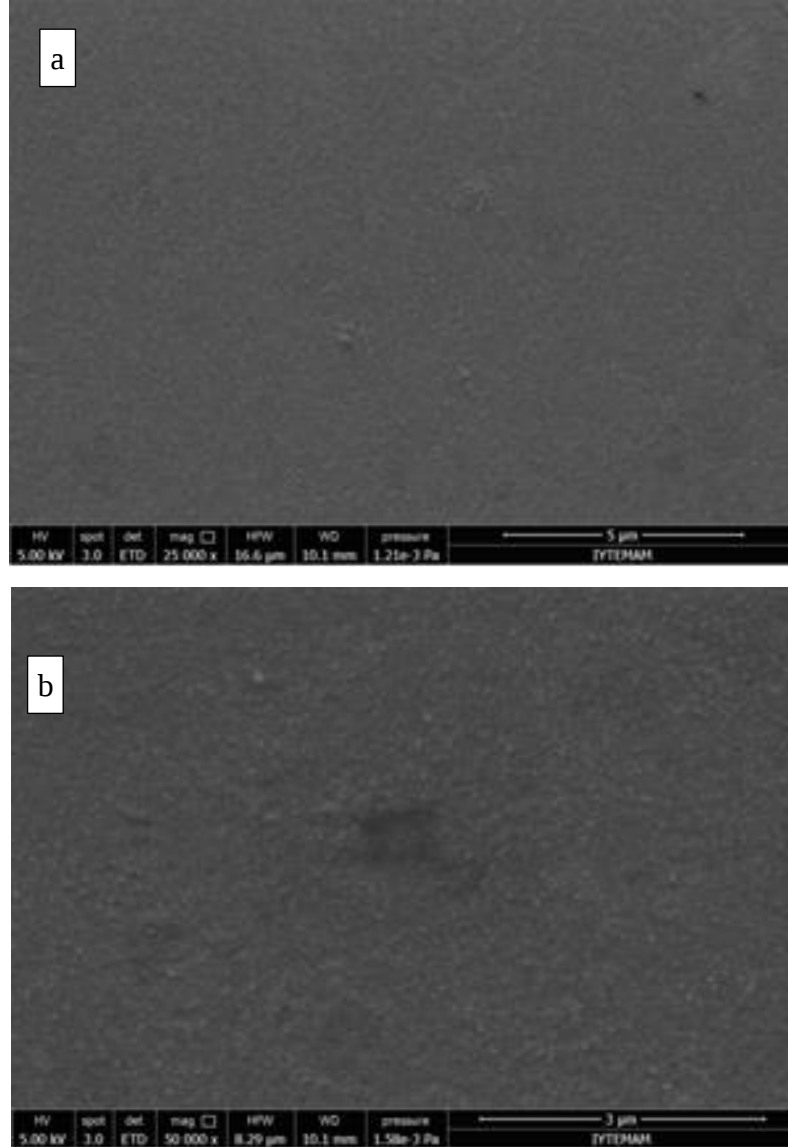


Şekil 42. Ta ince filme ait SEM görüntüsü üzerindeki bar skalaları a) 2 µm b) 200 nm

Taban malzemesi SLG olarak kaplanmış olan Tantalum morfolojisinde (Şekil 42.) yüzey pürüzlülüğü ve kusurlar pek çok bulunmamaktadır. Yüzey yapıları dikkatli incelendiğinde yüzey de herhangi bir tanecik yapısına rastlanmadığı düz bir yüzey elde edildiği görülmektedir.

Termal buharlaştırma ile gerçekleşen Bakır kaplaması

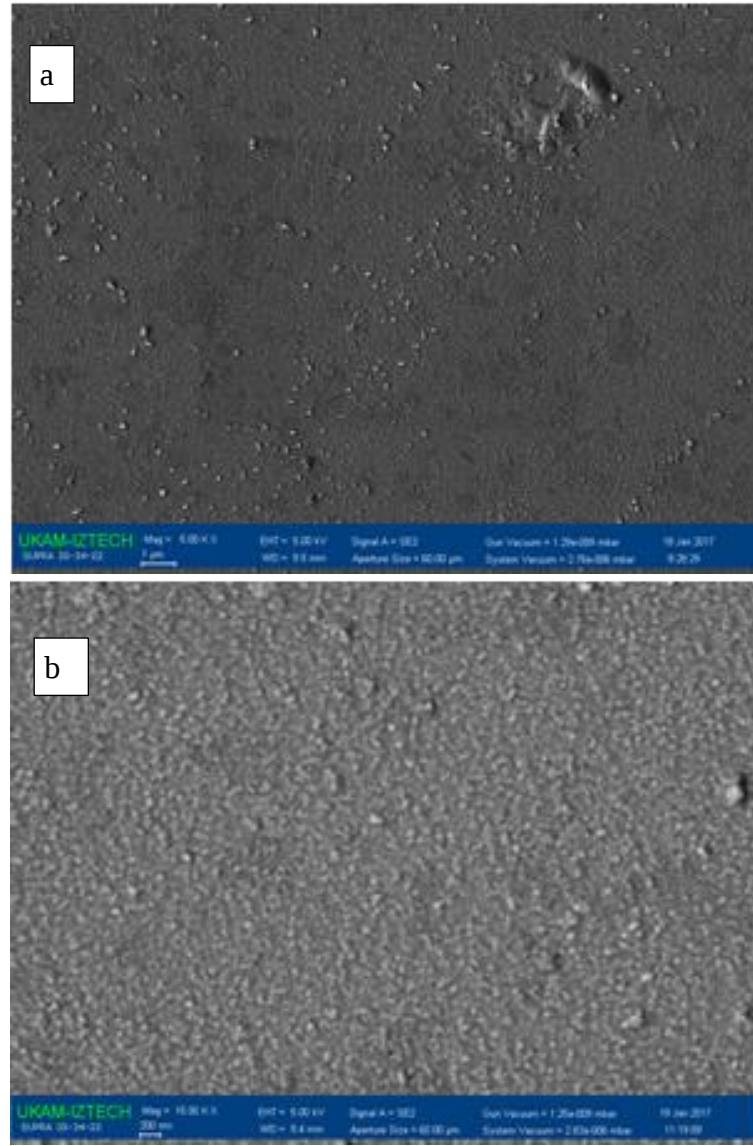
Termal buharlaştırma ile kaplanan yüzeyde hemen hemen düz ve pürüzsüz bir yapı görünmektedir (şekil 43) ve her türlü çatlak ve heterojen yapı ze çarpmamaktadır. Yapıda oluşan tane sınırları çok belli olmamaktadır.



şekil 43. Buharlaştırma ile büyütülen Cu filmlere ait SEM görüntüleri a) 25000x b) 50000x

Mıknatıssal saçtırma ile yapılan Tantalum zerine bakır kaplaması

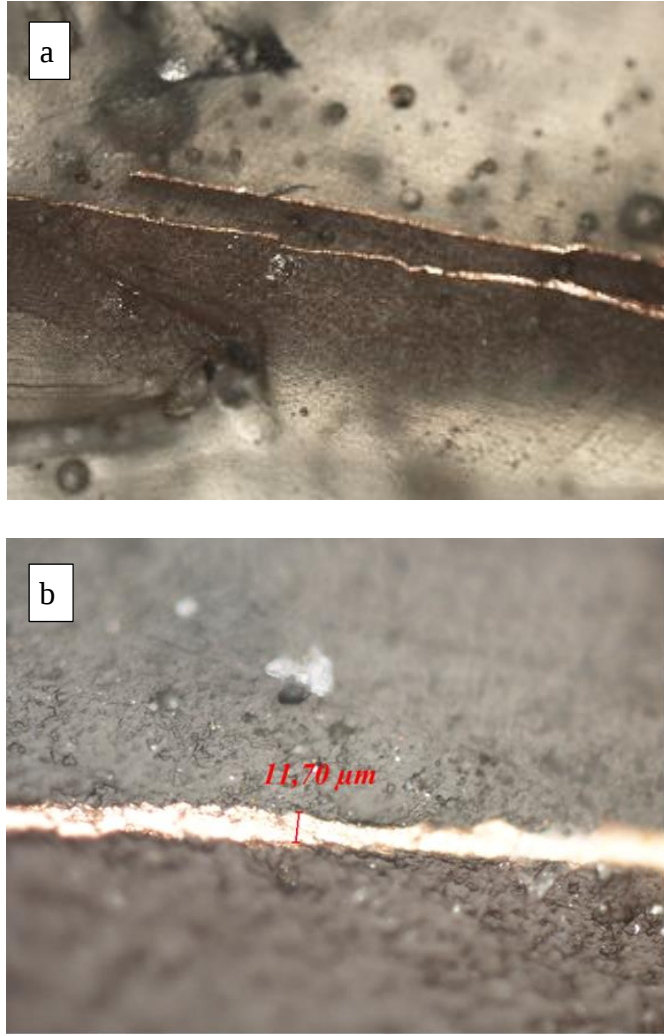
Termal buharlaştırmayla kıyasta yapılan Bakır kaplamalarında yüzey yapısı daha heterojen bir morfolojiye sahiptir (şekil 44) ve yüzeyde oluşan topaklanmalar ve tanecikler gözükmektedir. Bu topaklanmalar atomların çarpma süresinde meydana gelmiştir ve yüzey pürüzlülüğü daha yüksek orandadır. Yüzeyde her hangi bir çatlak gözükmemektedir.



Şekil 44. Mıknatıssal saçtırma ile büyütülen Cu filmlere ait SEM görüntüleri a)5000x b)15000x

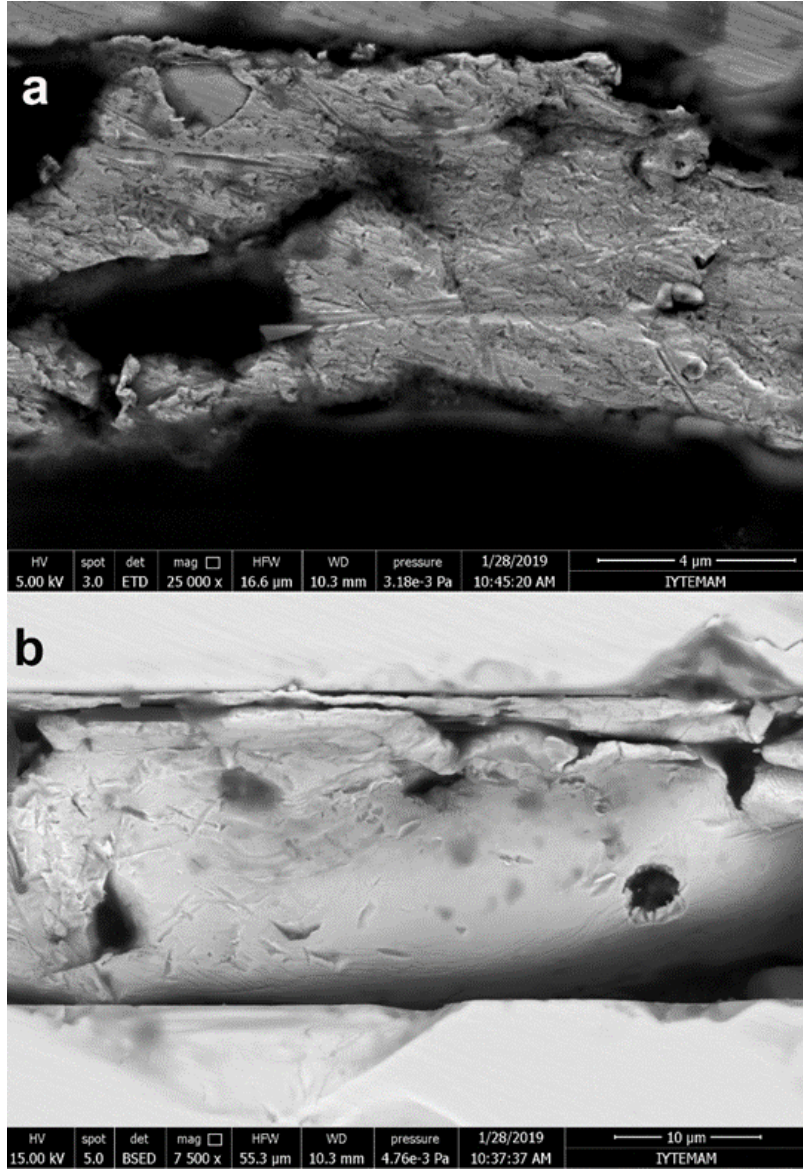
Arayüzey optik mikroskop ve SEM görüntüsü

Cu-Cu yapışması sırasında arada boşlukların kalması yani yüzeyin çok iyi yapışmaması aygıt performansını düşürmektedir. Bunun için üretilen örneklerin arayüzeyleri optik mikroskop (Şekil 45) ve SEM (Şekil 46) ile incelenmiştir. Cu-Cu yapıştırılan katmanlar Ta üzerine Cu büyütülmüş film ile Cu film birbirlerine yapıştırıldıktan sonra elde edilen filmin arayüzünü inceleyebilmek için önce filmler altlık üzerlerinden kaldırılmış ve epoksi reçine içerisine gömülmüştür. Daha sonra arakesiti ortaya çıkarmak için numuneye önce zımparalama daha sonra 9, 3 ve 1 mikrometrelik elmas parlatma sıvıları ile parlatma işlemi yapılmıştır.



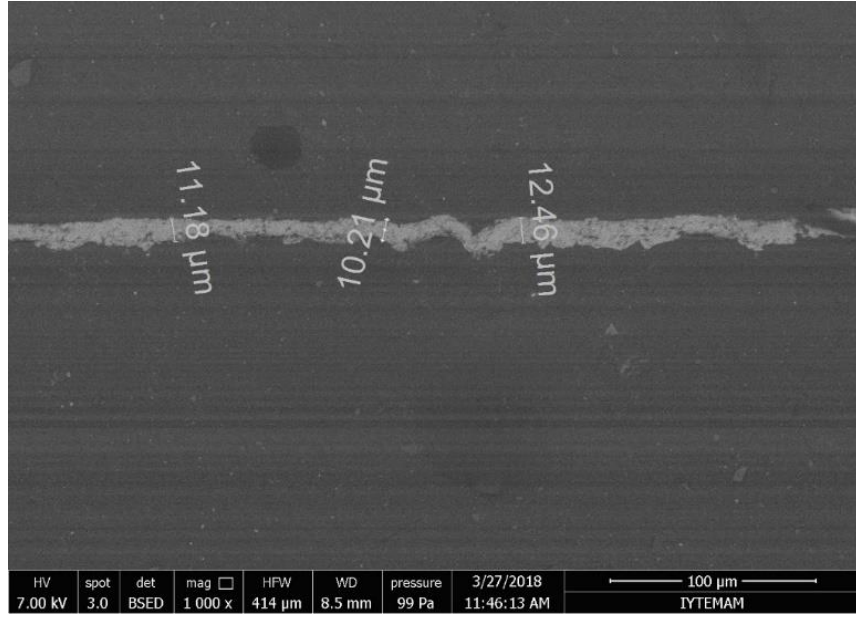
Şekil 45. Cu-Cu Arayüzeyinin optik mikroskop görüntüleri. Soldaki resim iki ara yüzey sağdaki resim yüksek büyötmeye karşılık gelmektedir.

Optik mikroskop ve SEM görüntülerinden elden edilen sonuçlarda üretilen Cu-Cu yapıştırılmış filmlerin arakesit kalınlıklarının birbiriyle uyumlu olduğu görölmektedir. Ta-Cu/Cu kaplaması düşünöldüğünde toplam kalınlığın 1 μm civarında olması beklenmektedir.

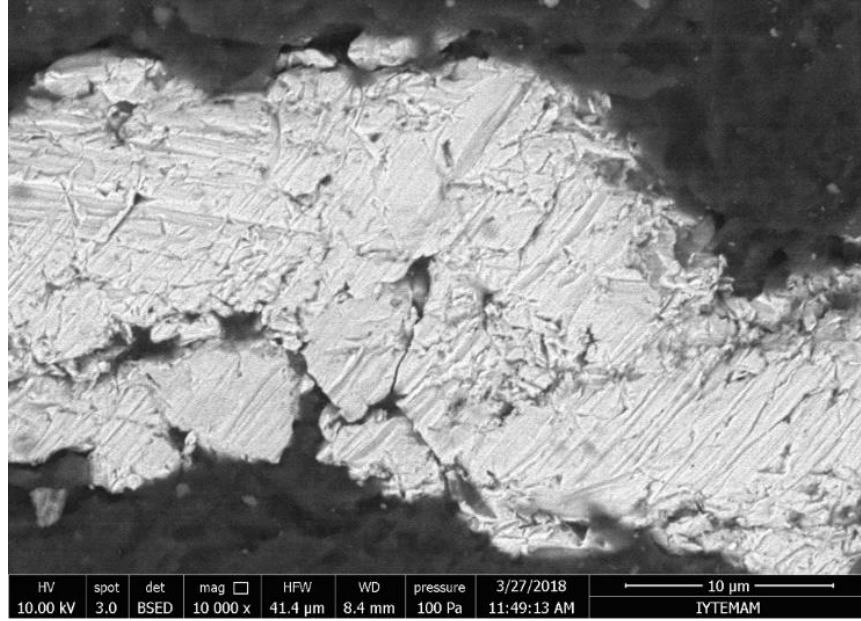


Şekil 46. Cu-Cu Arayüzeyinin SEM görüntüleri a) 5w 25000 büyütmede lokal ve kısmi yapışmalar. B) 15 w ve 7500 büyütmede ayrılmış bakır katmanı

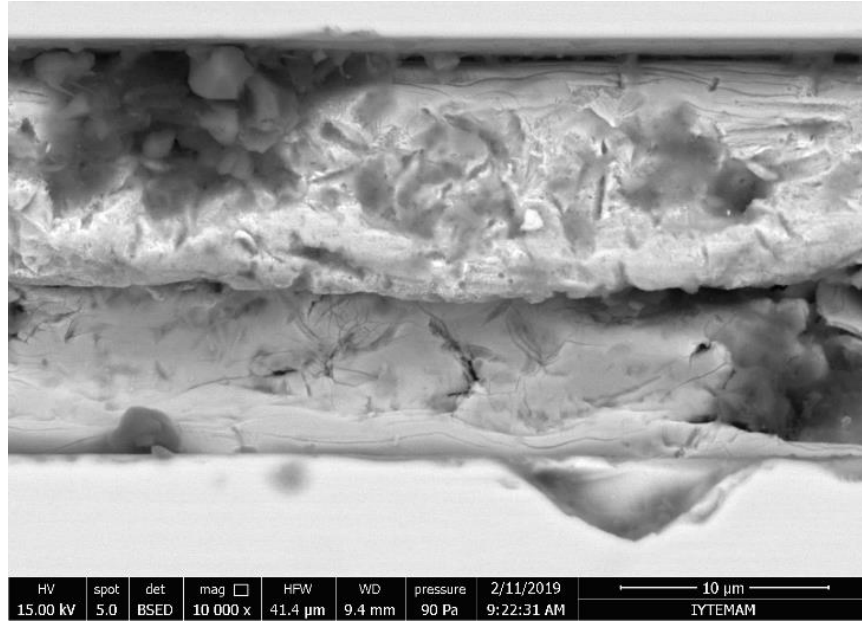
Daha detaylı örnekler olarak Şekil 47’de kalın kaplama sırasında birleşmiş olan iki bakır yüzeyi 1000 kat büyütmede ve Şekil 48 aynı yüzeyin 10000 kat büyütmede yapışma profilini göstermektedir. Ama Şekil 49 ince kaplamada yapışmamış olan iki bakır arayüzeyi 10000 kat büyütmede ifade eder.



Şekil 47. GaAs üzerine yapılan bakır kaplaması birleşmesi



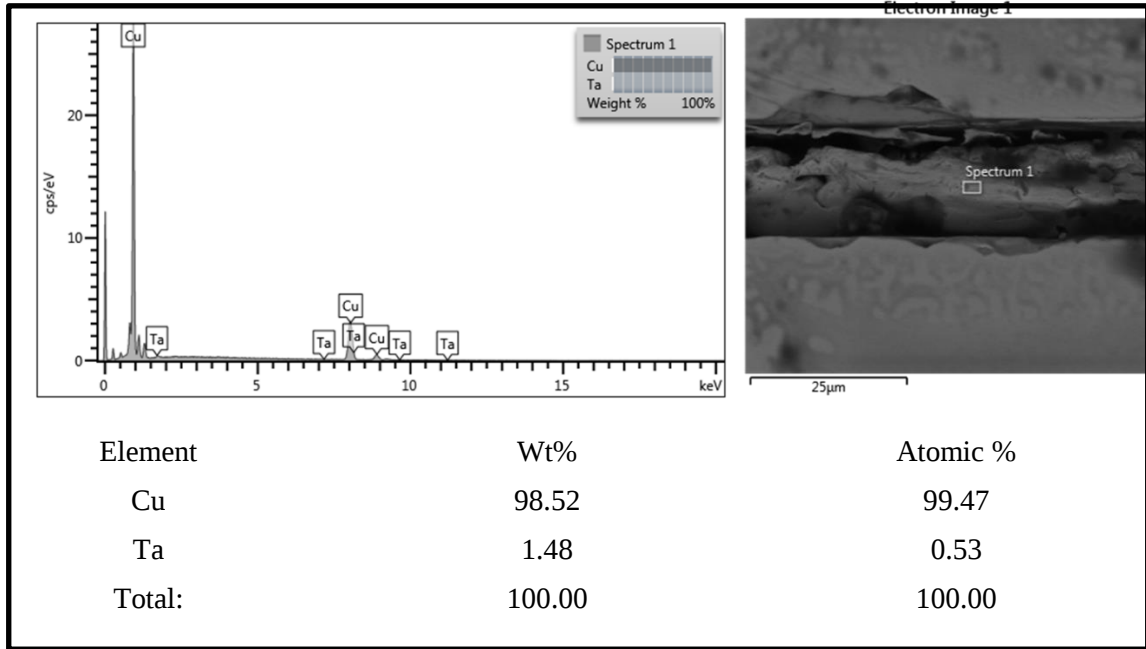
Şekil 48. Kalın kaplama da oluşan ara yüzey bağ düzlemi



Şekil 49. 15w ve 1000 büyütmede çekilen yapışmamış yüzey SEM görüntüsü

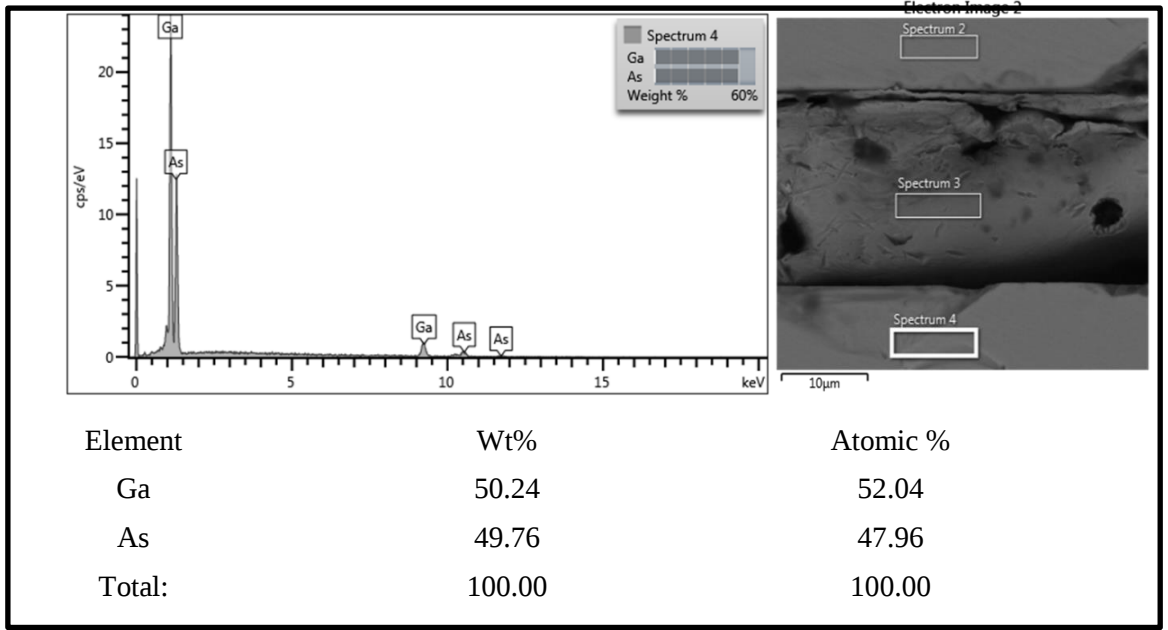
Yapışma Arayüzeyin EDX Kimyasal Analizleri

Yapılan arayüzey kimyasal analizlerinde farklı bölgelerde elementlerin dağılım oranı belirlenmektedir Şekil 50’de Spectrum 1 adlı verilen örnek Bakır-Bakır yapışma yüzeyinin kimyasal analizini göstermektedir.



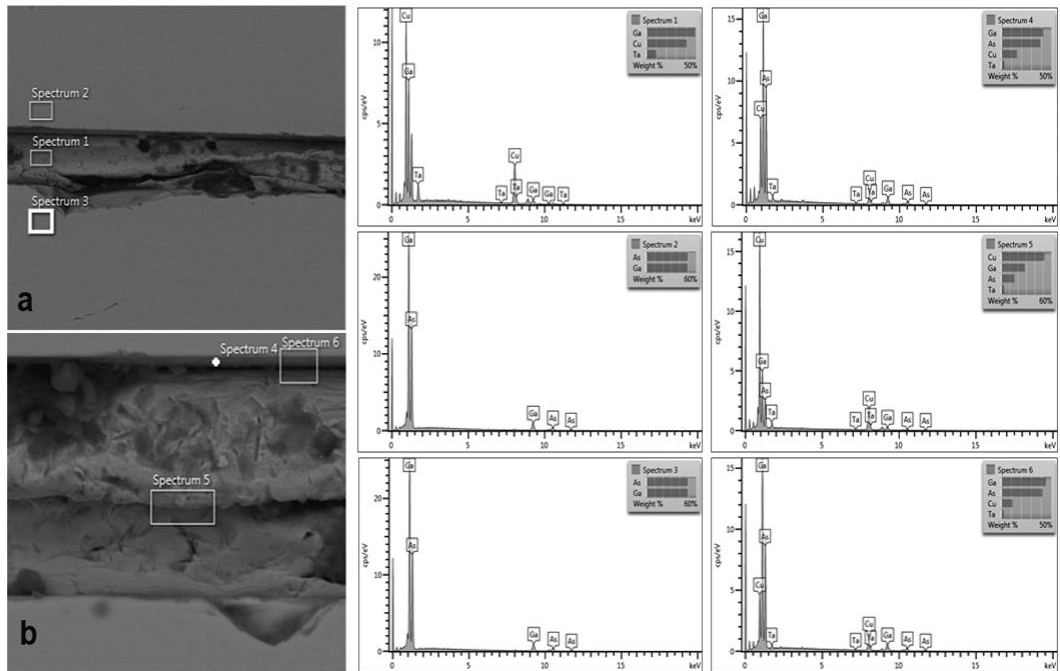
Şekil 50. Yapışma yüzeyi kimyasal analizi

Şekil 51 olarak altlık malzemesinden alınan EDX analizi Ga ve As elementlerin kimyasal dağılım oranını spectrom 4 olarak vermektedir.



Şekil 51. AlGaAs malzemenin kimyasal analizi

Şekil 52'den elde edilen Tablo 3'e göre, bir kaplanmış nihai numunenin farklı kısımlarından alınan EDX kimyasal analiz yapılan işlemin sonucunda arayüzeylerde her türlü oksit ve kontaminasyonun olmadığını ispatlamaktadır ve yapışma her türlü yan faz etkisinde olmadığını belirler (Blakemore 1982).



Şekil 52. Yapıştırma sonucunda elde edilen oksitsiz yapışma arayüzeyi (a) yapışan numune (b) sıkıntılı yapıştırma

Tablo 3. Yapıştırma sonucunda elde edilen kimyasal elementler yüzdesi

Wt%	Ga	As	Ta	Cu	O ₂	Total
Spectrum 1	48.99	0	10.34	40.67	0	100
Spectrum 2	49.80	50.20	0	0	0	100
Spectrum 3	49.99	50.01	0	0	0	100
Spectrum 4	41.95	39.12	3.20	15.73	0	100
Spectrum 5	28.41	15.96	3.77	51.86	0	100
Spectrum 6	44.57	41.29	2.65	11.56	0	100

Şekil 52 ve Tablo 3 de görünmüş olan EDX analizleri Bonding kombinasyonundan alınmıştır. Yapılan analizler atomik ağırlık esaslı rapor edilmiştir. Bonding alanı 6 bölgeye ayrılarak farklı elemental analiz sunmaktadır.

Spectrum 1. bakır kaplama bölgesini göstermiş olup 3 elementi içermektedir. Bu bölgede Altlık yapısından Galyum ve kaplamadan Tantalum elementinin kısmen bakır yapısına difüze olması görünmektedir ve bakır yapısında toplam %60 civarında iki elementten difüze olmuştur ama bu oran kısmidir.

Spectrum 2 tamamen Active region parçası olan altlıktan alınmıştır. Görünüşe göre kaplama elementleri hiç bir şekilde altlık yapısına difüze olmamıştır. O yüzden sadece Galyum ve Arsenide pikleri gözükmemektedir. Bu elementlerin atomik oranı yaklaşık yarı yarıyadır.

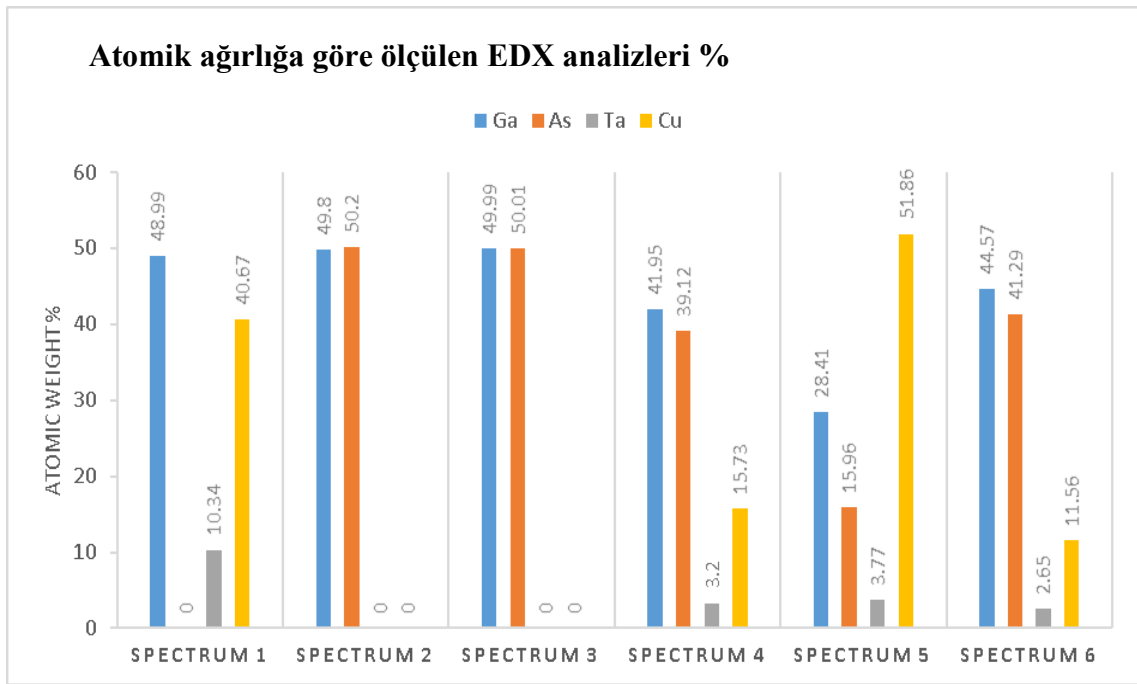
Spectrum 3 de spectrum 2 gibi koşullar içererek aynı oranları göstermektedir. Bu bölge n+ receptor bölgesinde her türlü difüzyon etkisinde kalmamıştır.

Spectrum 4 noktasal analiz şeklinde Tantalum Ve Galyum- Arsenide yapışma bölgesinden alınmıştır. Yapıda Tantalum atomik ağırlık yüzdesi %3 oranından fazladır ve altlık etkisi galip görünüyor.

Spectrum 5 Bakır-Bakır bonding bölgesini ifade eder. Bu bölgede Bakır elementinin içine diğer elementlerin toplam yarı oranda eli füze olması gözükmemektedir. Atomik oran açısından Galyum eli füze olması kabiliyeti en yüksektir.

Spectrum 6 Tantalum kaplama bölgesinden alınmıştır. Bakır elementinin miktarına göre %11 oranında Tantalum yapısına Karışmış olması gözükmemektedir. Ama Tantalum kaplaması içinde altlıktan gelen elementlerin oranı yaklaşık eşittir.

Tüm yapı analizinde görünmesi gereken elementler hariç başka safsızlık öne çıkmamıştır. Ayrıca Oksit faz oranı %0 miktarındır.



Şekil 53. EDX elemental dağılım analizi

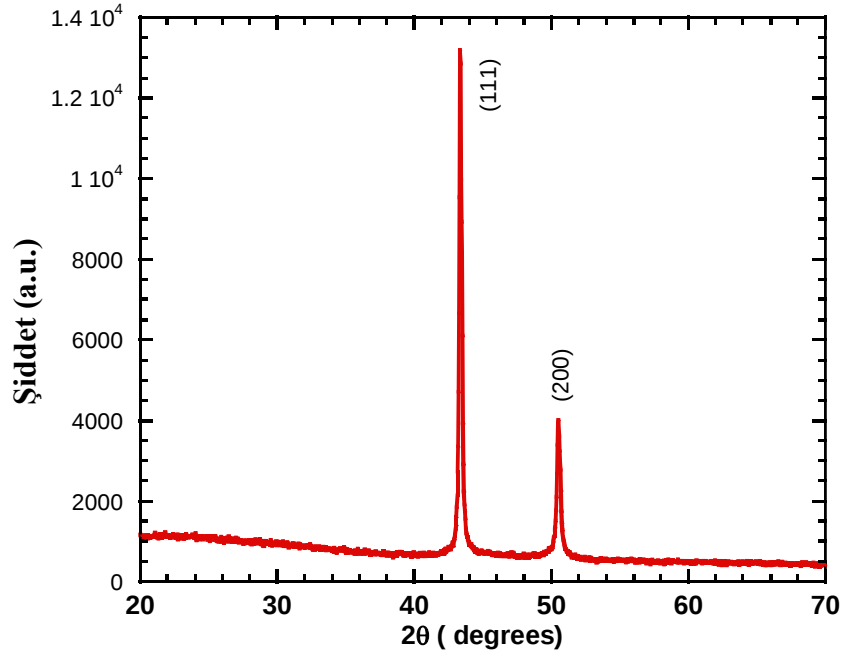
Aygıtların Arayüz ve Yapısal Karakterizasyonu

Tantalum kaplaması XRD karakterizasyonu

Cu ince filmlerin yapısal karakterizasyonu ve yüzey saflığı ise X-Ray ışınımı kırınımı (XRD) ile incelenmiştir. Ancak Ta ince filmlere ait XRD spektrumunu Ta'un kristal yapısı amorf olarak elde edilmiştir. Ancak SLG üzerine üretilen Ta ince filmin kalınlığı çok düşük olması nedeni ile elde edilen spektrum SLG'ye aittir.

Cu-Mıknatıssal Saçırma XRD Karakterizasyonu

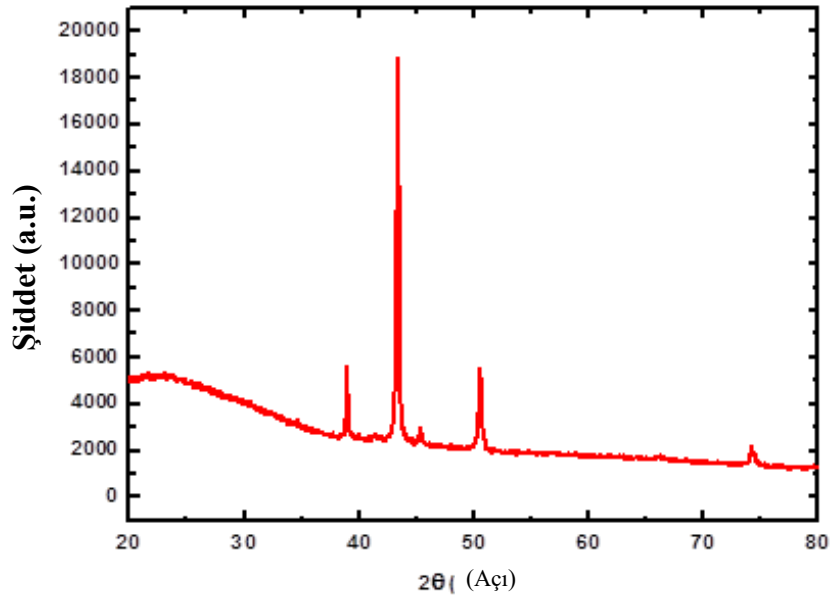
Şekil 54 mıknatıssal saçırma yöntemi ile bakır ince film kaplanmış malzemenin X-ışını kırınımı (XRD) sonuçlarını göstermektedir. XRD ölçümleri Cu K α ışınalı ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$) X'Pert Pro X-Işını difraktometresi kullanılarak alınmıştır. Ölçümler 20° - 70° arasında gerçekleştirilmiştir. 43.3° ve 50.5° derecelerde görülen kırınım pikleri sırasıyla kübik yapıdaki Cu'nun (111) ve (200) düzlemlerine aittir (Peng 2016; Boo 2004). Bu kırınım pikleri Cu filme ait kırınım pikleri dir. Bu da bize kaplanan malzemenin saflığı hakkında bilgi vermektedir. Elde edilen kırınım piklerinin sadece Cu a ait olması bize malzeme içerisinde herhangi bir safsızlık olmadığını göstermektedir.



Şekil 54. Mıknatıssal Saçtırma sistemi ile büyütülen Bakır ince filmin XRD grafiği

Cu-buharlaştırma ile yapılan yüzeyin XRD Karakterizasyonu

Şekil 55. bakır ince film kaplanmış malzemenin X-ışını kırınımı (XRD) sonuçlarını göstermektedir. XRD ölçümleri Cu K α ışınalı ($\lambda=1.5406 \text{ \AA}$) X'Pert Pro X-ışını difraktometresi kullanılarak alınmıştır. Ölçümler 20° - 80° arasında gerçekleştirilmiştir. 43.3° , 50.5° ve 74.1° derecelerde görülen kırınım pikleri sırasıyla kübik yapıdaki Cu'nun (111), (200) ve (220) düzlemlerine aittir (Boo 2004; Peng 2016). Bu kırınım pikleri Cu filme ait kırınım pikleri dir.



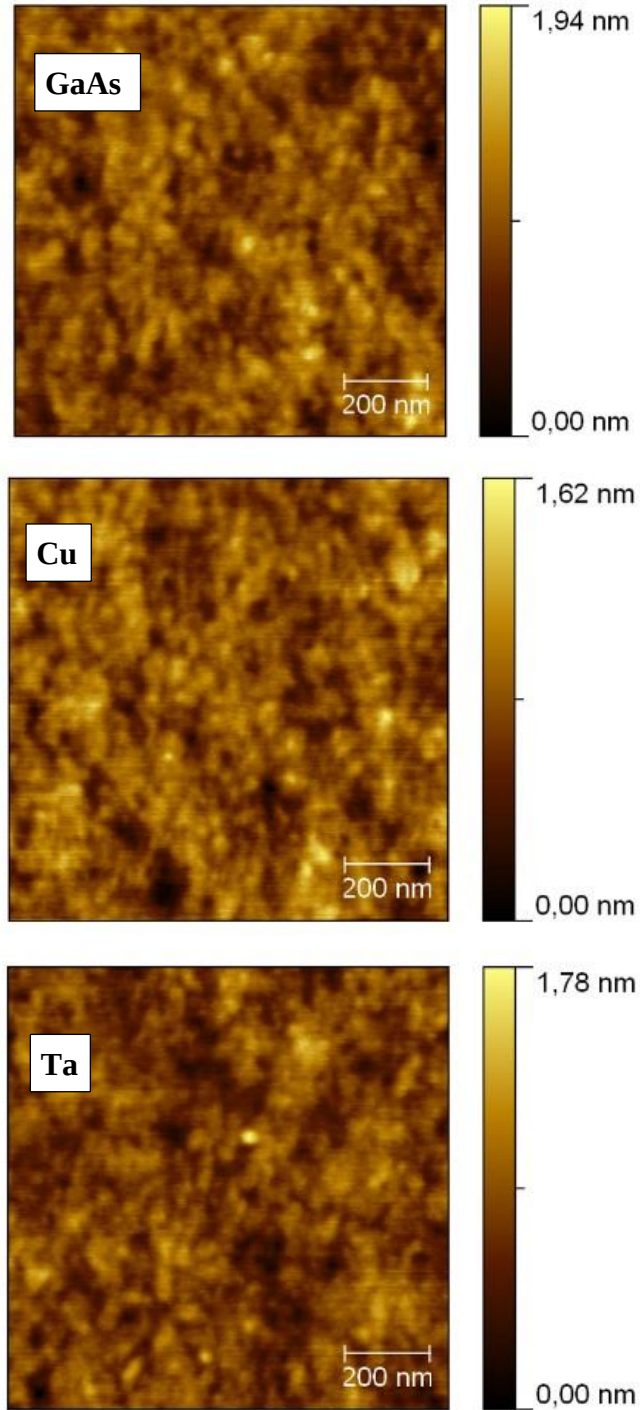
Şekil 55. Buharlaştırma sistemi ile Bakır ince film kaplanmış malzemenin XRD grafiği

Sonuç olarak, mıknatıssal saçtırma sistemi ile karşılaştırıldığında termal buharlaştırma sistemi ile üretilmiş Cu ince filmlerin hem XRD hem de SEM analizleri daha iyi sonuç

vermektedir. XRD difraksiyon pikleri daha keskin ve şiddetli iken SEM görüntülerinde de herhangi bir çatlğa rastlanmamaktadır. Bu da bize termal buharlaştırma sisteminde alternatif bir yöntem olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Yapılan Kaplamaların Aşamalı AFM Analizi

Elde edilen filmlerin topografik karakterizasyonu AFM kullanılarak Şekil 56'da incelenmiş ve ortalama rms değeri bulunmuştur.



Şekil 56. Kaplama aşamaları AFM analizleri ve rms değeri

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tezin altyapısında yer alıp üzerine özellikle vurgulamış olmamız hedef yapı Galyum-Arsenide epitaksiyel yapıdan ibaret olması bu malzemenin önemini ve yapılan denelerin malzeme modifikasyon yönünde ilerlemesini gösterip çalışmanın asıl amacını belirlemektedir. Hedeflenmesi belli olan yapıdaki (MQW) yada kuantum kuyuları topluluğunu metalik yapılar arasında taşıma bilme özelliği kazanması ve bunun yanı sıra lazer foton yayılımı gerçekleşmesi için, kaliteli ve kontaminasyonlardan arındırılmış bir katman yapısı oluşturmaktan ibarettir. Buna göre yüksek vakum ortamında gerçekleşmiş olan kaplama prosedürü ve işlem doğrultusunda ısıtma ve sonuçta termal baskı ve yapıştırma işlemi gerçekleşmektedir. Termal baskının yapıya kazandırmış olduğu sonuç, iki metalik katman arasında bir mekanik bağ oluşumunu göstermektedir. yani çalışma esnasında belirlenmiş olduğu öne sürülen sonuçlar tezin 3 boyutlu termal baskı vasıtasıyla integrasyon yapılmasından ibarettir. Bu prosedür sonucu GaAs altlık üzerine DC *magnetron sputtering* yöntemi ile kaplanmış olan Tantalum ince film yapısı foton geçişi sırasında bir sub-band ve ya yarı basamak oluşturmak görevi üslenmenin yanı sıra, diğer katmanlar arasında gereken yapıştırıcı ve tutkal malzemesi görevi üslenmektedir. Bu katman kalınlığı deney koşulları ve beklenen özelliklere göre 5-30 nm kalınlığı arasında değişim göstermekte olduğu raporlanmıştır.

Ancak asıl hedef katmanlar arasında geçiş ortamı sağlayan metalik yapının birleşme kabiliyeti olması Bakır-Bakır ikilisinin integrasyonu ile sonuçlanmaktadır. Birleşme sonucunda elde edilen bağ kalitesi, katmanlar arası gerçekleşen difüzyon vasıtasıyla belirlenir ve bu geçişler iki bakır katmanı arasından birbiri ile mekanik bağ kurmayı başaran saf bakır atomları ile gerçekleşir. Bu sırada oluşmuş olan bağ gücü geçişlerin ne kadar sağlam bir şekilde gerçekleşmesi ve ona göre arabantların kalitesini ifade etmektedir.

Gerçekleşmesi hedeflenmiş olan bağ kalitesi 3 yönden tartışılır. Birincisi iki bakır katmanı arasındaki safsızlıklar miktarı, ikincisi ara yüzey difüzyon kabiliyeti ve üçüncü olarak bağ gücü ve yapışma kalitesi olarak denetlemeye alınır.

Bakır-Bakır *self diffusion* Katsayısı

Termal baskı işlemi temel olarak bakır atomlarının karşı örgü yapısının içine kimyasal bağ kurmadan difüze olmasıyla gerçekleşmektedir. Bakır yapısının FCC ve ya yüzey merkezli kübik olması, difüzyon atomlarının örgü yapısının içinde araya sığınma yöntemi ile gerçekleşmesi enerji açısından daha muhtemel görünmektedir.

Teoriye göre difüzyon katsayısı, birim yüzey üzerinde intikal eden malzemenin dikey yoğunlaşma gerdiğine oranıdır. Difüzyon işlemi ana tarifi, moleküllerin rast gele şekilde gerçekleştirdiği mevki değişimi veya dağılımına denilmektedir. Aslında bu dağılımlar yapıdaki bir konsantrasyon grediyeni doğrultusunda gerçekleşerek yüksek konsantrasyonda bulundukları bölgeden daha düşük konsantrasyonlara göç etmektir. Ne kadar gazlar ve akışkanlarda difüzyon olayı daha kolay olsa da bu işlem katılarda da ortaya çıkarak atomlar birbirlerinin etrafında hareket ederek her türlü yer değiştirme olanağını sağlayan kristal kafesi kusurlarından yararlanır. Yani difüzyon oranı, konsantrasyon gardiyanının doğrusal bir fonksiyonudur, ve iki atom yerleşme mevki arasında konsantrasyon farkı ne kadar fazla ise, olay o kadar hızlı gerçekleşir ve atomlar difüze olur. Bu etkenin yanı sıra sıcaklık ve elektriksel ve manyetik alanlar gibi kuvvetlerin varlığı da atomik hareketlerde etki sağlamaktadır.

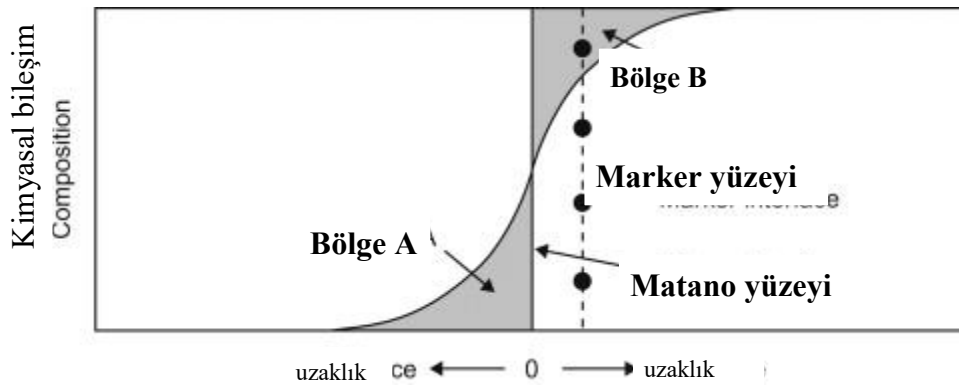
Difüzyonun geçişlerinde gerçekleşen en basit şekil bir cismin, hiçbir dış kuvvetin etki yapmadığı bir homojen katı ortamın içine yayılması (difüze olması) dır. Öz geçişler ancak kaç koşul ortamında gerçekleşir.

I) Malzeme yoğunluğunun (yani birim hacim başına bu cismin kitlesinin) her yerde aynı olması halinde, hiçbir difüzyon gerçekleşmez,

II) Difüze olan malzeme yoğunluğunun farklı noktalarda değişik olması halinde difüzyon, yüksek yoğunluklu alanlardan düşük yoğunluğa doğru gerçekleşir ve her yerde de aynı grediyeni sağlanmasına durur ve sabit bir orana gelir.

Matano Arayüzey Difüzyonu

Matano arayüzeyi belirli bir geçiş grediyeni olmayan yapışmış yüzeyler arasında farz edilen bir ayırım çizgisidir (Şekil 57). Bu arayüzey kimyasal veya a fiziksel yapışma şeklinde görünür ve yoğunluk miktarları farklı olmayan yüzeyler arasında sıklıkla gerçekleşir.



Şekil 57. Malzeme kompozosyonuna bağlı Matano arayüzeyi ve ayırım çizgisi (Dayananda 1996)

Şekilde görüldüğü gibi yoğunluk grediyeini farklı olmayan yüzeylerde oluşan difüzyon yoğunluk integrali ile hesaplanır (Dayananda 1996).

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\tilde{D}_i \frac{\partial n_i}{\partial x} \right)$$

$$\tilde{D}_i(n_i) = -\frac{1}{2t} \frac{\int_0^{n_i} x \, dn_i}{dn_i/dx}$$

$$\int_0^{n_i, max} x \, dn_i = 0$$

Formülde verilmiş olan (n_i) malzeme yoğunluğu ve (x_i) arayüzeyden uzaklığı ve (D_i) difüzyon katsayısı olarak tarif edilmiştir. Hesaplamalara göre integral sonucunun sıfır olması, difüzyonun katsayısının sıfıra doğru gitmesini ifade eder yani yoğunluk grediyeini iki yüzey arasında sıfırdır. Buna bağlı olarak Matano arayüzeyde gerçekleşen geçişlerin yarattığı difüzyon bağları görünür şekli almadan mekanik açıdan sert hale gelmemektedir (Dayananda 1996).

Difüzyon Olayında Kontaminasyonlar ve Safsızlıkların Etkisi

Dislokasyonlar örgü yapısındaki çekirdeklenme, ince filmlerin deformasyonu, yapısal gerilme oluşumu ve nanokristalin katmanları arasında oluşumuna neden olmaktadır. Dislokasyonların çekirdeklenmesi geniş kapsamlı nedenlerle meydana gelir kontrol edici bir faktör olabileceği sonuçlara sahiptir. Nano-indentasyon, küçük ölçekli moleküler dinamikler yöneltmekle sorumludur yani her türlü safsızlık dislokasyon oluşumunda etkilidir ve dislokasyon yoğunluğunun artışı difüzyon oranını artmaktadır (Bahr and Vasquez 2005).

Difüzyon Prosedüründe Gerçekleşen Sıcaklık Etkisi

Kristal yapısındaki örgüye verilmiş olan sıcaklık yapıdaki enerji seviyesini yükselterek atomların kinetik enerjisini artmakla beraber, titreşim seviyesi ve etraf atomlara uygulayan stres oranını yükseltmektedir. Bu esasta difüzyonun esas olan birinci Fick kanunu, difüzyon ile sıcaklığın exponansiyel bağlantısını alttaki denklem ile gösterilmektedir (Rothman and Peterson 1969).

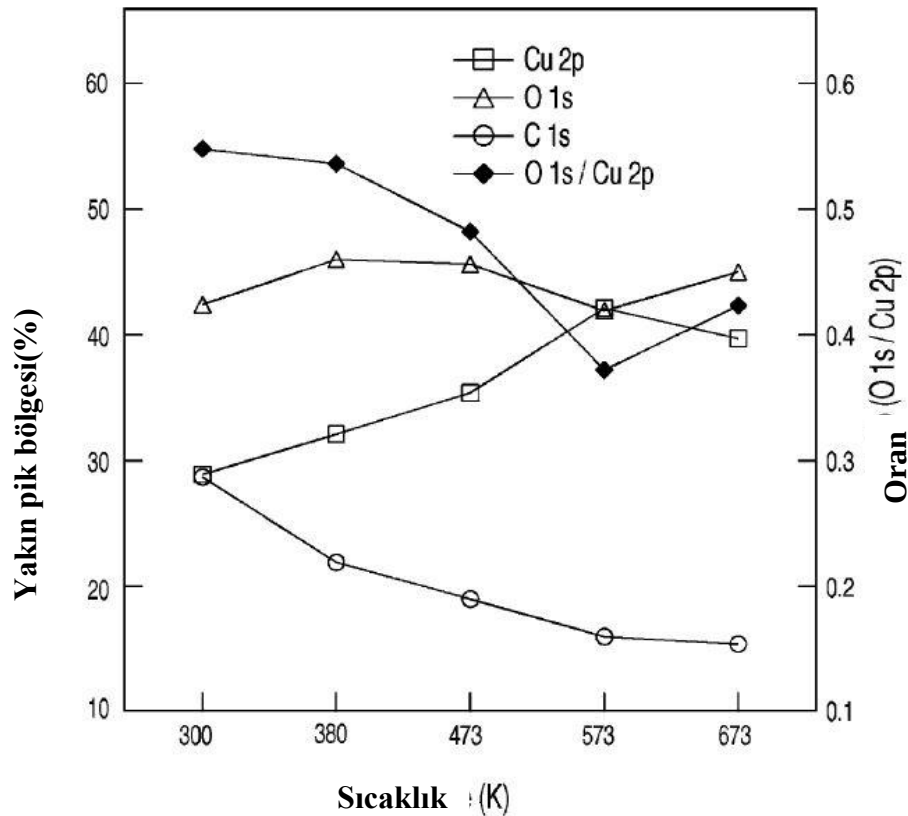
$$D = D_0 e^{(-E_a/KT)}$$

Denklemden yer alan (D) difüzyon katsayısı ve (D_0) difüzyon gerçekleşmeden önce yoğunluk katsayısı ve (E_a) atomların içerdiği enerji (K) Boltzman sabiti ve sonuçta (T) sıcaklığı ifade etmektedir. Formül yapısında görüldüğü gibi sıcaklık artışı difüzyon katsayısını pozitif yönde etkilemektedir. Rothman ve Peterson'a göre bakırın 700-1060°C aralığında kendi örgüsü içerisinde difüzyon gerçekleştirmesi aşağıdaki formülden elde edilir (Rothman and Peterson 1969).

$$D = 0.78 \exp \{ (-2.19 \pm 0.01)/kT \} \text{ cm}^2/\text{s}$$

Vakum Ortamında Tavlama Etkisi

Vakum ortamında değişken olan sıcaklık seviyesi PVD yöntemi ile üretilmiş olan bakır ince film yapısında tavlama etkisi yaratmaktadır. Lee 2003 ve çalışma grubuna göre (Şekil 58) Bakır ara yüzeyi tavlama 1 saat içinde 100°C civarında örgünün %25 ini etkilemektedir ve 4 saat süre ile 400°C ortamında tutulduğunda tavlama %100 oranını tamamlayıp yüzey morfolojisi tamamen yenilenmeye maruz kalarak 20 nm çapında katı adalar oluşturarak yenilenme ortaya çıkmaktadır (Lee 2003).



Şekil 58. Bakır bileşimleri arasında zamana göre tavlama etkisi (Lee *et al.* 2003)

Bakır ve Tantalum Arasında Oluşan Arayüzey Özellikleri

Tantalum ve bakır birbiri içinde çözülmeyen iki element olarak tanınır. Ancak iki elementin ergime (3290 K) noktasına ulaşmasıyla faz diyagramının gösterdiği oluşan alaşım σ fazı oluşumu göstermektedir. Katı fazlarında ise Bakır zengini bileşimler karşısında maksimum Cu-%20 Ta çözeltisi ortaya çıkmaktadır. Örgü yapısı PVD yöntemi ile Nano-kristal formunu aldığı zaman bu oran Cu- %6.5 Ta oranına inmektedir. Katı çözelti içinde Tantalum hacim merkezli kübik (BCC) ve Bakır yüzey merkezli kübik (FCC) örgü yapısı göstererek, Tantalumun 20 nm çaplı parçacıkları Bakırın 200 nm aralıklı örgü yapısının tane sınırlarından difüze olmaktadır. Bu difüzyon prosedürü Zener sabitleme etkisi ve mekanizması ile açıklanmaktadır. Bu olay sırasında Tantalum atomları döner ve kayma şeklinde Bakır örgüsü dislokasyonlarında yer alır ve bunun neticesinde yığılma gerilim oranı örgü yapısında yükselerek örgünün ayrılmasını daha çok engellemektedir. Ayrıca gerçekleşen olay tavlama sırasında da etkisini göstererek Bakırın yeniden çekirdeklenme oranında negatife etki sağlamaktadır ve Ta alaşımının malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde güçlendirici etkisi vardır. Beklendiği gibi, Ta özellikle akış gerilmelerini, veya Nano-kümeler oluşturmakla ayrılmasını engellemektedir. Bu güçlendirici etki basitçe örgünün korunması ve tutkal gibi yapı oluşum nedeniyle yapışkanlık göstermektedir ve nano-kristalin metallerde deformasyon mekanizmaları etkisiz hale getirir. Genel olarak ultra ince Cu filmleri Ta (111) düzlemi üzerine mono tabaka ve Ta (110) alt tabaka üzerinde küçük bir katman modunda (3D) büyüme modeli göstermektedir (Frolov *et al.* 2012)

Vakum Ortamında Görünür Işık Vasıtasıyla Sıcaklık Uygulaması

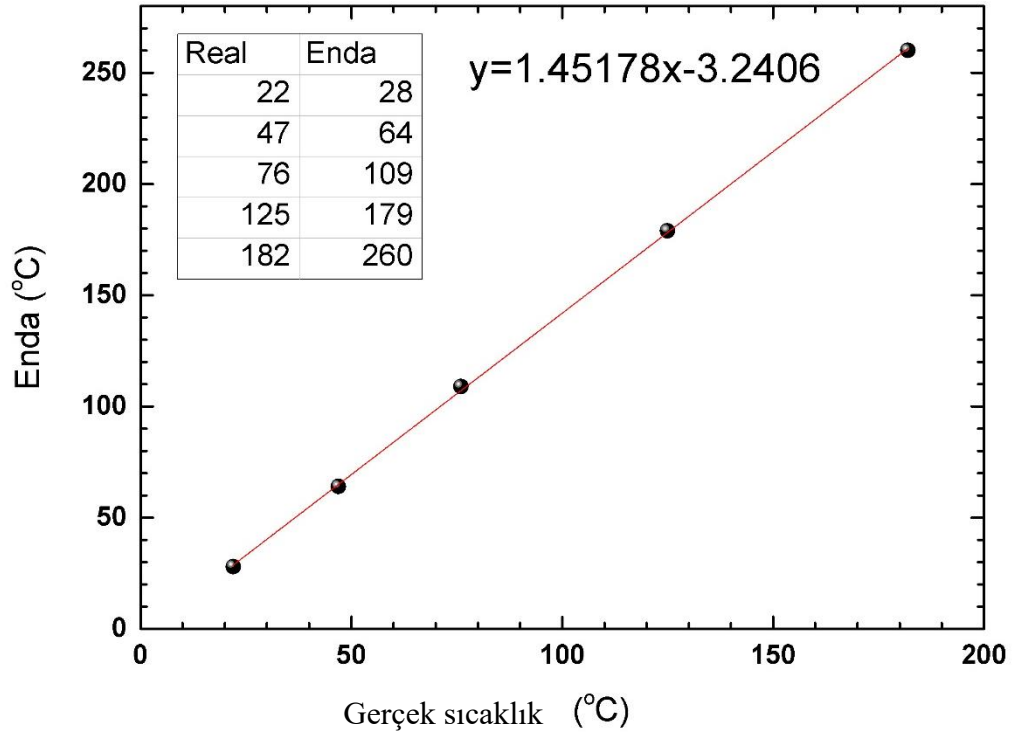
Termal radyasyon, ısı transferinin üç temel mekanizmasından biridir. Bir nesnenin sıcaklığı nedeniyle bir elektromanyetik radyasyon spektrumunun yayılmasını gerektirir. Diğer mekanizmalar konveksiyon ve iletimdir. Isı olarak da bilinen termal radyasyon, mutlak sıfırdan daha yüksek bir sıcaklığa sahip olan tüm maddelerden elektromanyetik dalgaların emisyonudur. Termal enerjinin elektromanyetik enerjiye dönüşümünü temsil eder. Termal enerji, madde içindeki atomların ve moleküllerin rastgele hareketlerinin kinetik enerjisinden oluşur. Tanımı gereği sıcaklığı olan her madde, kinetik enerjiye sahip olan ve birbirleriyle etkileşen parçacıklardan oluşur. Bu atomlar ve moleküller yüklü parçacıklardan, yani protonlar ve elektronlardan oluşur ve madde parçacıkları arasındaki kinetik etkileşimler yük hızlanma ve dipol salınımıyla sonuçlanır. Bu, elektrik ve manyetik alanların elektrodinamik üretimi ile sonuçlanarak, foton emisyonuna neden olur ve enerjiyi yüzey sınırı boyunca vücuttan yayar. Işık da dahil olmak üzere elektromanyetik radyasyon, çoğalmak için maddenin varlığını gerektirmez uzay boşluğunda sonsuza kadar seyahat eder. Katılarda ısı transferi tipik olarak

elektronlar veya atomik fotonlar titreşimler vasıtasıyla bilinmektedir ancak vakum ortamında bu olay ışınlama vasıtasıyla olduğu düşünülmektedir ve bir ortam eksikliği nedeniyle fotonlar tarafından aktarılmaz (Fong *et al.* 2019).

Vakum ortamında quartz lamba ışımasından elde edilen numune üzeri değer K tipi *Thermocouple* ile ölçülmektedir ve bu değer gerçek sıcaklık değeri ile telorans göstermektedir. *Thermocouple* gösterdiği değer hava ortamında ölçülerek aradaki tolerans farkı labview programı ile simülasyon yapılmıştır (Tablo 4) ve (Şekil 59).

Tablo 4. Thermocouple (ENDA) ve gerçek sıcaklık arasında olan tolerans oranı ve farklı sıcaklıklarda gerçekleşen işlemler

Real (°C)	Enda (°C)		Real (°C)	Enda (°C)		Real (°C)	Enda (°C)
20	25.795	RT	240	345.19	MAX	460	664.58
			245	352.45		465	671.84
30	40.313		250	359.7		470	679.1
35	47.572		255	366.96		475	686.35
40	54.831		260	374.22		480	693.61
		Coating temp.	265	381.48		485	700.87
50	69.348		270	388.74		490	708.13
55	76.607		275	396		495	715.39
60	83.866		280	403.26		500	722.65
65	91.125		285	410.52			
70	98.384	TMP off in cooling	290	417.78			
75	105.64		295	425.03			
80	112.9		300	432.29			
90	127.42		310	446.81			
95	134.68		315	454.07			
100	141.94		320	461.33			
105	149.2		325	468.59			
110	156.46		330	475.85			
115	163.71		335	483.11			
120	170.97		340	490.36			
125	178.23		345	497.62			
130	185.49		350	504.88			
135	192.75		355	512.14			
140	200.01		360	519.4			
145	207.27		365	526.66			
150	214.53		370	533.92			
155	221.79		375	541.18			
160	229.04		380	548.44			
165	236.3		385	555.69			
170	243.56		390	562.95			
175	250.82		395	570.21			
180	258.08	Lamp off in cooling	400	577.47			
185	265.34		405	584.73			
190	272.6		410	591.99			
195	279.86		415	599.25			
200	287.12		420	606.51			
			425	613.77			
210	301.63		430	621.02			
215	308.89		435	628.28			
220	316.15		440	635.54			
225	323.41		445	642.8			
230	330.67		450	650.06			
235	337.93		455	657.32			



Şekil 59. Tablo 4'e göre elde edilmiş olan sıcaklık profile eğrisi ve denklik noktaları

5.8. Araştırmalar ve Tartışmalar Sonrası Elde Edilen Tez Sonucu

Çalışma sonucunda elde edilmiş olan numunelerin döner parlatma makinesinde mekanik yapışma testlerinde numunelerin yapışmış olması ama çok güçlü mekanik bağ kuramaması ispatlanmaktadır. Yapılan tartışmalara göre:

- I. Tantalum elementinin %6.5 Bakır yapısına difüze olup örgü yapısı farkı yaratmakla, dislokasyonlarda kilitlenme etkisi yaratımı ve Cu/Ta arası güçlü bir bağ oluşturmaktadır.
- II. Cu-Cu Yapışma yüzeyinde safsızlık ve oksitlenme oranının neredeyse sıfır olması örgü yapısının dislokasyon oranını düşürüp karşı örgüdeki atomların difüze olması olasılığını azaltır ve aynı şekilde yüzeyin harici atom içermemesi, yüzey enerjisi seviyesini düşürüp ve dislokasyonların kilitlenmesi oranını azaltmaktadır.
- III. Birinci Fick kanununa istinaden atomların intikal etmesi örgüdeki atom yoğunluğu farkından kaynaklı olarak bu konu bir aktivasyon enerjisi olarak görev alır ama Bakır – Bakır yapışma arayüzeyinde hiç türlü atom yoğunluk farkı görünmemesi difüzyon olanağını yaklaşık sıfıra indiriyor.
- IV. Yüksek vakum ortamında optik ışınlama gücü ile uygulanmış olan sıcaklık seviyesi ölçülen sıcaklığın altında olması difüzyon için gereken termal aktivasyon miktarını azaltmaktadır ve Bakır örgüsünün içinde gerçekleşen yerel atomlar geçişinin yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirmesi buna ek olarak *self-diffusion* olanağını azaltır.

V. Gerçekleşen Cu-Cu arayüzeyi yapışması Termo-Mekanik baskısı eserinde Matano yüzeyi oluşturmaya eğilim gösterir ve atom yoğunluğu farkı olmaması eserinde bu arayüzey çok derin olmaz ve oluşan bağın yapışma gücü düşük olur.

Sonuç olarak önceki çalışmalara göre kuantum kademeli lazerler (QCL) yapılarında oluşan oksit yapıları gibi safsızlık lar ve ya istenmeyen yan fazlar bu lazerlerin çalışma sıcaklığını yüksek olması ve onun optimize edilmesi sürecinin maliyetli olmasını ifade etmektedir ve yapılan her çalışmada bunun daha optimize olunması hedeflenmiştir ama sıfıra kadar inmesi mümkün olmamıştır ve lazerin gösterdiği performansın düşük olmasının nedeni olarak rapor edilmiştir.

Bu Doktora tez çalışması sonucunda ortaya çıkan sonuçlara istinaden Cu-Cu arayüzey safsızlığı ve kontaminasyon oranını düşmesi bir yandan atom geçişleri ve *foton* yayılımını kolaylaştırırsa da ortaya çıkan bağın güçsüz olması lazer performansında negatif etki yaratmaktadır.

- Adam, A. J. L., Kašalynas, I., Hovenier, J. N., Klaassen, T. O., Gao, J. R., Orlova, E. E., Reno, J. L. (2006). Beam patterns of terahertz quantum cascade lasers with subwavelength cavity dimensions. *Applied Physics Letters*, 88(15), 0–3. <https://doi.org/10.1063/1.2194889>
- Ajili, L., Scalari, G., Hoyler, N., Giovannini, M., & Faist, J. (2005). InGaAs-AlInAs/InP terahertz quantum cascade laser. *Applied Physics Letters*, 87(14), 1–3. <https://doi.org/10.1063/1.2081122>
- Alami, J., Eklund, P., Andersson, J. M., Lattemann, M., & Wallin, E. (2007). Phase tailoring of Ta thin films by highly ionized pulsed magnetron sputtering, 515, 3434–3438. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.10.013>
- Bandyopadhyay, N., Bai, Y., Tsao, S., Nida, S., Slivken, S., & Razeghi, M. (2012). Room temperature continuous wave operation of $\lambda \sim 3\text{--}3.2\mu\text{m}$ quantum cascade lasers. *Applied Physics Letters*, 101(24), 3–6. <https://doi.org/10.1063/1.4769038>
- Bandyopadhyay, N., Slivken, S., Bai, Y., & Razeghi, M. (2012). High power, continuous wave, room temperature operation of $\lambda \sim 3.4\mu\text{m}$ and $\lambda \sim 3.55\mu\text{m}$ InP-based quantum cascade lasers. *Applied Physics Letters*, 100(21), 1–5. <https://doi.org/10.1063/1.4719110>
- Chopra, K. N., & Maini, A. K. (2010). Thin Films and Their Applications in Military and Civil Sectors. *DRDO Monographs/Special Publications Series*.
- Colombelli, R., Capasso, F., Gmachl, C., Hutchinson, A. L., Sivco, D. L., Tredicucci, A., Cho, A. Y. (2001). Far-infrared surface-plasmon quantum-cascade lasers at $21.5\mu\text{m}$ and $24\mu\text{m}$ wavelengths. *Applied Physics Letters*, 78(18), 2620–2622. <https://doi.org/10.1063/1.1367304>
- Dean, P., Lim, Y. L., Valavanis, A., Kliese, R., Nikolić, M., Khanna, S. P., Davies, a G. (2011). Terahertz imaging through self-mixing in a quantum cascade laser. *Optics Letters*, 36(13), 2587–2589. <https://doi.org/10.1364/OL.36.002587>
- Demirhan, Y., Alaboz, H., Nebioğlu, M. A., Mulla, B., Akkaya, M., Altan, H., Ozyuzer, L. (2017). Fourcross shaped metamaterial filters fabricated from high temperature superconducting YBCO and Au thin films for terahertz waves. *Superconductor Science and Technology*, 30(7). <https://doi.org/10.1088/1361-6668/aa6f8e>
- Deutsch, C., Krall, M., Brandstetter, M., Detz, H., Andrews, A. M., Klang, P., ... Unterrainer, K. (2012). High performance InGaAs/GaAsSb terahertz quantum cascade lasers operating up to 142 K. *Applied Physics Letters*, 101(21), 3–7. <https://doi.org/10.1063/1.4766915>
- Faist, J., Capasso, F., Sirtori, C., Sivco, D. L., Hutchinson, A. L., Hybertsen, M. S., ... Hill, M. (1996). PRL-1996 Quantum cascade laser without intersubband population inversion.pdf, 411–414.
- Frigeri, P., Seravalli, L., Trevisi, G., & Franchi, S. (2011). *Molecular Beam Epitaxy: An Overview. Comprehensive Semiconductor Science and Technology* (Vol. 1–6). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-44-453153-7.00099-7>
- Hofstetter, D., Beck, M., Aellen, T., Faist, J., Oesterle, U., Ilegems, M., ... Melchior, H. (2001). Continuous wave operation of a $9.3\mu\text{m}$ quantum cascade laser on a Peltier cooler. *Applied Physics Letters*, 78(14), 1964–1966. <https://doi.org/10.1063/1.1360225>
- Hu, Q., Williams, B. S., Kumar, S., Callebaut, H., Kohen, S., & Reno, J. L. (2005). Resonant-phonon-assisted THz quantum-cascade lasers with metal-metal waveguides. *Semiconductor Science and Technology*, 20(7). <https://doi.org/10.1088/0268-1242/20/7/013>
- Hwang, N. M. (2016). *Non-Classical Crystallization of Thin Films and Nanostructures in CVD and PVD Processes* (Vol. 60). <https://doi.org/10.1007/978-94-017-7616-5>
- Kumar, S. (2007). Development of Terahertz Quantum-Cascade Lasers by. *Electrical*

- Engineering*, 340. Retrieved from <http://18.7.29.232/handle/1721.1/40501%5Cnhttp://18.7.29.232/bitstream/handle/1721.1/40501/191824497.pdf?sequence=1>
- Kumar, S., & Lee, A. W. M. (2008). Resonant-phonon terahertz quantum-cascade lasers and video-rate terahertz imaging. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 14(2), 333–344. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2007.915510>
- Lyakh, A., Pflügl, C., Diehl, L., Wang, Q. J., Capasso, F., Wang, X. J., ... Patel, C. K. N. (2008). 1.6 W high wall plug efficiency, continuous-wave room temperature quantum cascade laser emitting at 4.6 μm . *Applied Physics Letters*, 92(11). <https://doi.org/10.1063/1.2899630>
- Maestrini, A., Mehdi, I., Lin, R., Vicente Siles, J., Lee, C., Gill, J., ... Ward, J. (2011). A 2.5–2.7 THz room temperature electronic source. *22Nd International Symposium on Space Terahertz Technology*.
- Mahler, L., Tredicucci, A., & Vitiello, M. S. (2012). Quantum cascade laser: A compact, low cost, solid-state source for plasma diagnostics. *Journal of Instrumentation*, 7(2). <https://doi.org/10.1088/1748-0221/7/02/C02018>
- Matsuura, S., Tani, M., & Sakai, K. (1997). Generation of coherent terahertz radiation by photomixing in dipole photoconductive antennas. *Applied Physics Letters*, 70(5), 559–561. <https://doi.org/10.1063/1.118337>
- McIntosh, K. A., Brown, E. R., Nichols, K. B., McMahon, O. B., Dinatale, W. F., & Lyszczarz, T. M. (1995). Terahertz photomixing with diode lasers in low-temperature-grown GaAs. *Applied Physics Letters*, 67(1995), 3844. <https://doi.org/10.1063/1.115292>
- Mihailescu, I. N., Kompitsas, M., & Giannoudakos, A. (2002). Particulates-free Ta thin films obtained by pulsed laser deposition : the role of a second laser in the laser-induced plasma heating, 195, 270–276.
- Ochs, T. (1995). Atomic Layer Epitaxy Growth of Tantalum Oxide Thin Films, 142(5), 1670–1675.
- Ozyuzer, L., Koshelev, A. E., Kurter, C., Gopalsami, N., Li, Q., Tachiki, M., ... Welp, U. (2007). Emission of coherent THz radiation from superconductors. *Science*, 318(5854), 1291–1293. <https://doi.org/10.1126/science.1149802>
- Ozyuzer, L., Meric, Z., Selamet, Y., Kutlu, B., Cireli, A.,. (2017). Antistatic and antibacterial properties of metal coated polypropylene fibers by magnetron sputtering, 1–5.
- Raisanen, A. V. (1992). Frequency Multipliers for Millimeter and Submillimeter Wavelengths. *Proceedings of the IEEE*, 80(11), 1842–1852. <https://doi.org/10.1109/5.175259>
- Riekkinen, T., Molarius, J., Laurila, T., Nurmela, A., Suni, I., & Kivilahti, J. K. (2002). Reactive sputter deposition and properties of Ta x N thin films, 64, 289–297.
- Rouvalis, E., Renaud, C. C., Moodie, D. G., Robertson, M. J., & Seeds, A. J. (2010). Traveling-wave Uni-Traveling Carrier Photodiodes for continuous wave THz generation. *Optics Express*, 18(11), 11105. <https://doi.org/10.1364/OE.18.011105>
- Sabah, C. (2018). Cross-like terahertz metamaterial absorber for sensing. *Pramana*, 91(2), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s12043-018-1591-4>
- Stavrev, M., Fischer, D., Wenzel, C., Drescher, K., & Mattern, N. (1997). Crystallographic and morphological characterization of reactively sputtered Ta , Ta-N and T a - N - O thin films, 307, 79–88.
- Strupiechonski, E., Grassani, D., Fowler, D., Julien, F. H., Khanna, S. P., Li, L., ... Colombelli, R. (2011). Vertical subwavelength mode confinement in terahertz and mid-infrared quantum cascade lasers. *Applied Physics Letters*, 98(10), 4–7. <https://doi.org/10.1063/1.3560980>
- Szerling, A., Kosiel, K., Szymanski, M., Wasilewski, Z., Golaszewska, K., Laszcz, A., Piotrowska, A. (2015). Processing of AlGaAs/GaAs quantum-cascade structures for terahertz laser. *Journal of Nanophotonics*, 9(1), 093079. <https://doi.org/10.1117/1.JNP.9.093079>
- Ta, Molecularbeamepixy (n.d.). Molecular Beam Epitaxy - A Short History - 2015.

- Turkoglu, F., Koseoglu, H., Zeybek, S., Ozdemir, M., Aygun, G., & Ozyuzer, L. (2018). Effect of altlikrotation speed and off-center deposition on the structural , optical , and electrical properties of AZO thin films fabricated by DC magnetron sputtering, 165104, 1–8.
- Vergheese, S., McIntosh, K. A., Calawa, S., Dinatale, W. F., Duerr, E. K., & Molvar, K. A. (1998). Generation and detection of coherent terahertz waves using two photomixers. *Applied Physics Letters*, 73(26), 3824–3826. <https://doi.org/10.1063/1.122906>
- Vossen, J. L. (1980). *Thin Film Processes, Volume 2. Journal of The Electrochemical Society* (Vol. 127). <https://doi.org/10.1149/1.2130540>
- Wade, A., Fedorov, G., Smirnov, D., Kumar, S., Williams, B. S., Hu, Q., & Reno, J. L. (2009). Magnetic-field-assisted terahertz quantum cascade laser operating up to 225K. *Nature Photonics*, 3(1), 41–45. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2008.251>
- Walther, C., Fischer, M., Scalari, G., Terazzi, R., Hoyler, N., & Faist, J. (2007). Quantum cascade lasers operating from 1.2 to 1.6 THz. *Applied Physics Letters*, 91(13), 89–92. <https://doi.org/10.1063/1.2793177>
- Walther, C., Scalari, G., Faist, J., Beere, H., & Ritchie, D. (2006). Low frequency terahertz quantum cascade laser operating from 1.6 to 1.8 THz. *Applied Physics Letters*, 89(23), 2004–2007. <https://doi.org/10.1063/1.2404598>
- Williams Benjamin S. (2007). THz Quantum Cascade Lasers. *Nature Photonics*, 1, 517–525. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2007.166>
- Williams, B. S., Kumar, S., Callebaut, H., Hu, Q., & Reno, J. L. (2003). Terahertz quantum-cascade laser at $\lambda \approx 100 \mu\text{m}$ using metal waveguide for mode confinement. *Applied Physics Letters*, 83(11), 2124–2126. <https://doi.org/10.1063/1.1611642>

EKLER

EK 1. Tez sürecinde tüm çalışma parametreleri

	Code	Substrate	Ta (min)	Ta (A)	Ta (V)	Ta (w)	Base press (torr)	Working press (torr)	Cu (g)	Cu (w)	Max. tmp. (°C) Enda	Total time (min)	cooling time (min)
1	Cu-Cu 01	SGL	*	*	*	*	2.9E(-6)	*	10	189	*	180	*
2	Cu-Cu 02	SGL	*	*	*	*	3.8E(-6)	*	3	210	*	140	*
3	Cu-Cu 03	SGL	*	*	*	*	7.7E(-6)	*	0.5	168	*	80	*
4	Cu-Ta 00	SGL	Ext	*	*	Ext	7.6E(-6)	Ext	0.25	257	*	120	*
5	Cu-Cu 04	SGL	*	*	*	*	5.0E(-6)	*	2	171	313	120	*
6	Cu-Cu 05	SGL	*	*	*	*	5.9E(-6)	*	2	168	235	180	*
7	Cu-Ta 01	SGL	Ext	*	*	Ext	6.0E(-6)	*	1.7	179	*	120	*
8	Cu-Ta 02	SGL	Ext	*	*	Ext	2.7E(-6)	Ext	1.7	192	216	155	*
9	Cu-Ta 03	SGL	Ext	*	*	Ext	5.9E(-6)	Ext	0.75	177	225	95	*
10	Cu-Ta 04	SGL	Ext	*	*	Ext	2.7E(-6)	Ext	0.5	185	200	330	*
11	Cu-Ta 05	SGL	Ext	*	*	Ext	5.5E(-6)	Ext	0.75	183	205	200	*
12	Cu-Ta 06	SGL	Ext	*	*	Ext	3.6E(-6)	Ext	0.75	196	*	90	*
13	Cu-Ta 07	SGL	Ext	*	*	Ext	5.0E(-6)	Ext	0.75	212	*	190	*
14	Cu-Ta 08	SGL	Ext	*	*	Ext	2.9E(-6)	Ext	0.75	195	225	120	*
15	Cu-GaAs 01	GaAs	*	*	*	*	3.3E(-6)	*	0.75	207	*	175	*
16	Cu-GaAs 02	GaAs	*	*	*	*	3.5E(-6)	*	0.75	205	*	180	*
17	Cu-GaAs 03	GaAs	*	*	*	*	4.2E(-6)	*	0.75	206	242	85	*
18	Cu- Ta/GaAs 04	GaAs	Ext	*	*	Ext	4.2E(-6)	Ext	0.75	180	223	240	*

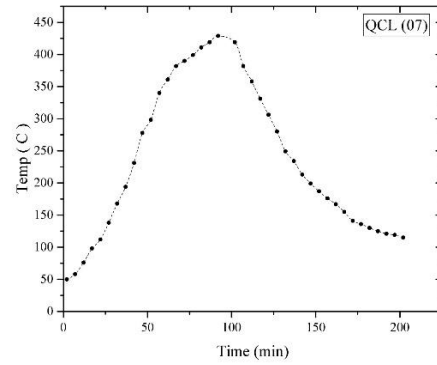
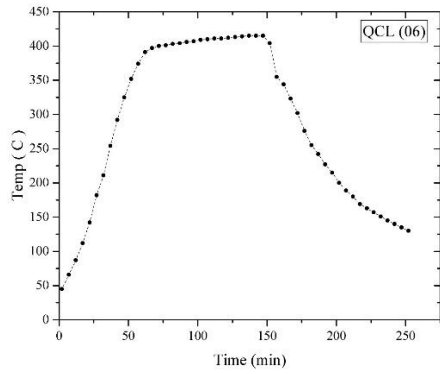
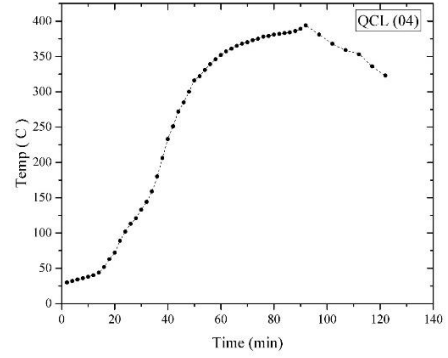
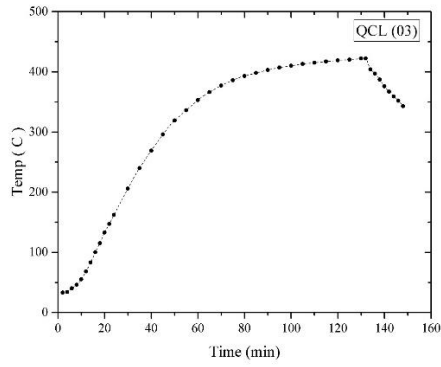
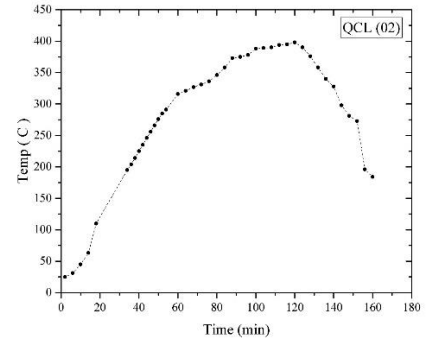
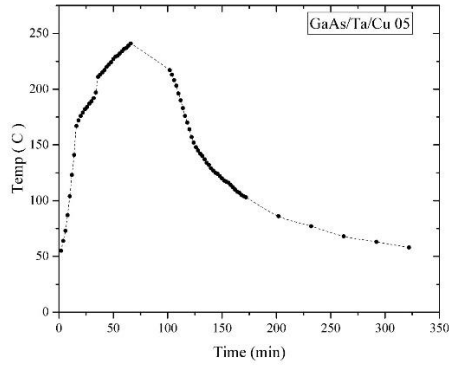
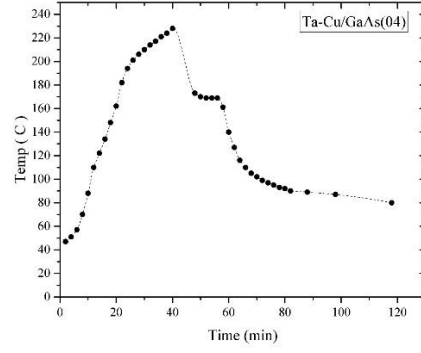
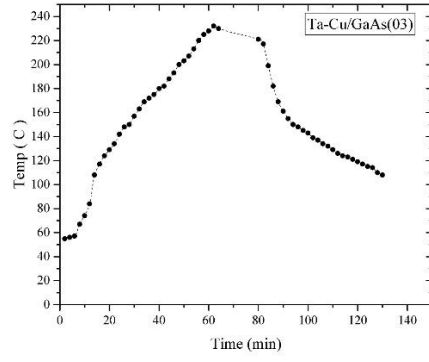
19	Cu-Ta/GaAs 05	GaAs	Ext	*	*	Ext	5.3E(-6)	Ext	0.75	218	211	45	*
20	Cu-Ta/GaAs 06	GaAs	Ext	*	*	Ext	5.6E(-6)	Ext	0.75	194	*	145	*
21	Cu-Ti/GaAs	GaAs	Ext	*	*	Ext	1.6E(-6)	Ext	0.55	172	253	180	*
22	Ta Spu Test 01	SGL	2	0.083	243	30	6.5E(-6)	8.5E(-4)	0.55	235	*	*	*
23	Ta Spu Test 02	SGL	3	0.089	318	30	6.6E(-6)	1.3E(-3)	*	*	*	*	*
24	Ta Spu Test 03	SGL	1	0.089	320	30	8.2E(-6)	1.4E(-3)	*	*	*	*	*
25	Ta Spu Test 04	SGL	1	0.068	426	30	6.6E(-6)	1.1E(-3)	*	*	*	*	*
26	Ta Spu Test 05	SGL	1	0.092	313	30	7.0E(-6)	1.3E(-3)	*	*	*	*	*
27	Ta Spu Test 06	SGL	2	0.091	314	30	6.8E(-6)	1.3E(-3)	*	*	*	*	*
28	Ta Spu Test 07	SGL	3	0.095	308	30	6.9E(-6)	1.2E(-3)	*	*	*	*	*
29	Ta-Cu 01	GaAs	2	0.095	308	30	8.4E(-6)	1.3E(-3)	0.5	151	*	90	*
30	Ta-Cu 02	GaAs	2	0.06	432	30	9.5E(-6)	1.3E(-3)	0.35	238	89	120	*
31	Ta-Cu 03	GaAs	2	0.08	317	30	8.6E(-6)	1.3E(-3)	0.35	206	232	5 h	52
32	Ta-Cu 04	GaAs	2	0.09	314	30	9.5E(-6)	1.5E(-3)	0.35	211	231	120	45
33	Ta-Cu 05	GaAs	2	0.08	331	30	1.1E(-5)	1.2E(-3)	0.35	165	241	200	120
34	QCL 01	GaAs	2	0.08	317	30	8.6E(-6)	9.5E(-4)	0.35	207	*	180	*
35	QCL 02	GaAs	2	0.08	312	30	1.1E(-5)	1.3E(-3)	0.35	250A	390	4h	120
36	QCL 03	GaAs	2	0.08	326	30	5.5E(-6)	1.5E(-3)	0.35	250A	420	150	*
37	QCL 04	GaAs	2	0.09	306	30	6.5E(-6)	1.4E(-3)	0.35	205	394	120	*
38	QCL 05	GaAs	2	0.08	317	30	7.5E(-6)	1.5E(-3)	0.35	167	380	120	*
39	QCL 06	GaAs	2	0.08	309	30	2.7E(-6)	1.5E(-3)	0.35	238A	381	6h	180
40	QCL 07	GaAs	2	0.08	315	30	2.8E(-6)	5.7E(-4)	0.35	240A	429	4h	110

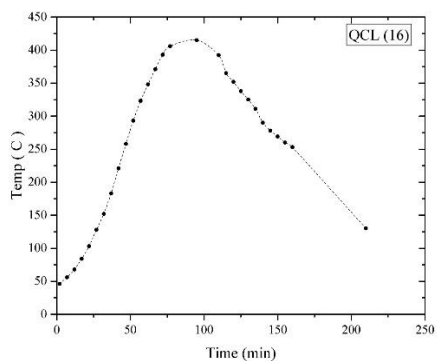
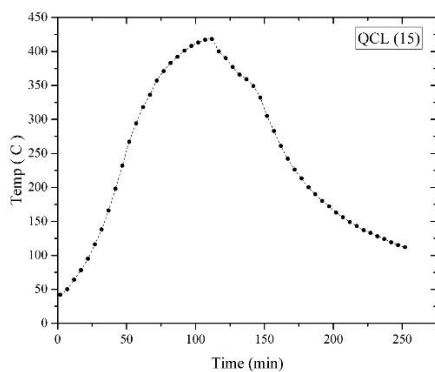
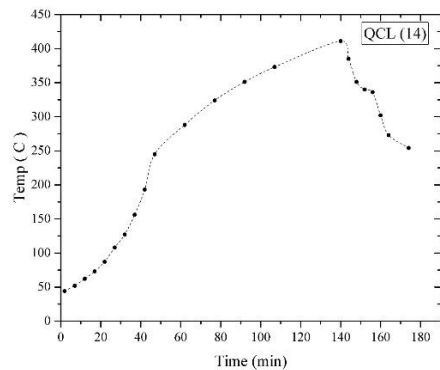
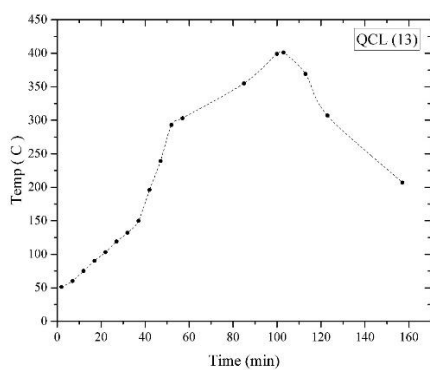
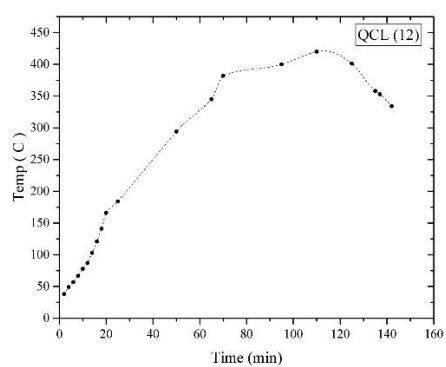
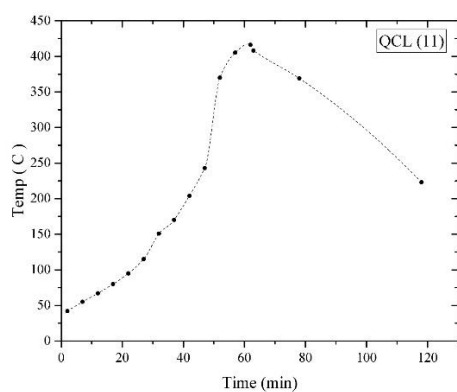
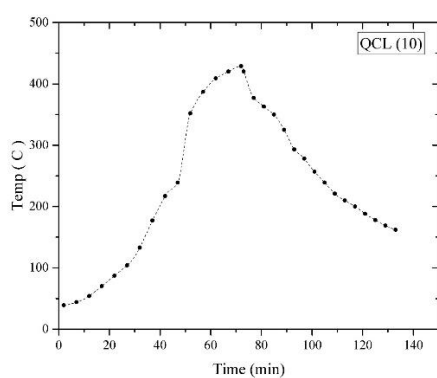
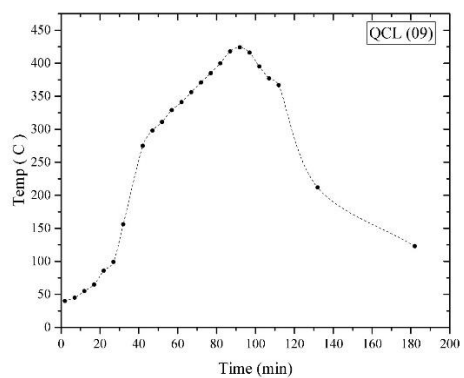
41	QCL 08	GaAs	2	0.08	306	30	4.2E(-6)	6.9E(-4)	0.35	240A	*	120	*
42	QCL 09	GaAs	2	0.08	306	30	6.5E(-6)	7.6E(-4)	0.35	250A	424	5h	80
43	QCL 10	GaAs	2	0.08	311	30	3.8E(-6)	2.2E(-3)	0.35	245A	429	4h	70
44	QCL 11	GaAs	2	0.08	303	30	4.5E(-6)	7.5E(-4)	0.35	245A	416	3.5h	70
45	QCL 12	GaAs	2	0.08	311	30	3.9E(-6)	6.9E(-4)	0.35	250A	420	3.5h	*
46	QCL 13	GaAs	2	0.08	313	30	5.7E(-6)	7.4E(-4)	0.35	250A	401	4h	*
47	QCL 14	GaAs	2	0.08	309	30	7.6E(-6)	7.1E(-4)	0.35	249A	411	4h	80
48	QCL 15	GaAs	2	0.08	309	30	2.6E(-6)	4.4E(-4)	0.35	224A	417	6h	180
49	QCL 16	GaAs	2	0.08	317	30	7.5E(-6)	7.1E(-4)	0.35	248A	415	6h	200
50	QCL 17	GaAs	2	0.08	308	30	6.4E(-6)	7.1E(-4)	0.35	245A	409	4h	70
51	QCL 18	GaAs	2	0.08	308	30	2.4E(-6)	8.4E(-4)	0.35	253A	406	6h	120
52	QCL 19	GaAs	2	0.08	308	30	8.4E(-6)	7.6E(-4)	0.35	251A	414	6h	100
53	QCL 20	GaAs	2	0.08	303	30	3.8E(-6)	7.6E(-4)	0.35	247A	413	4h	120
54	QCL 21	GaAs	2	0.08	307	30	6.4E(-6)	7.6E(-4)	0.35	250A	394	5h	120
55	QCL 22	GaAs	2	0.08	312	30	6.2E(-6)	7.8E(-4)	0.35	247A	*	*	*
56	QCL 23	GaAs	2	0.08	313	30	6.0E(-6)	4.0E(-4)	0.35	253A	424	4h	110
57	QCL 24	GaAs	2	0.08	318	30	8.3E(-6)	8.4E(-4)	0.35	250A	417	5h	100
58	QCL 25	GaAs	2	0.08	322	30	1.8E(-6)	8.8E(-4)	0.35	248A	443	6h	185
59	QCL 26	GaAs	2	0.08	313	30	2.7E(-6)	6.7E(-4)	0.35	250A	435	4h	90
60	QCL 27	GaAs	2	0.08	313	30	2.1E(-6)	6.4E(-4)	0.35	240A	425	5h	120
61	QCL 28	GaAs	2	0.08	312	30	6.3E(-6)	7.5E(-4)	0.45	248A	427	5h	70
62	QCL 29	GaAs	2	0.08	313	30	4.5E(-6)	7.5E(-4)	0.35	249A	436	4h	90
63	QCL 30	GaAs	2	0.08	316	30	1.6E(-6)	5.8E(-4)	0.2	240A	436	4.5h	120

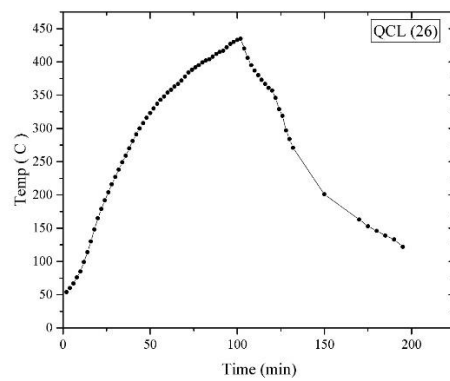
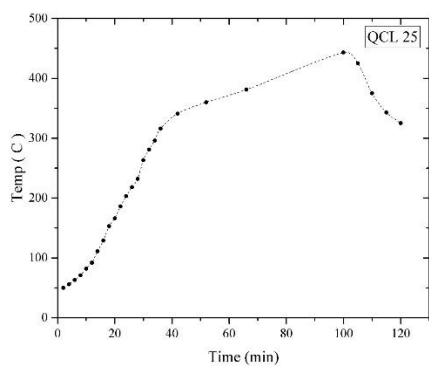
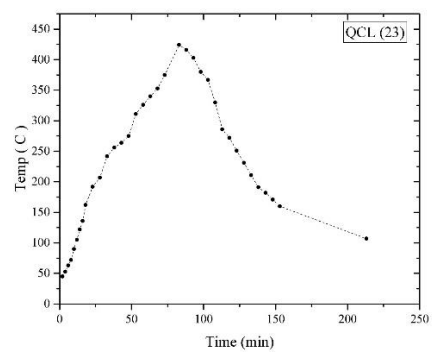
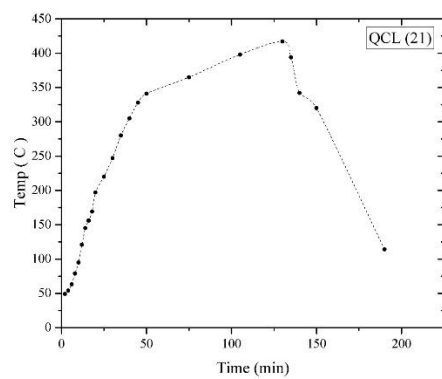
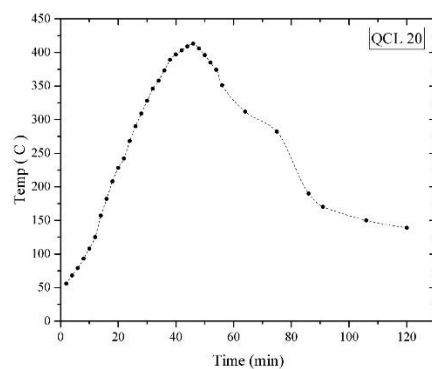
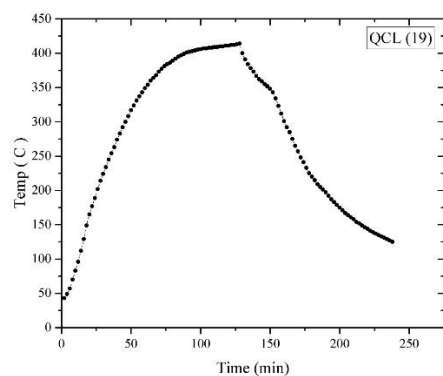
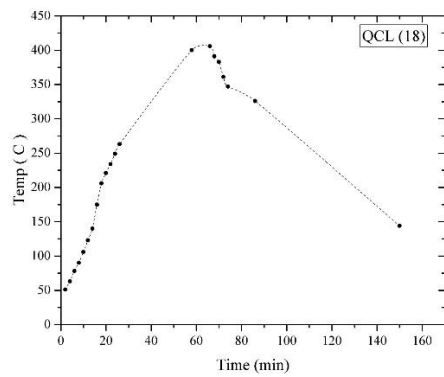
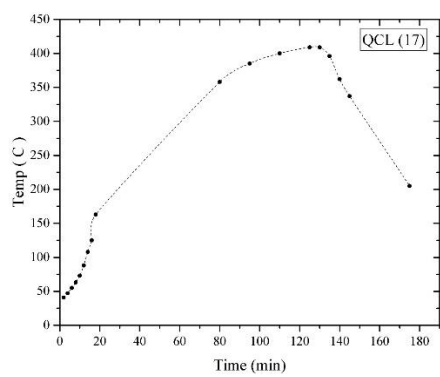
64	QCL 31	GaAs	2	0.08	313	30	5.3E(-6)	7.2E(-4)	0.2	250A	442	4h	90
65	QCL 32	GaAs	2	0.08	313	30	3.2E(-6)	6.3E(-4)	0.2	250A	415	5h	90
66	QCL 33	GaAs	2	0.08	324	30	4.9E(-6)	6.4E(-4)	0.2	236A	435	4h	70
67	QCL 34	GaAs	2	0.08	311	30	2.3E(-6)	5.0E(-4)	0.2	244A	431	5h	120
68	QCL 35	GaAs	2	0.08	317	30	2.6E(-6)	5.5E(-4)	0.22	245A	433	4.5h	120
69	QCL 36	GaAs	2	0.08	315	30	4.5E(-6)	2.4E(-4)	0.22	245A	426	5h	90
70	QCL 37	GaAs	2	0.08	318	30	1.3E(-6)	3.9E(-4)	0.22	250A	427	6h	180
71	QCL 38	GaAs	2	0.08	317	30	5.6E(-6)	5.8E(-4)	0.22	251A	409	6h	120
72	QCL 39	GaAs	2	0.08	336	30	4.0E(-6)	5.1E(-4)	0.22	245A	268	*	*
73	QCL 40	GaAs	2	0.08	316	30	2.0E(-6)	4.9E(-4)	0.22	249A	423	5h	90
74	QCL 41	GaAs	2	0.08	322	30	2.9E(-6)	6.1E(-4)	0.22	249A	422	4h	90
75	QCL 42	GaAs	2	0.08	322	30	5.4E(-6)	5.2E(-4)	0.22	267A	406	4h	70
76	QCL 43	GaAs	2	0.08	328	30	1.8E(-6)	4.2E(-4)	0.22	250A	399	5h	115
77	QCL 44	GaAs	2	0.08	320	30	7.9E(-7)	3.1E(-4)	0.22	250A	384	4h	0
78	QCL 45	GaAs	2	0.08	330	30	2.9E(-6)	3.5E(-4)	0.22	245A	406	5h	0
79	QCL 46	GaAs	2	0.08	327	30	2.1E(-6)	3.5E(-4)	0.22	251A	410	4h	0
80	QCL 47	GaAs	2	0.08	338	30	2.9E(-6)	2.4E(-4)	0.22	250A	400	4h	0
81	QCL 48	GaAs	2	0.08	318	30	6.5E(-7)	1.3E(-4)	0.22	250A	392	5h	0

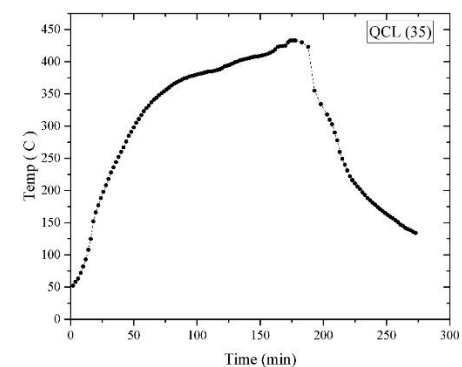
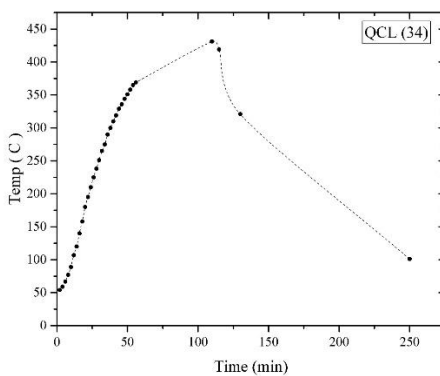
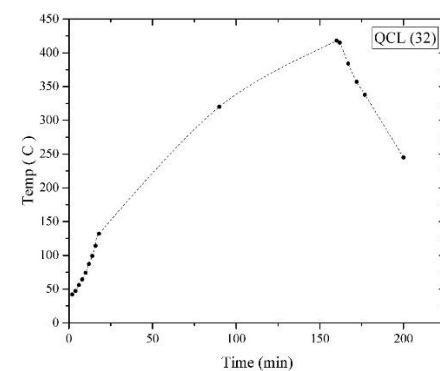
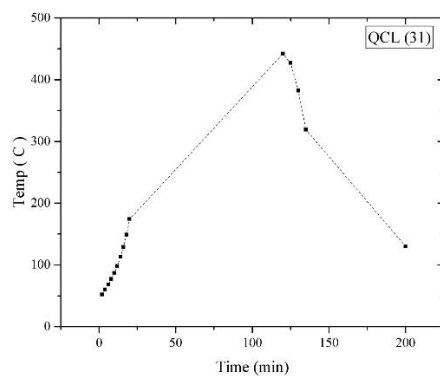
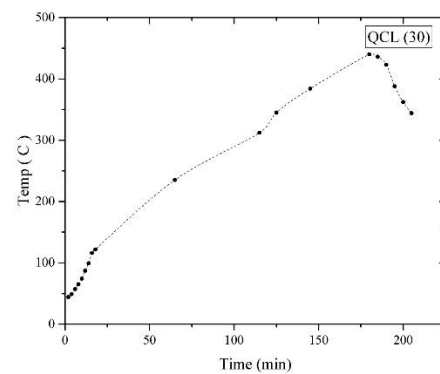
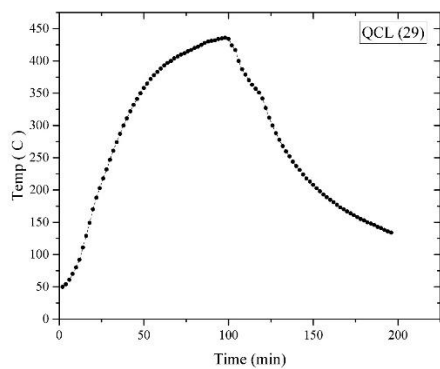
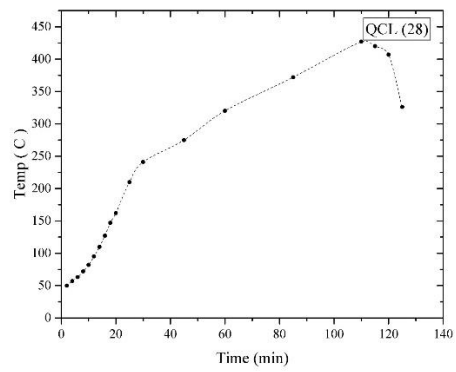
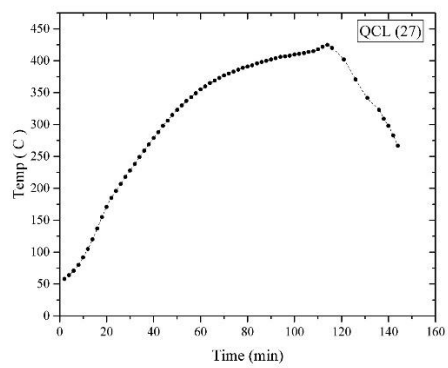
82	QCL 49	GaAs	2	0.08	329	30	1.0E(-6)	7.8E(-5)	0.22	243A	394	4h	0
83	QCL 50	GaAs	2	0.08	316	30	1.8E(-6)	6.5E(-3)	0.22	235A	410	4h	0

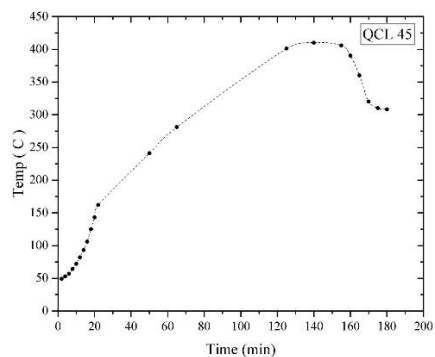
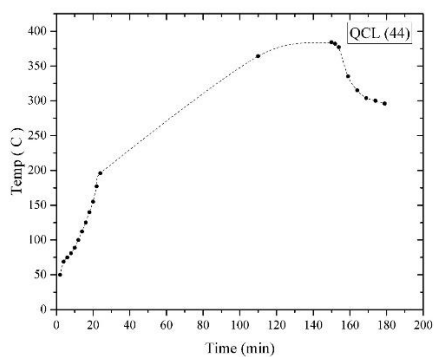
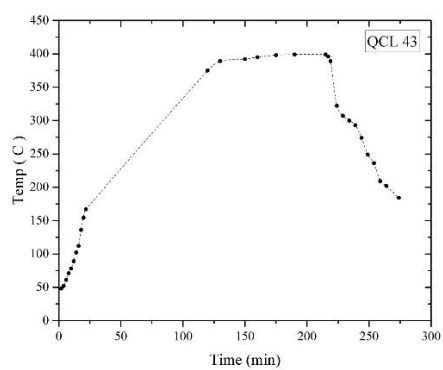
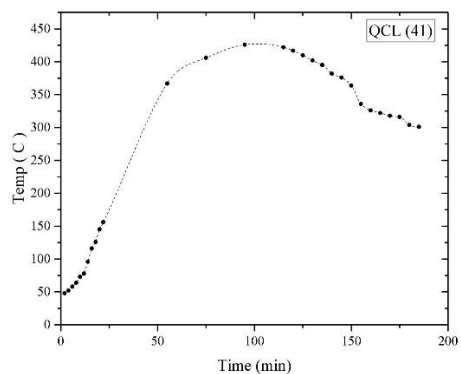
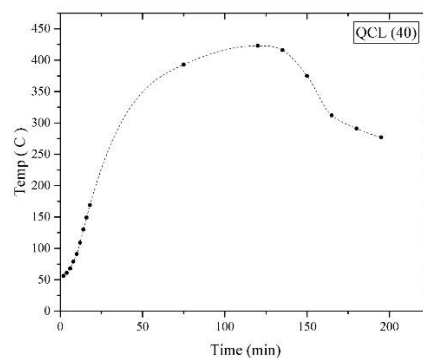
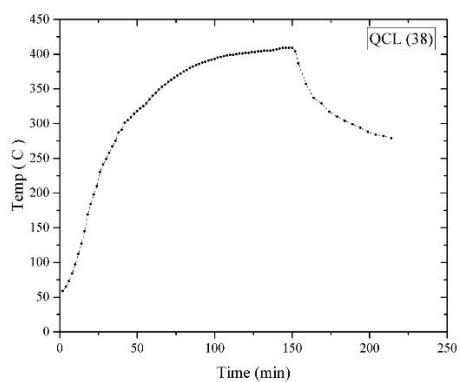
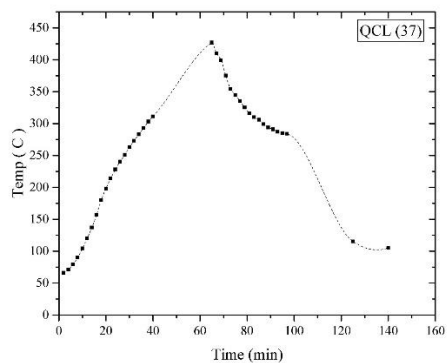
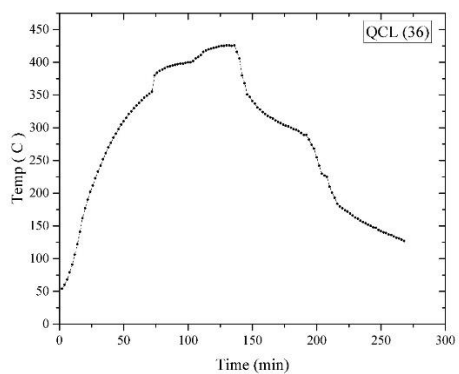
EK 2. Kaplama operasyonları sırasında gerçekleşen ısıtma ve soğutma düzeneği kayıtları

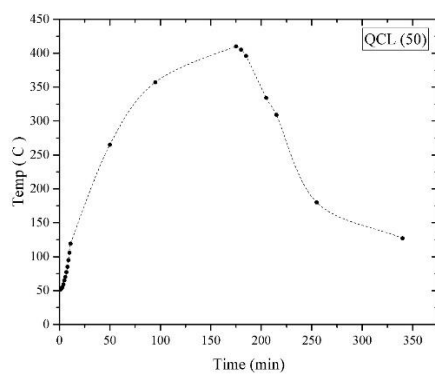
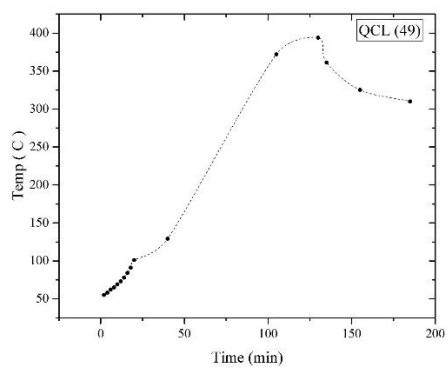
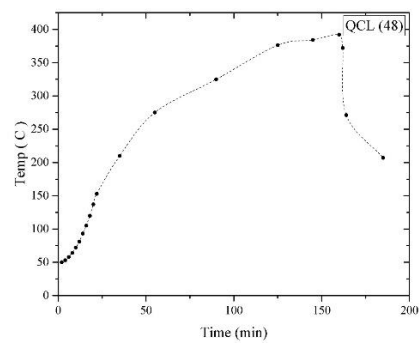
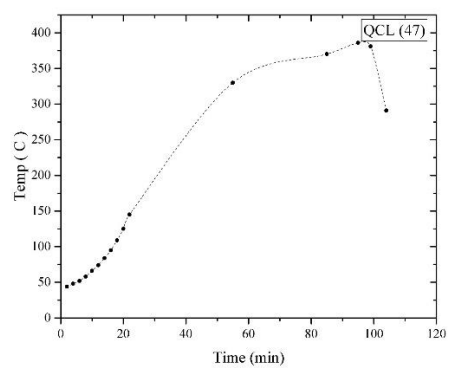












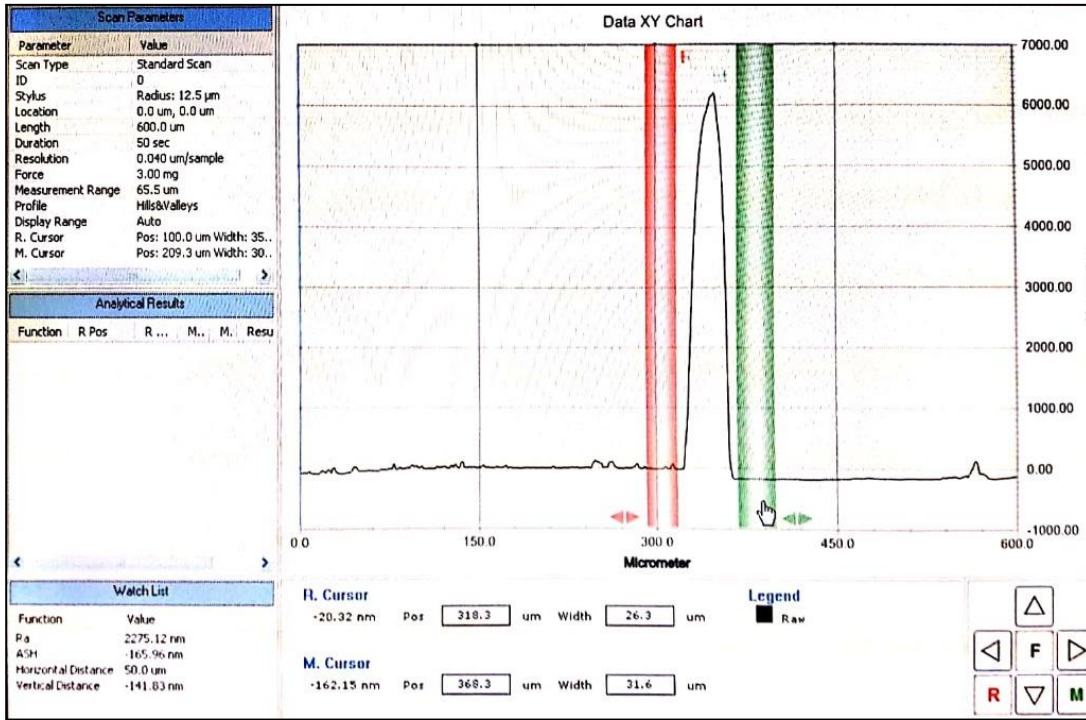
EK 3. Operasyonlar sırasında yapılan sistem modifikasyonları

Date	System design and preparation			Cu target		Ta Target	
	Chamber	Boat	Gun	Quantity (g)	Thickness (nm)	Time	Thickness (nm)
15/09/2017	System design and preparation	2 Mo	-	10	2893	-	-
21/09/2017	EVP Test	-	-	3	896	-	-
24/09/2017	Modification of target/holder distance	1 Mo	-	0.5	864	-	-
27/09/2017	Applying GaAs substrate	-	-	0.25	-	-	-
31/10/2017	Tungstan wire heater testing in air	-	-	-	-	-	-
4/12/2017	W filament testing in vacuum	-	-	-	-	-	-
21/12/2017	Applying Thermal lamp	-	-	-	-	-	-
29/12/2017	Changing lamp (250 w)	-	-	-	-	-	-
4/1/2018	Thermocouple attachment	-	-	-	-	-	-
9/1/2018	Thermocouple collibration	-	-	-	-	-	-
12/3/2018	Lamp modification and changing	-	-	-	-	-	-
20/03/2018	Ta deposition	-	External	1.7	-	-	-
4/4/2018	Bonding test	-	External	0.75	-	-	-
11/6/2018	GaAs substrate deposition	-	External	0.75	-	-	-
28/09/2018	Titanium target	W+Mo	-	0.75	-	-	-
16/10/2018	Sputter gun and shutter added	Mo	Internal	0.5	-	2 min	30/28

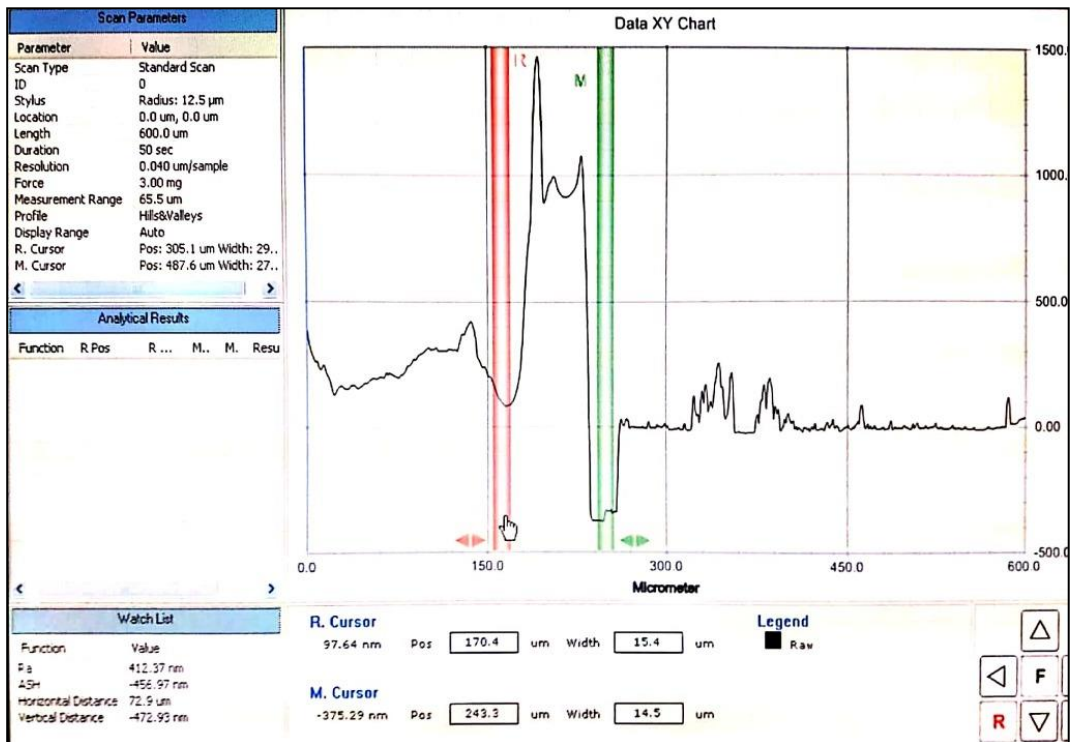
17/10/2018	Cooling system modification	-	-	-	-	-	-
18/10/2018	Sputtering test 1	-	Internal	0.5	-	3 min	36/27
22/10/2018	Sputtering test 2	-	Internal	0.5	-	1 min	28/18
26/10/2018	Sputtering+Evp test	-	Internal	0.5	989/367	2 min	-
1/11/2018	Lamp modification (400 w)	-	-	0.5	-	-	-
2/11/2018	GaAs substrates 650+450	-	Internal	0.35	507/179	2 min	-
29/11/2018	Thermocouple and EVP feedthroughs modification	-	-	-	-	-	-
5/12/2018	Lamp shutter added	-	-	-	-	-	-
7/12/2018	Thermocouple calibration	-	-	-	-	-	-
25/12/2018	Sputtering P.S. changed (MDX-1.5K)	-	-		-	-	-
14/01/2019	Max. Heating rang(429 C)	-	Internal	0.35	-	2 min	-
25/01/2019	Lamp changing 400W	-	-	-	-	-	-
12/2/2019	DC cable repaired	-	-	-	-	-	-
14/02/2019	Cable connector changed	-	0	-	-	-	-
11/3/2019	350+350 um GaAs	-	Internal	0.35	-	2 min	-
14/03/2019	400+400um GaAs	-	Internal	0.35	-	2 min	-
15/03/2019	650+450um GaAs	-	Internal	0.35	830/280	2 min	-
3/4/2019	650+150um GaAs	-	Internal	0.2	450/180	2 min	-

17/05/2019	650+450um GaAs	-	Internal	0.22	520/313	2 min	-
2/7/2019	New sample holder+ filament (3 wires)	-	-	-	-	-	-
4/7/2019	MAX 82 C (2 wires)	-	-	-	-	-	-
16/07/2019	MAX 212 C (1 wire)	-	-	-	-	-	-
17/07/2019	In vacuum MAX 52 C	-	-	-	-	-	-
19/07/2019	Thermocouple calibration	-	-	-	-	-	-

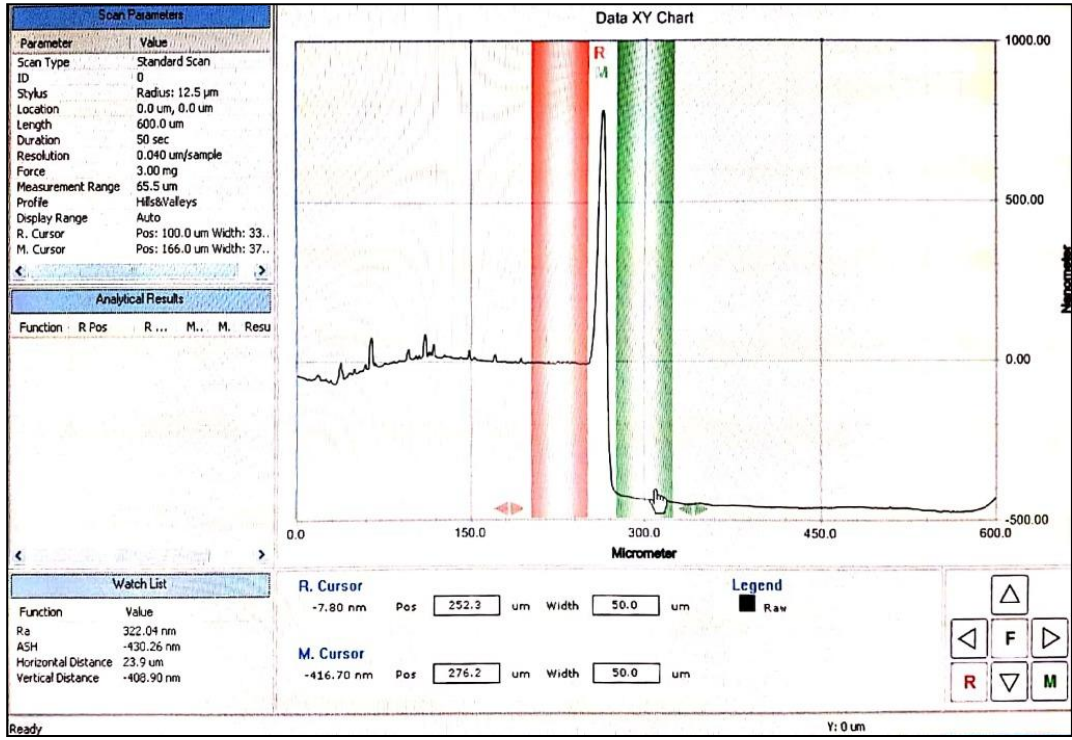
EK 4. Kalınlık ölçümlerinde Veeco Dektak 150 profilometre cihazından elde edilen eğriler ve Ra değerleri



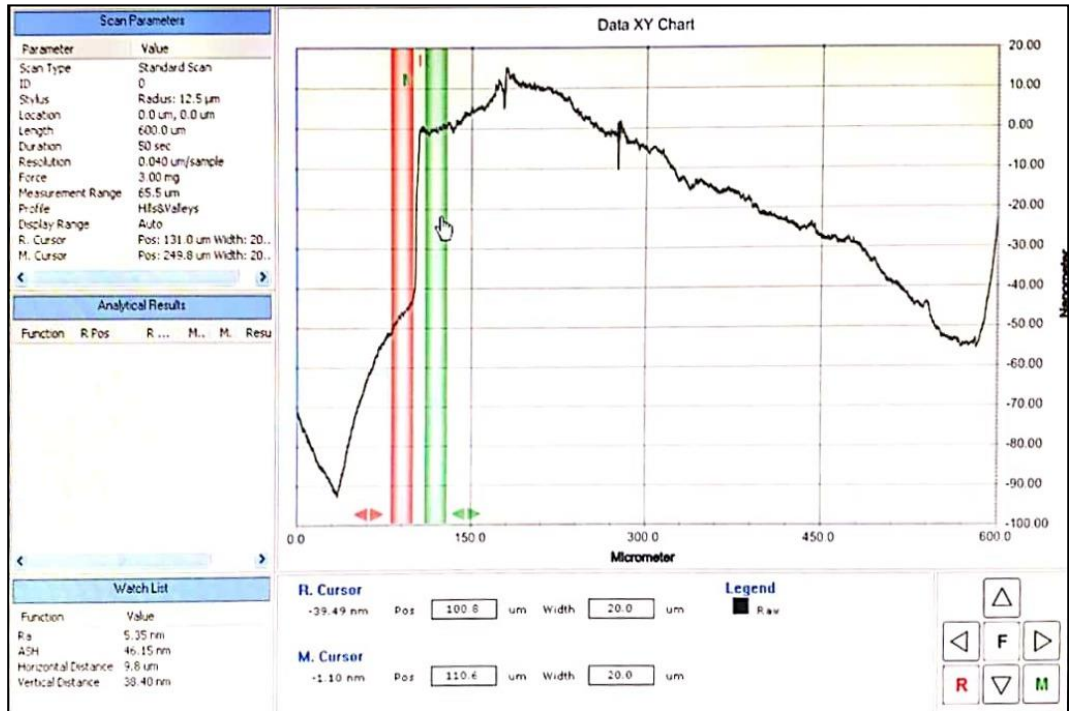
5 g bakır buharlaştırma malzemesinden alınan Ta/Cu kaplama kalınlığı (Ra=2275 nm)



0.25 g bakır buharlaştırmadan alınan kalınlık değeri



0.35 g bakır kaplamasından alınan kalınlık değerleri



1 dakika altında süreden alınan Tantalum kalınlık değeri

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Sina ROUHI
Doğum tarihi:	28.06.1984
Doğum Yeri:	İran
Uyruğu:	Türkiye - İran
Adres:	Ufuktepe mahallesi, 1257.sokak 9/1. Keçiören-Ankara
Tel:	0090 (535) 055 4073
E-mail:	sinaro2009@gmail.com
Eğitim	
Lise:	İran- Çamran
Lisans:	İran Azad üniversitesi
Yüksek lisans:	Atatürk üniversitesi
Doktora:	Atatürk üniversitesi/ İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi (C1)
Almanca:	Orta (B1)
Tezden Üretilmiş Yayınlar	
Rouhi, S., Martinez-Madina, Y.E., Ozdemir, M., Ertugrul, M., Aygun, G., & Ozyuzer, L. (2020). A comprehensive study of molybdenum boats behavior during service life for continuous thermal evaporation technique used in thin film technology , 109167, 176.	