



**GaTe ve GaTe:Cd YARIİLETKENLERİN
BÜYÜTÜLMESİ, YAPISAL ve OPTİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ ve
SCHOTTKY DİYOD UYGULAMASI**

Mehmet ŞATA

Doktora Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Bilim Dalı

Yrd. Doç. Dr. Bekir GÜRBULAK

2017

Her hakkı saklıdır

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**GaTe ve GaTe: Cd YARIİLETKENLERİN BÜYÜTÜLMESİ,
YAPISAL ve OPTİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ ve
SCHOTTKY DİYOD UYGULAMASI**

Mehmet ŞATA

**FİZİK ANABİLİM DALI
Katıhal Bilim Dalı**

**ERZURUM
2017**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ ONAY FORMU



GaTe ve GaTe:Cd YARIİLETKENLERİN BÜYÜTÜLMESİ, YAPISAL VE OPTİKSEL ÖZELİKLERİNİN İNCELENMESİ VE SCHOTTKY DİYOD UYGULAMASI

Yrd. Doç. Dr. Bekir GÜRBULAK danışmanlığında, Mehmet ŞATA tarafından hazırlanan bu çalışma, 28/12/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fizigi Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak oybirliği (5) ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Songül DUMAN

İmza :

Üye : Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

İmza :

Üye : Doç. Dr. Güven TURGUT

İmza :

Üye : Doç. Dr. Özlem BARIŞ

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Bekir GÜRBULAK

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun 28.12/2017 tarih ve 51.1...40 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi 2016/146 numaralı BAP projesi kapsamında desteklenmiştir.

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

ÖZET

Doktora Tezi

GaTe ve GaTe: Cd YARIİLETKENLERİN BÜYÜTÜLMESİ, YAPISAL ve OPTİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ ve SCHOTTKY DİYOD UYGULAMASI

Mehmet ŞATA

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Bekir GÜRBULAK

GaTe ve Cd katkılı GaTe ikili yarıiletkenler, modifiye edilmiş Bridgman - Stockbarger kristal büyütme yöntemi ile elde edilmiştir. Büyütülen yarıiletkenlerin yapısal, morfolojik ve optiksel karakterizasyonları sırasıyla XRD, SEM, EDX, AFM ve soğurma ölçümleri ile yapılmıştır. XRD analizleri sonucunda, GaTe ve GaTe: Cd ikili yarıiletkenlerin monoklinik yapıya sahip oldukları ve Cd katkılanması sonucu pik şiddetlerinin arttığı ayrıca bazılarının azaldığı ve bazı piklerin yeni ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Tavlama sıcaklığının yapı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla büyütülen kristaller çeşitli sıcaklık değerlerinde (100, 200, 300, 350, 400, 500, 600 ve 700°C) belirlenen süreler (10, 20 ve 30 dak.) boyunca azot gazı ortamında tavllanmış ve tavlama sonrası hemen sonra XRD analizleri yapılmıştır. GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenleri için EDX tekniği ile elde edilen atomik ağırlığı değerleri ile büyütme esnasında hesaplanıp uygulanan değerler birbirleriyle uyum içinde olduğu belirlenmiştir. Yarıiletkenlerin soğurma ölçümleri 320-10 K aralığında ve 10 K'lık adımlarla alınmış GaTe ve GaTe: Cd ikili bileşiklerine ait sıcaklığın bir fonksiyonu olarak soğurma katsayısı ve yasak enerji aralıkları hesaplanmıştır. GaTe ve Cd katkılı GaTe ikili yarıiletkenlerinden Schottky diyot elde edilmiştir. Elde edilen diyotun akım-voltaj ölçümleri karanlık ortamda, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak (25-360 K aralığında) alınmıştır. Alınan ölçümler analiz edilerek diyot için önemli parametreler olan idealite faktörü ve engel yüksekliği hesaplanmıştır.

2017, 97 sayfa

Anahtar Kelimeler: GaTe, GaTe: Cd. XRD, SEM, EDX, AFM, Soğurma Katsayısı.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

GROWTH of GaTe and GaTe:Cd SEMICONDUCTORS and THE INVESTIGATION of STRUCTURAL and OPTICAL PROPERTIES OF THEM and SCHOTTKY DIODE APPLICATION

Mehmet ŞATA

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics
Department of Solid State

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Bekir GÜRBULAK

GaTe and GaTe:Cd binary semiconductors were grown by the modified Bridgman-Stockbarger method. The structural, morphological and optical characterizations of the semiconductors grown were performed by XRD, SEM, EDX, AFM and absorption measures, respectively. As a result of the XRD analyses, it was observed that GaTe and GaTe:Cd binary semiconductors had monoclinic structure; and as a result of Cd doping it was observed that peak intensities increased and that some peaks disappeared and that some peaks appeared. In order to determine the effect of annealing temperature on structure, the crystals grown were annealed in nitrogen gas environment at different temperatures (100, 200, 300, 350, 400, 500, 600 and 700°C) and in determined periods (10, 20 and 30 min.) and just after annealing XRD analyses were done. For GaTe and GaTe:Cd semiconductors, atomic weight values that were obtained by EDX technique and the values that were calculated during grown and applied were in agreement with one another. The absorption measures of GaTe and GaTe:Cd binary semiconductors were in the range of 320-10 K and these measures were performed for each 10 K steps. The absorption coefficients and energy band gaps were calculated as a function of temperature for GaTe and GaTe:Cd binary semiconductors. Schottky diode was obtained from GaTe and Cd doped GaTe binary semiconductors. The current-voltaj measures of obtained diode were measured in dark environment as a function of temperature (25-360 K range). Ideality factor and barrier height that are important parameters for diode were calculated by analyzing measurements that taken.

2017, 97 pages

Keywords: GaTe, GaTe:Cd. XRD, SEM, EDX, AFM, Absorption coefficient.

TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunduğum bu alışma Atatürk Üniversitesi Fen Fakóltesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği laboratuvarında hazırlanmıştır. Bu zorlu ve yorucu yolda, başım her sıkıştığında kapısını çaldığım, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan ve her durum karşısında farklı aırlarla bakabilmemi sağlayan, değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Bekir GÜRBULAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Tez hazırlama süresince görüş, öneri ve bilgilerinden faydalandığım çok kıymetli hocalarım Sayın Prof. Dr. Seydi DOĞAN, Sayın Prof. Dr. Songül DUMAN, Sayın Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI, Sayın Doç. Dr. Özlem BARIş Sayın Doç. Dr. Güven TURGUT ve çalışma arkadaşlarım Dr. Afsoun ASHKHASİ, Günay MERHAN-MUĞLU, Dr. Sevda SARITAş ve bu çalışmada yardımlarını esirgemeyen Fizik bölümü öğretim üyeleri ve çalışanlarına çok teşekkür ediyorum. SEM, EDX ve AFM ölçümleri için Fizik bölümü öğretim üyesi Sayın Doç. Dr. Emre GÜR'e yardımları için çok teşekkür ediyorum.

Tez çalışmalarım boyunca sağladığı burs sebebiyle bana maddi destek veren TUBİTAK-BİDEB'e minnettarım.

Zorlu sürecin her aşamasında bana her türlü ilgi ve desteği sağlayan eşime ve aileme çok teşekkür ediyorum.

Bu tezi, hayatıma renk katan ona baktıkça ne kadar şanslı olduğumu hatırlatan biricik oğlum Eyüp Enes'e (afacan çocuğa) atfediyorum. İyiki varsın.

Mehmet şATA

Aralık, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	11
2.1. Giriş.....	11
2.2. Yarıiletkenler Hakkında Temel Bilgiler.....	11
2.3. Kristal Yapı Kusurları	13
2.4. Yapısal Kusurlar ve Termal işlemlerle Giderilmesi.....	14
2.5. X-Işınları Kırınımı (XRD).....	16
2.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	19
2.7. Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrometresi (EDX)	23
2.8. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)	24
2.9. Kristallerin Optik Özellikleri.....	29
2.9.1. Soğurma katsayısı (α) ve Beer-Lambert yasası.....	29
2.9.2. Enerji bantları arası optiksel geçişler	31
2.10. Metal/Yarıiletken Kontaklar.....	32
2.10.1. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontaklar	33
2.10.2. Metal/p-tipi yarıiletken Schottky kontak.....	34
2.10.3. Metal/yarıiletken kontaklar üzerine sıcaklığın etkisi	36
2.10.4. Termiyonik emisyon ile akım-voltaj karakteristiğinin belirlenmesi	36
2.11. Seri Direnç Hesaplama Yöntemleri.....	37
2.12. Basit Eşitlikler	38
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	40
3.1. Galyum, Tellür ve Kadmiyum Elementleri	40
3.2. GaTe Yarıiletkenin Genel Özellikleri	41

3.3. GaTe Yarıiletkenini Büyütme Prosedürü	46
3.4. Stockbarger – Bridgman Yöntemi.....	50
3.5. GaTe ve GaTe: Cd Yarıiletkenlerin Büyütülmesi.....	52
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	56
4.1. Deney Sistemleri ve Ölçümlerin Yapılması	56
4.2. GaTe ve GaTe: Cd Yarıiletkenlerin XRD Analizleri	56
4.3. GaTe ve GaTe: Cd Yarıiletkenlerin SEM ve EDX Analizleri	66
4.4. GaTe ve GaTe: Cd Yarıiletkenlerin AFM Analizleri.....	69
4.5. GaTe ve GaTe: Cd Yarıiletkenlerin Soğurma Ölçümleri.....	72
4.6. Sn/p-GaTe Schottky Diyodunun I-V Karakteristiğinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi	79
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	82
KAYNAKLAR	92
ÖZGEÇMİŞ	98

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

2θ	Bragg kırınım açısı
$^{\circ}$	Derece
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
μ	Soğurma katsayısı
μm	Mikrometre
\AA	Angström
c	Işık hızı
Cd	Kadmiyum
cm	Santimetre
d	Düzlemler arası mesafe
D	Kristal tanecik büyüklüğü
E	Enerji
$e^{-2\mu}$	Debye-Waller faktörü
eV	Elektron volt
eV_{dif}	Engel yüksekliği
$e\Phi_b$	Boşluklar için engel yüksekliği
F	Yapı faktörü
Ga	Galyum
h	Plank sabiti
K	Kelvin
keV	Kiloelektron volt
meV	Milielektron volt
mm	Milimetre
N	Birim alan başına kristal sayısı
Sn	Kalay
Se	Selenyum
nm	Nanometre
T	Sıcaklık
Te	Tellür

V	Volt
Z	Atom numarası
β	Pik genişliğinin yarısı
δ	Dislokasyon yoğunluğu
σ	Mikro gerilim/zorlanma
Φ_m	İş fonksiyonu (metal için)
Φ_s	İş fonksiyonu (Yarıiletken için)
ε	Zorlanma derecesi
κ	Scherrer sabiti
λ	Dalga boyu
χ_s	Elektron yatkınlığı
ν	Frekans
v_e	Elektron hızı

Kısaltmalar

AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
CVD	Kimyasal Buhar Birikimi
C-V	Kapasitans-Voltaj
DLTS	Derin Seviye Geçiş Spektroskopisi
EDX	Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrometresi
FWHM	Yarı Pik Genişliği
I-V	Akım-Voltaj
HDTEM	Yüksek Çözünürlüklü Geçirmeli Elektron Mikroskobu
MBE	Moleküler Işın Epitaksi
MOCVD	Metalorganik Kimyasal Buhar Büyütme
MOSFET	Metal Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör
NTE	Nadir Toprak Elementi
PL	Foto Lümenesans
PVD	Fiziksel Buhar Birikimi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu

STM	Taramalı Tünelleme Mikroskobu
TEM	Geçirmeli Elektron Mikroskobu
XPS	X-ışınları Fotoelektron Spektroskopisi
XRD	X-Işını Kırınımı



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Tabakalı GaTe ikili yarıiletkenin yapı modelleri	2
Şekil 1.2. GaTe yarıiletkenin bant yapısı.....	3
Şekil 1.3. Kalınlığa göre GaTe kristalinin faz değişimi.....	9
Şekil 2.1. Saf yarıiletkenin enerji bandı.....	12
Şekil 2.2. Bragg kırınımının şekilsel gösterimi	17
Şekil 2.3. XRD ölçüm cihazı	19
Şekil 2.4. Taramalı elektron mikroskopunun çalışma prensibi.....	21
Şekil 2.5. SEM ölçüm cihazı	22
Şekil 2.6. Enerji dağılımlı x-ışınları spektroskopinin çalışma prensibi.....	23
Şekil 2.7. AFM cihazının çalışma prensibi.....	25
Şekil 2.8. a) 1000 ve b) 3000 büyütmede taramalı elektron mikroskopuyla çekilmiş AFM ucu	26
Şekil 2.9. AFM ucu ve numune yüzeyi arasındaki kuvvetlerin mesafeye bağlı değişimi	27
Şekil 2.10. AFM ölçüm cihazı	28
Şekil 2.11. a) Yarıiletkende elektron-boşluk çiftinin oluşumu b) dx kalınlı bir numune için soğurmanın gerçekleşmesi	30
Şekil 2.12. a) Direkt bant geçişi b) İndirekt bant geçişi.....	31
Şekil 2.13. Kontak yapılmadan önce <i>n</i> -tipi yarıiletken ve metale ait enerji bant diyagramları	33
Şekil 2.14. Kontak yapıldıktan sonra termal denge halinde oluşan enerji-bant diyagram.....	34
Şekil 2.15. Metal/ <i>p</i> -tipi yarıiletken Schottky kontağın enerji-bant diyagramı	35
Şekil 3.1. <i>m</i> -GaTe ve <i>h</i> -GaTe tabakaları arasındaki ilişki (Uzaklık birimi Å <i>m</i> : monoklinik ve <i>h</i> :hegzagonal).....	43
Şekil 3.2. a) GaTe külçe kristalinin yandan b) üstten c) derinlemesine d) tek tabakalı hegzagonal formu e) külçe hegzagonal formu f) monoklinik formu göstermektedir	44

Şekil 3.3. GaTe yarıiletkenin tabaka kalınlığının bant yapısının değişimi üzerindeki etkisi	45
Şekil 3.4. GaTe yarıiletkenin büyütüleceği fırınının fotoğrafı	47
Şekil 3.5. Kristal büyütme sisteminin şematik görünüşü.....	48
Şekil 3.6. GaTe ve GaTe: Cd için uygulana büyütme programı.....	52
Şekil 3.7. Yatay büyütme fırını.....	54
Şekil 3.8. Büyütülen GaTe yarıiletkeni	55
Şekil 4.1. GaTe yarıiletkenin oda sıcaklığındaki XRD spektrumu.....	60
Şekil 4.2. GaTe: Cd yarıiletkenin oda sıcaklığındaki XRD spektrumu.....	61
Şekil 4.3. GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin oda sıcaklığındaki XRD spektrumları.....	61
Şekil 4.4. GaTe yarıiletkenin 100°C'de 10 dakika tavlamadan sonra XRD spektrumu .	62
Şekil 4.5. GaTe yarıiletkenin 100°C'de 20 dakika tavlamadan sonra XRD spektrumu .	62
Şekil 4.6. GaTe yarıiletkenin 100°C'de 30 dakika tavlamadan sonra XRD spektrumu .	63
Şekil 4.11. GaTe yarıiletkenini 500°C'de 10,20 ve 30 dakika tavlamadan sonra XRD spektrumu	65
Şekil 4.12. GaTe: Cd yarıiletkenin 500°C'de 10, 20 ve 30 dakika tavlamadan sonra XRD spektrumu.....	66
Şekil 4.13. GaTe yarıiletkenin SEM görüntüsü	67
Şekil 4.14. GaTe: Cd yarıiletkenin SEM görüntüsü	67
Şekil 4.15. GaTe yarıiletkenin EDX spektrumu	68
Şekil 4.16. GaTe: Cd yarıiletkenin EDX spektrumu	68
Şekil 4.17. GaTe yarıiletkenine ait üç boyutlu AFM görüntüsü.....	70
Şekil 4.18. GaTe yarıiletkenine ait iki boyutlu AFM görüntüsü	71
Şekil 4.19. GaTe: Cd yarıiletkenine ait üç boyutlu AFM görüntüsü	71
Şekil 4.20. GaTe: Cd yarıiletkenine ait iki boyutlu AFM görüntüsü.....	72
Şekil 4.21. Tavlınmamış GaTe yarıiletkenin soğurma katsayısının sıcaklığa göre değişimi	73
Şekil 4.22. 350°C'de 30 dakika boyunca tavlınmış GaTe yarıiletkenin soğurma katsayısının sıcaklığa göre değişimi.....	74
Şekil 4.23. Tavlınmamış GaTe: Cd yarıiletkenin soğurma katsayısının sıcaklığa göre değişimi	74

Şekil 4.24. 350°C’de 30 dakika boyunca tavllanmış GaTe: Cd yarıiletkenin soğurma katsayısının sıcaklığa göre değişimi.....	75
Şekil 4.25. Tavllanmış ve tavlınmamış GaTe yarıiletkenin soğurma katsayısının sıcaklığa göre değişiminin karşılaştırılması (‘T’ tavlınmış).....	75
Şekil 4.26. Tavlınmış ve tavlınmamış GaTe: Cd yarıiletkenin soğurma katsayısının sıcaklığa göre değişiminin karşılaştırılması (‘T’ tavlınmış).....	76
Şekil 4.27. Tavlınmamış GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin soğurma katsayılarının sıcaklıkla değişiminin karşılaştırılması	76
Şekil 4.28. 350°C’de 30 dakika boyunca tavlınmış GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin soğurma katsayılarının sıcaklıkla değişiminin karşılaştırılması.....	77
Şekil 4.29. GaTe yarıiletkenin yasak enerji aralığının sıcaklıkla değişimi.....	77
Şekil 4.30. GaTe: Cd yarıiletkenin yasak enerji aralığının sıcaklıkla değişimi.....	78
Şekil 4.31. GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin yasak enerji aralığının sıcaklıkla değişiminin karşılaştırılması	78
Şekil 4.32. Sn/p-GaTe Schottky diyodunun sıcaklığa bağlı olarak I-V karakteristiği. ..	80
Şekil 4.33. Sn/p-GaTe Schottky diyodunun idealite ve engel yüksekliğinin sıcaklığa göre değişimi	80
Şekil 4.34. Sn/p-GaTe Schottky diyodunun engel yüksekliğinin idealite faktörüne göre değişimi	81

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin oda sıcaklığındaki XRD analizleri	57
Çizelge 4.2. GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin oda sıcaklığındaki bazı kristal parametreleri (D: tanecik büyüklüğü, ϵ : zorlanma derecesi, δ : dislokasyon yoğunluğu, N: birim alan başına kristal sayısı ve σ : mikro zorlanma).....	57
Çizelge 4.3. GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin 100°C'deki ve farklı tavlama sürelerindeki XRD sonuçları.....	57
Çizelge 4.4. GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin 100°C'deki kristal parametreleri	58
Çizelge 4.5. GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin 300°C'deki ve farklı tavlama sürelerindeki XRD sonuçları.....	58
Çizelge 4.6. GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin 300°C'deki kristal parametreleri.	59
Çizelge 4.7. GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin 500°C'deki ve farklı tavlama sürelerindeki XRD sonuçları.....	59
Çizelge 4.8. GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin 500°C'deki kristal parametreleri	60
Çizelge 4.9. GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin EDX sonuçları.....	69
Çizelge 4.10. GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin AFM sonuçları	72
Çizelge 4.11. Bazı sıcaklık değerleri için GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin yasak enerji aralıklarının karşılaştırılması.....	79
Çizelge 4.12. Sn/p-GaTe Schottky diyoduna ait parametreler	81

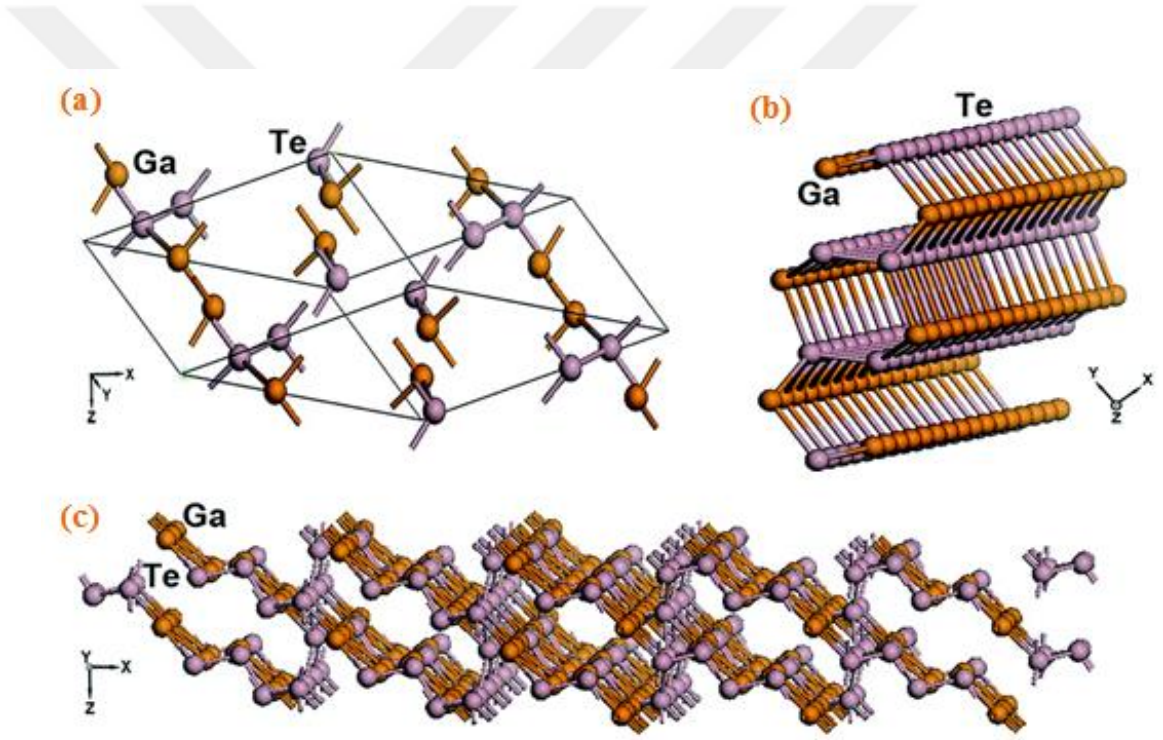
1. GİRİŞ

Tek kristallerin büyütülmesi ve araştırmaların sonucu olarak yarıiletken teknolojisi gün geçtikçe gelişimini sürdürmektedir. Bilindiği gibi teknoloji ve bilim dünyasındaki birçok uygulamanın temelinde yarıiletken teknolojisi yatmaktadır. Örneğin; lazerler, yükselticiler, görünür ve kırmızı ötesi ışık yayan diyotlar, kırmızı ötesi dedektörler, güneş enerji dönüştürücüler gibi birçok uygulamanın olduğu görülmektedir. Yarıiletken teknolojisinin önemli bir avantajı ise yenilenebilir enerji kaynaklarının üretilmesinde başarılı olarak kullanılmasıdır. Bilindiği gibi fosil yakıt ürünleri ve diğer petrol ürünleri yavaş yavaş tükenmekte iken gelişen ve büyüyen dünyanın enerjiye bağımlılığı her geçen gün artmaktadır. Bu bağlamda yarıiletken teknolojisi her geçen gün daha önemli bir hale gelmektedir.

Dünyadaki enerji ihtiyacı ve mevcut fosil yakıt miktarları göz önüne alındığında, gelişmiş bir yarıiletken teknolojisinin önemli bir güç olduğu görülmektedir. Gelişmiş ülkelerin çoğu yarıiletken teknolojisi için ciddi yatırımlar yapmaktadırlar. Özellikle Avrupa ülkelerine bakıldığında, güneş enerjisi ve rüzgâr enerjisinden ciddi bir biçimde faydalandıkları görülmektedir. Bu uygulama alanları yarıiletken bileşiklerin belirli karakteristik özelliklerine göre şekillenmektedir. Yarıiletken bileşikleri belirli gruplara ayrılmıştır. Bunlar; II-VI grubu ailesi, III-V grubu ailesi, III-VI grubu ailesi vb isimlerle tanınmaktadırlar.

Son yıllarda III-VI grubu ailesi üzerinde birçok çalışma yapılmış ve hala bu gruba yoğun ilgi devam etmektedir. Bu yoğun ilginin sebebi ilgili bileşik ailesinin kendine has özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu bileşikler, III. grup In, Ga, Tl elementleri ile VI. grup Se, S, Te elementlerinden oluşmaktadır. III-VI yarıiletkenleri arasında GaSe, GaS ve GaTe ikili yarıiletkenleri Galyum kalkojenleri olarak isimlendirilirler ve tabakalı bir yapıya sahiptirler. Bu tabakalı yapıları sayesinde doğal bir süper örgü özelliğine sahiptirler (Fielding *et al.* 1959; Manfredotti *et al.* 1975; Bacino *et al.* 1979). GaSe ve GaS hegzagonal yapıda kristalleşme gösterirken, GaTe monoklinik yapıda kristalleşir (Pearson 1964; Zhao *et al.* 2016).

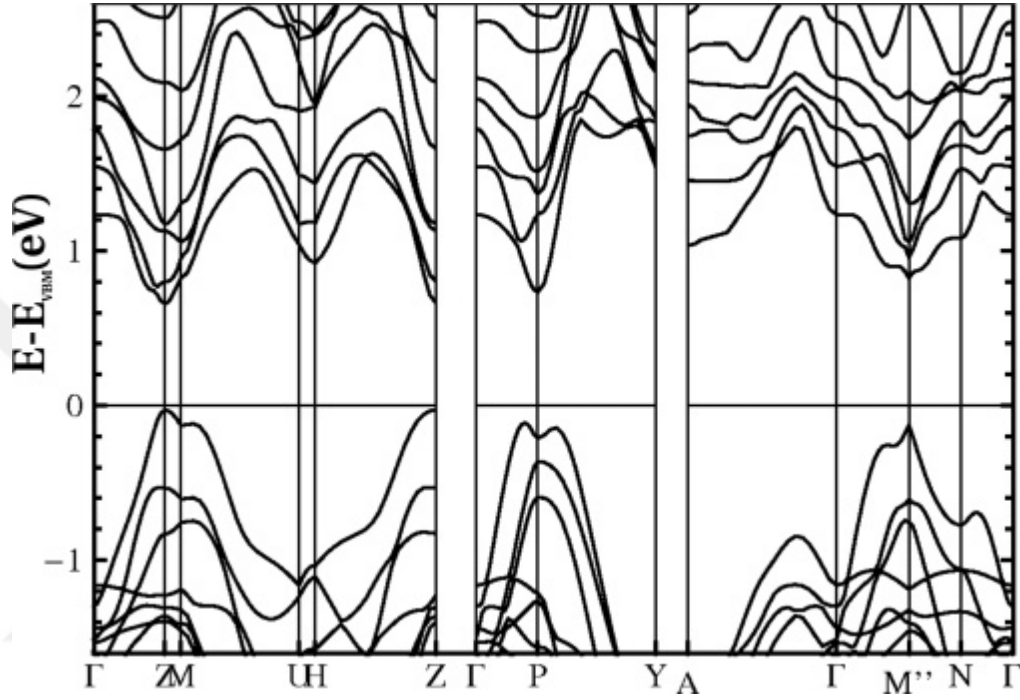
GaTe yarıiletkenin tabaka yapısı incelendiğinde, tabakalar içi bağlar güçlü kovalent bağlarına sahip, tabakalar arası bağlar ise zayıf Van-der Waals bağlarına sahip olduğu görülmektedir (Fielding *et al.* 1959; Sanchez-Royo *et al.* 1995). Diğer III-VI ikili yarıiletkenlerden farklı olarak, GaTe yarıiletkenin fiziksel özellikleri yüksek düzeyde anizotropi göstermektedir (Grandolfo *et al.* 1971; Gousskov and Gousskov 1979; Leontie *et al.* 2014). Ga-Ga bağlarının üçte biri, tabaka içinde b-eksenine dik doğrultuda yer alır ve fiziksel özelliklerdeki anizotropi bu bağların varlığına atfedilir (Gousskov and Gousskov 1979; Sanchez – Royo *et al.* 1995; Shenoy *et al.* 2016). Şekil 1.1’de tabakalı GaTe ikili yarıiletkenin yapı modelleri verilmiştir.



Şekil 1.1. Tabakalı GaTe ikili yarıiletkenin yapı modelleri (Yu *et al.* 2014)

GaTe yarıiletkeni, birçok yöntemle elde edilebilmektedir. Bu yöntemler; dikey Bridgman (Fielding *et al.* 1959; Pal and Bose 1996; Mandal *et al.* 2006; Mandal *et al.* 2011), Bridgman-Stockbarger (Gousskov *et al.* 1977; Kurbatov *et al.* 1979; Ertap *et al.* 2015; Gürbulak *et al.* 2016), Zon Büyütme (Fischer and Brebner 1962), Kapalı Tüp Süblüstasyonu (Mancini *et al.* 1974; Bose and Pal 2001; Kunjomana *et al.* 2014) ve İyodin Yardımlı Kimyasal Taşıma (Mancini *et al.* 1974; Kunjomana *et al.* 2014)

şeklinde. GaTe yarıiletkeni büyütme yönteminden bağımsız olarak p-tipi özelliğe sahiptir (Mancini *et al.* 1974; Fonseca *et al.* 2016). Şekil 1.2’de GaTe yarıiletkenin bant yapısı verilmiştir.



Şekil 1.2. GaTe yarıiletkenin bant yapısı (Leao and Lordi 2011)

Literatürde GaTe yarıiletkenin; yapısal, özdirenç, mobilite, Hall etkisi, fotoluminesans, soğurma ölçümleri, Raman, DLTS ve morfolojik analizlerinin yapılmıştır (Sanchez-Royo *et al.* 2002; Yüksek *et al.* 2012; Kolesnikov *et al.* 2013). GaTe yarıiletkenine bu yoğun ilginin altında yatan temel etkenlerden biri de direkt bant aralığına sahip olması gösterilmektedir. Oda sıcaklığında GaTe yarıiletkenin yasak enerji aralığı 1,67 eV ve 4 K’de ise 1,79 eV’dir (Coşkun *et al.* 2003). GaTe yarıiletkenin 300 K’de 1,67 eV enerji aralığına sahip olması, kuvvetli eksiton luminesans emisyonu ve önemli optiksel nonlineerlik özelliklerinden dolayı geleceğin optoelektronik materyali olarak önerilebilir.

Abay *et al.* (2002) tarafından, Bridgman-Stockbarger büyütme yöntemi ile büyütülen GaTe yarıiletkeni ile kadmiyum kullanılarak Schottky diyod elde edilmiş ve akım-voltaj

(I-V) karakteristiği 90-330 K sıcaklık aralığında incelenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, Cd/p-GaTe Schottky diyodun termoiyonik emisyon teorisinde verildiği gibi sıcaklığa güçlü bir derecede bağımlı olduğu gösterilmiştir.

Coşkun *et al.* (2003) tarafından yapılan Sn/p-GaTe Schottky diyodun I-V çalışmalarında Schottky homojensizlikleri tekli Gauss dağılımıyla açıklanabilmiş ve modifiye Richardson sabiti $6,15 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ olarak hesaplanmıştır. Literatürde GaTe yarıiletken kristali üzerine yapılan Schottky diyod çalışmalarının sayısı sınırlıdır ve bu yarıiletkenin, akım-voltaj ve kapasitans-voltaj özellikleri tam olarak araştırılmamıştır. Bu sebepten dolayı GaTe yarıiletken kristali üzerine yapılacak olan diyod karakteristikleri yapısal farklılıklarından dolayı birçok yönden dikkat çekici olacağı düşünülmektedir.

Balitskii *et al.* (2008) tarafından, Bridgman yöntemi kullanılarak büyütülen GaTe ikili yarıiletkeni STM, SEM, LEED, XPS ve XRD ölçümleri yapılarak değerlendirilmiştir. Yapılan XPS ölçümleri, sadece galyum ve tellür seviyelerinin oluştuğunu ve desende Auger piklerinin bulunduğunu göstermektedir. Yüzey üzerindeki karbonun varlığı genelde tabakalı bileşiklerden ve ne kadar kaçınırsanız bile karbonun yüzeyi kaplamasından dolayı oluşmaktadır. SEM görüntüleri kristaller için karakteristik olan merdiven gibi bir yapının olduğunu göstermiştir. Bu merdiven benzeri yapılar dışında yüzeyde hiçbir homojensizlik ya da kusurların genişlemesi gözlenmemiştir. XRD ölçümlerine bakıldığında yapının monoklinik olarak büyüdüğünü ve C2/m uzay grubuna ait olduğu bulunmuştur.

Mandal *et al.* (2008) tarafından, modifiye edilmiş dikey Bridgman yöntemi ile yüksek saflıktaki Ga (7N) kullanılarak GaTe tek kristalleri elde edilmiştir. Büyütülen kristaller 2 cm çapında ve 10 cm uzunlukta olarak elde edilmiş ve bu kristaller, I-V ölçümleri, Hall Etkisi ölçümleri, düşük sıcaklıktaki fotoluminesans spektroskopisi ve kontak direnci çalışması ile analiz edilmiştir. Hall ölçümleri sonucunda kristallerin p-tipi özellik gösterdiği bulunmuştur.

Cui *et al.* (2009) tarafından, katkılanmamış GaTe ve indiyum katkılı GaTe kristallerinin derin seviyeleri dikey Bridgman tekniği ile büyütülen numuneler için rapor edilmiştir. GaTe ve GaTe:In Schottky diyotlar elde edilmiş ve I-V, C-V ve DLTS kullanılarak analiz edilmiştir. Katkılanmamış GaTe kristalinde valans bandının üstünde 0,40 eV, 0,59 eV ve 0,67 eV olmak üzere üç derin seviye olduğu bulunmuştur. 0,40 eV'daki seviye galyum boşlukları ve galyum ara yer atomlarını içeren karmaşık bir seviyedir. 0,59 eV'daki seviye galyum yerine tellür atomunun yerleşmesi ile oluşmuş ve son olarak 0,67 eV'daki seviye ise iki defa iyonize olmuş galyum boşluklarının oluşturduğu seviye olduğu bulunmuştur. İndiyum izoelektronik katkılama, Schottky doyum akımının azalmasında ve galyum atomu yerine yerleşmiş tellür kusuru ile iyonize olmuş galyum boşluk kusurlarını azaltması gibi fark edilebilir etkiler bulunmuştur. Düşük sıcaklıktaki fotoluminesans spektroskopisi ölçümleri GaTe ve GaTe:In kristalleri üzerinde yapılmıştır. Katkılanmamış GaTe kristalinde galyum boşluklarına karşılık gelen 140 meV'daki bir sığ akseptör seviye ölçülmüştür. GaTe:In kristalinde ise 123 ve 74 meV olmak üzere iki sığ akseptör seviyesi gözlenmiştir. PL sonuçları In atomlarının GaTe kristalinin büyütme süreci boyunca Ga boşluklarına yerleştiği ve bu durumun GaTe kristalinin optiksel ve elektriksel özelliklerini etkilediğini göstermektedir.

Mandal *et al.* (2011) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise yeni bir büyütme yöntemi kullanılarak GaTe tabakalı tek kristaller elde edilmiştir. GaTe numuneleri mekaniksel olarak temizlenmiş ve XRD, SEM, EDAX, XPS (X-ışınları fotoelektron spektroskopisi), TLM (transfer length method), van der Pauw tekniği ve Hall olayı ile direnç ölçümleri ve C-V ölçümleri yapılmıştır. Büyütülen GaTe tek kristalleri toz haline getirildikten sonra XRD analizleri yapılmıştır. XRD analizlerine göre, toz haldeki GaTe tek kristallerinin monoklinik yapıda olduğu ve literatür ile uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. SEM sonuçları incelendiğinde yapının tabakalı olduğu ve EDX sonucunda ise yapı içinde sadece Ga ve Te elementlerinin bulunduğu doğrulanmıştır. SEM ölçümleri numuneler temizlenmiş ve temizlenmemiş olarak iki ayrı şekilde alınmış ve temizlenmiş numunelerin daha düz bir yüzeye sahip oldukları, temizlenmemiş numunelerin ise daha pürüzlü oldukları belirlenmiştir.

Yatay donma büyütme tekniği kullanılarak büyütülen GaTe tek kristalleri SEM, XRD ve EDX analizleri ile değerlendirilmiştir. XRD analizleri neticesinde büyütülen kristallerin monoklinik yapıda olduğu belirlenmiştir. Numunelerin ortalama tanecik büyüklüğü Debye-Scherer formülü kullanılarak hesaplanmıştır. SEM analizleri neticesinde de yapının tabakalı olduğu gözlenmiştir. EDX analizleri sonucunda da herhangi bir kirlilik yapısının olmadığı ve beklenen stokiyometrik oranların elde edildiği belirlenmiştir (Reshmi *et al.* 2011).

Yüksek *et al.* (2012) tarafından yapılan başka bir çalışmada ise dikey Bridgman yöntemi kullanılarak külçe GaTe kristali büyütülmüş, optiksel ve yapısal özellikleri araştırılmıştır. Külçe GaTe kristalinin kalınlığı SEM kullanılarak 20,5 µm olarak belirlenmiştir. GaTe tek kristalin yapısı Rikagu D/max-2200 X-ışınları kırınımı (Cu-Kα ışınımı, $\lambda=1,5405 \text{ \AA}$ $2\theta=0-70^\circ$) kullanılarak analiz edilmiştir. XRD spektrumunun analizi sonucunda GaTe'ün kristal yapısının monoklinik yapıda olduğu gözlenmiştir. GaTe külçe kristalinin doğrusal soğurma spektrumu oda sıcaklığında 700 nm ile 1100 nm arasında olan taramalı spektrometre kullanılarak rapor edilmiştir.

GaTe yarıiletkenlerin büyütülmesi; tabakalı yarıiletkenlerin özellikleri, yapıları ve kimyasal bağların anizotropiliği gibi özelliklerden dolayı çok ciddi zorluklar içermektedir. Genellikle saf ve katkılı GaSe ve GaTe gibi külçe tabakalı yarıiletkenler Bridgman tekniği ile büyütülmektedirler. Büyütme oranları oldukça yavaştır. Yaklaşık olarak 2-6 mm/gün'dür. XRD verilerinde GaTe için dört kristalik faz rapor edilmiştir. Bunlardan üçü monoklinik faz, biri ise hegzagonal fazdır (Kolesnikov *et al.* 2013). Kolesnikov *et al.* (2013) tarafından GaTe kristalleri yüksek basınçlı dikey zone eritme yöntemi (HPVZM) kullanılarak eriyikten külçe kristal olarak büyütülmüştür. Büyütülen külçe kristaller; XRD, SEM, EPMA, optiksel mikroskop, mikro sertlik ve geçirgenlik ölçümleri ile değerlendirilmiştir. XRD analizlerine göre külçe halde hegzagonal yapıda olan kristaller, öğütüldüğünde monoklinik hale dönüşmüşlerdir. Ayrıca SEM analizleri incelendiğinde, dislokasyonların olduğu gözlenmiştir (Kolesnikov *et al.* 2013).

Çınar *et al.* (2014) tarafından, GaTe ince filmi, elektrokimyasal birikim tekniği silikon altlık üzerinde büyütülmüştür. Büyütülen GaTe ince filmlerinin üzerine Sn (kalay) $1,3 \times 10^{-3}$ Pa basınçla buharlaştırılmıştır. Böylece Sn/GaTe Schottky diyodları elde edilmiştir. Sn/GaTe Schottky diyodunun I-V karakteristiği sıcaklığın bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. İdealite faktörü ve engel yüksekliğinin kuvvetli bir şekilde sıcaklığa bağlı olduğu bulunmuştur. Sıcaklık 75 K'den 300 K'e artırıldığında idealite faktörü 5,28'den 1,29'a düşmüştür. Engel yüksekliğinin deneysel değerleri 0,2 eV ile 0,76 eV aralıklarında değişmiştir. Sn/GaTe Schottky diyodun Richardson eğiminin düşük sıcaklıklarda doğrusal olmadığı bulunmuştur. GaTe ince filminin enerji bant aralığı soğurma ölçümlerinden oda sıcaklığında 1,67 eV olarak hesaplanmıştır.

Hu *et al.* (2014) tarafından, modifiye edilmiş Bridgman yöntemi kullanılarak GaTe yarıiletkenleri elde edilmiştir. Elde edilen yarıiletkenler SEM, EDX, TEM, STEM, AFM, Fotolüminesans spektroskopisi ve Raman spektroskopisi yardımıyla analiz edilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde tipik GaTe yarıiletkenin yapısı olan tabakalı yapı görülmektedir. Ayrıca seçilen bir bölgede elektron kırınımı ile yapının monoklinik yapıda olduğu gözlenmiştir. AFM ile nano tabakaların 1 ile 60 nm aralığında değiştiği bulunmuştur. Raman spektroskopisi ölçümlerine bakıldığında, 112 cm^{-1} ve 115 cm^{-1} 'de iki belirgin pikin olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak elde edilen GaTe kristalinden yapılan GaTe nano tabakalı fototransistörler; dokunmatik sensör panelleri, görüntü sensörleri ve güneş pilleri gibi çeşitli uygulamalar için cazip bir aday olduğu belirtilmiştir.

Kunjomana *et al.* (2014) tarafından, fiziksel buhar birikimi (PVD) yöntemi kullanılarak yassı tanecikli GaTe yarıiletkenleri üretilmiştir. Bu yassı taneciklerin morfolojisi ve büyüme mekanizması SEM yardımıyla araştırılmıştır. Bileşiğin yapısını ve fazını belirlemek için X-ışını kırınımı (XRD) tekniği kullanılmıştır. SEM görüntüleri incelendiğinde tabakalı ve homojen bir yapının elde edildiği tespit edilmiş ve EDX analizi ile stokiyometrik oranlar doğrulanmıştır. XRD ölçümleri incelendiğinde üretilen GaTe yassı taneciklerinin monoklinik yapıda olduğu ve C12/m uzay grubuna ait olduğu belirlenmiştir.

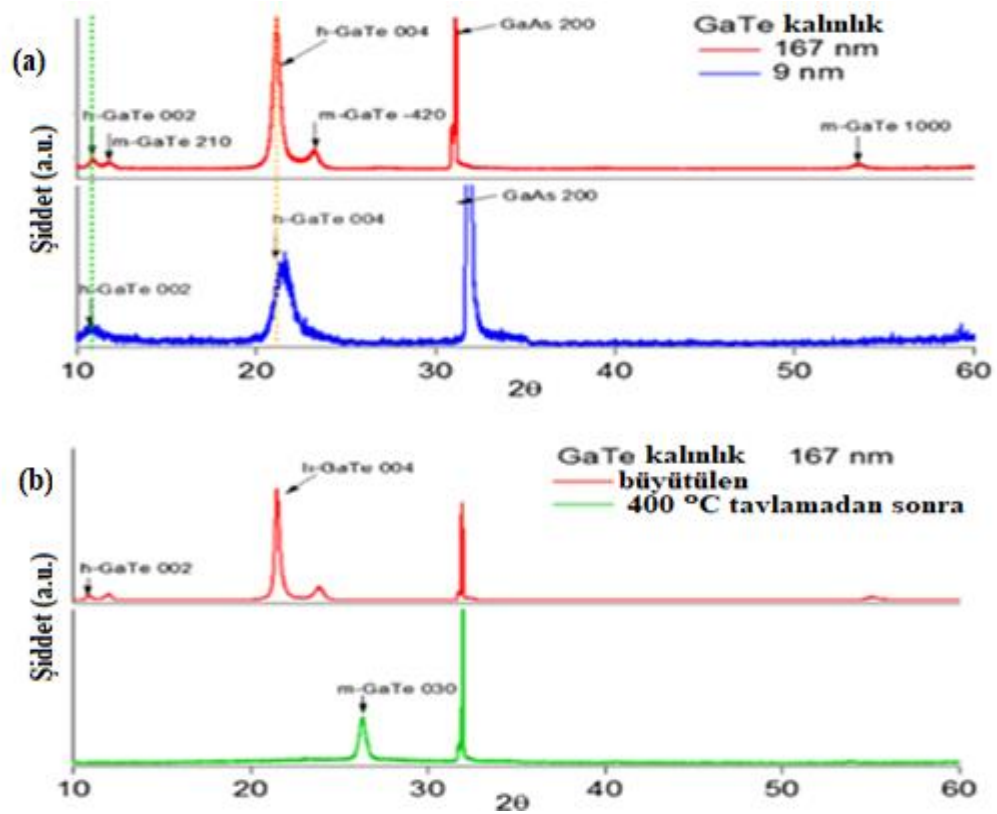
Yu *et al.* (2014) tarafından, GaTe tek kristalleri bir CVD yöntemi olan yatay kuartz tüpü fırını kullanılarak elde edilmiş ve XRD, SEM, TEM ve fotolüminesans spektroskopisi kullanılarak analiz edilmiştir. XRD ölçümleri incelendiğinde büyütülen GaTe tek kristallerinin monoklinik yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Fotolüminesans spektroskopisi sonuçlarına bakıldığında, GaTe tek kristalinin direkt bant yapısına sahip olduğu ve yaklaşık olarak 737 nm'ye tekabül eden güçlü bir emisyon bandının olduğu gözlemlenmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde GaTe nano çubuklarının çapının 100 ile 500 nm arasında olduğu ve uzunluklarının ise birkaç mikrometre olduğu bulunmuştur.

Shenoy *et al.* (2016) tarafından, Bridgman tekniği kullanılarak büyütülen GaTe kristallerinin yapısal ve optiksel analizleri gerçekleştirilmiştir. XRD ölçümleri incelendiğinde GaTe tek kristallerinin monoklinik yapıda olduğu gözlemlenmiştir. EDX sonuçlarına göre Ga/Te oranı 1,02 olarak belirlenmiştir. Çeşitli kalınlıklara sahip GaTe kristalleri için Raman spektroskopisi ölçümleri alınmıştır. Tabaka kalınlıkları değiştikçe piklerin yeri de değişim göstermiştir. Ayrıca sıcaklığa bağlı olarak da Raman spektroskopisi ölçümleri alınmıştır.

Zhao *et al.* (2016) tarafından, Bridgman yöntemi kullanılarak GaTe tek kristalleri elde edilmiş; yapısal, morfolojik, optiksel özellikleri incelenerek karakterize edilmiştir. TEM sonuçları incelendiğinde, belirli bir kalınlıktan sonra monoklinik yapıdan hegzagonal yapıya doğru bir değişimin olduğu belirtilmiştir. Ayrıca Raman spektroskopisi, kristal yapısı hakkında zengin bilgi sağlamaktadır. Raman spektroskopisi sonuçları incelendiğinde literatürde rapor edilen on tane karakteristik pikin olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, hem termodinamik analiz hem deneysel karakterizasyon, faz dönüşümü için (monoklinik fazdan hegzagonal faza dönüşme) kritik bir kalınlığın olduğunu göstermiştir.

Bae *et al.* (2017) tarafından moleküler ışın epitaksi (MBE) yöntemi kullanılarak büyütülen GaTe tek kristalleri XRD ve Raman spektroskopisi kullanılarak incelenmiştir (Şekil 1.3). GaAs üzerine büyütülen GaTe tek kristalinin belli bir kalınlıktan (90 nm)

sonra monoklinik yapıdan hegzagonal yapıya dönüştüğü XRD ve Raman spektroskopisi kullanılarak doğrulanmıştır.



Şekil 1.3. Kalınlığa göre GaTe kristalinin faz değişimi (Bae *et al.* 2017)

III-VI grubu ailesi içinde GaTe, GaSe, GaS ve InSe vs. tabakalı yapıya sahiptirler. Bu dört bileşik içinde de en karmaşık yapıya sahip olan bileşik GaTe ikili bileşiğidir. Bundan dolayı diğer tabakalı bileşiklere göre bu bileşikle daha az çalışılmıştır. Fakat GaTe ikili bileşiğinin sahip olduğu özellikler göz önüne alındığında bu kristalin daha fazla çalışılmasına ihtiyaç olduğu görülmektedir. Bu durum gözönüne alınarak bu çalışmada GaTe ikili bileşiğinin büyütülmesi ve karakterizasyonu incelenmesini esas alınmıştır. Ayrıca büyütülen GaTe külçe kristali kullanılarak Schottky diyot aygıtı yapılmıştır.

Bu tezin ilk bölümünde GaTe yarıiletkeni üzerinde yapılan çalışmaların özeti ve GaTe yarıiletkenin bazı özellikleri anlatılmıştır. İkinci bölümde tez kapsamında kullanılan

teknikler hakkında genel bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde GaTe yarıiletkenin genel özellikleri ve büyütme yönteminden bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde araştırma kapsamında elde edilen bulgulara yer verilmiştir. Son bölümde ise bulgulara dayalı olarak sonuçlar tartışılmıştır.



2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Giriş

Katkısız GaTe ve katkılı GaTe: Cd yarıiletkenler laboratuvarında büyütülüp, yapısal, morfolojik, elektriksel ve optiksel karakterizasyonları irdelenip bugüne ışık tutan sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmalar neticesinde teknolojiye kullanılan birçok özellikli aygıtların gelişmesi ve daha etkin kullanılması imkân bulacaktır. Yarıiletken malzemelerin teknoloji üzerindeki belirleyici gücün bir sonucu olarak sürekli bir gelişim eğrisine sahip olduğu bilinmektedir. Özellikle gelişmiş ülkelerin her geçen gün yarıiletken teknolojisine yönelik ciddi bir bütçe ve zaman ayırdığı görülmektedir. Bunun bir sonucu olarak küresel güç ve avantaj sağlamaları önemli bir derecede artmaktadır.

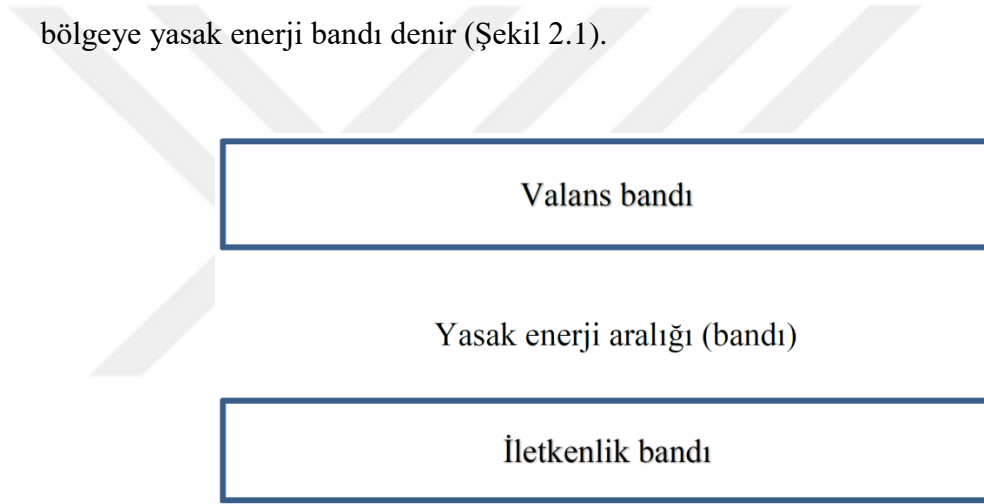
Yarıiletkenlerin kalitesini ve verimini belirlemek için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerin birçoğu birbirini destekler niteliktedir. Bir yarıiletkenin ne kadar işlevsel olduğunu belirlemek için yapısal, morfolojik, topolojik, elektriksel, manyetiksel ve optiksel özelliklerinin belirlenmiş olması gerekir. Bu bağlamda aşağıda kuramsal temelleri tanıtılmış olan yöntem ve teknikler bu araştırmada büyütülmüş olan GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin karakterize edilmesinde kullanılmıştır. Bu teknikler dışında birçok teknik mevcut olmakla birlikte mevcut şartlarda en uygun teknikler kullanılmaya çalışılmıştır.

2.2. Yarıiletkenler Hakkında Temel Bilgiler

Elektrik akımını geçiren iki tür iletkenlik durumu söz konusudur. Bunlar; elektronik geçişli iletkenler ve iyonik geçişli iletkenler olarak adlandırılmaktadır. Metallerde elektrik akımının çoğunluk taşıyıcıları elektronlar olduğundan metaller elektron geçişli iletkenlerdir. İyonik iletkenlerde elektrik akımı malzemenin iyonları ile taşınmaktadır. Yarıiletkenler ise hem elektron hemde iyon iletkenliğine sahiptir. Yarıiletkenlerin çoğu

(Si, Ge, Se, Te, GaAs, InP, InSb, CdSe, CdTe, PbS, PbSe, SiC vs) elektron iletkenliğine sahiptir.

Kuantum teorisine göre izole edilmiş atomların elektronlarının enerjisi kesikli olarak değişebilir. Yarıiletken malzeme oluştuğunda atomlar birbirlerine çok yaklaştığında (yaklaşık 10^{-8} cm) komşu atomların kuvvetli elektrik alanı etkisiyle valans elektronlarının enerji düzeyi banda ayrılır. Valans elektronlarından oluşmuş banda valans bandı denir. Atomdaki valans elektronlarının uyarılma düzeyinden oluşan banda serbest veya iletkenlik bandı olarak adlandırılır. İletkenlik ve valans bandı arasındaki bölgeye yasak enerji bandı denir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Saf yarıiletkenin enerji bandı

$$\text{İletkenlik bandı enerjisi: } E_c = E_g + \hbar^2 k^2 / 2m_e$$

$$\text{Valans bandı enerjisi: } E_v = E_g + \hbar^2 k^2 / 2m_h \quad (2.1)$$

ile verilir. Yasak enerji aralığının genişliği yarıiletkenlerin kimyasal bağ türü ve atom türü ile belirlenir. Farklı yarıiletkenlerin band genişliği 0,1 ile 5,0 eV'a kadar değişir. Yarıiletkenlerin yasak enerji aralığının genişliği sıcaklık arttıkça değişir. Bu olayın sebebi; atomların ısısal titreşim genliklerinin sıcaklıkla değişimi ve atomlar arası uzaklığın sıcaklıkla değişmesine bağlıdır. Yarıiletkenlerin çoğunluğunda sıcaklık arttıkça yasak enerji aralığı küçülmektedir.

2.3. Kristal Yapı Kusurları

Atomları düzgün bir dizilime sahip olan bir kristal yapı hiçbir zaman ideal tanımına uygun değildir. Yani doğada her yapının olduğu gibi kristalinde idealini bulmak çok zordur. Bir kristal içerisindeki atomlar her zaman aynı sırayla dizilmezler. Bunun yanı sıra kristal yapıyı oluşturan atomlar durgun halde değildirler. Sıcaklığa bağlı olarak kristal içerisindeki atomlar beklenen nokta etrafında titreşim hareketi yaparlar. Yapı içerisindeki periyodik dizilişi az veya çok miktarda bozacak kusurlar bulunur. Bu kusurlara kristal yapı kusurları denir. Örneğin kristal örgüde, olması gereken atomun yeri boş kalabilir veya örgü sisteminde ilave atom ya da atomlar yer alabilir. Bunun yanı sıra kristal yapıda fazla veya eksik atom tabakaları da bulunabilir. Bütün bunlar kristal yapı kusurlarını oluşturur. Kusur oluşması her zaman kaygı verici değildir. Mesela bazı yarıiletkenlerin iletkenlikleri tamamen kusurlara bağlıdır. Yine birçok kristalin rengi kusurlardan doğmaktadır. Kristal içerisindeki lüminesans, kusur varlığına bağlanabilir. Katılar içerisinde atomların nüfusu kusurlar tarafından hızlandırılır. Ayrıca katıların mekanik ve plastik özellikleri genelde kusurlar tarafından kontrol edilir.

Bir kristal yapı içerisinde atomların düzeni, tanımlanan ideal durumdan iki şekilde ayrılır. Bunlardan birincisi fiziksel kusurlar ikincisi ise kimyasal kusurlardır.

A) Fiziksel Kusurlar: Kristalin kendi atomları arasında meydana gelen düzensizlikten oluşur. Fiziksel kusurlar kendi arasında 4'e ayrılır. Bunlar; noktasal kusurlar (boyutsuz), çizgisel kusurlar (tek boyutlu), düzlemsel kusurlar (iki boyutlu) ve hacimsel kusurlar (üç boyutlu) olarak adlandırılmaktadır.

Yapı bozukluğu kristalin bazı özelliklerini değiştirir. Bu değişiklikler neticesinde; kristal kolay şekil verilebilir özelliğe sahip olur, direnci veya mukavemeti artar, elektriksel iletkenliği kontrol edilebilir ve kristal, bir yarıiletken ise yasak enerji aralığı (E_g) değiştirilebilmektedir.

B) Kimyasal kusurlar: Kristal malzemenin içerisinde bilerek veya bilmeyerek karışan yabancı atomlar kimyasal kusurlara neden olur. Bilmeyerek oluşan kimyasal yapı kusurları ise kristal büyütme sistemi veya eriyiğin bulunduğu atomdan karışan artıklardır. Kimyasal kusurları 4 başlıkta toplamak mümkündür.

- 1) Bir Başkasının Yerine Yerleşme (substitutional) Kusurları: Yabancı bir kimyasal atomun kristal örgüsüne yerleşmesidir.
- 2) Arayer Atomları: Yabancı atomlar arayere yerleşirse bu tür kusurlar arayer kusurlarıdır.
- 3) Çiftler: Yabancı atomların çiftler oluşturmasıdır. Yani bir yabancı arayer atomunun diğer arayer atomu ile oluşturduğu çiftlerdir.
- 4) Daha Kompleks Kusurlar.

2.4. Yapısal Kusurlar ve Termal İşlemlerle Giderilmesi

Kirlilik atomlarının yer aldığı bir kristalin tamamen farklı bölgelerindeki latislerde birçok düzensizlik mevcut olabilir. Yapısal bir kusur, bir malzemenin kısa ve uzun mesafeli yapısındaki herhangi bir düzensizliktir. Bu tür kusurlar, kısa mesafe düzenli şekilsiz katılarla ve üç boyutsal bir yapıya sahip kristal katıları ile alakalıdır. Yapısal kusurlara, nokta kusurları ve yayılan kusurları örnek olarak vermek mümkündür. Nokta kusurlar, kristalin bazı atomik yerlerinde lokalize edilen düzensizlikleri içeren kusur şeklidir. Nokta kusurlar, boşluklar (latis atomlarının yerlerini terketmesiyle oluşan kusurlar), arayer kusurları (latislere yerleşmeyen atomların oluşturduğu kusurlar), antisite kusurları (yerleşme şeklinin yanlış olarak düzenlendiği bir bileşiğin elementlerinin neden olduğu kusurlardır). Yapısal kusurlar, materyalin yapısında olan birer içsel kusurlardır. Kristalde, yabancı atomlardan kaynaklanan dışsal kusurlar içsel kusurların üstlendikleri rolleri üstlenebilirler ve kristalin içsel özellikleri ile birleşip onlar gibi davranabilirler.

İzotopların çeşitli olduğu bir yapı, düzensiz bir yapı gibi düşünülebilir ve izotropik çokluk, düşük sıcaklık termal iletkenlik ölçümleri gibi bazı durumlarda yapıyı

belirgin bir biçimde etkileyebilir. Yapıda farklı izotopların mevcut olması, kusur yapılarının tanımlanmasında bu çeşit farklı izotoplar kısmen de olsa rol oynayacaklardır (Önengüt ve Önengüt 2014).

Materyallerde nokta kusurları oluşturmada kullanılan metotlar termal ve termokimyasal metotlardır. En basit termal davranış, yavaş soğutma prosesi (anneal etme) veya hızlı olarak yapılan soğutma prosesi (quenç etme) ile bir numune yüksek bir sıcaklığa getirilmeye çalışılır (Agulló-López *et al.* 1988). Hızlı soğutma olayında numune yüksek sıcaklıklarda termal olarak indüklenen kusurlar aniden dondurulmaya çalışılır. Numune üzerinde yapılan herhangi bir soğutma prosesinden sonra numune, herhangi bir düşük sıcaklığın termodinamik denge şartından oldukça uzak bir halde kalacaktır. Bu hal ise yarı kararlı (metastable) hal olacaktır. Etkin olabilecek bir soğutma prosesi gerçekleştirebilmek için, iyi termal iletkenliğe sahip numuneler gereklidir. Yalıtkan materyaller üzerinde yapılabilen bir soğutma prosesi, etkinliği daha az olan bir soğutma prosesidir. Bu proses, kristalde içsel kusur konsantrasyonlarını artırmak için sıkça kullanılan bir prostestir. Bu tür proseslerde çok sıkça karşılaşılan problemler, yalıtkanların düşük termal iletkenliğe sahip olmaları ve numunelerin termal gerilmeden dolayı çatlama olması muhtemeldir. Yavaş soğutma olayında ise herhangi bir sıcaklıkta denge durumuna malzemenin yeterince yavaş soğutma oranlarında ulaşılır. Denge konumunda ise, artık numune en düşük sıcaklığa kadar gelmiştir ve numune üzerinde azaltılmış bir kusur konsantrasyonuna ulaşmıştır.

Termal proseslerde pasif bir atmosferin olması gereklidir. Ancak bunu pratikte her zaman için gerçekleştirme imkânı yoktur. Çünkü vakum esnasında oksitlerin ısı davranışlarından dolayı oksijen boşluk merkezleri oluşacaktır ve bu tür olaylar sonucunda oksijen kayıplarına neden olacaktır. Daha mükemmel bir kristal hazırlamak için, iki türlü yavaş soğutma işlemi uygulanır. Bu anneal işlemleri; izotermal anneal işlemi ve periyodik anneal işlemidir. Periyodik anneal prosesi, izotermal anneal prosesinden daha çok etkili olan bir anneal prosesidir (Caferov 1998; Durlu 1996).

2.5. X-Işınları Kırınımı (XRD)

GaTe yarıiletkeni faz dönüşüme sahip olan bir bileşiktir. Başka bir deyişle aynı yöntemle büyütülse bile bazen monoklinik bazen de hegzagonal faza sahip olabilmektedir. Bu yüzden büyütülen GaTe yarıiletkenin yapısal olarak karakterize edilmesi önem arz etmektedir. Bu bağlamda GaTe yarıiletkenin yer aldığı çalışmalar incelendiğinde büyük bir çoğunluğunda yapısal özelliklerinin incelendiği görülmektedir.

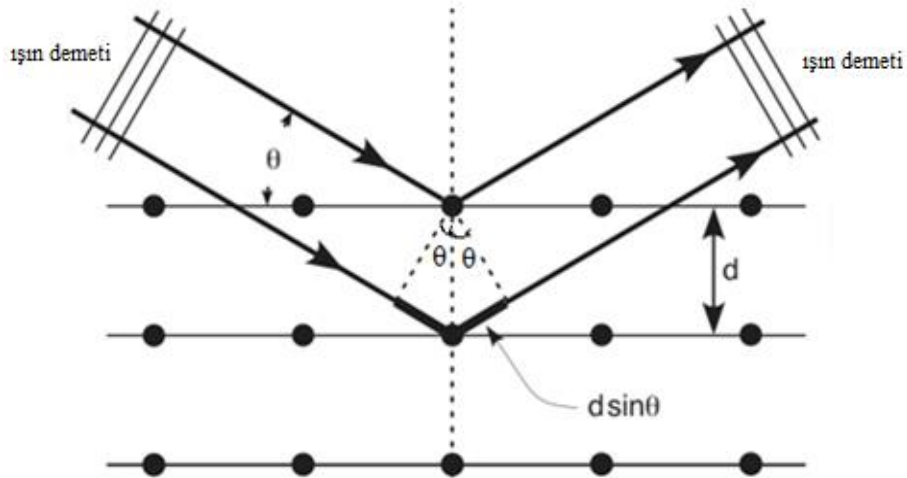
X-ışınları kırınımı (XRD), ince filmlerde ve çok tabakalı yapılarda fazların ve yapısal özelliklerin belirlenmesinde kullanılan tahribatsız, mükemmel bir tekniktir. Maliyet olarak ucuz ve kullanımı daha kolaydır. Bugün birçok teknolojik uygulamada çok tabakalı yapılar tercih edilmekte dolayısıyla bu yapıların yapısal karakterizasyonu önem arz etmektedir. XRD özellikle çok tabakalı yapılarda tabakaların yüzeyleri arasındaki difüzyonları belirlemede güçlü bir tekniktir. XRD tekniğinin önemli bir diğer avantajı kristal yapılarda daha derindeki tabakalara inmesi ve daha geniş alanları taramasıdır. Bu özelliklerinden dolayı özellikle külçe kristallerde XRD cihazının kullanılması daha fazla bilgi sağlamaktadır.

XRD tekniği kullanılarak ince filmlerin ve çok tabakalı yapıların kalınlık ölçümü yapılabilmektedir. Burada kalınlık tayini yapılırken yapıya herhangi bir tahribat verilmemesi XRD tekniğinin önemli bir avantajı olarak görülmektedir. XRD tekniğinin diğer önemli bir avantajı ve kullanım uygulaması kristallerin sahip olduğu yönelimlerin belirlenebiliyor olması gösterilmektedir. Bu teknik kullanılarak kristalin hangi yönelimlerde büyüdüğü kaç yönelimin olduğu hakkında doğru bilgiler elde edilebilmektedir.

XRD tekniğinin diğer bir kullanımı ve avantajı olarak kristal yapının tanecik büyüklüğünün hesaplanabilir olmasıdır. Aslında TEM ve SEM gibi teknikler kullanılarak da tanecik yapıları elde edilebilmektedir. Fakat XRD daha duyarlı sonuçlar sağlamaktadır. Şayet bir çalışmada tanecik büyüklüğü önemli bir parametre olarak ele

alınmışsa eğer XRD tekniğinin kullanılması tercih edilmelidir. Ayrıca kristalin örgü sabitlerinin belirlenmesinde de X-ışınlarından faydalanmaktadır.

Bugün kristallerde kırınım olayı kristalin doğrultuları ve mükemmelliği ile ilgili bilgiler sağlamak amacıyla yapılmaktadır. X-ışını kırınımında, inkoherent bir oluşum her zaman söz konusudur. Bunun temel nedeni Compton olayıdır. X-ışınları hem dalga hem tanecik özelliği göstermektedir. Başka bir deyişle çift karakterli bir yapıya sahiptir. X-ışınlarının kristal yapılarda kullanılması kullanımı İngiliz fizikçiler W.L. Bragg ve W.H. Bragg (1913) tarafından yapılan çalışmalar neticesinde mümkün olmuştur. Bu yüzden x-ışınları kırınımının diğer bir adı da Bragg kırınımı olarak geçmektedir. Bragg kırınımının özü şu şekildedir; bir kristali, periyodik aralıklarla sıralanmış özdeş ve birbirine paralel düzlemler şeklinde düşünüp bu düzlemlere belirli bir θ açısıyla yaklaşan bir elektromanyetik dalga olduğu varsayalım. Bu dalga kristale çarptığında her atomdan ışınların bir bölümü saçılacak, saçılan dalgaların aynı fazda olduğu doğrultularda kırınım maksimumları gözlenecektir. İlk düzlemden yansıyan dalgaları göz önüne alındığına, saçılan dalgaların aynı fazda olduğu doğru bilinen yansıma kuralıyla verilir. Sonra; aralarında d uzaklığı olan ardışık iki düzlemdeki atomlardan saçılan dalgalar göz önüne alındığında, ardışık iki düzlemde kırınımına uğrayan dalgaların aynı fazda olabilmesi için yol farkı dalga boyunun (λ) tam katları olmalıdır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Bragg kırınımının şekilsel gösterimi

Yol farkının dalga boylarının tam katı olması halinde Bragg ve Bragg (1913) tarafından

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.2)$$

eşitlik ile verilmiştir. Bu eşitlik Bragg kanunu olarak bilinmektedir. Burada, λ ışığın dalga boyunu, $n=1, 2, 3$, kırınım derecesini, d tabakalar ya da düzlemler arasındaki mesafeyi ve θ ise saçılma açısını ifade etmektedir. Bu açı gelen ve saçılan ışın demetinin kristalin yüzeyi ile yaptığı açıdır. Bu denklem incelendiğinde görünür ışığın neden kullanılmayacağı aşikâr bir şekilde görülmektedir. Çünkü görünür ışığın dalga boyu atomlar arası mesafeye göre çok büyük iken x-ışınlarının dalga boyu atomlar arası mesafe ile aynı büyüklüktedir.

Kristallerin yapı analizinde kullanılan x-ışını yöntemleri genel olarak üçe ayrılmaktadır. Bunlar; Laue tekniği, toz tekniği ve döner kristal tekniği olarak isimlendirilmektedir. Laue tekniğinde, kristal malzeme sabit tutulmakta ve kristalin yüzeyine geniş bir aralığa sahip x-ışınları gönderilmektedir. Bu teknik kullanılarak gelen x-ışınlarının açısı ve tabakaların arasındaki uzaklık ile girişim sağlanıyor ise o dalga boyunda maksimum pikler meydana gelmektedir. Bu yüzden Laue tekniği ile elde edilen spektrumlar genellikle benekli olurlar. Toz tekniğinde ise, tek renkli x-ışını toz haline getirilmiş numune üzerine gönderilerek yapılmaktadır. Bu yöntemde sabit olan ışın demetidir. Bu ışın demeti numune üzerine düşürüldüğünde uygun açı denk geldiğinde maksimum yansıma oluşacaktır. Bu tekniğin önemli bir avantajı polikristal numuneler söz konusu olduğunda geçerlidir. Çünkü polikristaller rasgele bir yönelime sahip olabilmekte bundan dolayı kırınım açısını yakalamak Laue tekniğinde zor olabilmektedir. Diğer bir x-ışını yöntemi de döner kristal tekniğidir. Bu yöntemde te tek renkli x-ışını kullanılmakta dolayısıyla dalga boyu sabit olmaktadır. Burada kristal malzeme sabit bir eksen etrafında döndürülürken üzerine tek renkli x-ışınları gönderilmektedir. Bu şekilde belirli bir tabakadan ya da düzlemden maksimum yansıma yakalanıncaya kadar değiştirilir. Maksimum pikin elde edildiği noktada açı ve dalga boyu bilindiğinden denklem (2.2) kullanılarak düzlemler arası mesafe tayin edilebilir.

XRD tekniğinde, kristal malzemeye herhangi bir temas olmadığından ve malzeme ön hazırlama işlemine tabi tutulmadığından, kristal malzemedeki bir bozulma olması pek olası değildir. Bu XRD tekniğinin kullanımındaki önemli bir avantajı olarak görülmektedir. Ayrıca bu sayede kristal malzemenin doğal halinin incelenmesi mümkün olmaktadır. XRD yönteminde önemli bir kullanım alanı da yüksek atom numaralı elementlerin daha duyarlı bir şekilde yapı karakterizasyonlarının yapılmasına imkân sağlamasıdır. Çünkü XRD tekniğinde kırınım şiddetleri daha büyük olmaktadır. Şekil 2.3’de bu ikili bileşiklerin XRD ölçümlerinin alındığı cihaz verilmiştir.



Şekil 2.3. XRD ölçüm cihazı (Bruker D2 Phaser)

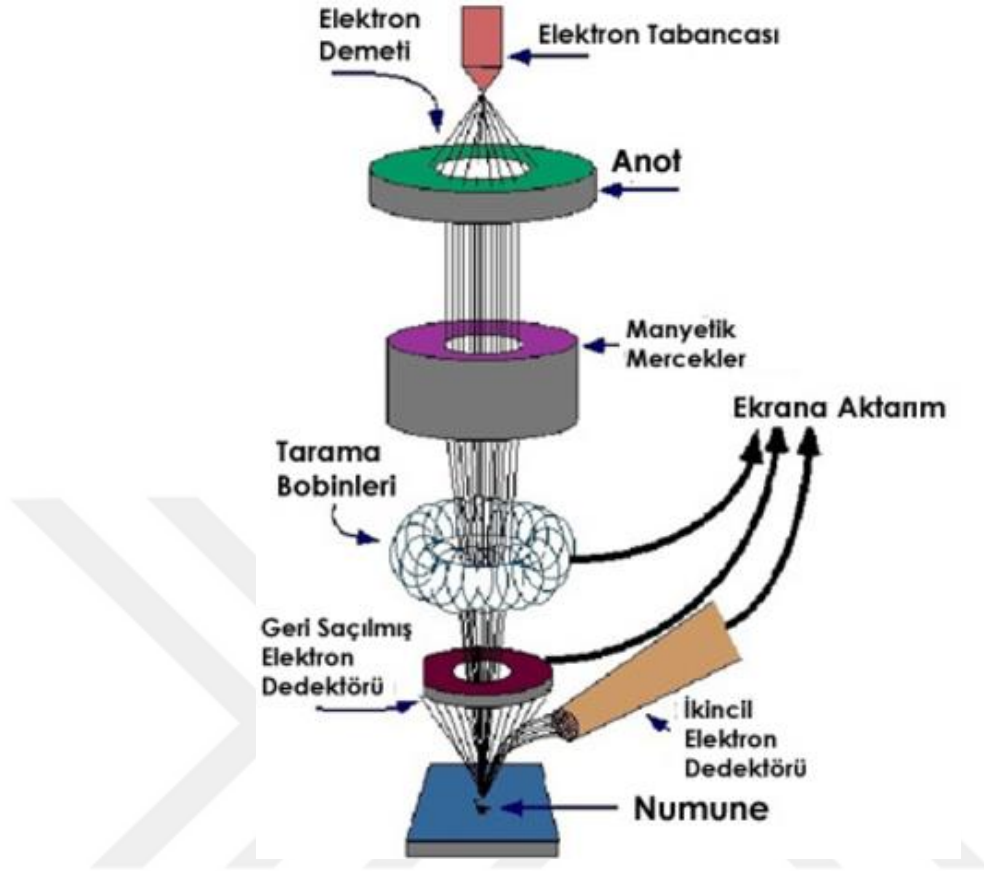
2.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Kristal malzemelerin morfolojik analizlerinde en çok kullanılan yöntemler arasında SEM, TEM ve HDTEM gibi teknikler kullanılmaktadır. Özellikle SEM cihazı çok fazla bir kullanıma sahiptir. Taramalı elektron mikroskobu kullanılarak kristal bir malzemenin büyütülmüş halini görmek mümkün olabilmektedir. Bu görüntünün elde

edilmesinde elektron demetinden faydalanılmaktadır. Genel olarak bilinen üç çeşit SEM bulunmaktadır. Bunlar; iletimli, alan yayınlamalı ve taramalı olarak adlandırılmaktadır.

Bir taramalı elektron mikroskobu; lens sistemi, tarayıcı bobinler, elektron tabancası, katot ışını tüpü ve bir elektron toplayıcısından meydana gelmektedir. Birçok kristal malzeme için elektronların enerjisi genel olarak 10–30 keV civarında iken yalıtkan malzemeler için bu değer daha düşük olmaktadır. Burada önemli olan bir husus, elektronların kullanılması sonucu daha geniş büyümeler ve alan derinliğinin daha yüksek olması optik mikroskoplara göre avantaj sağlamaktadır. Başka bir deyişle taramalı elektron mikroskobunun çözünürlüğü, optik mikroskoplara göre çok daha fazla olmaktadır.

SEM tekniğinin yarıiletken malzemelerde en yaygın kullanımı bir devredeki aygıtların yüzeylerinin görüntülenmesi, devre elemanlarının hata analizleri, eklem derinlikleri, MOSFET kanal uzunluklarının belirlenmesi gibi birçok ölçümde kullanılabilir. Ayrıca büyütülen yarıiletkenlerin morfolojik analizleri, tanecik büyüklükleri gibi ölçümler elde etmek için de yaygın bir kullanımı mevcuttur.



Şekil 2.4. Taramalı elektron mikroskobunun çalışma prensibi (Türkyay 2017)

SEM tekniğinde elde edilen görüntü, malzemenin odaklanmış bir elektron demeti ile taranması ve ikincil ve/veya geri saçılmış olan elektronların dedekte edilmesiyle elde edilmektedir. Şekil 2.4 taramalı elektron mikroskobunun çalışma prensibini göstermektedir. Bu teknikte öncelikle elektronlar demet bölgesinin üzerine gönderilmekte ve bundan sonra burada dedekte edilmektedir. Burada SEM görüntüsünü veren ikincil elektronlardır. Bazı durumlarda saçılmış olan elektronlar da görüntü vermektedir. Eğer kristal malzemenin yüzeyi tamamen homojen ise hiçbir görüntü oluşmayacaktır. Çünkü burada saçılan bir elektron demetinden söz edilemez. Bu SEM görüntüsünün kontrastı olarak bilinmektedir. SEM görüntüsünün kontrastı birçok faktöre bağlı olarak değişmektedir. Örneğin kristal malzemenin yüzeyi farklı atomlardan oluşmuş ise (bileşik yarıiletkenler hepsi bu sınıfa girmektedir) geri saçılan elektronlar sayesinde bir kontrast elde edilir. SEM görüntüsünün kontrastı atom numarası ile doğru orantılı olarak değişim göstermektedir. SEM görüntüsünün

kontrastını etkileyen başka bir faktör ise yüzey şartları ve bölgesel elektrik alanın olup olmamasıdır.

Bütünleşik devre elemanları incelenirken yüzey yüklerini azaltmak veya mümkün ise ortadan kaldırmak çok önemlidir (Faifer *et al.* 2006). Başka bir deyişle iyi bir SEM görüntüsü alabilmek için yüzeyin iletkenliğe sahip olması gerekmektedir. Yalıtkan malzemelerin SEM görüntüsü bundan dolayı alınamamaktadır.

Taramalı elektron mikroskobu kullanılarak bir nm'den daha yüksek çözünürlük elde edilebilmektedir. Tipik SEM ölçüm cihazları (Şekil 2.5) yüksek vakum gerektiren, kuru ve iletken yüzeyleri inceleme imkânı sağlamaktadır. Bu durumların dışında başka ölçüm teknikleri (örneğin AFM gibi) bulunmaktadır. Tipik SEM cihazlarının avantajlarına bakıldığında; çözme gücü, büyütme oranı ve çözme derinliği söylenebilir. Dezavantajlarına bakıldığında ise vakumlu bir ortam gerektirmesi, numunenin iletkenlik göstermesi ve cihazın bakım masraflarının yüksek olması gelmektedir.



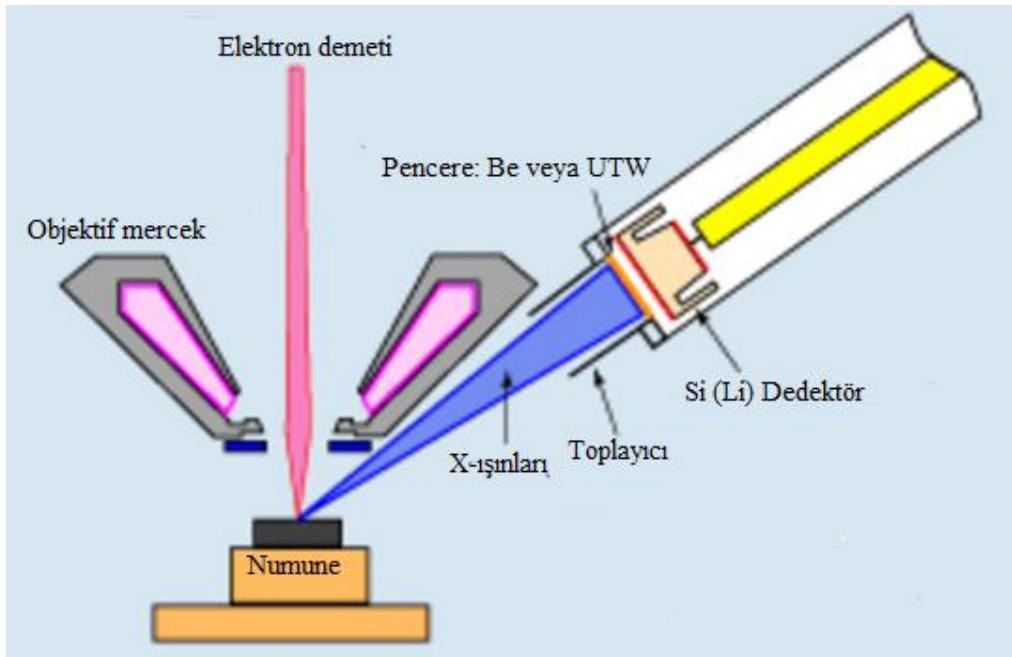
7

Şekil 2.5. SEM ölçüm cihazı (Quanta Feg 250)

2.7. Enerji Dağılımlı X-Işını Spektrometresi (EDX)

Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX), belirli bir numunede hangi elementlerin ve kimyasal bileşiklerin olduğunu ortaya çıkarmada ideal, güçlü ve kullanımı kolay bir tekniktir. Temelde EDX, bir elektron mikroskopunda yüksek enerjili elektronlarla bir numuneyi bombaladıktan sonra her bir element tarafından üretilen karakteristik x-ışınlarını dedekte etmeyi içermektedir. X-ışını haritalama olarak bilinen bir işlemi kullanarak, daha sonra numunenin temel bileşimi hakkında bilgi, numunenin büyütülmüş görüntüsünün üzerine bindirilebilir. EDX cihazları birçok SEM ve TEM ölçüm cihazlarında bulunmaktadır. Şekil 2.6'da EDX tekniğinin çalışma prensibi verilmiştir.

EDX tekniğini özellikle yararlı kılan şey, bir numunede bulunan her elementin yaydığı X-ışını miktarının, o element konsantrasyonu ile doğrudan bir ilişki (kütle veya atomik fraksiyon) olmasıdır. Bu nedenle, X-ışını ölçümlerini nihai bir X-ışını spektrumuna dönüştürmek ve bir numunedeki mevcut çeşitli kimyasalların yoğunluklarını değerlendirmek mümkündür.



Şekil 2.6. Enerji dağılımlı x-ışınları spektroskopinin çalışma prensibi

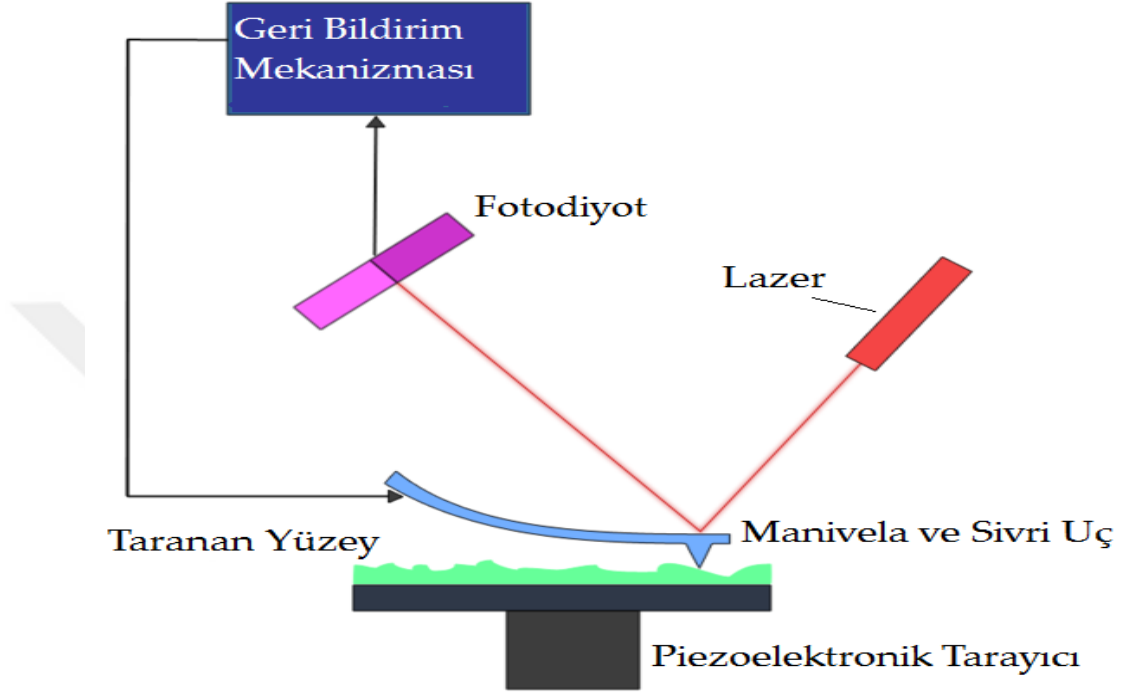
Birçok disiplin (fiziksel ve kimyasal bilimler) elektronik ve hatta adli tıp araştırmaları da dâhil olmak üzere EDX tekniğini düzenli olarak kullanmaktadır. Ancak şüphesiz ki, EDX'den en fazla fayda sağlayan disiplin malzeme bilimidir. Burada; artıkların tespit edilmesi veya bilinmeyen elementlerin belirlenmesi dâhil olmak üzere, kalite kontrol taraması, doğrulama ve sertifikasyon gibi materyalleri tanımlamak ve değerlendirmek için kullanılabilir. Pratikte, EDX tekniğinin uygulama yelpazesi, alaşım tasarımı, tarihsel belgelerdeki pigmentleri analiz etme, kirlilik partiküllerinin çevresel araştırmalarını yapma, sigorta taleplerini araştırma ve inşaatta asbest seviyelerini izleme gibi birçok alanı kapsamaktadır.

2.8. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), Binnig *et al.* (1986) tarafından üretilmiştir. Adında mikroskop kelimesi geçmekte ama aslında bilinen mikroskoplardan farklı bir işleve sahiptir. Bir mikroskop kullanıldığında cismin kendisi görülürken AFM tekniği kullanıldığında cismin resmi/görüntüsü görülmektedir. Atomik kuvvet mikroskobunun ortaya çıkmasındaki temel etken yalıtkan malzemelerin yüzey morfolojisini incelemeye imkân veren bir aletin olmamasından kaynaklanmamaktadır. AFM tekniğinden önce Binnig *et al.* (1982) tarafından taramalı tünelleme mikroskobu (STM) üretilmiştir. Taramalı tünelleme mikroskobu sayesinde pek çok iletken malzemenin yüzeyi atomik ölçekte incelenebilmektedir. STM her ne kadar iletken malzemelerin yüzey morfolojisini atomik ölçekte inceleme imkânı verse de, yalıtkan malzemelerin de yüzeylerinin incelenebilmesi için yeni taramalı uç mikroskoplarının geliştirilmesi gerektiğinden AFM üretilmiştir.

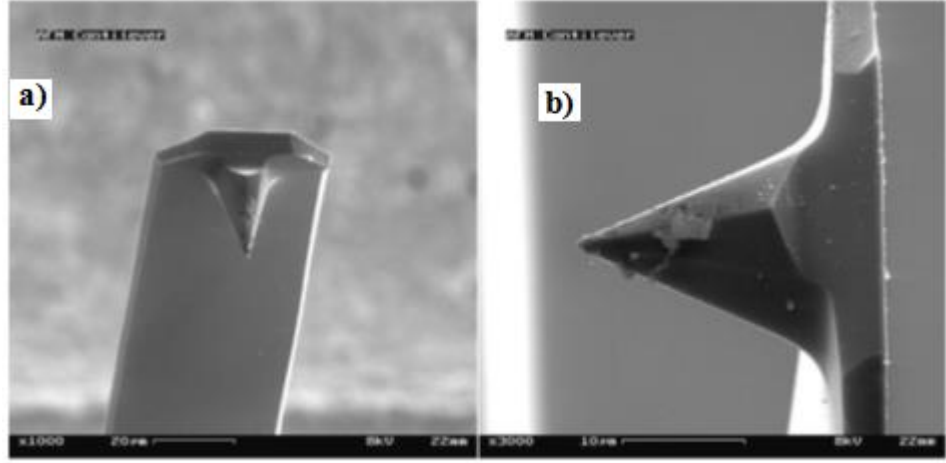
AFM tekniğinin ortaya çıkmasıyla birlikte hem iletken hem de yalıtkan pek çok numunenin yüzeyinin incelenme fırsatı doğmuştur. AFM tekniğinin çalışma prensibi uç ile numune/malzeme yüzeyi arasındaki atomlar arası etkileşim kuvvetlerine dayanmaktadır. AFM numune yüzeyini algılama yöntemi bakımından STM tekniğinden çok farklıdır. AFM tipi ile numune arasında akım değil, elektrostatik, van der Waals,

sürtünme ve manyetik kuvvet gibi güçler söz konusudur (Uslu 2017). Şekil 2.7’de tipik bir AFM cihazının çalışma prensibi verilmiştir.



Şekil 2.7. AFM cihazının çalışma prensibi (Yükseltürk 2008)

Şekil 2.7 incelendiğinde, manivelanın sonuna sabitlenmiş olan uç yardımıyla numune yüzeyi taranmaktadır. Yapılan bu tarama esnasında uç ile numune yüzeyi arasında oluşan atomik etkileşimler manivelayı saptırır. Meydana gelen bu sapma bir sensör kullanılarak kaydedilir ve böylece numune yüzeyinin haritası çıkartılmış olur. Bu harita sayesinde numune yüzeyindeki pürüzlülüğü, kusur yoğunluğu ve kusur tipleri ile ilgili bilgi edinilebilmektedir.



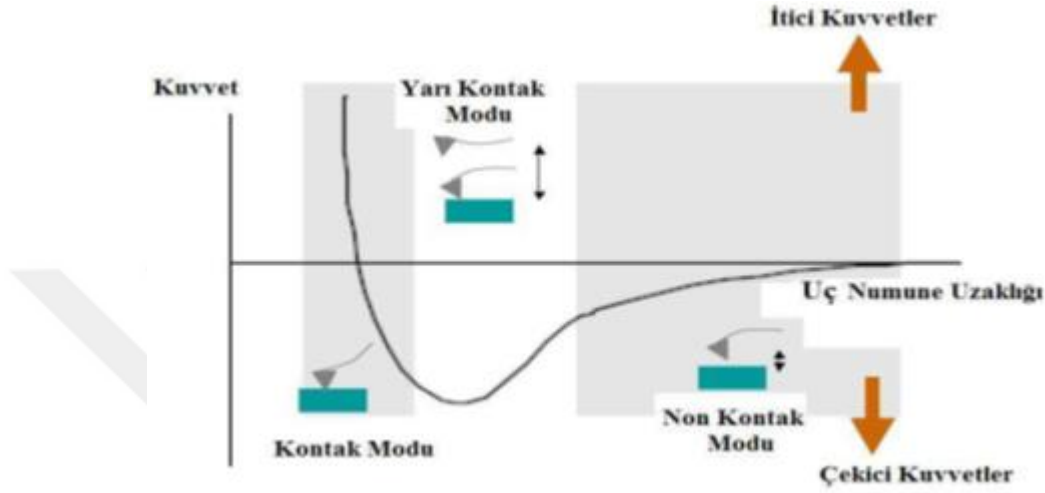
Şekil 2.8. a) 1000 ve b) 3000 büyütmede taramalı elektron mikroskobuyla çekilmiş AFM ucu (Alp 2011)

Şekil 2.8’de manivelanın ve ucunun taramalı elektron mikroskobu kullanılarak çekilmiş fotoğrafı bulunmaktadır (Yükseltürk 2008). Bir AFM ucu, 100-200 μm uzunluğunda bir manivelanın ucuna sabitlenmiş 2-3 mikron uzunluğunda ve çapı da yaklaşık olarak 20 nm’den daha küçüktür. Bir AFM cihazının performansı iki şeye bağlıdır. Bunlar; manivela ve ucun (tip) fiziksel özellikleridir (Uslu 2017). Çok hassas bir AFM için düşük yay sabiti olan denge çubuklarının (manivela) tercih edilmesi gerekir. Genel olarak manivelalar, silikon, silikon nitrat ve silikon oksitten yapılmaktadır. Manivelaların üretiminde fotolitografik teknikler kullanılmaktadır (Yükseltürk 2008).

AFM ölçümleri kontak, non-kontak ve yarı kontak olmak üzere üç ayrı modda yapılmaktadır. Taramanın hangi modda yapılacağı numune yüzeyi ile uç arasındaki mesafeye bağlıdır. AFM ucu numune yüzeyine yaklaştığı zaman numune yüzeyi ile AFM ucu arasında bir etkileşim kuvveti oluşmaktadır.

Şekil 2.9 incelendiğinde AFM ucu sağ tarafa doğru gittikçe etkileşim kuvvetinin sıfıra gittiği görülmektedir. Uç numune yüzeyine doğru yaklaştığında çekici van der-Waals kuvvetinin etkisiyle yavaş yavaş numune yüzeye doğru çekilmektedir. Uç-numune yüzeyi mesafesinin azalmasıyla bu çekim, uç ve numune yüzeylerindeki atomların elektron bulutlarının birbirlerini elektrostatik olarak itmeye başladığı uzaklığa kadar

artmaktadır. Uzaklık azaldıkça itici kuvvet artacak ve net kuvvet bağ uzunluğu düzeyindeki bir mesafede sıfır olacaktır. Numune yüzeyi ile AFM ucu kontak etmeye başlar ve bundan sonra net kuvvet itici olur (Alp 2011).



Şekil 2.9. AFM ucu ve numune yüzeyi arasındaki kuvvetlerin mesafeye bağlı değişimi (Alp 2011)

Kontak modda uç ile numune yüzeyi arasındaki uzaklık birkaç Å mesafesindedir. Numune yüzeyi ve uç kontak halinde olduklarından, itici kuvvetlerle birbirlerini iterler. Numune yüzeyinin topolojisi iki şekilde elde edilmektedir. Bunlar; ya denge çubuğunun titreşimleriyle veya denge çubuğu sabitlenerek yüzeyin yükseklik farkından yararlanarak elde edilebilmektedir. Non-kontak (kontaksız) modda ise uç-numune yüzeyi uzaklığı yaklaşık 50-150 Å mertebesindedir. Bu uzaklıkta oluşan kuvvetler zayıf çekici kuvvetlerdir. Bu zayıf çekici kuvvetler kontak moddaki kuvvetlerden çok daha zayıf olmaktadır. Bu kuvvetler yükseklik değişimine karşı duyarlılıkları daha düşüktür. Bundan dolayı bu modda yüzey tipografisi elde edilirken farklı bir sistem kullanılmaktadır. Cantilever, rezonans frekansına yakın bir frekansta titreştirilir. Uç numune yüzeyine yaklaştıkça genlikteki değişimler saptanmaktadır. Non-kontak ölçümler birçok faktörden etkilenmektedir. Bunların başında harici titreşimler, cantilever kalitesi ve ucun kalitesi gelmektedir. Diğer bir kontak modu ise yarı-kontak moddur. Bu modda cantilever kendi rezonans frekansında titreştirilmektedir. Uç her bir salınımda numune yüzeyi ile anlık fiziksel temas sağlar. Numuneye yaklaşma

durumunda salınımın şiddetinde meydana gelen değişim esas alınır (Alp 2011). Şekil 2.10'da AFM ölçüm cihazı verilmiştir.



Şekil 2.10. AFM ölçüm cihazı (Hitachi 5100N)

Atomik kuvvet mikroskobu ile taramalı tünelleme mikroskobu birbirine benzemekle birlikte birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur. AFM tekniğinin STM tekniğine göre avantajları, AFM tekniğinde görüntüleme kuvvete bağlı olduğundan hem iletken hem de yalıtkan numunelerde kullanılabilenken STM tekniğinde görüntüleme işlemi akım ile olduğundan sadece iletken numunelerde kullanılmaktadır. Bir diğer avantajı ise AFM taranan numunenin hem üç boyutlu görüntüsünü hem de iki boyutlu görüntüsünü veriyor iken STM tekniğinde ise numunenin sadece iki boyutlu görüntüsünü vermektedir. Üçüncü bir avantaj AFM cihazlarının maliyeti STM cihazlarının maliyetine göre daha ekonomiktir. Dördüncü olarak AFM tekniği, açık havada, suda ve vakum ortamında çalışmakta iken STM tekniği sadece vakumlu ortamda çalışmaktadır. Bu avantajları olmasına rağmen bazı dezavantajları da bulunmaktadır. İlk olarak STM cihazı AFM cihazına göre çok daha hızlı çalışmaktadır. İkinci bir dezavantaj görüntü büyüklüğü küçüktür. Üçüncü olarak AFM cihazının dikey menzili kısa olduğundan dolayı çok yüksek numune yüzeylerini tarayamamaktadır. Son olarak AFM cihazının çözünürlüğü daha düşüktür.

AFM cihazının uygulama alanlarına bakıldığında, malzeme yüzeylerinin topografik görüntülerini oluşturma, bazı malzemelerin ortamda olup olmadığını anlama, malzeme yüzeyindeki atomların yerlerini değiştirme ve ilgilenilen malzemenin karakteristik özellikleri hakkında bilgi edinmede kullanılmaktadır.

2.9. Kristallerin Optik Özellikleri

Bir kristal malzeme üzerine ışık düşürüldüğünde, kristal malzemenin içinde birçok optik olaylar meydana gelmektedir. Bu olaylar; yansıma, kırılma, soğurma, lüminesans, saçılma ve geçirgenlik olarak adlandırılmaktadır. Bu olayların meydana gelmesinde temel etken birbirinden farklı elektronik geçişler yatmaktadır. Yarıiletkenlerdeki elektronik geçişlerden faydalanarak birçok karakteristik özellik hakkında bilgi elde edilebilmektedir.

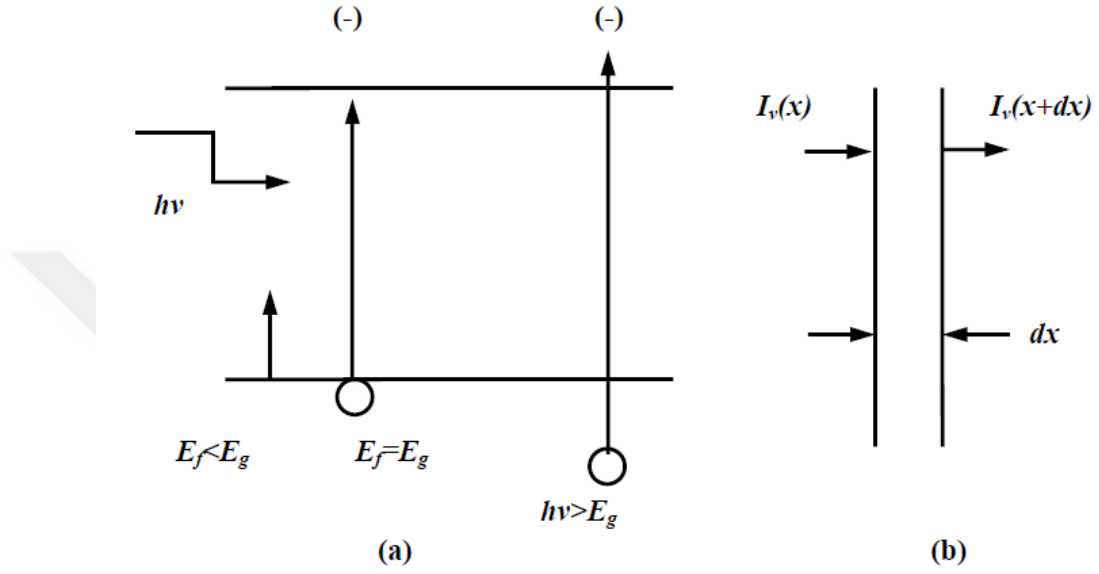
Bu çalışma kapsamında büyütülen GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin optiksel özelliklerini belirlemek amacıyla, ilgili kristallerin soğurma ölçümleri alınmış ve bu ölçümlerden faydalanarak yasak enerji aralığı hesaplanmıştır.

2.9.1. Soğurma katsayısı (α) ve Beer-Lambert yasası

Katıhal fiziğinde soğurma ölçümlerinin yapılması, kusur ve katkıların titreşim özellikleri ve kristalin saf haldeki uyarılması gibi birçok özellik hakkında bilgi verdiğinden önemli bir yere sahiptir. Yarıiletken malzemenin fonon enerjilerinin belirlenmesi, kusur seviyelerinin tespiti, eksitonların varlığı, bağlanma enerjileri ve yarıiletkenin bant yapısı genel olarak soğurma deneyleri vasıtasıyla elde edilmektedir. Soğurma ölçümleri dışında birçok analiz yöntemi daha mevcut olmasına rağmen soğurma ölçüm yönteminin uygulamada bazı avantajları bulunmaktadır. Bu avantaj soğurma ölçümü alınan malzemenin başka deneysel ölçümlerde de kullanılabilir olmasıdır.

Bir yarıiletken malzeme üzerine bir ışık demeti düşürüldüğü zaman, ışık demetinin fotonları yarıiletken tarafından ya soğurulacak ya da yarıiletkenden geçeceklerdir. Gelen

ışık demetinin enerjisine bağlı olarak çeşitli soğurma işlemleri meydana gelmektedir. Şekil 2.11'de gelen fotunun farklı enerji değerleri için çeşitli soğurma işlemleri verilmiştir.



Şekil 2.11. a) Yarıiletkente elektron-boşluk çiftinin oluşumu b) dx kalınlı bir numune için soğurmanın gerçekleşmesi (Tekle 2012)

dx mesafesi boyunca birim zamanda soğrulan enerji miktarı,

$$\alpha I_v(x) dx \quad (2.3)$$

biçiminde yazılır. Burada α soğurma katsayısı olarak adlandırılmaktadır. Birimi cm^{-1} olup birim uzunlukta soğrulan foton sayısını temsil etmektedir. Bu tanıma göre denklem (2.3)'ü yeniden yazarsak;

$$I_v(x + dx) - I_v(x) = \frac{dI_v(x)}{dx} dx = -\alpha I_v(x) dx \quad (2.4)$$

biçiminde de ifade edilebilir. Şayet $x=0$ 'da $I_v(x) = I_{v0}$ olarak yazarsak, denklem (2.4) eşitliği çözümlerse,

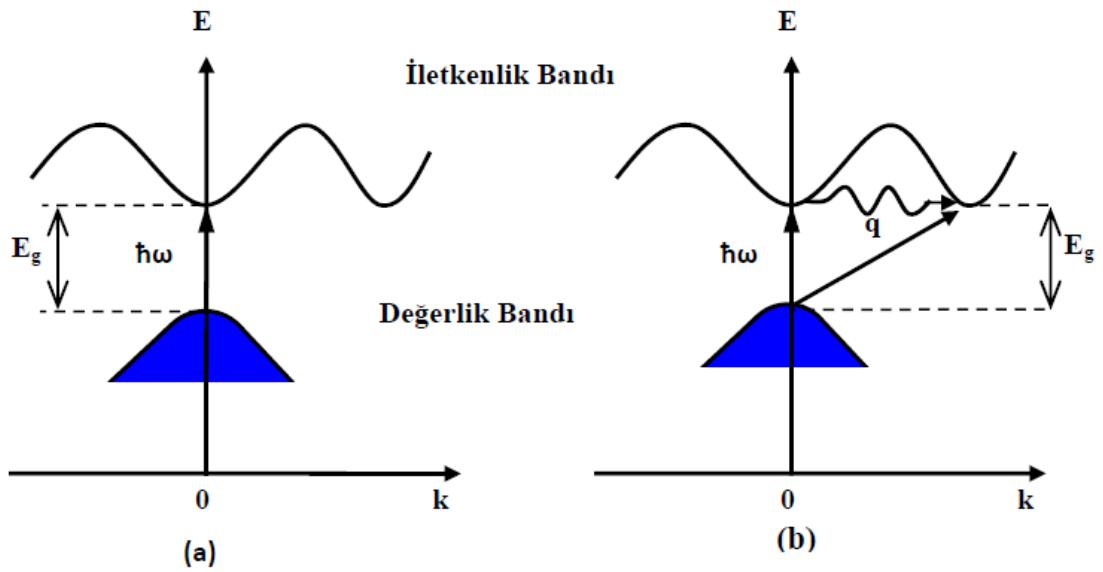
$$I_v(x) = I_{v0}e^{-\alpha x} \quad (2.5)$$

elde edilir. Denklem (2.5) çözülerek α soğurma katsayısı hesaplanabilir. Burada soğurma katsayısı tek ışın yayan bir spektrometre kullanılarak kolaylıkla elde edilebilir.

2.9.2. Enerji bantları arası optiksel geçişler

Yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığına eşit enerjiye sahip olan bir foton yarıiletken malzeme üzerine düşürüldüğünde, valans bandındaki bir elektronu iletkenlik bandına geçmektedir. Bu olay temel soğurma olarak adlandırılır. Valans bandından iletkenlik bandına geçen elektron, fonon içeriyorsa indirekt (dolaylı) geçiş, fonon içermiyorsa direkt (doğrudan) geçiş yapmaktadır.

İletkenlik bandındaki en düşük enerji seviyesinin dalga vektörü (k_{\min}) valans bandındaki maksimum enerji seviyesinin dalga vektörü (k_{\max}) ile aynı değere sahipse direkt geçişler değil ise indirekt geçişler olur. Direkt geçişlerde momentum korunurken indirekt geçişlerde momentum korunmamaktadır. Direkt ve indirekt geçişler şekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.12. a) Direkt bant geçişi b) İndirekt bant geçişi (Tekle 2012)

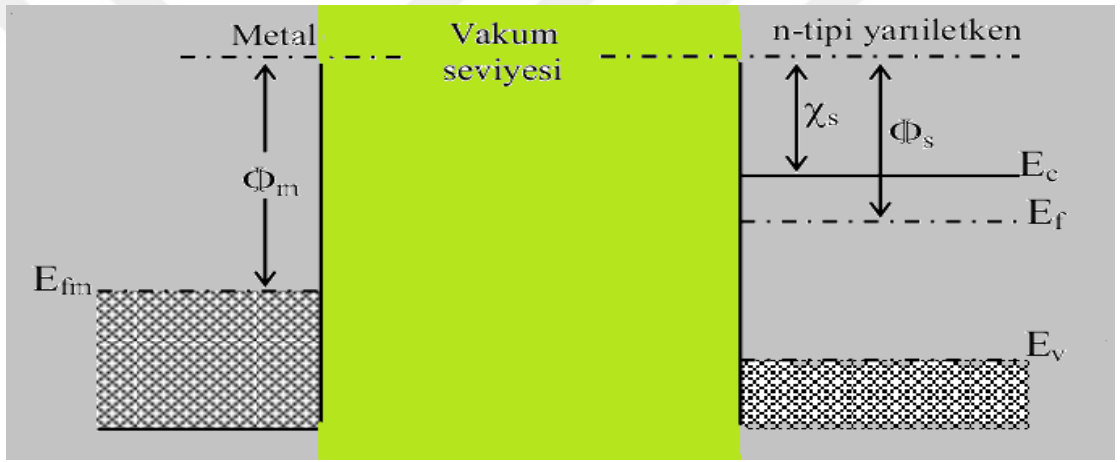
2.10. Metal/Yarıiletken Kontaklar

Birinci ve ikinci dünya savaşından sonra metal-yarıiletken kontaklar üzerine yapılan çalışmalar, tranzistörlerin icat edilmesi sonucu bir yoğunluk kazanmış ve böylelikle azınlık taşıyıcılar ile çalışan nokta-kontaklar üzerine dikkatler çevrilmiştir. 1960'lı yıllarda geliştirilmiş olan yüksek vakuma sahip sistemler kullanılarak yarıiletken malzeme üzerine metal filmlerin buharlaştırması yoluyla elde edilen kontak yapıları, nokta-kontak yapılarından çok daha kararlı bir hale sahip olması ve tekrar üretilebilirliklerinin yüksekliği gibi nedenlerden dolayı ilgi odağı haline gelmiştir. Bu yıllardan 1980'lerin ortalarına kadar metal-yarıiletken kontaklar üzerinde yoğun araştırmalar yapılmış olmasına rağmen ilgi günümüze kadar hala devam etmiştir. Bu doğrultuda metal-yarıiletken ara yüzeylerinde ortaya çıkan akım iletim mekanizması, engel oluşumu ve dağılımının anlaşılmasında çalışmalar büyük bir hızla devam etmektedir.

Metal-yarıiletken kontaklar, bir metal ve bir yarıiletkenin atomik seviyede süreklilikle birleştirilmesi sonucu oluşturulan yapılardır. Bu kontaklarda metal olarak kalay (Sn), alüminyum (Al), altın (Au), indiyum (In), gümüş (Ag) gibi çeşitli metaller kullanılırken yarıiletken olarak n-tipi veya p-tipi yarıiletken numuneler kullanılmaktadır. Bu yüzden metal-yarıiletken kontakları, kullanılan yarıiletkenin tipine bağlı olarak; metal n-tipi yarıiletken kontak ve metal p-tipi yarıiletken kontak olmak üzere iki başlık altında çalışılmaktadır. Akım iletim mekanizmalarına göre kontaklar; doğrultucu kontaklar (Schottky kontak) ve omik kontaklar olmak üzere iki durumda çalışılmaktadır. Metalin iş fonksiyonu (Φ_m), yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) olmak üzere metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda $\Phi_m > \Phi_s$ ise doğrultucu kontak, $\Phi_m < \Phi_s$ ise omik kontak oluşur. Metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda ise $\Phi_m > \Phi_s$ için omik kontak, $\Phi_m < \Phi_s$ için ise doğrultucu kontak oluşur.

2.10.1. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontaklar

Bir metal ile yarıiletken birleştirildiğinde (kontakt yapıldığında), metal-yarıiletken ara yüzeyinde yüklerin ayrışmasından dolayı bir potansiyel engel oluşur. Doğrultucu kontak durumunda elektronlar bir yönde kolaylıkla hareket ederken elektronların diğer yönde hareketi potansiyel engel tarafından zorlaştırılır. Şekil 2.13, $\Phi_m > \Phi_s$ olduğu zaman iş fonksiyonu Φ_m olan metal ile iş fonksiyonu Φ_s olan n-tipi yarıiletken kristalin kontak yapılmadan önceki enerji bant diyagramlarını göstermektedir.

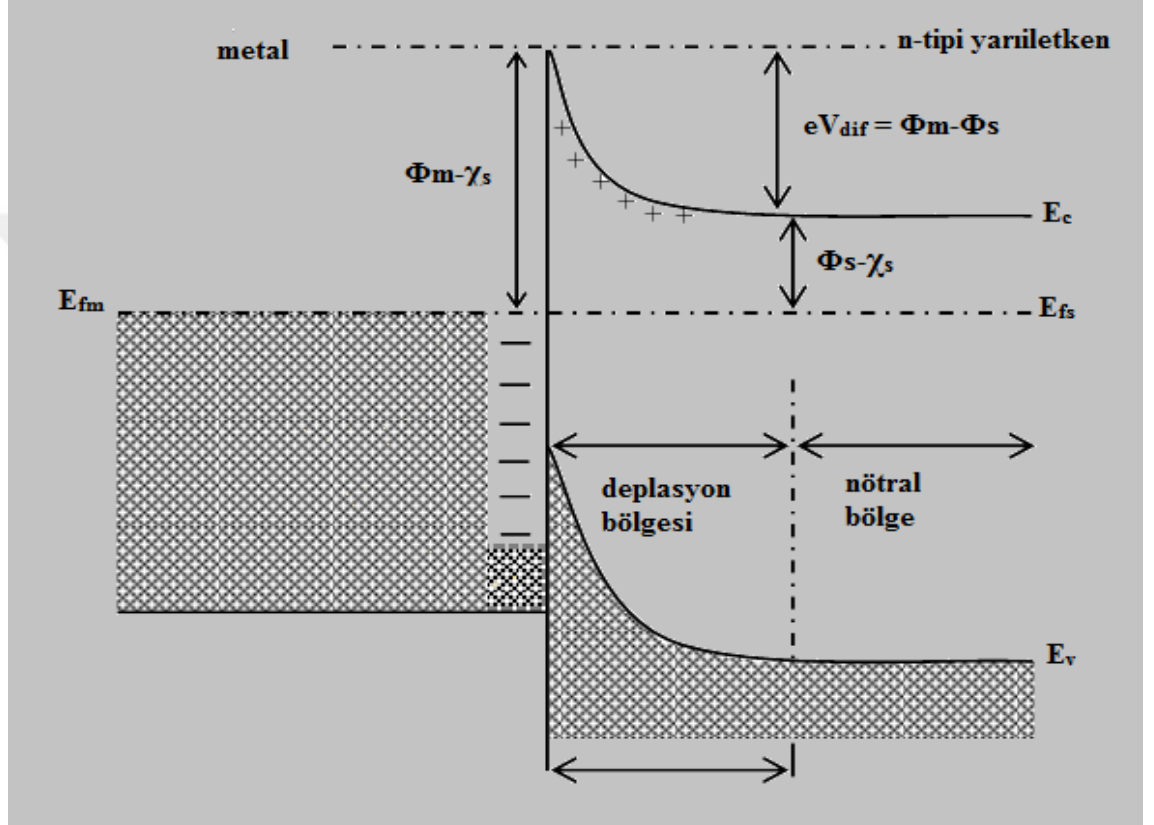


Şekil 2.13. Kontakt yapılmadan önce n-tipi yarıiletken ve metale ait enerji bant diyagramları

Burada iş fonksiyonu terimi, bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji miktarı olarak tanımlanır. Ayrıca elektron yatkınlığı (χ_s) terimi de yarıiletkenin iletkenlik bandının tabanındaki bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji miktarıdır.

Kontakt yapılmadan önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ miktarı kadar yukarıdadır. Kontakt yapıldıktan sonra termal denge sağlanıncaya kadar yarıiletkenden metale doğru bir elektron geçişi olmaktadır. Termal dengede Fermi enerji seviyeleri eşitlenir. Kontakt yapıldıktan sonra durum Şekil 2.14'de gibi olmaktadır. Yarıiletkenin enerji seviyeleri $\Phi_m - \Phi_s$ kadar düşmüştür. Kontakta oluşan

dipol tabakası sebebiyle oluşan eklem üzerinde bir potansiyel engel oluşmaktadır. Bu engelin yarıiletken tarafındaki yüksekliği $\Phi_m - \Phi_s$ kadar, metal tarafındaki yüksekliği ise $\Phi_m - \chi_s$ kadardır. Difüzyon potansiyeli türünden bu engelin yüksekliği; $eV_{dif} = \Phi_m - \Phi_s$ şeklinde verilebilir.

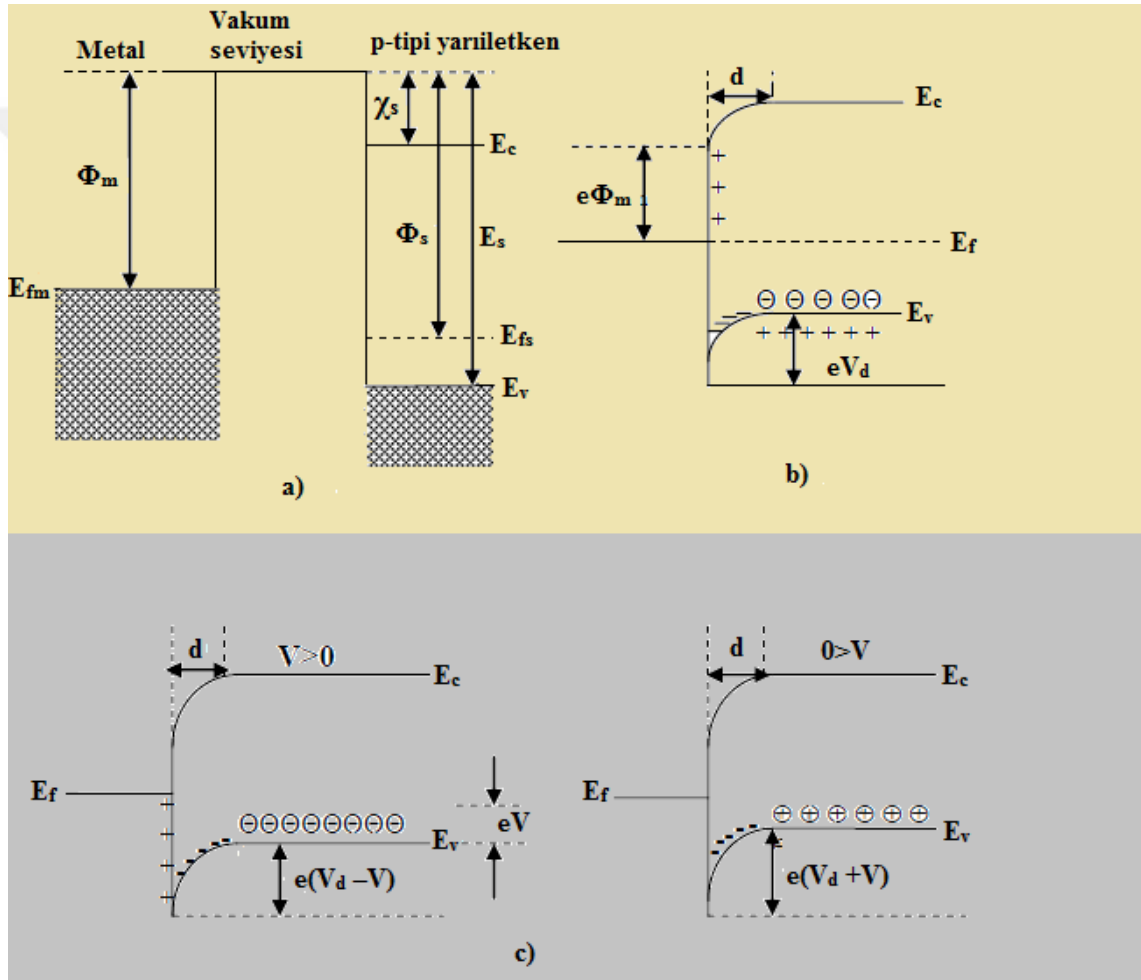


Şekil 2.14. Kontak yapıldıktan sonra termal denge halinde oluşan enerji-bant diyagramı

2.10.2. Metal/p-tipi yarıiletken Schottky kontak

Bir metal ve bir p-tipi yarıiletken göz önüne alalım. $\Phi_m < \Phi_s$ olsun. Oda sıcaklığında akseptörlerin hepsinin iyonize olduğunu varsayalım. Kontak yapılmadan önce, Şekil 2.15'de görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi metalin Fermi enerji seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar aşağıdadır. Kontak yapıldıktan sonra metalin ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri aynı seviyeye gelinceye kadar metalden yarıiletkenine doğru elektron akışı olur. Bunun sonucunda, yarıiletken tarafındaki boşluklar, bu elektronlardan dolayı

iyonize olurlar. Yarıiletkenin yüzey tabakasındaki bu negatif yüklü iyonize olmuş akseptörler d kalınlığında bir uzay yükü tabakası içerisinde dağılıma sahip olurlar. Yarıiletken gövdedeki enerji seviyeleri $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükseldiğinden dolayı, yarıiletken tarafındaki boşluklar için yüzey engeli; $eV_{dif} = \Phi_s - \Phi_m$ olur. Yarıiletken içerisinde oluşan bu potansiyel, metalin yüzeyine göre alınır. Kontakın metal tarafındaki boşluklar için engel yüksekliği; $e\Phi_b = E_s - \Phi_m$ ile verilir.



Şekil 2.15. Metal/p-tipi yarıiletken Schottky kontakının enerji-bant diyagramı

a; kontak yapılmadan önce, b; kontak yapıldıktan sonra ve termal denge durumunda, c; $V \neq 0$ durumu

Yarıiletkene bir V gerilimi uygulanırsa (Şekil 2.15.b), soldan sağa akan hol akımı değişmez, fakat sağdan sola doğru akan akım $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar değişecektir. Bunun sonucunda yarıiletkendeki enerji seviyelerinin tümü eV kadar düşer ve buna

bağlı olarak da yarıiletkenden metale geçen boşluklar için engel yüksekliği eV kadar azalır.

2.10.3. Metal/yarıiletken kontaklar üzerine sıcaklığın etkisi

Yarıiletken malzemelerin devre elemanlarında kullanılan kontakların çoğu farklı biçimlerde ısıya maruz kalırlar. Metalin yarıiletkene adezyonunu artırmak için bu durum kaçınılmaz olabilir. İdeale yakın Schottky kontak yapılırken kontakın eriyebileceği sıcaklığa çıkmamak oldukça önemlidir. Çünkü ara yüzeyler yarıiletken malzemenin içinde keskin metalik sivri bir çıkıntıya sahip düzlemsel olmayan yapıya sahip olur. Bu durum meydana geldiğinde, çıkıntının ucundaki yüksek alan bölgesi elektriksel karakteristikleri nispeten bozulabilir (Aydoğan 2003).

Devre elemanı uygulamalarında kontakta (diyot) akım akışıyla oluşan ısının bir sonucu olarak bir düzensizlik durumu oluşabilir. Gözlenen metalürjik değişimler için $I-V$ karakteristiklerinin bozulmalarını açıklamak çok güçtür. $I-V$ karakteristiklerindeki değişim daima engel yüksekliğindeki bir değişimle basit bir şekilde izah edilmeyebilir. Bazı durumlarda karakteristikler donor ya da akseptör olarak davranan atomların yarıiletkene difüze oldukları varsayılarak yorumlanabilir. Ya da yarıiletken malzemede katkı atomlarının etkin yoğunluğunun değiştirilmesi için elektriksel olarak aktif merkezler oluşturulabilir. Katkı yoğunluğu arttıkça engel yüksekliği daralır ve termiyonik alan emisyonu oluşabilir. Yarıiletken malzemenin içine giren atomlar ya da kusurlar asıl katkı atomlarıyla zıt kutupta olurlarsa etkin hal yoğunluğu azalır ve bazen de p-n eklemine oluşabileceği hal elde edilir. (Rhoderick and Williams 1988).

2.10.4. Termiyonik emisyon ile akım-voltaj karakteristiğinin belirlenmesi

Termiyonik emisyon, taşıyıcıların sahip oldukları termal enerjileri nedeniyle kristal yüzeyinden salınması/ayrılması olarak nitelendirilmektedir. Genellikle Schottky diyotlarda, elektronun potansiyel engeli geçmesi termiyonik emisyon teorisi kullanılarak izah edilmektedir. Bu teoriye göre elektron sahip olduğu termal enerjiyi

kullanarak metalden yarıiletkene veya tam tersi bir durumda yarıiletkenden metal tarafına geçebilmektedir. Doğrultucu kontaklarda akımın oluşmasında çoğunluk taşıyıcıları sorumludur. Dolayısıyla metal/n-tipi doğrultucu kontaklarda elektronlar, matal/p-tipi doğrultucu kontaklarda ise holler akımı meydana getirmektedir.

Bir Schottky kontağa voltaj uygulandığı zaman, mevcut durumdaki metal ve yarıiletkenin eşit Fermi enerji seviyeleri bozulacak ve termal enerji kazanarak uyarılmış hale gelen elektronlar bir taraftan diğerine geçiş yapacaktır. Şayet doğru beslem uygulanırsa, var olan engelin yüksekliği azalacak ve böylece metalden yarıiletkene elektron geçişi olacak ve bunun sonucunda yarıiletkene doğru olan akım artmış olacaktır. Fakat ters beslem durumunda mevcut engelin yüksekliği artacağından elektron geçişi azalacak ve yarıiletken tarafına geçecek akım miktarı da azalacaktır.

2.11. Seri Direnç Hesaplama Yöntemleri

Metal-yarıiletken kontaklarla yapılan I-V analizlerinin yüksek gerilim bölgesinde I-V karakteristiklerinin idealden sapmasında seri direncin etkili bir parametre olduğu literatürde çalışmalara konu olmuş ve seri direnç etkisini hesaplamak için de çeşitli seri direnç modelleri ortaya konmuştur (Norde 1979; Lien *et al.* 1984; Cheung and Cheung 1986; Werner 1988). Düşük sıcaklıklarda homojen yapıya sahip Schottky diyotlarda açıkça görünmeyen seri direnç etkisi gözlemlenirken, homojen olmayan diyotlarda seri direncin etkisi gözlenebilmektedir (Chand 2004). İdeal diyot durumu için (idealite faktörünün 1'e eşit olduğu diyotlar) seri direnç değerini hesaplamak amacıyla, termoiyonik emisyon denkleminde, ölçülen akım-gerilim değerlerine bağlı elde edilen fonksiyonun uygulama gerilimi değişimi ile minimum olduğu noktada seri direnç ve engel yüksekliği değerleri elde edilebilmektedir (Norde 1979). Norde'nin ortaya koyduğu yöntem idealite faktörünün 1'e eşit olduğu diyotlar için geçerli olmakta ve bu modelin Schottky kontakların yapısından dolayı gerçek seri direnç değerlerini veremeyeceği gerçeği ile modifiye-Norde metodu geliştirilmiştir (Sato and Yasumura 1985). Ayrıca bu model, deneysel sonuçlara başarı ile uygulanmıştır (Lee *et al.* 1992).

Deneysel verilerin etkin kullanımında tespit edilen belirsizliklerden dolayı seri direnç bölgesinde en küçük kareler metodunu kullanılarak seri direnç, idealite faktörü ve engel yüksekliği parametrelerinin hesaplamasında daha güvenilir olarak elde edildiği yeni bir hesaplama tekniği Cheung tarafından literatüre kazandırılmıştır (Cheung and Cheung 1986). Norde metodunda görülen aksaklıkların göz önüne alındığı ancak Norde fonksiyonunun dönüşümü ile elde edilen fonksiyonun akım değerlerine karşı olan değişiminin minimum noktasından seri direnç, idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin elde edilebileceği farklı bir seri direnç hesaplama metodu Lien tarafından öngörülmüştür (Lien *et al.* 1984). I-V karakteristik değerlerini kullanarak elde edilen kondüktansın akıma bağlı değişiminden engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç değerlerinin elde edilebileceği de bilinmektedir (Werner 1988). Schottky diyotların I-V karakteristiklerinden seri direnç hesaplamasında kullanılan Norde, Cheung, Lien-So-Nicolet ve Werner metotlarından son ikisi aynı sonuçlara götürmekte olup Werner metodu ilaveten akım iletim mekanizmasını belirleyen tekrardan-birleşim ve tekrardan oluşum akımlarının katkısını da göstermektedir (Aubry and Meyer 1994). Seri direnç hesaplamasında kullanılan tekniklerin taban direncinin sabit olduğu durumda güvenilir olacağı ve I-V karakteristiklerinden doğru diyot parametreleri elde etmek için taban direncinin de dikkate alınması gerekmektedir (Prokopyev and Mesheryakov 2003). Schottky kontakların I-V ilişkisinde seri direnç ve paralel kondüktans değerleri önemli olup bu parametrelerin belirlenmesiyle yük iletim özelliklerinin analizinde diyot parametreleri daha doğru olarak elde edilebilmektedir (Ferhat-Hamida *et al.* 2002).

2.12. Basit Eşitlikler

XRD kırınım desenlerinden yararlanarak büyütülen kristallerin belli özellikleri tayin edilmektedir. Büyütülen tek kristallerin tanecik büyüklüğü Debye-Scherrer formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

$$D = \kappa\lambda/(\beta \cos \theta) \quad (2.6)$$

Burada $\kappa=0,94$ Scherrer sabiti, $\lambda=1,54050 \text{ \AA}$ x-ışınlarının dalga boyu, β kırınım pikinin maksimum yüksekliğinin yarısının genişliği ve θ Bragg kırınım açısıdır.

Yarıiletkenin zorlanma derecesi aşağıdaki formül ile bulunur:

$$\varepsilon = (\beta \cos \theta)/4 \quad (2.7)$$

Yarıiletkenin zorlanma derecesi aşağıdaki formül ile bulunur:

$$\sigma^2 = \left(\frac{\kappa\lambda}{\sin\theta}\right)^2 \left[\left(\frac{\beta \cos \theta}{\kappa\lambda}\right)^2 - \frac{1}{d_s^2} \right] \quad (2.8)$$

Yarıiletkenin dislokasyon yoğunluğu da şu formülden bulunur:

$$\delta = \frac{15\varepsilon}{a \times D} \quad (2.9)$$

burada a yarıiletkenin örgü sabitidir.

Birim alan başına düşen kristal sayısı şu formülden bulunur:

$$N = \frac{t}{D^3} \quad (2.10)$$

burada t yarıiletkenin kalınlığıdır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Galyum, Tellür ve Kadmiyum Elementleri

Galyum elementi, boksit ve çinkonun saflaştırılması esnasında alüminyum ile beraber elde edilmektedir. Başak bir değişle Galyum elementi bir yan üründür. Periyodik çizelgenin III-A grubunda yer almaktadır. En çok kullanılan bileşikleri GaN ve GaAs'tır. Galyum elementinin kararlı bir yapı sergilemesi kuru havada gerçekleşir. Nemli havada ya da oksijen varlığında yüzeyi mattır. Havada ısıtıldığında yüzeyi bir oksit katmanıyla kaplanmaktadır. Gümüş renkli metaldir ve grimsi mavi yansıma gösterir. Eritildiğinde Gümüş veya Kalay'a benzemektedir. Doğal halde bulunan galyum iki izotopun karışımından oluşmuştur. Bunlar; Ga-69 ve Ga-71. Galyum elementinin yoğunluğu 5,904 g/ml, erime sıcaklığı 29,76 °C (302,91 K), atom numarası 31 ve atom ağırlığı ise 69,723'tür. Galyum elementi katı halde ve zayıf metaldir.

Kristal durumundaki tellür, gümüş beyazı renğinde, saf halde metalik parlaklıkta, kırılğan ve kolaylıkla toz haline getirilebilen bir elementtir. Periyodik tablonun VI-A grubunda yer alan bir elementtir. Hava temasında ısıtıldığı zaman tutuşur ve beyaz tellür dioksit (TeO₂) dumanları yayarak mavi bir alevle yanar. Ayrıca halojenlerle birleşmesi sonucu enerji vermektedir. Doğada rastgele dağılmış olarak bulunan tellür, ticari amaçla blisten bakırın elektrolizle saflaştırılması sonucu ortaya çıkan anot çamurunda, en çok Kanada, Peru ve Japonya'da elde edilir. Bazı bileşiklerde zehirli olduğundan bu bileşiklerin dikkatli kullanılması gerekmektedir. Tellür elementinin atom numarası 52, atom ağırlığı 127,60, katı halde ve yarı metaldir. Tellür elementinin yoğunluğu 6,25 g/ml, erime sıcaklığı ise 450°C'dir.

Kadmiyum elementinin elde edilış yöntemi, çinkonun elektrolitik olarak rafine edilmesi işleminde çinko sülfat saflaştırılırken, kadmiyum da öteki artıklarla birlikte çökelir. Kolay bir şekilde eriyen alaşım elde etmek için ve ayrıca çelik fabrikasyonunda yüzeyleri pasa karşı koruyucu olarak ve metalik parlaklık elde etmek için kullanılır.

Ayrıca saf halde nükleer reaktörlerde kontrol çubukları yapımında kullanılır. Periyodik tablonun II-B grubunda yer alan kadmiyum, bir geçiş elementidir. Fiziksel özellikleri olarak çok yumuşak bir elementtir. Kuru ortamda bozulmaz iken nemli ortamda oksitlenir. Atom numarası 48 atom ağırlığı 112,41'dir. Fiziksel hali katı ve rengi gümüş grisidir. Erime sıcaklığı 320°C'dir.

3.2. GaTe Yarıiletkenin Genel Özellikleri

Yarıiletken bileşikler içerisinde III-VI yarıiletken bileşikler ailesi, son yıllarda üzerinde çok sayıda araştırma yapılmaktadır. III-VI grubu bileşikler, teknolojik önemi büyük olan bileşikler olup foton dedektörleri, lazer, led gibi optoelektronik devre elemanı ve nükleer detektör yapımına elverişlidirler. III-VI grubu bileşikler, III. grup Tl, Ga, In elementleri ile VI. grup S, Se, Te elementlerinden meydana gelmektedir. III-VI bileşiklerinden tabakalı GaTe oda sıcaklığında yaklaşık olarak 1,7 eV direkt bant aralığından dolayı optoelektronik aygıtlar, radyasyon dedektörler, güneş pilleri gibi uygulamalar için yüksek bir potansiyele sahiptir.

Tabakalar arasındaki kimyasal bağlar Van der Waals bağları iken tabakalar içi atomlar baskın bir şekilde kovalent bağ yapmışlardır. Kuvvetli kovalent bağ ve zayıf van der Waals bağları arasındaki etkileşimler bu sistemde iki boyutlu karakterlerle yapısal, elektrik ve optiksel özellikler için sorumludur. Genelde III-IV tabakalı GaS ve GaSe gibi bileşikler, tüm Ga-Ga bağları tabaka düzlemlerine diktir. Sadece GaTe yarıiletkenin Ga-Ga bağlarının üçte ikisi tabaka düzlemlerine diktir. Kalan üçte biri ise tabakalar düzlemine paraleldir. Bu özellikten dolayı diğer III-IV bileşiklerinden kristalografik ve optiksel olarak oldukça farklılık gösterir. Örneğin GaS ve GaSe indirekt bant aralığı gözlenmesine rağmen GaTe direkt bant aralığına sahip olduğundan optoelektronik uygulamalarda daha avantajlıdır. Ayrıca GaTe diğer tabakalı III-IV bileşiklerinden daha yüksek anizotropiye sahiptir (Liu *et al.* 2014).

Diğer III-VI bileşiklerinden farklı olarak, GaTe yarıiletkenin fiziksel özellikleri yüksek derecede anizotropi gösterir. Ga-Ga bağlarının üçte biri, tabaka içinde b-eksenine dik

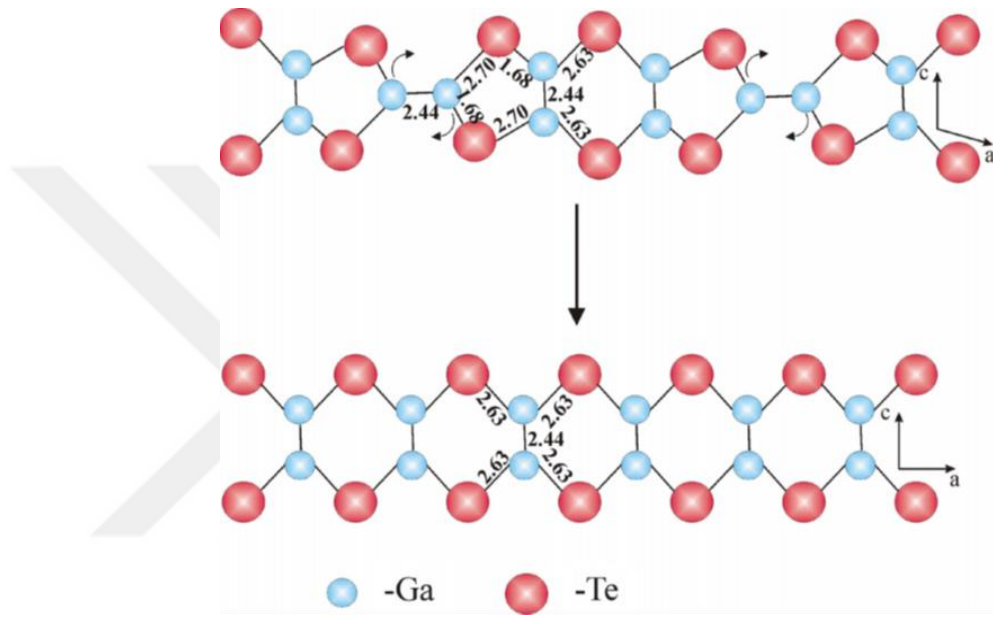
doğrultuda yer alır ve fiziksel özelliklerdeki anizotropi bu bağların varlığına atfedilir (Gouskov and Gouskov, 1979). Monoklinik yapının yoğunluğu $\rho=5.44$ g/cm³ ve örgü parametreleri $a=17.31$ Å, $b=4.04$ Å, $c=10.52$ Å ve $\beta=104.4^\circ$ olarak bildirilmiştir. Yarıma düzlemi, geriye ansımalı Laue metoduyla (100) olarak tesbit edilmiştir (Mamedov and Aldzhanov 1978; Pal and Bose 1996). Ayrıca; özel şartlar altında büyütülmüş, GaSe yapısına benzer şekilde Te-Ga-Ga-Te atom zincirinden oluşmuş ikili tabakalardan müteşekkil hegzagonal (β -GaTe) yapıya sahip bir hali bildirilmiştir. Yarıkırmalı olan bu hal, 100°C civarında kısa süreli bir ısı ile monoklinik yapıya dönüşmektedir.

Optik soğurma ve geçirme verilerinden, GaTe yarıiletkenin $E_{n-1}=1.779$ meV enerjide çok şiddetli ($\alpha_{\max}=16000$ cm⁻¹) ve oldukça dar ($\Gamma=2.5$ meV) bir eksiton piki verdiğini, eksiton bağlanma enerjisi 17.5 ve 19.5 meV, kırılma indisi 2.7 olduğu bulunmuştur. Direkt bant aralığı, 1.6 K'da 1.797eV, 4K'da 300 K'de 1.7 ve 1.667 eV olarak bildirilmiş olup, bant aralığının sıcaklıkla değişim katsayısı ($4.14-4.8 \times 10^{-4}$ eV/K) ve statik dielektrik katsayısı $\epsilon=7.3$ olarak belirlenmiştir. (Camassel *et al.* 1978).

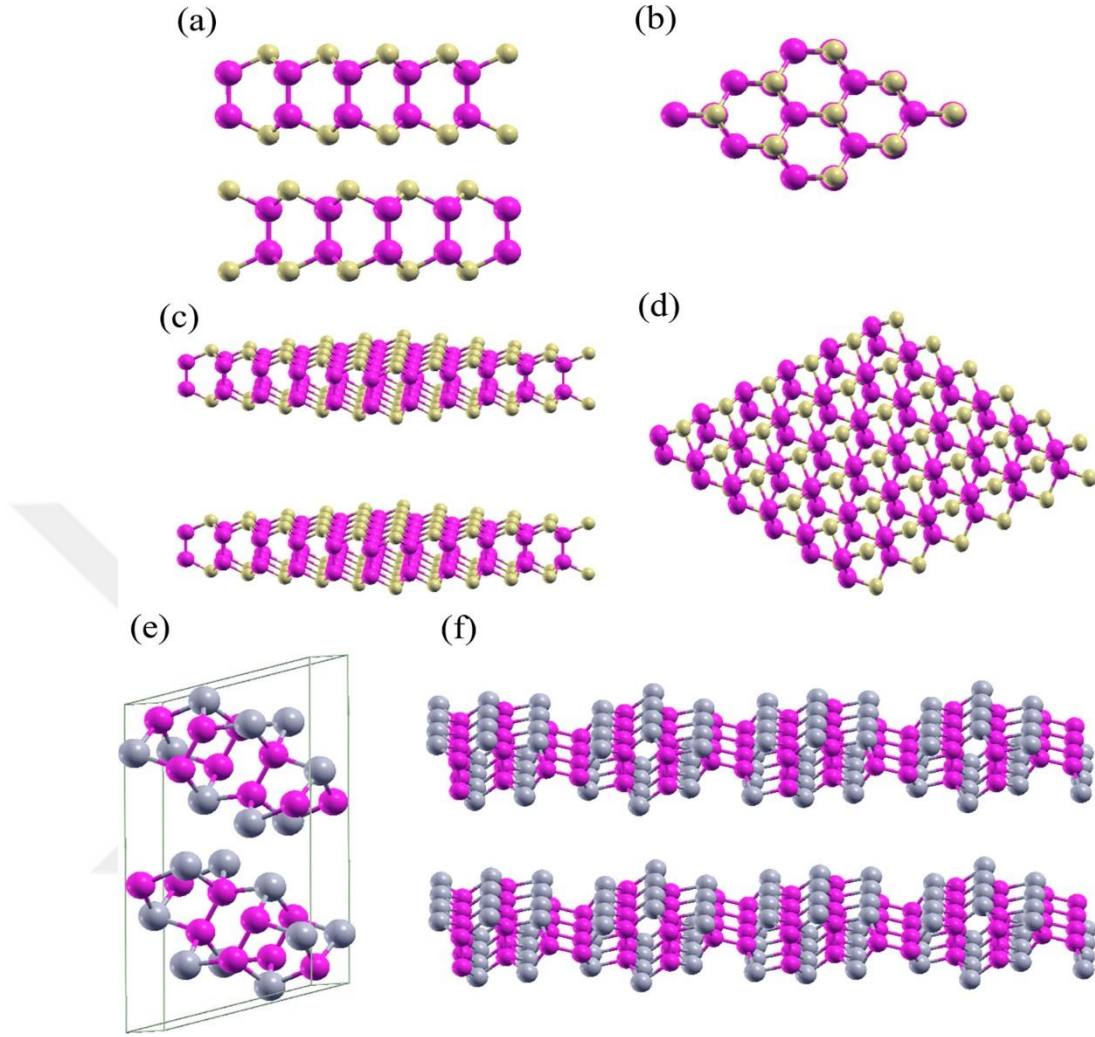
GaTe yarıiletkeni diğer III-VI grubu tabakalı yarıiletkenlerden daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu yüzden diğer tabakalı bileşiklere göre daha az çalışılmıştır. Fakat GaTe yarıiletkenin karakteristik özellikleri dikkate alındığında (örneğin, direkt bant yapısına sahip olması gibi) daha fazla araştırılmasına gerek duyulmaktadır. Son birkaç yıldır birçok önemli uygulamada GaTe yarıiletkeni kullanılmaktadır. Özellikle radyasyon dedektörleri ve dokunmatik sensörlerin yapımında çok fazla kullanıldığı görülmektedir (Mandal *et al.* 2011; Hu *et al.* 2014; Liu *et al.* 2014; Yu *et al.* 2014).

Son yapılan birkaç çalışma göstermektedir ki GaTe yarıiletkeninde tabaka kalınlığı değiştiğinde GaTe ikili bileşiğinde bir faz dönüşümü (monoklinikten hegzagonal faza) ve bant dönüşümü (indirekt bant yapısından direkt bant yapısına) meydana gelmektedir (Liu *et al.* 2014; Zhao *et al.* 2016; Bae *et al.* 2017; Cai *et al.* 2017). Bu sebeple GaTe yarıiletkenin birden fazla fazı ve bileşik türü bulunmaktadır. Galyum ve Tellür elementleri; GaTe, Ga₂Te₃, Ga₃Te₄ gibi çeşitli bileşikler oluşturmaktadırlar. GaTe ikili

bileşiminin uzay grubu $C2/m$ olarak rapor edilmiş ve diğer tabakalı bileşiklerden daha düşük bir simetriye sahip olduğu bildirilmiştir. Ayrıca GaTe yarıiletkeni hangi büyütme tekniğinin kullanılmasına bakılmaksızın her zaman p-tipi özellik sergilemektedir. Literatürde n-tipi özellik sergilediğine dair bir bulguya rastlanmamış fakat katkı yapılarak n-tipi elektrik göstermesi sağlanabilir.

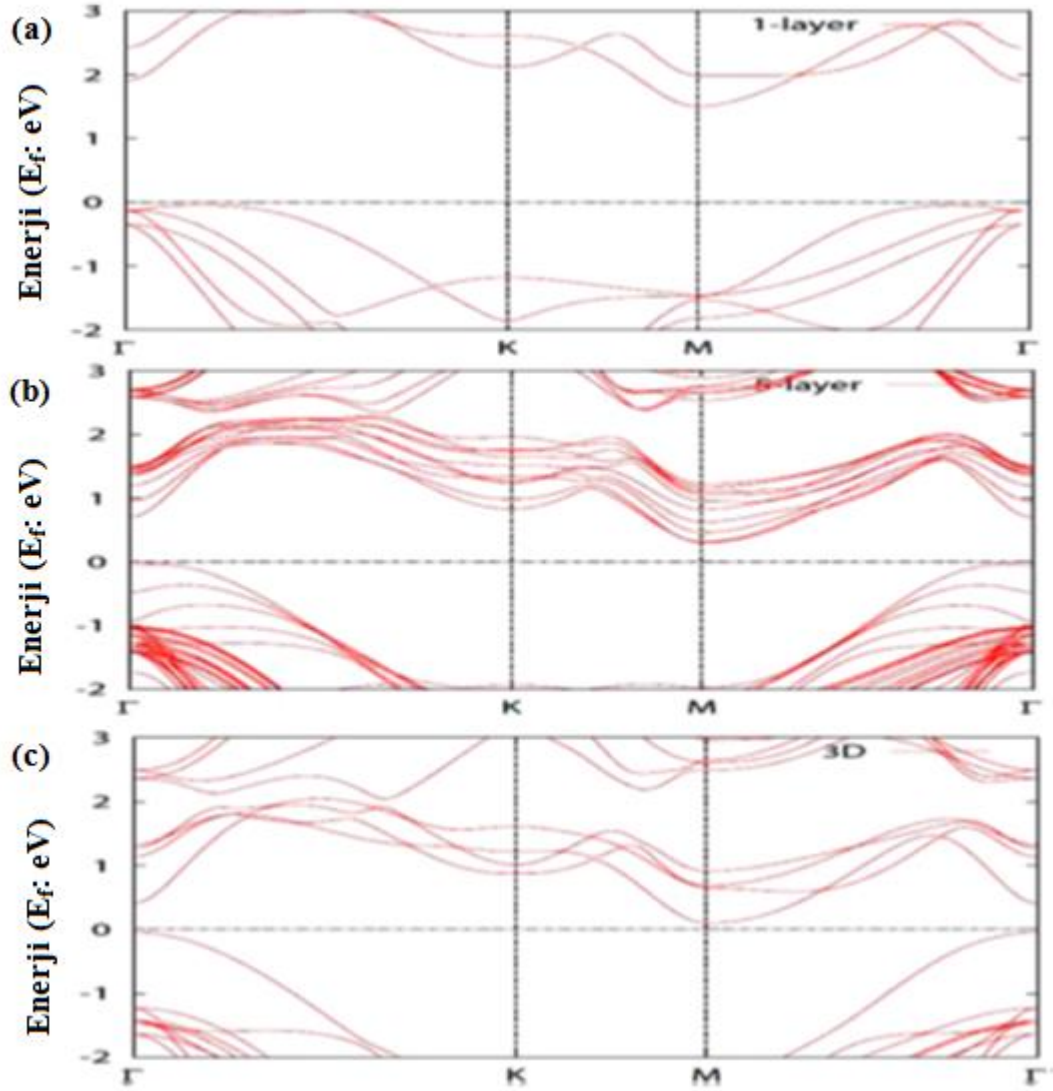


Şekil 3.1. m-GaTe ve h-GaTe tabakaları arasındaki ilişki (Balitskii *et al.* 2008) (Uzaklık birimi Å m: monoklinik ve h:hegzagonal)



Şekil 3.2. a) GaTe külçe kristalinin yandan b) üstten c) derinlemesine d) tek tabakalı hegzagonal formu e) külçe hegzagonal formu f) monoklinik formu göstermektedir. (Shenoy *et al.* 2016)

Şekil 3.2 incelendiğinde, GaTe yarıiletkenin tabaka kalınlığı faz dönüşümünde önemli bir parametre olduğu görülmektedir. Bu bağlamda külçe GaTe ile ince film GaTe aynı faza sahip olmayabilir. Bu yüzden büyütülen kristallerin yapısal analizlerinin yapılması önem arz etmektedir. Çünkü büyütülen kristalin hangi faza ait olduğu yapısal analizler ile mümkün olabilmektedir.



Şekil 3.3. GaTe yarıiletkenin tabaka kalınlığının bant yapısının değişimi üzerindeki etkisi (Liu *et al.* 2014)

Şekil 3.3 irdelendiğinde, Liu *et al.* (2014) tarafından yapılan bir çalışmada tek tabakalı GaTe yarıiletkenin hegzagonal yapıda ve indirekt bant yapısına sahip olduğu ve artan tabaka sayısı ile birlikte hegzagonal yapının monoklinik yapıya ve direkt bant yapısına dönüştüğü rapor edilmiştir. GaTe yarıiletkenin iki kararlı fazı bulunmaktadır. Bunlardan ilki α -GaTe olan faz monoklinik yapıda ve uzay grubu $C2/m$ (C_{2h}^3) iken β -GaTe fazı ise hegzagonal yapıda ve uzay grubu $C6/mmc$ (D_{6h}^4)'dir.

3.3. GaTe Yarıiletkenini Büyütme Prosedürü

Yarıiletken bileşiklerinin üretilmesinde büyütme tekniğinin seçilmesi önemli bir aşamadır. Büyütme yönteminin seçiminde dikkat edilmesi gereken bazı önemli hususlar bulunmaktadır; ilk olarak büyütülecek olan bileşiğin buhar basıncının ne olduğu bilinmeli, bileşiği oluşturacak olan elementlerin karakteristik özellikleri ve bileşiğin kimyasal aktifliği göz önüne alınmalıdır. İkincisi, büyütülecek olan bileşiğin faz dönüşümlerinin olup olmadığı (önceki konularda belirtildiği gibi GaTe faz dönüşümü olan bir bileşik) belirlenmelidir (Shay and Wernick 2013).

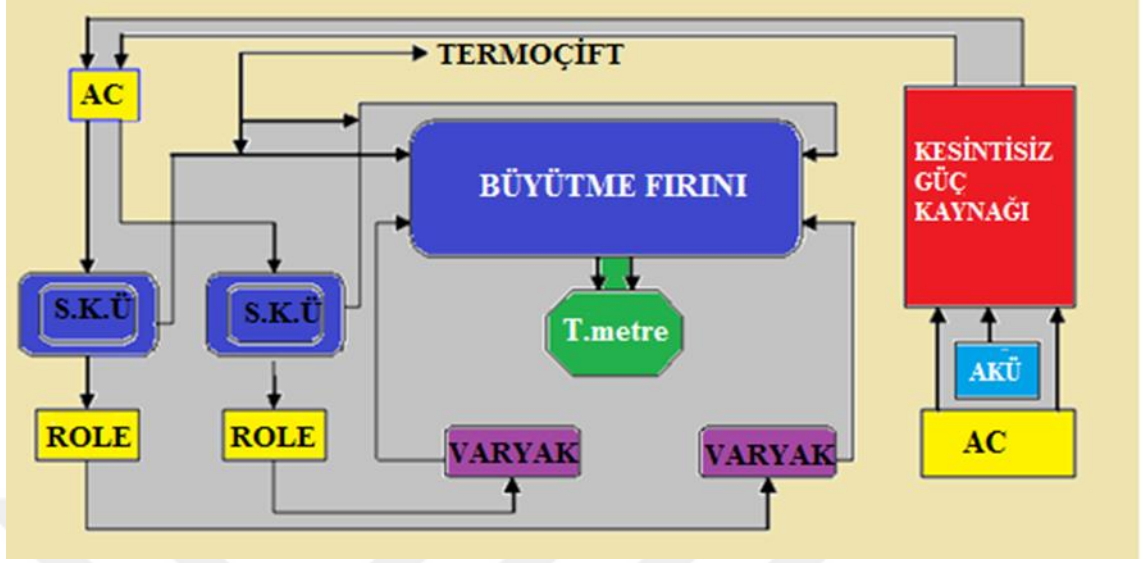
Büyütülecek olan yarıiletkenlerde kullanılan elementlerin (Ga, Te ve katkı olarak Cd) hem buhar basınçlarının çok yüksek olması hem de ampullere yapışma sorunu bulunmaktadır. Bu sorunların en aza indirilmesinde en önemli faktör kullanılmak istenilen büyütme tekniğinin seçimidir. GaTe yarıiletkenin büyütülmesinde kristal büyütme laboratuvarı şartlarında modifiye edilmiş Bridgman-Stockbarger büyütme yönteminden faydalanılmıştır. Ayrıca literatüre bakıldığında bu yöntemle büyütülen kristallerin kaliteli olması, araştırmacının bu yöntemi kullanma sebeplerinden biridir. Bu yöntemde, kapalı bir kuvars tüp içinde eriyik halde bulunan elementlerin, bölge sıcaklığının kontrollü değişimi ile büyüme doğrultusunda kristalleşmeleri sağlanılmaktadır. Büyütme yönteminde kullanılan ampul sabit bırakılarak iki ayrı sıcaklık bölgesine sahip olan fırının sıcaklığı değiştirilerek büyütme işlemi yapılmaktadır. Böylelikle kristalleşme, hareketsiz olan ampul içinde gerçekleşeceğinden olası titreşimler en aza indirilmiş olabilmektedir.

Bu çalışma kapsamında kristal büyütme fırını, Bridgman-Stockbarger büyütme tekniği ile kristalleri büyütmeye olanak verecek şekilde iki bölge (zonlu) olarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Büyütme fırını tüpü iç yarıçapı 4 cm, dış yarıçapı 5 cm olan 1800°C'ye dayanıklı bir m uzunluğunda alümine seramik bir boru kullanılarak hazırlanmıştır. 0,8 mm çaplı 4 adet kanthal rezistans teli 6 mm çap ve 2 mm hatve verilerek spiral şeklinde hazırlanmıştır. Elde edilen spiral rezistansların yalıtımı seramik boncuklarla yapılmış ve her bir rezistans için, fırın tüpünün bölge başlangıçlarına

delinmiş bir mm çaplı çapraz iki deliğin birinden geçirilip diğerinden çıkarılmasıyla sabitleştirilerek, ısıtma rezistansının ikisi birinci zona, diğer ikisi de ikinci zona sarılarak fırın tasarlanmıştır. Fırın tüpü etrafına sarılan rezistans telden geçen akımın oluşturacağı elektrik ve manyetik alanı sıfırlamak için her bir zona sarılan iki spiralden birinci spiralın zon başlangıç ucu, ikinci spiralın bitiş ucuna birleştirilerek elde edilen iki uç seramik klemenslere bağlanmıştır. Fırın tüpünün her iki zonunun sıcaklık kontrolü için her zonun merkezine açılan 2 mm çaplı deliklerden geçen K-tipi termo çift yerleştirilmiştir. Alümine seramik borunun ve ısıtıcı telin etrafı zirkonyum battaniye ile sarılarak termal yalıtkan sağlanmıştır. Kristalin erime sıcaklığında, çalkalama işleminin gerçekleştirilmesi için küçük bir motor kullanılarak fırının yatay ve dikey pozisyonlar arasındaki hareketi sağlanmıştır. Fırın tüpü 2,5 cm köşebent demirden yapılan kafes kutu içerisine yerleştirildikten sonra, 4 adet termoçift ve elektrik bağlantıları fırının ön paneline kurulmuştur. İki zonlu kristal büyütme sisteminin fotoğrafı Şekil 3.4'de ve şematik görünüşü ise Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.4. GaTe yarıiletkenin büyütüleceği fırınının fotoğrafı



Şekil 3.5. Kristal büyütme sisteminin şematik görünüşü (Gürbulak 1997)

Kristal büyütmede kullanılacak olan ampullerin hazırlanmasında bir metre uzunluğunda iç çapı 10 mm ve et kalınlığı 1,5 mm olan kuvars cam boruları kullanılmıştır. Bu borular 50 cm uzunlukta olacak şekilde kesilmiş ve boruların bir ucu kristal büyütme amacına göre uygun bir biçimde şekillendirilerek kapatılmıştır. Literatürde konik uçlu cam borularda en iyi büyütmenin gerçekleştirildiği rapor edildiğinden, ilgili çalışmada cam borunun ucu konik olacak şekilde iki boğumlu olarak biçimlendirilmiş ve kapatılmıştır. Bu cam borunun tercihindeki öncelik GaTe yarıiletkenin düzgün bir biçimde büyümesini sağlamasından dolayıdır. Daha sonra kesilen bu cam borular belli aşamalar izlenilerek temizleme işine tabi tutulmuştur.

Temizleme işlemi şu adımlardan oluşmaktadır; ilk olarak tüpler de iyonize su ile yıkanmış ve yüzeyde oluşmuş olan kirlerin temizlenmesini sağlamaktır. Daha sonra, silika ampuller %40 oranında sulandırılmış HNO_3 içinde 20 dakika bekletilerek yüzeydeki metalik kirlerin temizlenmesi sağlanmıştır. Bu işlemden sonra ampuller tekrar de iyonize su ile yıkatılmıştır. Daha sonra ampuller 24 saat boyunca sıvı temizlik deterjanı içerisinde bırakılarak iç ve dış cephelerde oluşan toz ve yağ parçacıklarının temizlenmesi sağlanmıştır. Bu işlemden sonra ampuller %40 oranında sulandırılmış HF içerisinde 5 dakika (yüzeyin aşınmayacağı zaman) boyunca bırakılarak yüzeyin

aşınmayacağı herhangi bir kirlilik bulunamaması sağlanmıştır. Bu işlem yapıldıktan sonra ampuller bir kez daha de iyonize su ile yıkanmış ve ampullerin içerisi de aseton ile yıkandıktan sonra kurumaya bırakılmıştır. Tüm bu işlemler eldiven kullanılarak yapılmıştır.

Bir önceki paragrafta bahsedilen temizleme işlemine tabi tutulmuş olan silika ampuller, önceden hazırlanmış olan elementler konulmak üzere şu işlemlerden geçmiştir: ilk olarak 6N saflıktaki Ga ve Te elementleri molar olarak %37,18 Ga ve %62,82 Te elementlerinden alınmıştır. Bu oranların seçilmesindeki temel etken literatürde değinildiği gibi en kaliteli büyütmenin sağlanıyor olmasından kaynaklanmaktadır. Silika ampulün boyutu ve elementlerin buhar basınçları gibi ölçütler göz önüne alınarak iki elementin toplam ağırlığı 150 g olarak belirlenmiştir. GaTe yarıiletkenini oluşturacak her iki elementin miktarları aşağıda verilmiş olan eşitlikler kullanılarak belirlenmiştir.

$$\sum Ga = \frac{\sum A_{Ga}}{\sum A} \sum Te = \frac{\sum A_{Te}}{\sum A} \quad (3.1)$$

$$\%Ga = Ga(\sum Ga) * 100 \quad \%Te = Te(\sum Te) * 100 \quad (3.2)$$

$$W_{Ga} = 150 * (\%Ga) \quad W_{Te} = 150 * (\%Te) \quad (3.3)$$

bu eşitlikler kullanılarak ve daha önceden belirlenen stokiyometrik oranlar dikkate alınarak,

$$W_{Ga} + W_{Te} = 150 \text{ g} \quad (3.4)$$

olacak şekilde Ga ve Te elementlerinden hesaplanan miktarlar ampuller içine yerleştirilmiştir. Ga ve Te elementlerinin miktarları belirlenirken çok hassas bir terazi (virgülden sonra dört anlamlı rakama kadar ölçüm yapan) kullanılmıştır. Kesme işleminden önce büyütülecek olan elementler 3-4 dakika boyunca birçok kimyasal çözeltisinde bekletilmiş ve sırasıyla aseton ve metanol ile yıkanarak temizlenmiştir. Bu

işlemden sonra elementler de iyonize su ile yıkatılmış ve azot gazı ortamında kurutulmuştur. Böylece oluşabilecek oksitlenme ve kirliliğin önüne geçilmeye çalışılmıştır. Tüm bu işlemlerden sonra Ga ve Te elementleri önceden hazırlanmış olan silika ampullere konulmuştur. Bu ampullerden birine %0,1 (binde bir) oranında 5N saflıkta olan Cd elementi ilave edilmiştir. Daha sonra ampuller vakum sistemine bağlanarak vakuma alınmıştır. Basınç göstergesi yaklaşık olarak 10^{-6} mbar değerine düşüncüye kadar vakumlama yapılmış ve vakumda iken asetilen-oksijen hamlacıyla ampullerin açık olan uçları kapatılarak büyütme işlemi için hazır duruma getirilmiştir.

Yarıiletken bileşikler büyütme için kullanılan elementler, homojen olarak birbirleri ile karışımını sağlamak amacıyla önreaksiyon işlemine başvurulmaktadır. Bu sebepten dolayı ön reaksiyon yapılmasının iki önemli nedeni ortaya çıkmaktadır: İlk neden çalkalama imkânı verebilecek biçimde tasarlanmış olan ön reaksiyon fırınları bileşen elementlerin birbirleriyle iyice karışmasını sağlamaktır. İkinci neden olarak literatürden bilindiği gibi kullanılan elementlerin (Ga, Se, Te, S, In, Cd) bir kısmının tek başına buhar basınçları çok yüksektir. Bu elementlerin karışımlarından ortaya çıkan ikili ve üçlü yarıiletken bileşiklerde ise karışımın homojenliğini ve kimyasal reaksiyonun bitmesinden sonra buhar basınçları mükemmel bir şekilde aşağı değerlere düşmektedir. Sonuçta ön reaksiyona girmiş bileşiğin patlama riski ortadan kalkar ve doğabilecek olası tehlikeler bertaraf edilir.

3.4. Stockbarger – Bridgman Yöntemi

Yarıiletken kristal, belirli bir yerleşim düzeni ile bir araya gelen atomların meydana getirdikleri yerleşim düzeninin üç boyutta tekrarı ile meydana gelen yapılardır. Her yarıiletken kristal belli bir yerleşim düzenine sahip olduğundan farklı farklı büyütme teknikleri bulunmuştur. Kristalin yapısına uygun olan bir büyütme yönteminin seçilmesi daha kaliteli bileşiklerin elde edilmesi anlamına gelmektedir. Bu yüzden büyütülecek yarıiletken kristaline uygun bir tekniğin seçilmesi önem arz etmektedir. Literatürde de değinildiği gibi GaTe yarıiletkeni ve diğer tabakalı bileşikler için en uygun yöntemlerden biri olarak Bridgman-Stockbarger yöntemi önerilmektedir.

Bu yöntemin birkaç versiyonu bulunmaktadır. İlk olarak dikey Bridgman yöntemi daha sonra yatay Bridgman yöntemi kullanılmıştır. Stockbarger ise bu yöntemin geliştirilmiş bir hali olarak ortaya çıkmıştır. Geleneksel Bridgman yönteminde sıcaklık değişimi sabit olan sabit bir fırının içinde hareketli bir ampul bulunmaktadır. Fakat Stockbarger ise hem fırını hem de ampülü sabit tutup bunu yerine sıcaklık gradyentini değiştirerek büyütme işlemini gerçekleştirmektedir. Bridgman yönteminde tek zonlu bir fırın yeterli iken Stockbarger yönteminde kullanılan fırın en az iki zona sahip olmalıdır ki büyütme işlemi yapılabilir. Stockbarger yönteminin geleneksel Bridgman yönteminden üstün yanı hareketten dolayı oluşabilecek yapı kusurlarını bertaraf etmesi gösterilmektedir.

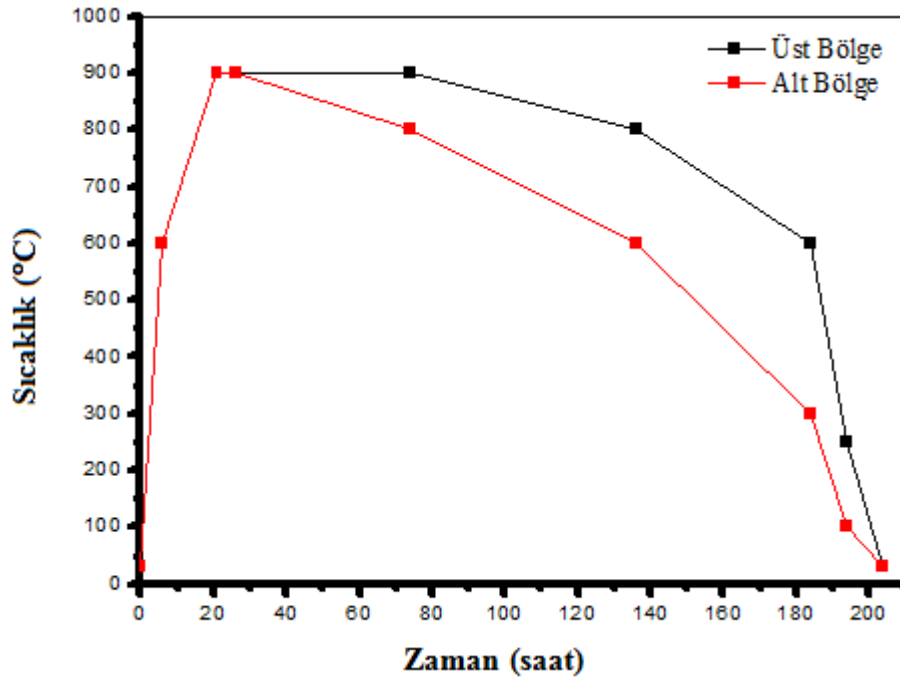
Stockbarger yönteminde büyütme işlemi şu adımlarla yapılmaktadır: Ampulün bulunduğu fırının üst bölgesi (sıcak olan bölge) ilgili bileşiğin erime sıcaklığından 60-100 °C yüksek, alt bölgesi (soğuk olan bölge) ise bileşiğin erime sıcaklığından 60-100 °C daha düşük sıcaklıkta ayarlanır. Ampul soğutma bölgesine gelecek şekilde ucu aşağı doğru olacak biçimde bir yönlendirmeye tabi tutulmaktadır. Buradaki temel amaç kristalin tek bir doğrultuda büyümesini sağlamaktır. Tek bir doğrultuda büyüme gerçekleşmesi kaliteli bir kristalin özelliğidir. Burada kullanılan büyütme tüplerinin uçlarının konik şeklinde olduğu ve böylece daha kaliteli kristal büyütmenin sağlandığı söylenebilir. Silika ampul oturağının sıcaklık gradiyenti boyunca sabit hızlarla indirilmesi için çeşitli yöntemlerin kullanıldığı birçok çalışma mevcuttur. Potanın oturağı bir metal çubuk üzerine oturtulur. Bu çubuk mekanik olarak ya manuel ya da bir elektrik motoru ile aşağı indirilir. İnceleme hızı 0,05-0,10 cm/saat aralığındaki değişimlerle büyütülür. Daha nitelikli yarıiletken kristaller için daha düşük iniş hızları kullanılmaktadır. Silika ampulün bir seramik çubuk yerine bir metal çubuk üzerine oturtulmasının sebebi ısı akışının yarıiletken kristal boyunca olmasını sağlamaktır. Fırın içindeki izotermeler yatay doğrultuda oluşmaktadır. Bunun sonucunda büyümekte olan, katı-sıvı ara yüzeyindeki sıcaklık izoterm eğrileri de yatay doğrultuda oluşur.

Bu konuyla ilgili literatür incelendiğinde en uygun sıcaklık gradiyentinin 25°C/cm olduğu bildirilmiştir. Fakat bu değer ne kadar düşük olursa o nisbette daha kaliteli büyütme yapılabileceği unutulmamalıdır. Burada önemli bir husus ampulün mevcut

sıcaklık gradiyenti boyunca sabit kalması gerekir. Büyüteceğiniz kristalin özelliklerine bağlı olarak sıcaklık gradiyenti 5-10°C/saatlik adımlarla azaltılarak işlem sürdürülebilir. Çalkalama fırının sıcaklık gradiyenti Gürbulak (1992) tarafından hazırlanmıştır.

3.5. GaTe ve GaTe:Cd Yarıiletkenlerin Büyütülmesi

Bazı araştırmacıların (Irie *et al.* 1979; Shih *et al.* 1986) raporladığı gibi büyütülecek olan yarıiletkenin öğütülüp ikinci bir ampule alınması sonucunda oksitlenme ve element kaybının olması gibi etkenler göz önüne alınarak ilgili elementler tek bir ampulde ve tek bir seferde büyütülmüştür. Böylelikle hem oksitlemenin hem de bileşen kaybının önüne geçilmiştir. Yarıiletken kristallerin büyütülmesinde uygulanmış olan sıcaklık programı Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6. GaTe ve GaTe:Cd için uygulanan büyütme programı

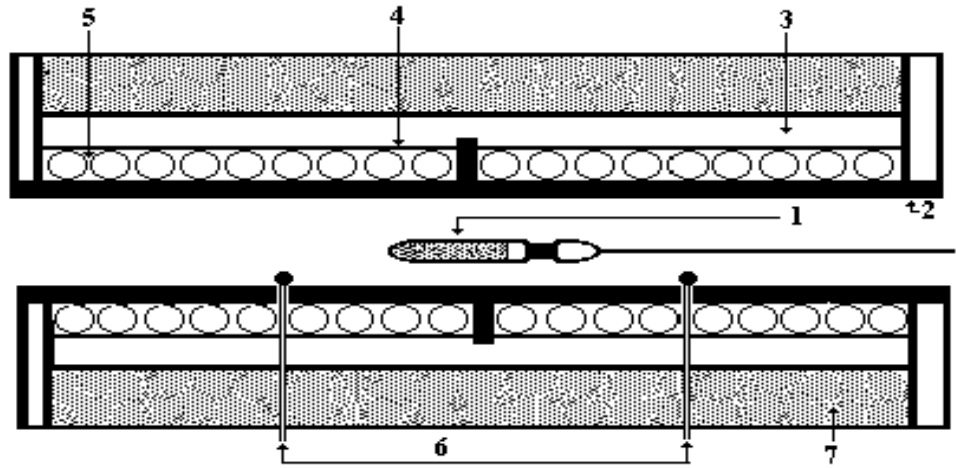
GaTe yarıiletkeni termal iletkenlik sonucu galyumun kimyasal tepkimeye girip tellürü eriteceği göz önünde bulundurularak fırının alt ve üst bölge sıcaklıkları sırasıyla 10 saat içerisinde 430°C'ye yükseltilmiş ve 430°C'de 10 saat beklenilmiştir. Böylelikle

galyumun erime sıcaklığından (Ga: 29,78°C erime sıcaklığı) yukarı olmasına ve tellürün erime sıcaklığından (Te: 449,51°C erime sıcaklığı) düşük olmasına dikkat edilerek Ga ile Te arasında kimyasal tepkimenin sonlanması ve kimyasal reaksiyon hızının düşmesi öngörülmüştür. Sonra 430°C'den 600°C'ye 10 saatte çıkılmış ve 10 saat boyunca bu sıcaklıkta beklenilmiştir. Daha sonra 24 saatte 30°C'ye düşürülmüştür. Bu ön reaksiyon işlemi sonucunda hem alaşımın buhar basıncı düşülmüş hem de sonraki büyütme adımındaki patlama veya çatlama problemleri en aza indirilmeye çalışılmıştır.

GaTe ve GaTe: Cd karışımı Şekil 3.6'dan görüldüğü gibi, termal iletkenlik sonucu kimyasal tepkimeye girip tellürün buhar basıncını artıracığı göz önünde bulundurularak fırının alt ve üst bölge sıcaklıkları sırasıyla 6 saat içerisinde 600°C'ye yükseltilmiştir ve basınç riski ortadan kaldırılmaya çalışılmıştır. Bu durum ampul içerisinde oluşan sıcaklığın ve basıncın ani bir şekilde artmasını engellemiştir. Bu sıcaklıkta 10 saat muhafaza edilmiştir. Çünkü 450°C'de Ga ve Te arasında oluşan ekzotermik kimyasal tepkime devam ettiğinden dolayı oluşabilecek patlama veya ampulde çatlama gibi risklerin tamamıyla ortadan kalkması için geniş zamana ihtiyaç vardır. Te elementi 600°C sıcaklığından sonra yüksek buhar basıncına sahip olduğundan, 15 saatte 900°C'ye çıkılıp 5 saat bekletilmiş ve 4 saat Galyum ve tellür elementlerinin homojen dağılımını sağlamak amacıyla fırın yaklaşık olarak 45°'lik açı yapacak biçimde aşağı-yukarı hareket ettirilerek çalkalanma işlemi yapılmış ve fırın yatayla 60-70°'lik açı yapacak şekilde sabitleştirilmiştir.

Kristal büyütme fırının üst bölge sıcaklığı sırasıyla önce, 48 saat 900°C'de sabit tutulmuş, 62 saatte 800°C'ye, 48 saatte 600°C'ye, 10 saatte 250°C'ye ve 10 saatte 30°C'ye düşürülmüştür. Fırının alt bölge sıcaklığı ise 48 saatte 800°C'ye, 62 saatte 600°C'ye, 48 saatte 300°C'ye, 10 saatte 100°C'ye ve 10 saatte 30°C'ye düşürülmüş ve fırın kapatılmıştır. Böylece aynı zamanda ve aynı büyütme sıcaklık programı kullanılarak, GaTe ve GaTe: Cd ikili yarıiletken kristallerinin büyütme işlemi yaklaşık 9 gün ve önreaksiyonla birlikte 12 günde tamamlanmıştır.

Büyütme işlemi sonunda büyütme fırınından çıkarılan ampuller bir kesici kullanılarak külçe yarıiletken kristalin, herhangi bir zor veya bozulmaya uğramadan kuartz ampulden çıkarılması sağlanmıştır. Yarıiletken kristalin kirlenmesini engellemek için külçenin çok temiz bir ortamda muhafaza edilmesi, bu yarıiletken kristal üzerinde yapılacak olan araştırmaların doğruluğu açısından önem arz etmektedir. Büyütülecek numunenin ampulünün kristal büyütme fırını içerisindeki yeri çok önemlidir. Çünkü burada sıcaklık gradiyenti doğrudan büyütmedeki en önemli faktörlerden biri olduğundan ampulün bu sıcaklıkta sabit kalması gerekir. Büyütme sıcaklığının oluşturulan bölgede değişmesi bile kaliteli bir kristal büyütme veya büyütmemeyi etkiler. Şekil 3.7 ampulün fırın içindeki konumunu temsil etmektedir.



Şekil 3.7. Yatay büyütme fırını

1. Kuvars ampul, 2. Alüminyum tüp, 3. Zirkonyum battaniye, 4. Alüminyum folyo, 5. Kanthal rezistans (Cr-Al-Fe), 6. Termoçift, 7. Hava boşluğu (Gürbulak 1997)



Şekil 3.8. Büyütülen GaTe yarıiletkeni

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Deney Sistemleri ve Ölçümlerin Yapılması

Geliştirilmiş Bridgman-Stockbarger yöntemi ile büyütülen GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin yapısal analizlerini yapmak amacıyla XRD, SEM EDX ve AFM teknikleri kullanılmıştır. Yasak enerji aralığındaki ve band yapısındaki değişimler ve elektriksel özellikler incelenmiştir. Ayrıca üretilen tüm numunelerin yapısal özellikleri üzerinde ve band yapısında tavlama sıcaklığının yanı sıra katılan Cd elementinin etkisi araştırılmıştır.

4.2. GaTe ve GaTe:Cd Yarıiletkenlerin XRD Analizleri

Modifiye Bridgman-Stockbarger yöntemi ile büyütülmüş olan GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin farklı sıcaklıklarda ve farklı tavlama sürelerinde tavlansından sonra XRD spektrumları alınmıştır. İkili bileşikler oda sıcaklığında, 100°C, 200°C, 300°C, 350°C, 400°C, 500°C, 600°C ve 700°C'de ve her bir sıcaklık değerinde 10, 20 ve 30 dakika boyunca tavlansarak kristallerin XRD spektrumları alınmıştır. Büyütülen ikili bileşiklerin yapısal analizi Cu, K α kullanan ve $2\theta = 4^\circ$ den 90° ye kadar değişen ve 0,6 s tarama oranı ve dalga boyu 1.54184 Å olan x-ışınları kırınım cihazı kullanılmıştır. GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenleri için en şiddetli pik olan (-420) için yarıiletkenlerin bazı kristal özellikleri hesaplanmıştır. Bu özellikler; yansıma düzlemleri arasındaki mesafe (d), tanecik büyüklüğü (D), zorlanma derecesi (ϵ), dislokasyon yoğunluğu (δ), birim alan başına kristal sayısı (N) ve mikro gerinim veya mikro zorlanmadır (σ). Bu parametreler oda sıcaklığında, 100, 300 ve 500°C'deki tavlansmış numuneler için (2.6)-(2.10) denklemleri kullanılarak hesaplanmış ve tablo olarak aşağıda sunulmuştur. Örgü parametreleri $a= 17,404 \text{ \AA}$; $b= 10,456 \text{ \AA}$; $c=4,077 \text{ \AA}$ elde edilmiş ve $\lambda=1,54184 \text{ \AA}$ hesaplamalarda kullanılmıştır.

Çizelge 4.1. GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin oda sıcaklığındaki XRD analizleri

Numune	Şiddet	Şiddet oranı	2θ (°)	d _{deney} (Å)	d _{teorik} (Å)	Yapı
GaTe	27075	0,074	24,197	3,675	3,608	Monoklinik
GaTe:Cd	366175		24,673	3,605	3,608	Monoklinik

Çizelge 4.2. GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin oda sıcaklığındaki bazı kristal parametreleri (D: tanecik büyüklüğü, ε: zorlanma derecesi, δ: dislokasyon yoğunluğu, N: birim alan başına kristal sayısı ve σ: mikro zorlanma)

Numune	2θ (°)	FWHM (°)	D _{deney} (Å)	ε x10 ⁻⁴	δ (çizgi/m ²) x10 ¹⁴	N (m ⁻²) x10 ¹⁸	σ(%)
GaTe	24,197	0,216	418,2	9,215	5,718	6,973	0,599
GaTe:Cd	24,673	0,162	557,6	6,905	3,216	2,942	0,434

Çizelge 4.3. GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin 100°C'deki ve farklı tavlama sürelerindeki XRD sonuçları

Numune	Şiddet	Şiddet oranı	2θ (derece)	d _{deney} (Å)	d _{teorik} (Å)	Yapı
GaTe-10dk.	13545	0,074	24,699	3,601	3,605	Monoklinik
GaTe:Cd-10dk.	182169		24,544	3,624	3,627	Monoklinik
GaTe-20dk.	12704	5,129	24,437	3,697	3,643	Monoklinik
GaTe:Cd-20dk.	2477		24,515	3,628	3,631	Monoklinik
GaTe-30dk.	125303	3,636	24,226	3,671	3,674	Monoklinik
GaTe:Cd-30dk.	34459		24,304	3,659	3,662	Monoklinik

Çizelge 4.4. GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin 100°C'deki kristal parametreleri

Numune	2θ (°)	FWHM (°)	D_{deney} (Å)	ε $\times 10^{-4}$	δ (çizgi/m ²) $\times 10^{14}$	N (m ⁻²) $\times 10^{18}$	σ (%)
GaTe-10dk.	24,699	0,159	568,8	6,777	3,091	2,771	0,432
GaTe-20dk.	24,437	0,227	398,4	9,680	6,300	9,725	0,627
GaTe-30dk.	24,226	0,114	793,3	4,863	1,589	1,234	0,319
GaTe: Cd-10dk.	24,544	0,177	510,0	7,547	3,845	3,845	0,479
GaTe: Cd-20dk.	24,515	0,212	426,5	9,039	5,497	6,445	0,582
GaTe: Cd-30dk.	24,304	0,131	688,2	5,588	2,111	1,534	0,356

Çizelge 4.5. GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin 300°C'deki ve farklı tavlama sürelerindeki XRD sonuçları

Numune	Şiddet	Şiddet oranı	2θ (°)	d_{deney} (Å)	d_{teorik} (Å)	Yapı
GaTe-10dk.	199150	7,869	24,413	3,643	3,646	Monoklinik
GaTe: Cd-10dk.	25309		24,570	3,620	3,623	Monoklinik
GaTe-20dk.	12328	1,746	24,860	3,579	3,582	Monoklinik
GaTe: Cd-20dk.	7059		24,362	3,650	3,654	Monoklinik
GaTe-30dk.	24839	4,881	24,699	3,602	3,605	Monoklinik
GaTe: Cd-30dk.	5089		24,307	3,659	3,662	Monoklinik

Çizelge 4.6. GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin 300°C'deki kristal parametreleri

Numune	2θ (°)	FWHM (°)	D_{deney} (Å)	ε $\times 10^{-4}$	δ (çizgi/m ²) $\times 10^{14}$	N (m ⁻²) $\times 10^{18}$	σ (%)
GaTe-10dk.	24,413	0,185	488,5	7,890	4,191	4,375	0,508
GaTe-20dk.	24,860	0,196	460,4	8,352	4,718	5,226	0,519
GaTe-30dk.	24,699	0,240	377,0	10,230	7,036	9,518	0,655
GaTe:Cd-10dk.	24,570	0,261	345,5	11,127	8,377	12,123	0,699
GaTe:Cd-20dk.	24,362	0,167	541,9	7,123	3,405	3,142	0,465
GaTe:Cd-30dk.	24,307	0,144	626,4	6,142	2,549	2,034	0,393

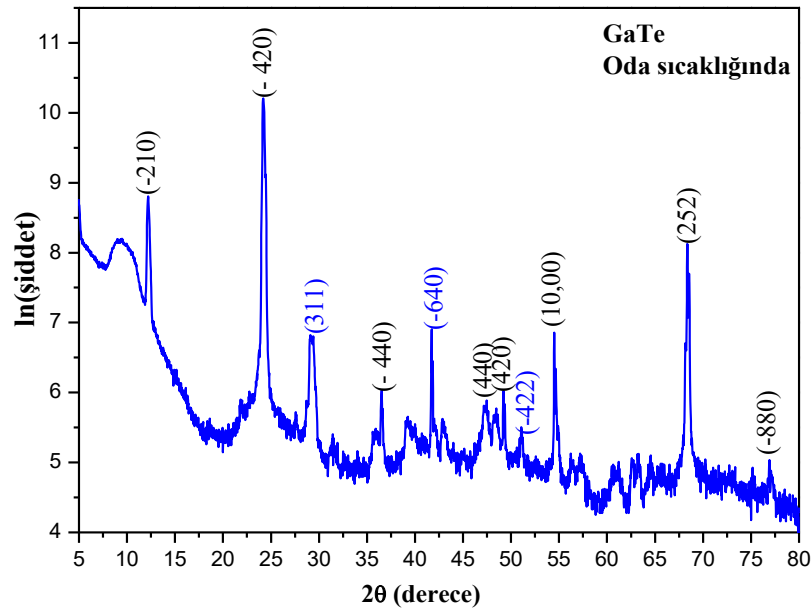
Çizelge 4.7. GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin 500°C'deki ve farklı tavlama sürelerindeki XRD sonuçları

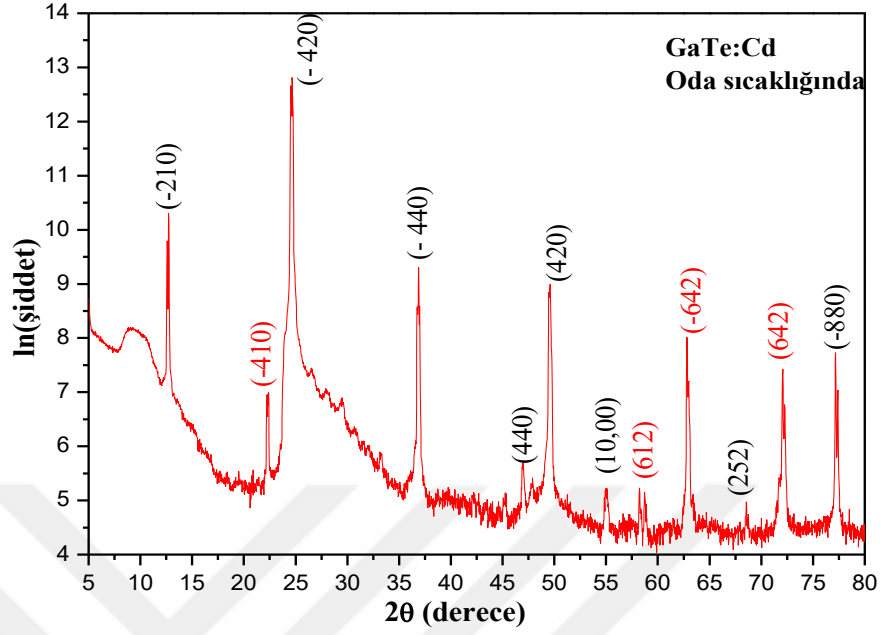
Numune	Şiddet	Şiddet oranı	d_{deney} (Å)	d_{teorik} (Å)	2θ (°)	Yapı
GaTe-10dk.	34998	1,429	3,613	3,616	24,622	Monoklinik
GaTe:Cd-10dk.	24491		3,597	3,600	24,728	Monoklinik
GaTe-20dk.	62475	21,783	3,571	3,574	24,911	Monoklinik
GaTe:Cd-20dk.	2868		3,608	3,611	24,656	Monoklinik
GaTe-30dk.	42945	49,080	3,542	3,545	25,120	Monoklinik
GaTe:Cd-30dk.	875		3,567	3,571	24,937	Monoklinik

Çizelge 4.8. GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin 500°C'deki kristal parametreleri

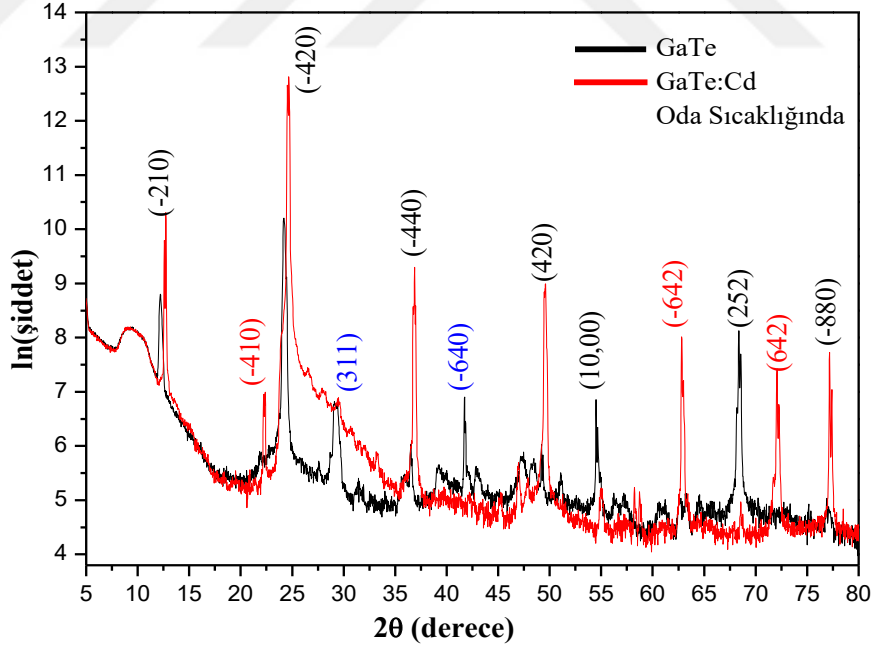
Numune	2θ (°)	FWHM (°)	D_{deney} (Å)	ϵ $\times 10^{-4}$	δ (çizgi/m ²) $\times 10^{14}$	N (m ⁻²) $\times 10^{18}$	σ (%)
GaTe-10dk.	24,622	0,152	594,8	6,480	2,827	2,424	0,414
GaTe-20dk.	24,911	0,119	758,3	5,070	1,739	1,170	0,314
GaTe-30dk.	25,120	0,154	588,7	6,559	2,885	2,500	0,417
GaTe:Cd-10dk.	24,728	0,179	504,6	7,629	3,927	3,892	0,481
GaTe:Cd-20dk.	24,656	0,243	372,2	10,358	7,219	9,697	0,663
GaTe:Cd-30dk.	24,937	0,045	1990,1	1,917	0,252	0,063	0,067

Büyütülen GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenleri için XRD spektrumları oda sıcaklığı, 100°C, 300°C ve 500°C için aşağıda sırasıyla verilmiştir.

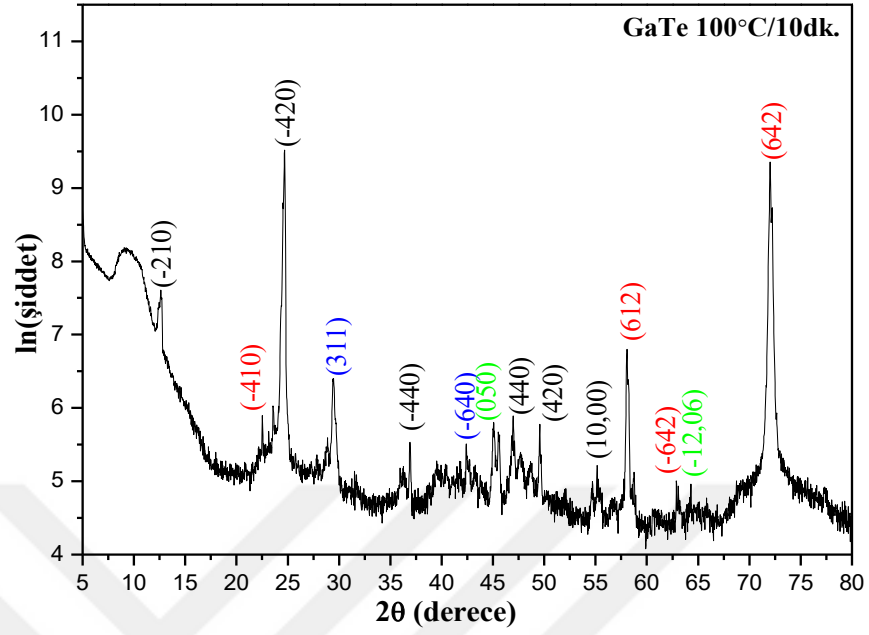
**Şekil 4.1.** GaTe yarıiletkeninin oda sıcaklığındaki XRD spektrumu



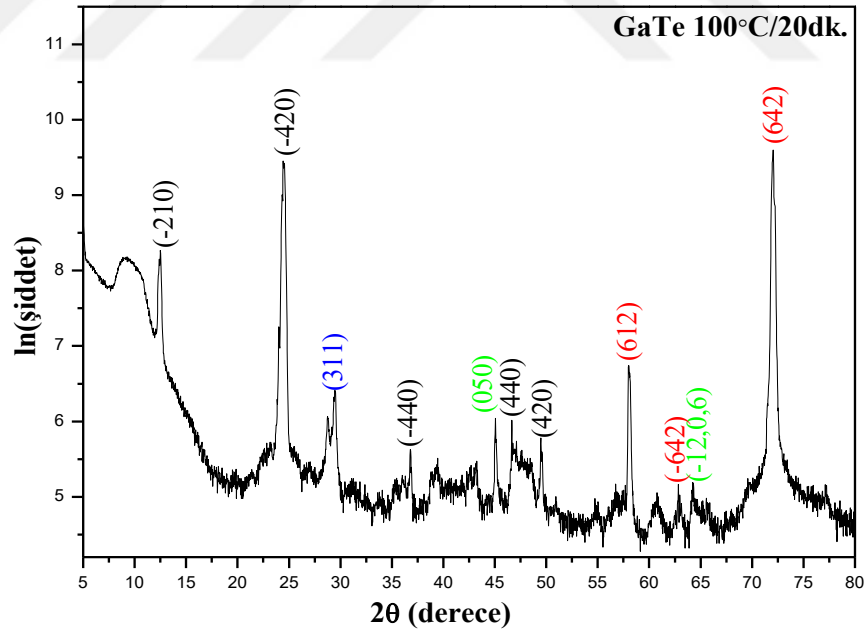
Şekil 4.2. GaTe:Cd yarıiletkenin oda sıcaklığındaki XRD spektrumu



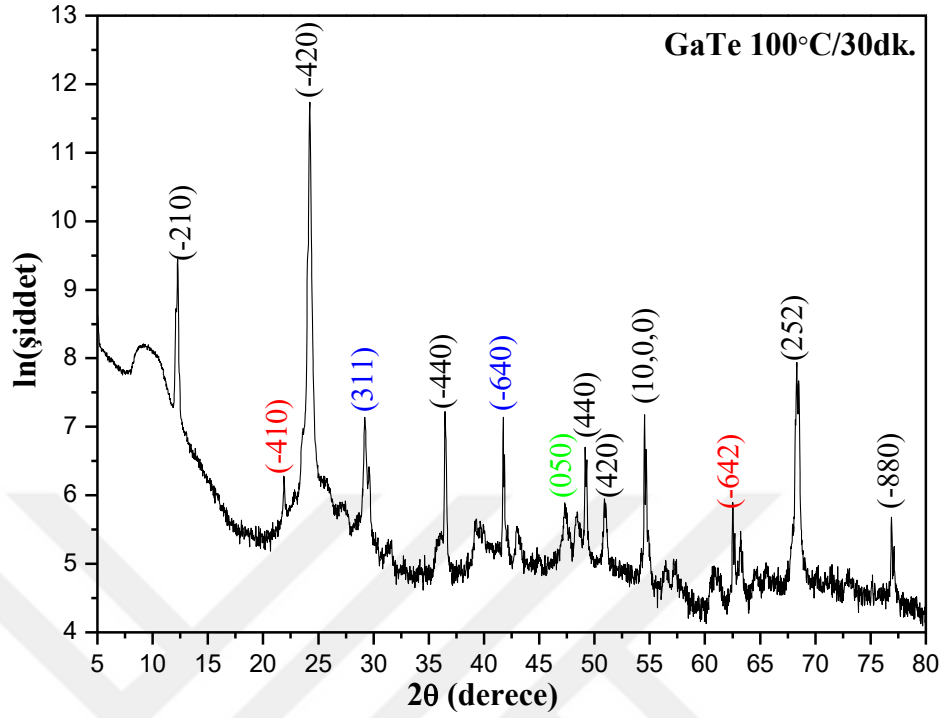
Şekil 4.3. GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin oda sıcaklığındaki XRD spektrumları



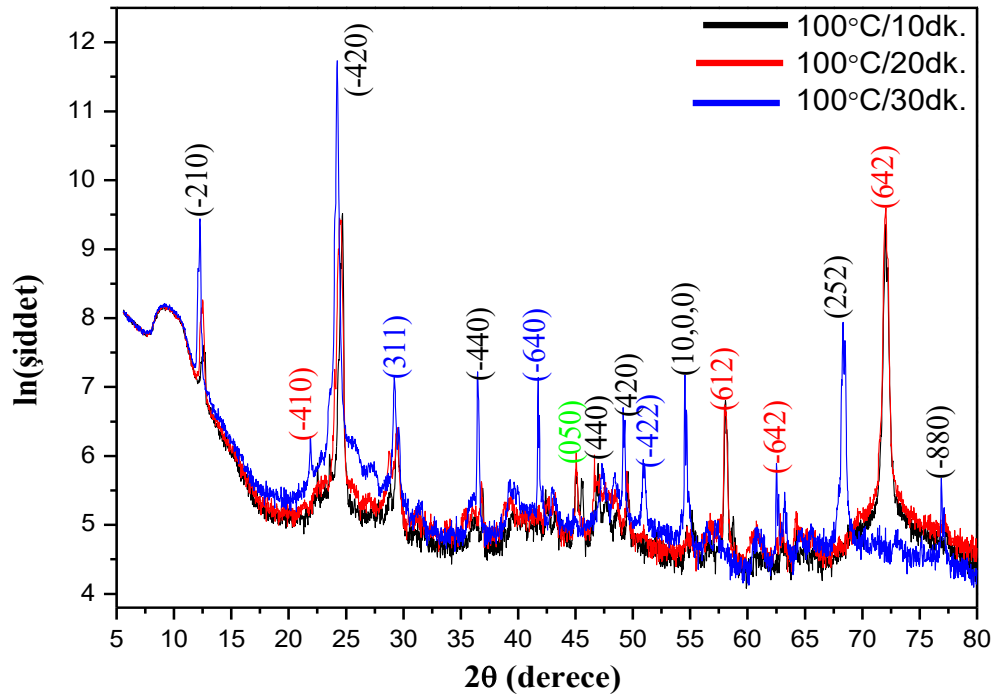
Şekil 4.4. GaTe yarıiletkenin 100°C'de 10 dakika tavlama sonrasında XRD spektrumu



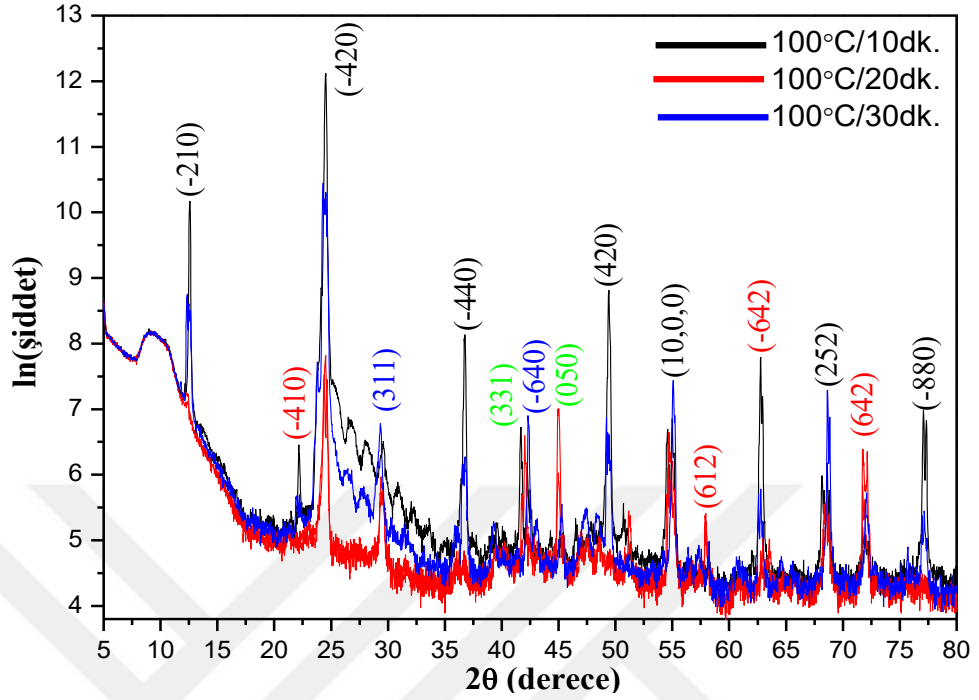
Şekil 4.5. GaTe yarıiletkenin 100°C'de 20 dakika tavlama sonrasında XRD spektrumu



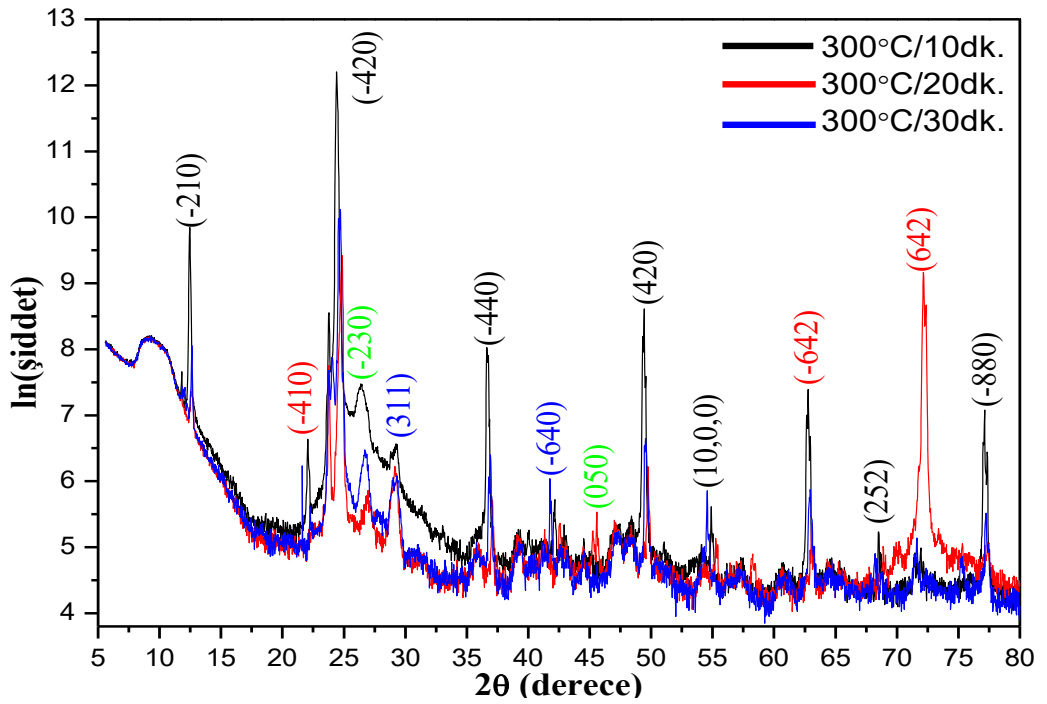
Şekil 4.6. GaTe yarıiletkenin 100°C'de 30 dakika tavlama sonrasında XRD spektrumu



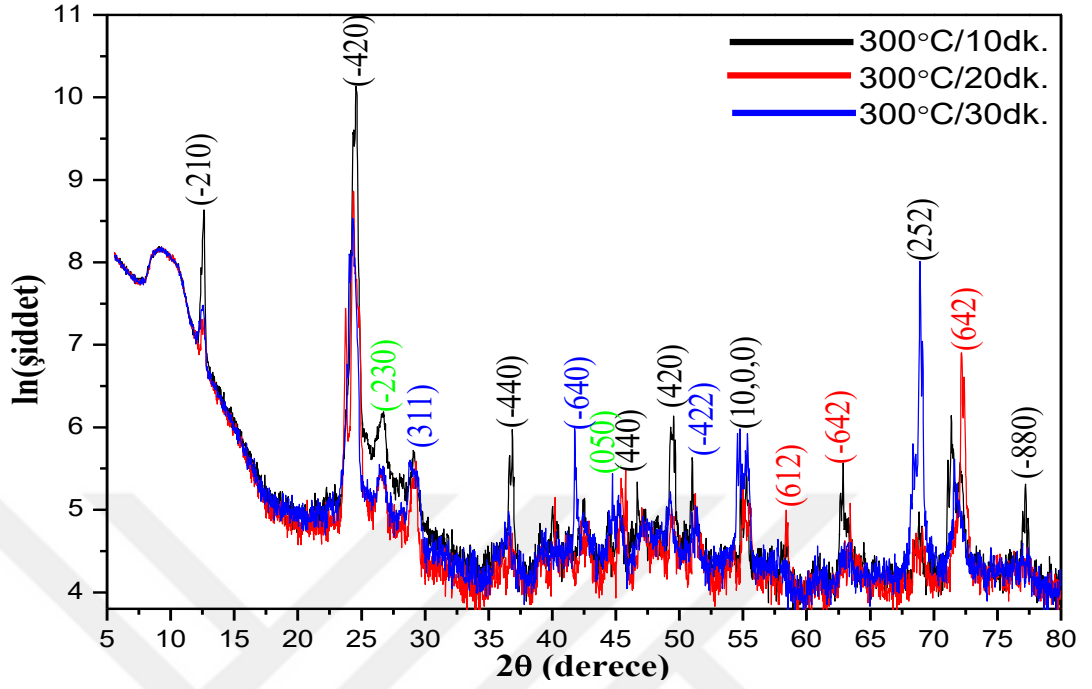
Şekil 4.7. GaTe yarıiletkenin 100°C'de 10, 20 ve 30 dakika tavlama sonrasında XRD spektrumu



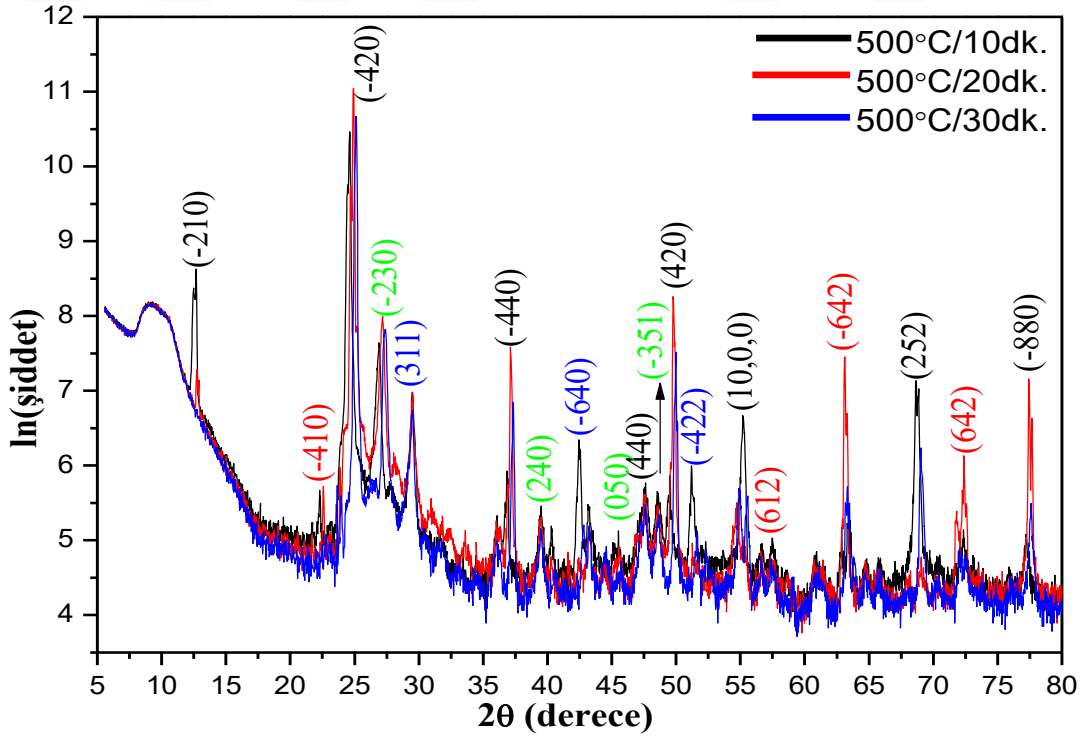
Şekil 4.8. GaTe:Cd yarıiletkenin 100°C'de 10,20 ve 30 dakika tavlama sonrasında XRD spektrumu



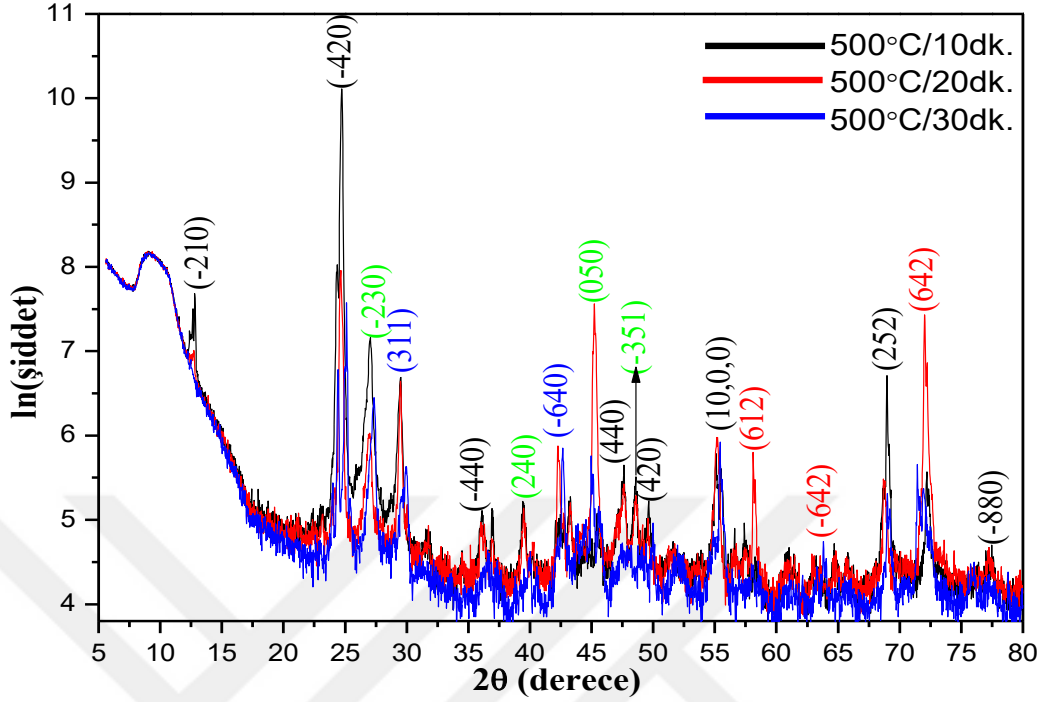
Şekil 4.9. GaTe yarıiletkeni için 300°C'de 10,20 ve 30 dakika tavlama sonrasında XRD spektrumu



Şekil 4.10. GaTe:Cd yarıiletkenin 300°C'de 10, 20 ve 30 dakika tavlamadan sonra XRD spektrumu



Şekil 4.11. GaTe yarıiletkenini 500°C'de 10, 20 ve 30 dakika tavlamadan sonra XRD spektrumu

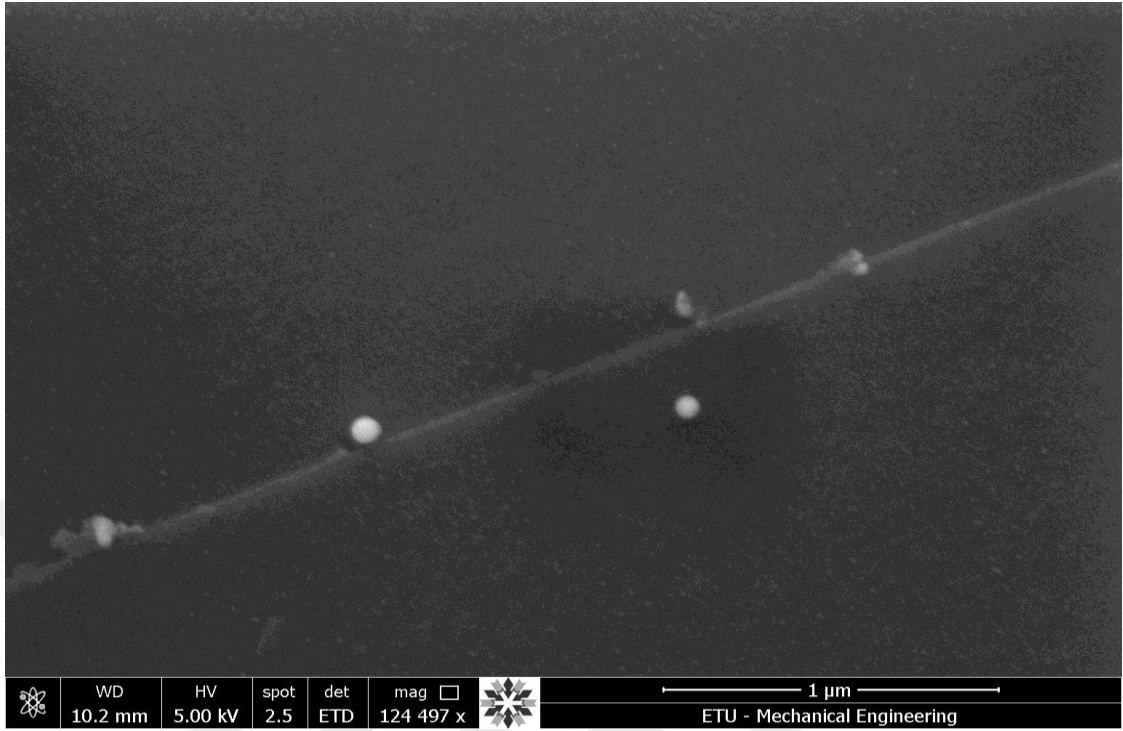


Şekil 4.12. GaTe:Cd yarıiletkenin 500°C'de 10, 20 ve 30 dakika tavlamadan sonra XRD spektrumu

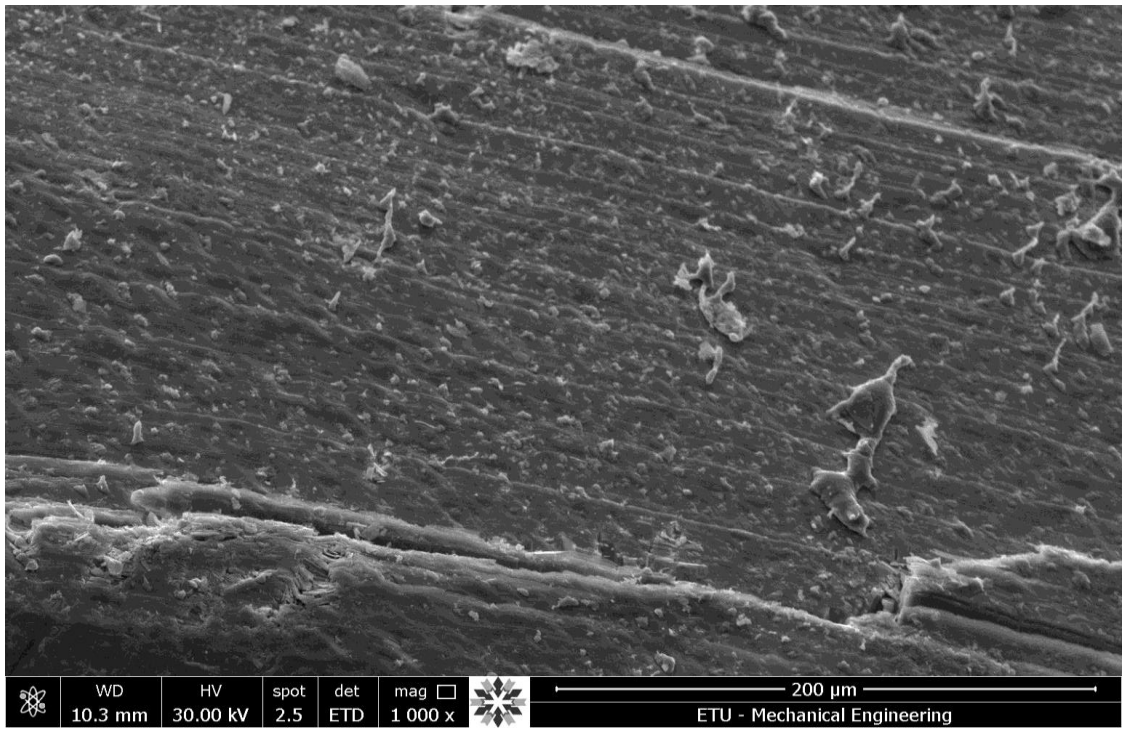
4.3. GaTe ve GaTe:Cd Yarıiletkenlerin SEM ve EDX Analizleri

GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin yüzey morfolojisi SEM tekniği ile elde edilmiştir. GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin 5 kV'de 125 000 büyütme oranında elde edilen SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 4.13'de SEM görüntülerinden GaTe yarıiletkenin homojen bir yüzeye sahip olduğu belirlenmiştir. GaTe yarıiletkenin SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlara göre taneciklerin ortalama büyüklüğü yaklaşık olarak 490-980 Å civarında olduğu bulunmuştur. GaTe:Cd yarıiletkenin SEM görüntüleri incelendiğinde tipik GaTe tabakalı yapının olduğu gözlenmiştir. Ayrıca yüzeyde diğer tabakalara ait olduğu düşünülen artık parçaların kaldığı gözlemlenmiştir.

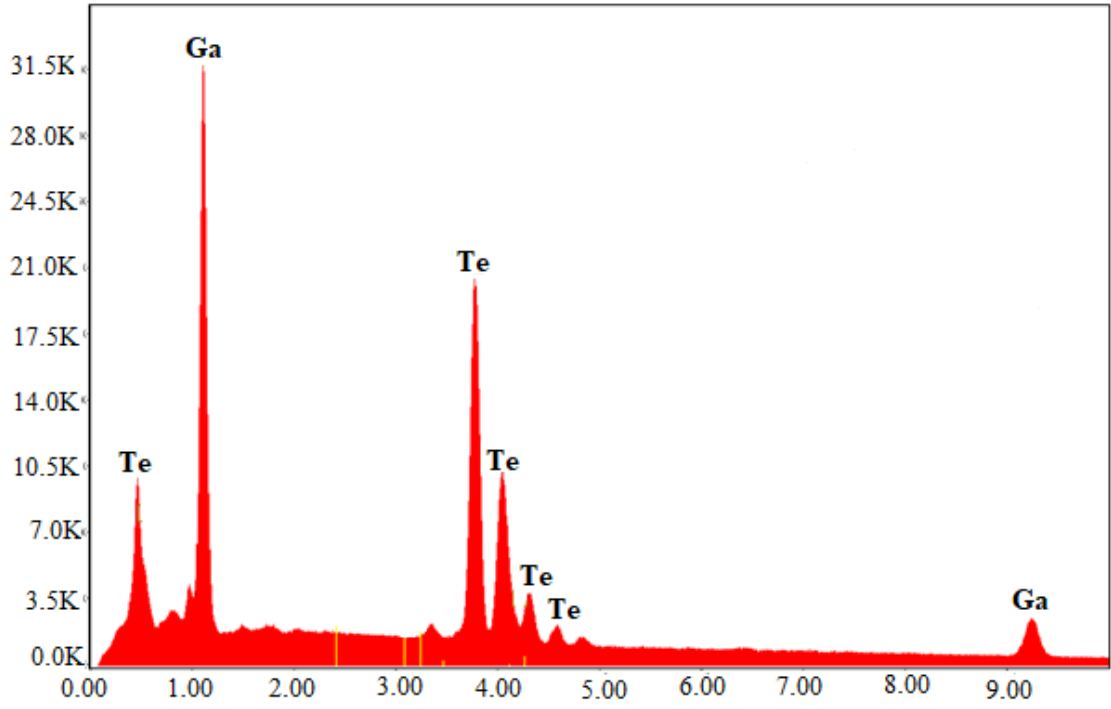
Bileşiklerin içinde hangi elementlerin olduğu ve bu elementlerden yüzde atomik olarak ne kadar yapıda var olduğunu belirlemek için EDX analizi yapılmıştır. EDX analiz sonuçları GaTe için Şekil 4.15'te ve GaTe:Cd için 4.16'da verilmiştir.



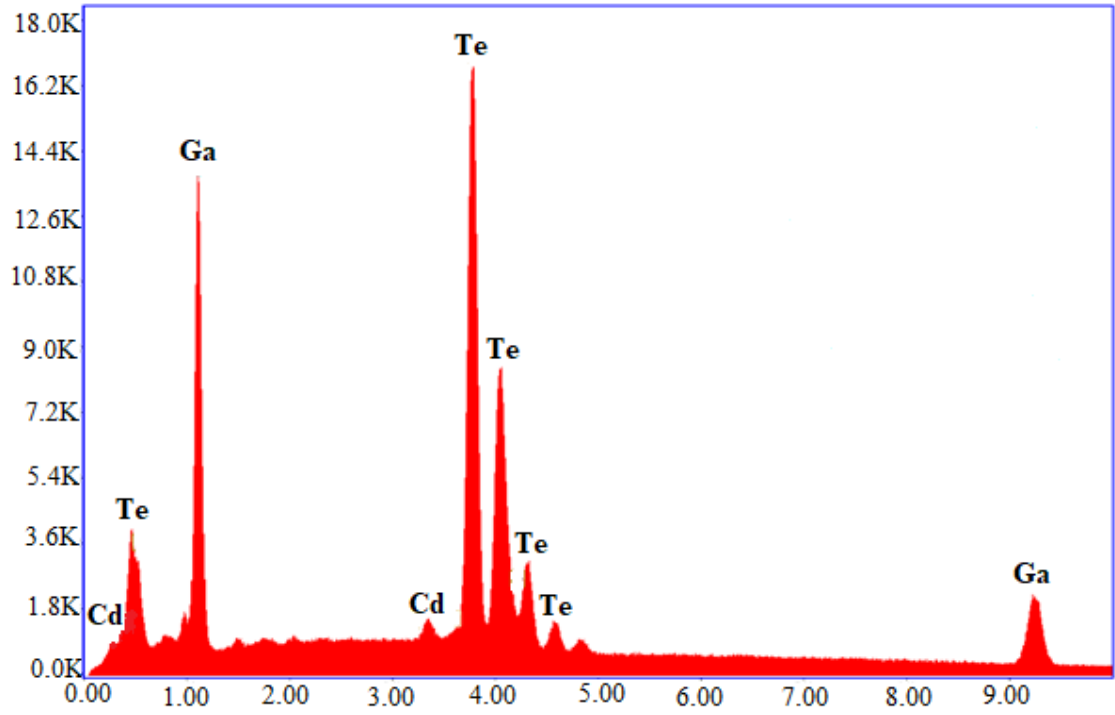
Şekil 4.13. GaTe yarıiletkenin SEM görüntüsü



Şekil 4.14. GaTe:Cd yarıiletkenin SEM görüntüsü



Şekil 4.15. GaTe yarıiletkenin EDX spektrumu



Şekil 4.16. GaTe:Cd yarıiletkenin EDX spektrumu

Çizelge 4.9. GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin EDX sonuçları

Elementler	GaTe		GaTe:Cd	
	% Wt	% At	% Wt	% At
Ga	47,14	62,01	32,50	46,82
Te	52,86	37,99	66,92	52,67
Cd	-----	----	0,57	0,51

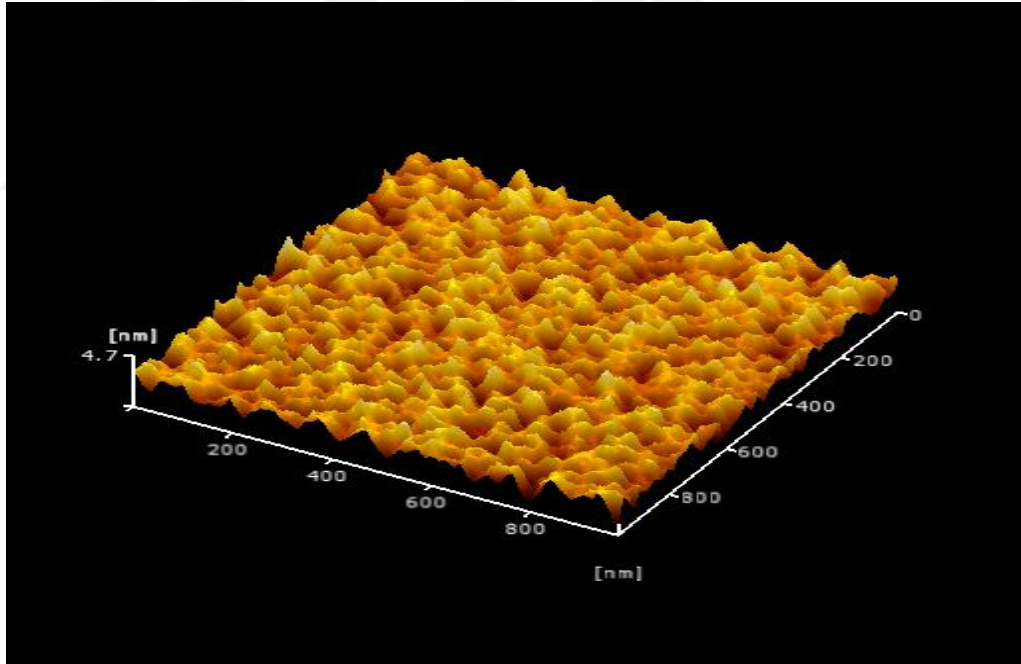
4.4. GaTe ve GaTe:Cd Yarıiletkenlerin AFM Analizleri

GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin topografi görüntüleri “Hitachi 5100N” atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile kontaklız modda yaklaşık 300 kHz titreşim frekansında ve 0,7 Hz tarama hızında, oda sıcaklığında ve hava ortamında alınmıştır. Yay ve uç silisyumdan yapılmıştır ve yay sabiti 40 N/m'dir. AFM cihazından alınan görüntüler, yüzey pürüzlülüğünü renk ton farklılıklarıyla sembolize eder. AFM görüntülerindeki renkler yüksekliklere göre değişim göstermektedir. Beyaz bölgeler üst üste yığılmış tane şeklindeki oluşumları, siyah bölgeler ise tane boşluklarını (derinlikleri) gösterir. Renklerin aynı tonda olması ise film yüzeyinin homojen olduğunun bir göstergesidir.

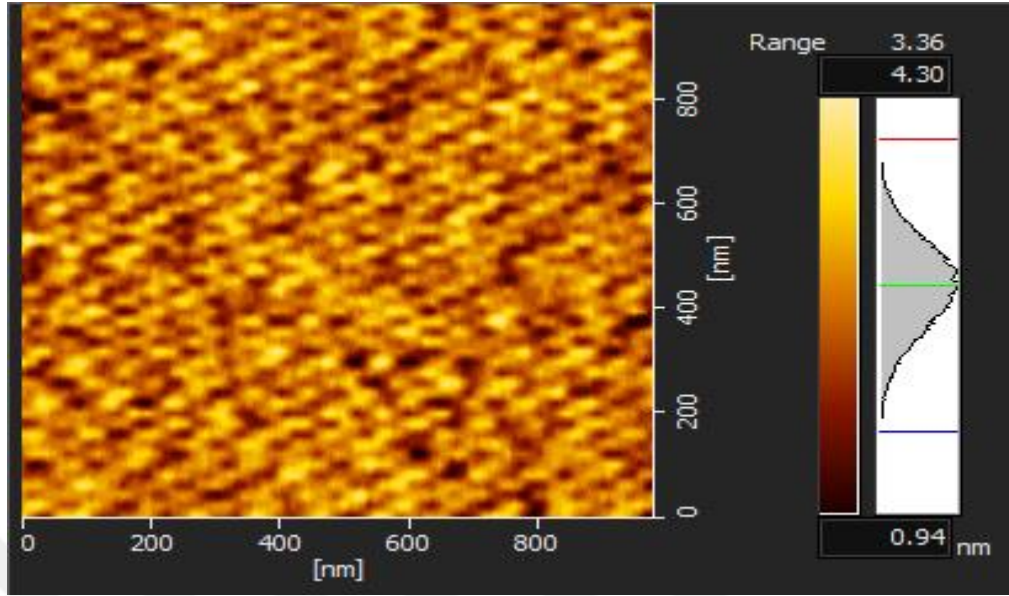
Şekil 4.17-4.18 ve şekil 4.19-4.20'de sırasıyla GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlere ait AFM görüntüleri gösterilmektedir. GaTe için Ra ve Rq yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla, 0,553 nm ve 0,656 nm'dir. Şekil 4.17'deki AFM görüntüsü incelendiğinde, üst üste yığılmış tanelerin kümeleşmesiyle oluşan beyaz bölgelerin varlığı dikkat çekmektedir. Siyah bölgeler ise çok daha az olduğu görülmektedir. Siyah bölgeler, yüzeye gelen atomların büyüme merkezi olarak bu bölgeleri tercih etmemelerinden dolayı kaynaklanmış olabilir. GaTe:Cd için Ra ve Rq yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla, 0,421 nm ve 0,513 nm'dir. Şekil 4.19'daki AFM görüntüsü incelendiğinde, üst üste yığılmış tanelerin kümeleşmesiyle oluşan beyaz bölgelerin varlığı dikkat çekmektedir. GaTe ikili yarıiletkene Cd katkılı olduğunda beyaz bölgelerin daha sivrileştiği ve siyah bölgelerin biraz daha fazla olduğu görülmektedir. Siyah bölgelerin

oluşmasında muhtemel bir sebep Cd elementinin yapı içinde kusur oluşturması gösterilebilir.

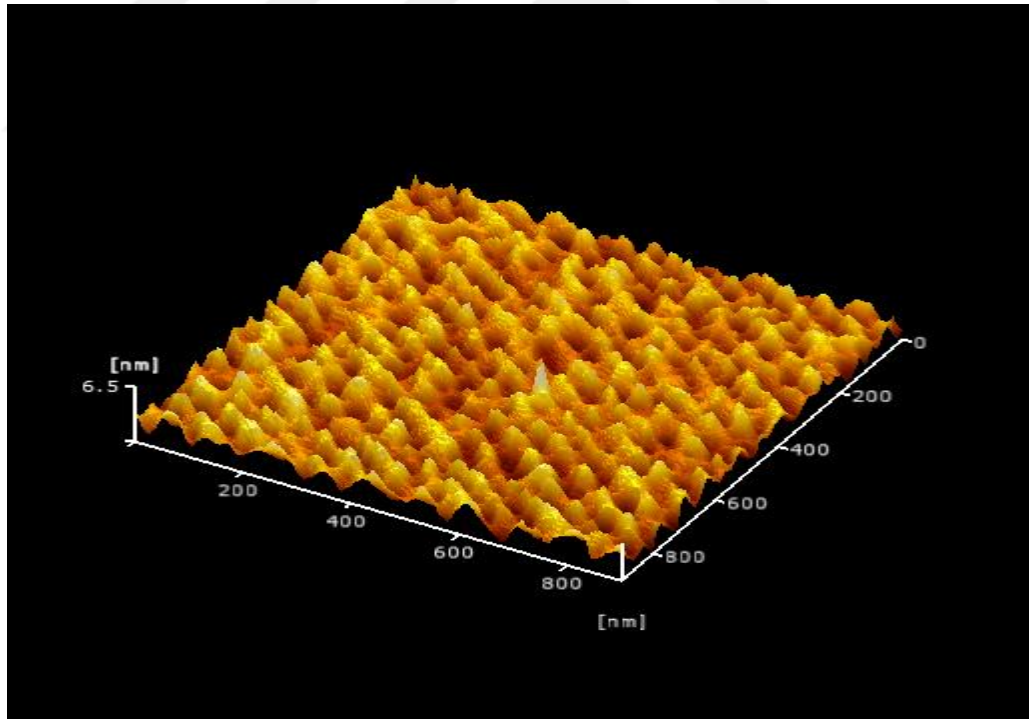
GaTe yarıiletkenin taranan kısmı yaklaşık olarak $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ olarak seçilmiştir. Ortalama parçacık büyüklükleri şekillerden de görüldüğü gibi, kristallerin homojen bir şekilde büyüdüğü ve küçük taneciklerin birleştiği görülmüştür. Taneciklerin homojen ve yoğun (sık) bir dağılıma sahip olduğunu ve parçacıkların yüzeye rastgele dağıldıklarını göstermektedir. GaTe: Cd yarıiletkeninde taneciklerin büyüklüğü, yüzey pürüzlülüğü, karekök ortalama değerleri ve büyük tanelerin sayısı küçük tanelerin sayısına göre artmıştır. Cd atomları GaTe fazı arasına yerleşerek pürüzlülüğün artmasına, yapının bozulmasına ve kusurların oluşmasına neden olabileceği düşünülebilir.



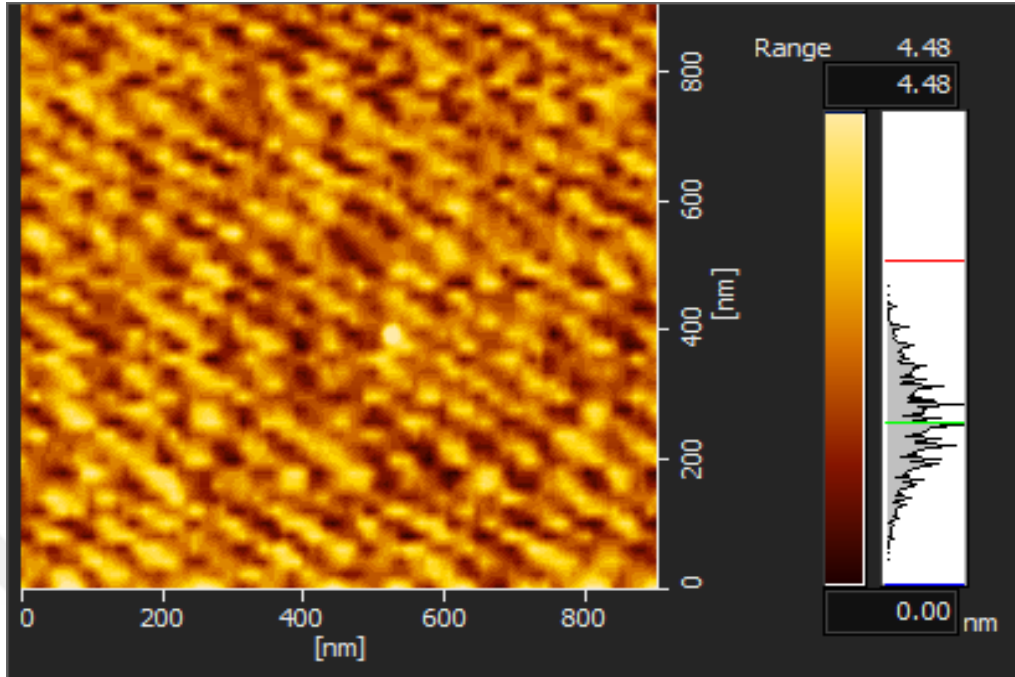
Şekil 4.17. GaTe yarıiletkenine ait üç boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 4.18. GaTe yarıiletkene ait iki boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 4.19. GaTe:Cd yarıiletkenine ait üç boyutlu AFM görüntüsü



Şekil 4.20. GaTe:Cd yarıiletkenine ait iki boyutlu AFM görüntüsü

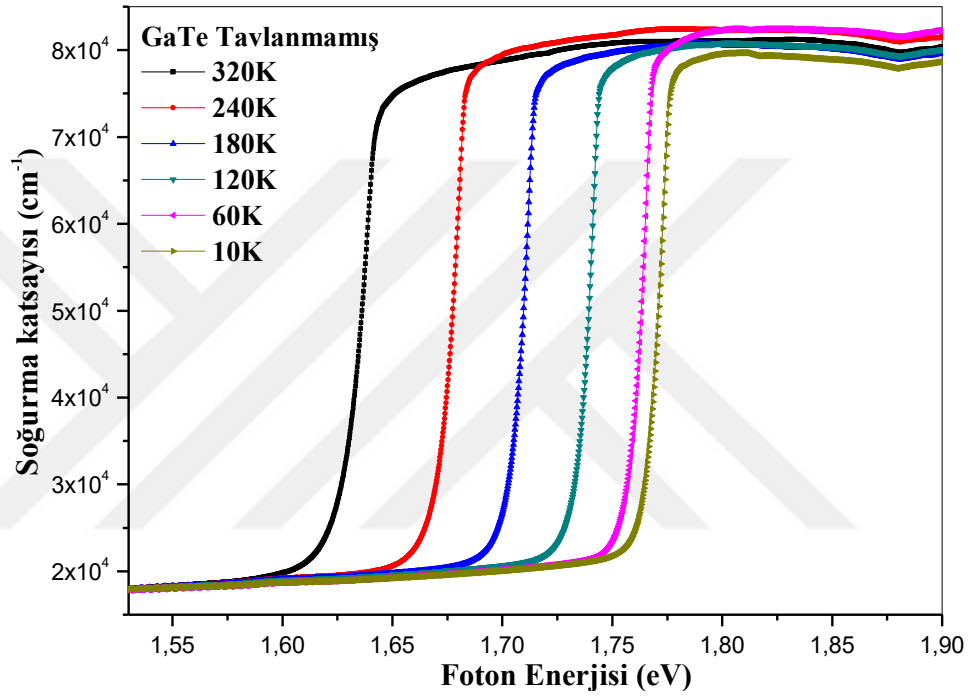
Çizelge 4.10. GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin AFM sonuçları

Parametreler	GaTe	GaTe:Cd
Ortalama pürüzlülük değeri (S_a)	0,410 nm	0,572 nm
Maksimum vadi derinlik değeri (S_v)	2,619 nm	2,243 nm
Ortalama pürüzlülük yükseklik değeri (S_z)	3,825 nm	4,726 nm
Maksimum zirve yükseklik değeri (S_p)	2,118 nm	4,261 nm
Karekök ortalama değeri (S_q)	0,514 nm	0,710 nm
Toplam pürüzlülük değeri (S_T)	4,737 nm	6,503 nm

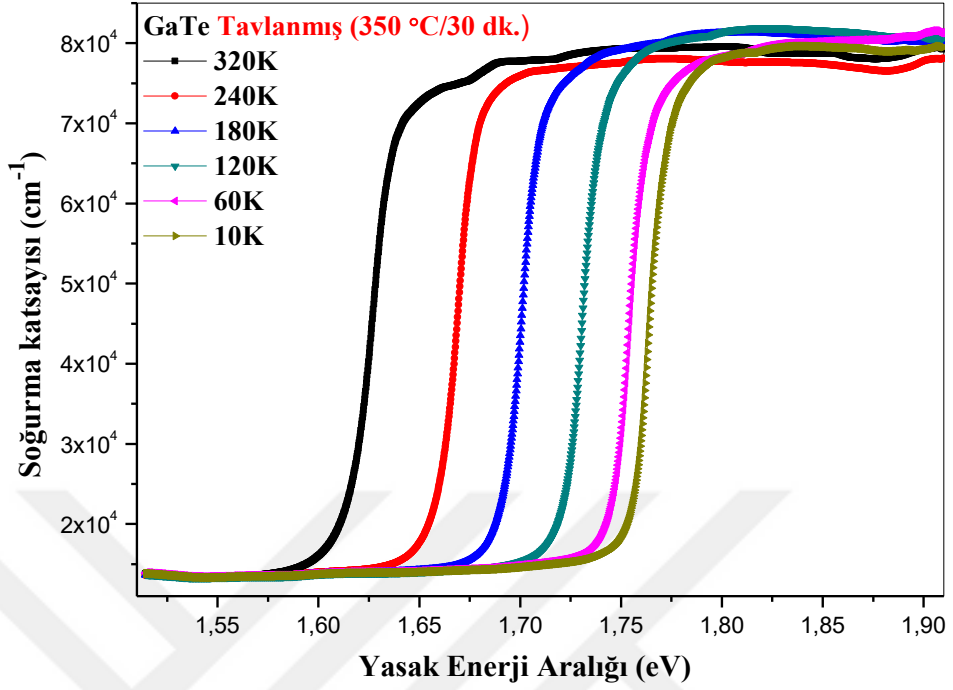
4.5. GaTe ve GaTe:Cd Yarıiletkenlerin Soğurma Ölçümleri

GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin soğurma ölçümleri sıcaklığa bağlı değişimleri alınmıştır. Bunun için numune sıcaklığı 320 K'den başlanarak 10 K'lik adımlarla düşürülmüş ve son ölçüm 10 K sıcaklığında alınmıştır. Her sıcaklık değerinde kararlı durumun elde edilmesi için belli bir süre (10 dak.) beklenilmiştir. Perkin Elmer UV/VIS

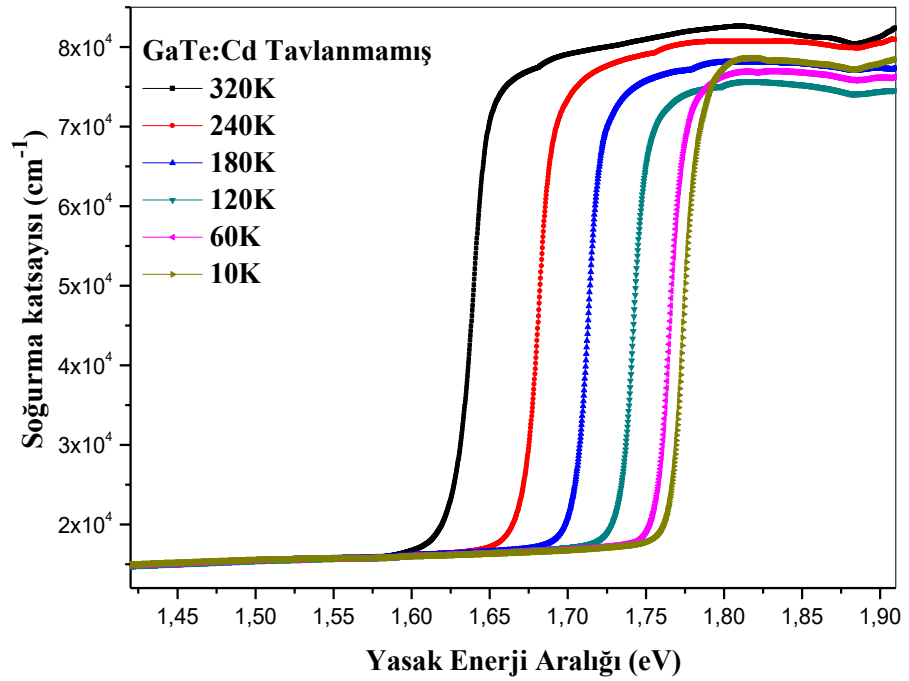
Lambda 2S Spektrometresi yardımıyla alınan soğurma verileri soğurma katsayısı değerlerine dönüştürülerek dalga boyuna bağlı değişimleri elde edilmiştir. Dalga boyu cinsinden alınan değerler eV cinsine dönüştürülerek soğurma katsayısına karşılık gelen fotonun enerji grafikleri elde edilmiştir. GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin soğurma katsayılarının sıcaklıkla değişimi sırasıyla Şekil 4.21 ve Şekil 4.23'de verilmiştir.



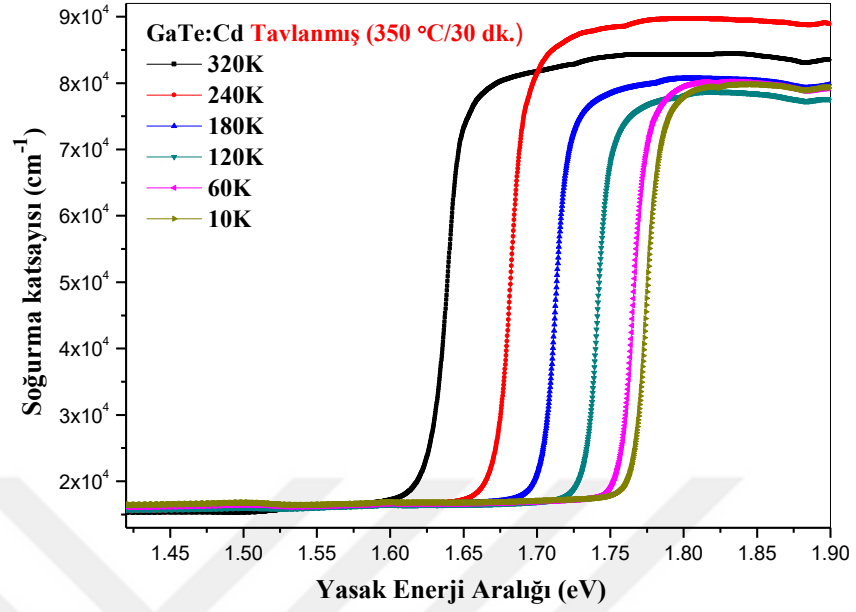
Şekil 4.21. Tavlanmamış GaTe yarıiletkenin soğurma katsayısının sıcaklığa göre değişimi



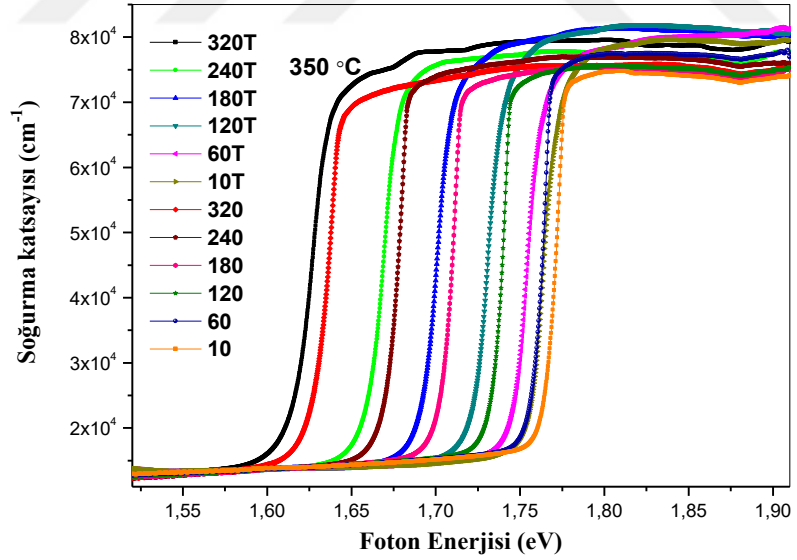
Şekil 4.22. 350°C’de 30 dakika boyunca tavlınmış GaTe yarıiletkenin soğurma katsayısının sıcaklığa göre değişimi



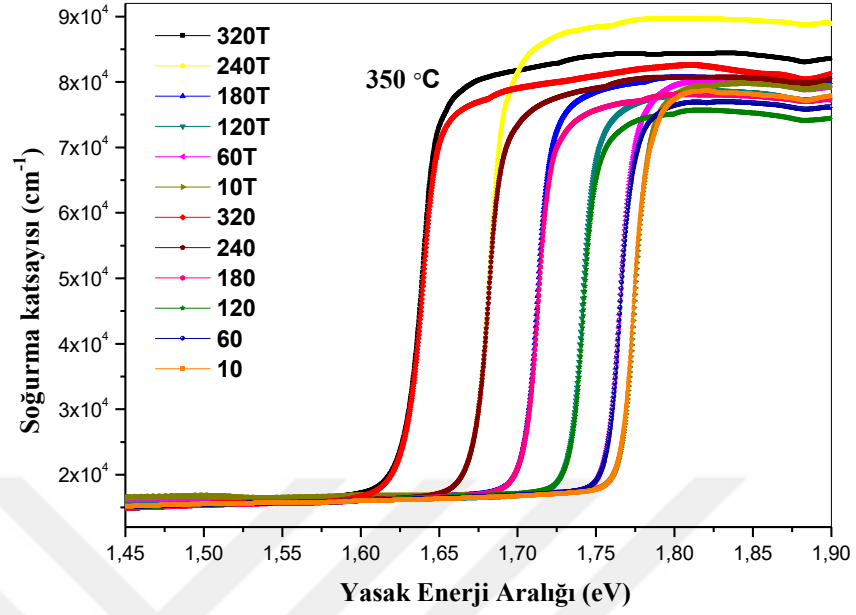
Şekil 4.23. Tavlınmamış GaTe: Cd yarıiletkenin soğurma katsayısının sıcaklığa göre değişimi



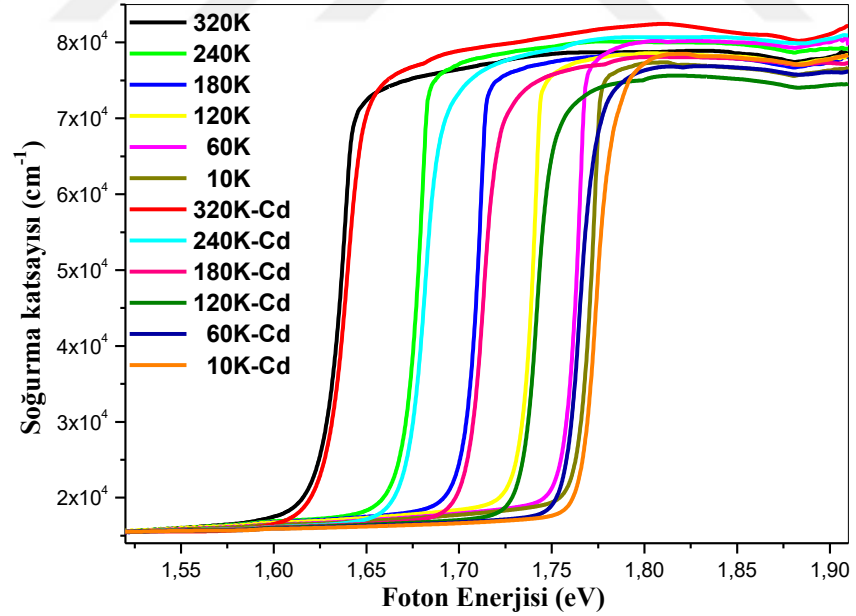
Şekil 4.24. 350°C’de 30 dakika boyunca tavllanmış GaTe:Cd yarıiletkenin soğurma katsayısının sıcaklığa göre değişimi



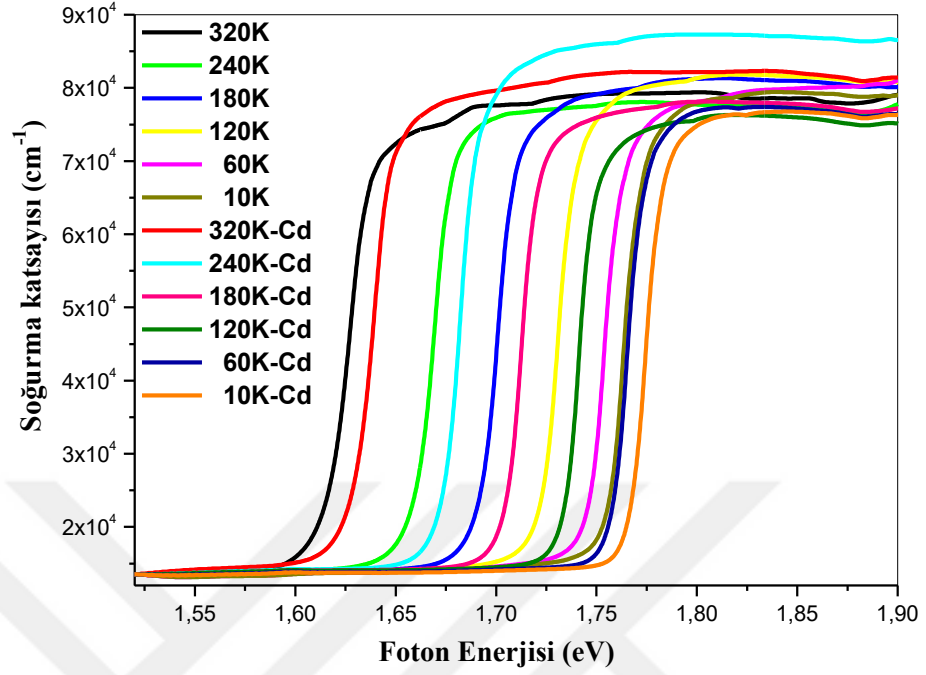
Şekil 4.25. Tavllanmış ve tavlınmamış GaTe yarıiletkenin soğurma katsayısının sıcaklığa göre değişiminin karşılaştırılması ('T' tavllanmış)



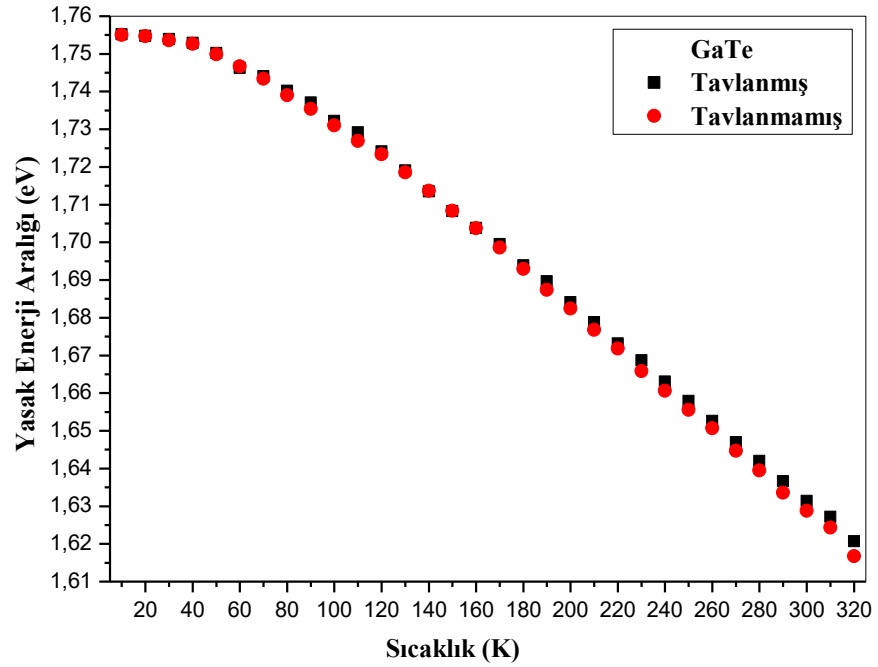
Şekil 4.26. Tavlanmış ve tavlanmamış GaTe:Cd yarıiletkenin soğurma katsayısının sıcaklığa göre değişiminin karşılaştırılması ('T' tavlanmış)



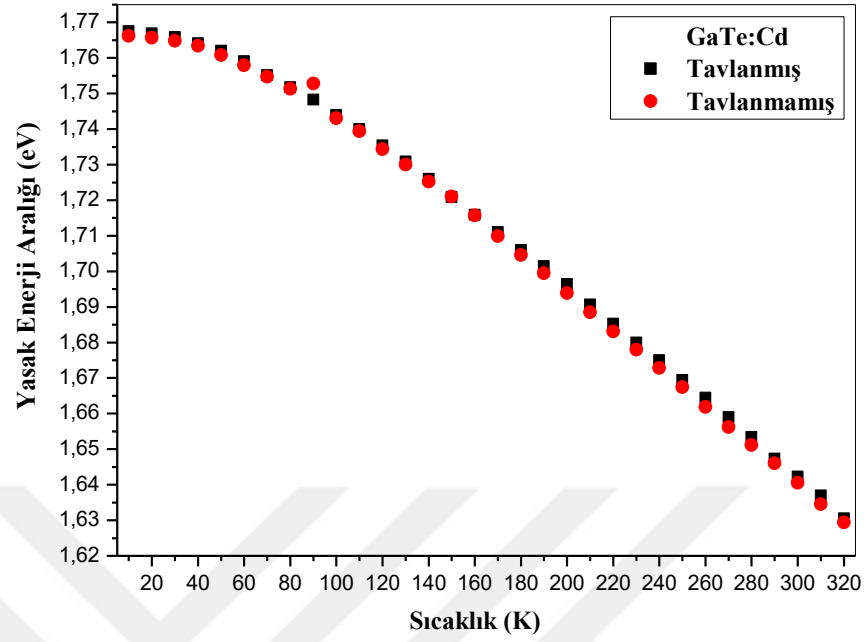
Şekil 4.27. Tavlanmamış GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin soğurma katsayılarının sıcaklıkla değişiminin karşılaştırılması



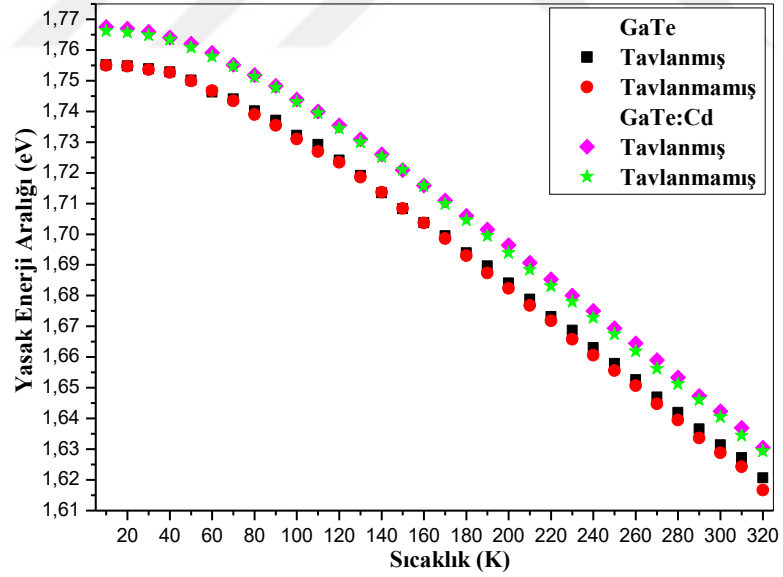
Şekil 4.28. 350°C’de 30 dakika boyunca tavllanmış GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin soğurma katsayılarının sıcaklıkla değişiminin karşılaştırılması



Şekil 4.29. GaTe yarıiletkeninin yasak enerji aralığının sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.30. GaTe:Cd yarıiletkeninin yasak enerji aralığının sıcaklıkla değişimi



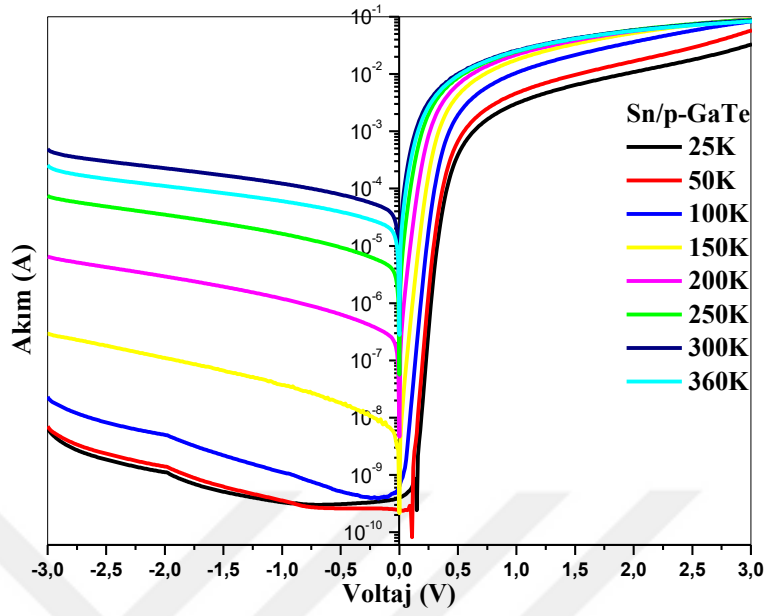
Şekil 4.31. GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerinin yasak enerji aralığının sıcaklıkla değişiminin karşılaştırılması

Çizelge 4.11. Bazı sıcaklık değerleri için GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin yasak enerji aralıklarının karşılaştırılması

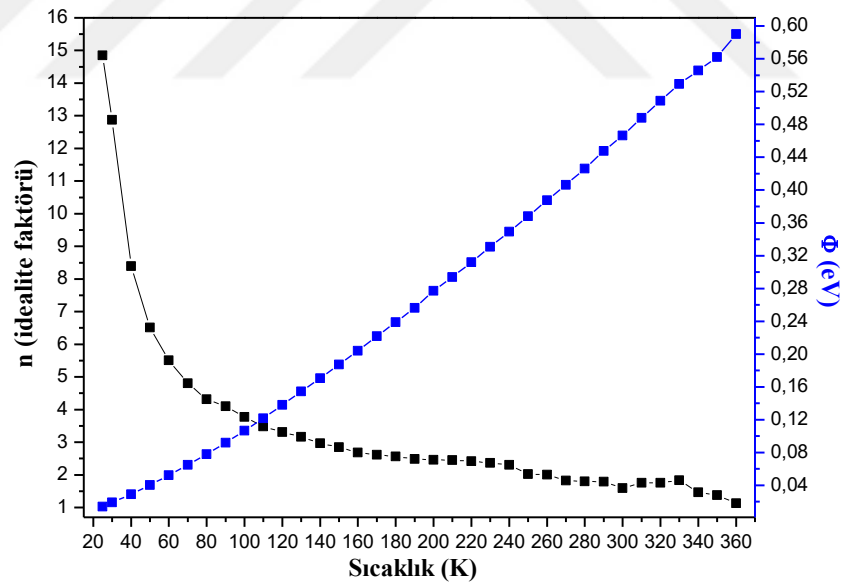
T (K)	GaTe		GaTe:Cd	
	Tavlanmış	Tavlanmamış	Tavlanmış	Tavlanmamış
10	1,7552	1,7550	1,7675	1,7662
60	1,7463	1,7467	1,7591	1,7579
120	1,7241	1,7234	1,7354	1,7344
180	1,6939	1,693	1,7060	1,7046
240	1,6631	1,6606	1,6750	1,6728
300	1,6314	1,6288	1,6423	1,6405
320	1,6207	1,6167	1,6305	1,6294

4.6. Sn/p-GaTe Schottky Diyodunun I-V Karakteristiğinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi

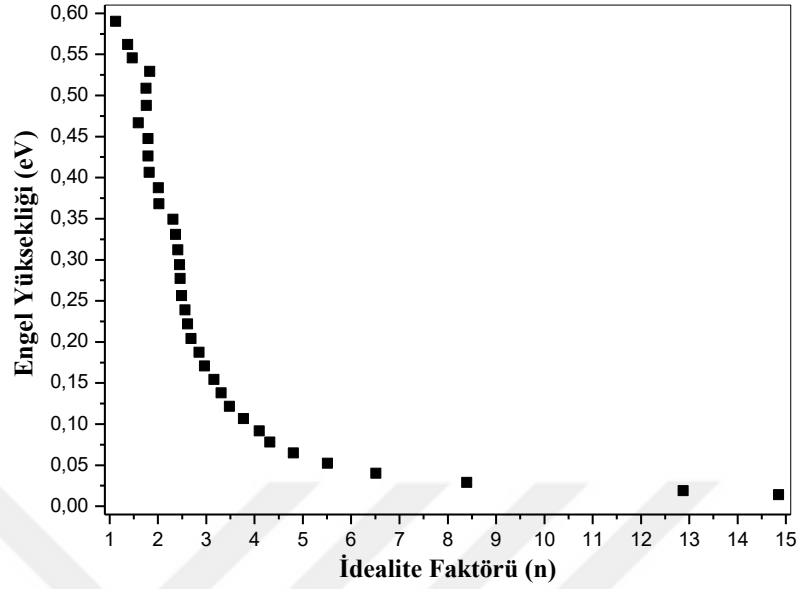
Büyütülen GaTe yarıiletkenin bir tarafına termal buharlaştırma ile In elementi buharlaştırılarak omik kontak elde edilmiştir. Benzer olarak diğer tarafına ise Kalay (Sn) elementi buharlaştırılarak doğrultucu (Schottky) diyod elde edilmiştir. Kontaklar elde edildikten sonra sıcaklığa bağlı ölçümler 360 K'den başlanarak 10 K'lik adımlar halinde sıcaklık düşürülmüş, en son sıcaklık 25 K'de alınmış ve veriler kaydedilmiştir. Daha sonra veri seti kullanılarak Sn/p-GaTe diyodu için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak akım-voltaj grafiği çizilmiştir. Çizilen bu grafiklere fit çekilerek $y = ax + b$ gibi bir denklem elde edilmiştir. Bu denklemde a, eğimi ve b ise sabiti (I_0) temsil etmektedir. Fit yapılarak elde edilen bu iki değer, termoiyonik emisyon teorisinde ilgili yerlere yazılarak diyoda ait parametreler tayin edilmiştir.



Şekil 4.32. Sn/p-GaTe Schottky diyodunun sıcaklığa bağlı olarak I-V karakteristiği



Şekil 4.33. Sn/p-GaTe Schottky diyodunun idealite ve engel yüksekliğinin sıcaklığa göre değişimi



Şekil 4.34. Sn/p-GaTe Schottky diyodunun engel yüksekliğinin idealite faktörüne göre değişimi

Çizelge 4.12. Sn/p-GaTe Schottky diyoduna ait parametreler

Sıcaklık (K)	İdealite faktörü	Engel yüksekliği (eV)	Sıcaklık (K)	İdealite faktörü	Engel yüksekliği (eV)
360	1,125	0,590	180	2,562	0,239
350	1,374	0,562	170	2,617	0,222
340	1,468	0,546	160	2,685	0,204
330	1,831	0,529	150	2,850	0,187
320	1,754	0,509	140	2,963	0,171
310	1,757	0,488	130	3,163	0,154
300	1,593	0,466	120	3,311	0,138
290	1,795	0,448	110	3,484	0,122
280	1,796	0,426	100	3,772	0,107
270	1,821	0,406	90	4,097	0,092
260	2,009	0,388	80	4,317	0,078
250	2,020	0,368	70	4,802	0,065
240	2,310	0,349	60	5,511	0,052
230	2,364	0,331	50	6,514	0,040
220	2,416	0,312	40	8,393	0,029
210	2,448	0,294	30	12,875	0,019
200	2,458	0,277	25	14,853	0,014
190	2,488	0,256	---	-----	-----

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

$A^{III}B^{VI}$ tipi GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin yapısal, optik ve elektriksel karakterizasyonlarının bilinmesinin yanı sıra, öncelikli olarak, bu kristallerin büyütülmesi de önemlidir. Elde edilen kristallerin kullanılabilir özelliklerde olması, tek doğrultuda büyütülmesi ve boyutlarının en azından araştırma yapılabilecek ve devre elamanı olarak kullanılacak büyüklükte olması gerekmektedir. GaTe yarıiletkeninin bazı yapısal özelliklerini ve soğurma ölçüleri yardımıyla elde edilen yasak enerji aralığının bilinmesi önemlidir.

Son yıllarda III-VI grubu ailesi üzerinde birçok çalışma yapılmış ve günümüzde bu yoğun ilgi devam etmektedir. Bu yoğun ilginin sebebi ilgili bileşik ailesinin kendine has özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu bileşikler, III. grup In, Ga, Tl elementleri ile VI. grup Se, S, Te elementlerinden oluşmaktadır. III-VI yarıiletkenleri arasında GaSe, GaS ve GaTe ikili yarıiletkenleri Galyum kalkojenleri olarak isimlendirilirler ve tabakalı bir yapıya sahiptirler. Bu tabakalı yapıları sayesinde doğal bir süper örgü özelliğine sahiptirler (Fielding *et al.* 1959; Manfredotti *et al.* 1975; Bacino *et al.* 1979). GaSe ve GaS hegzagonal yapıda kristalleşme gösterirken, GaTe monoklinik yapıda kristalleşir (Pearson 1964; Zhao *et al.* 2016).

III-VI grubu bileşik ailesi içinde GaTe yarıiletkeni özel bir yere sahiptir. Bunun temel nedeni bu yarıiletkenin diğer yarıiletkenlerden farklı olarak direkt bant yapısına sahip olması ve daha yüksek bir anizotropiye sahip olması gelmektedir. GaTe yarıiletkeni diğer tabakalı yarıiletkenlere göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir (Wang *et al.* 2014). GaTe yarıiletkenin sahip olduğu yapıdan dolayı özel bir gruba girmektedir. Bu grup iki boyutlu (2D) malzemeler olarak bilinmektedir. Bu grupta yüksek düzlemsel simetriye (örneğin grafen gibi) sahip olan kristaller bulunduğu gibi düşük düzlemsel simetriye sahip olan kristaller de (GaTe) bulunmaktadır (Huang *et al.* 2016). GaTe sahip olduğu bu özel yapısından dolayı son yıllarda çok fazla ilgi görmektedir. Çünkü GaTe tabakalı yarıiletken direkt bant yapısına sahip, fotodetektör olarak kullanıldığında yüksek bir foto duyarlılığı (10^4 A/W) ve kısa yanıt süresine (6 ms) sahip olduğu bildirilmiştir.

GaTe yarıiletken sahip olduğu özel yapısı sayesinde günümüzde kullanılan birçok uygulamada tercih edilmektedir. Özellikle; güneş pilleri, görüntüleme dizinleri, radyasyon dedektörleri, doğrusal olmayan optik ve termoelektrik cihazlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Huang *et al.* 2016).

GaTe yarıiletkenin kendisine has kristal yapısından dolayı son birkaç yıldır özellikle foton ve radyasyon dedektör uygulamalarında çok fazla kullanılmaktadır (Conway *et al.* 2007; Mandal *et al.* 2011; Reshmi *et al.* 2011; Hu *et al.* 2014; Liu *et al.* 2014; Wang *et al.* 2015; Susoma *et al.* 2017). Külçe GaTe yarıiletkenin güçlü eksiton soğurmasına sahip olduğu ve yüksek mobiliteye ve uzun taşıyıcı ömrüne sahip olduğu bulunmuştur (Susoma *et al.* 2016). Rapor edilen bu özellikler GaTe yarıiletkeni mükemmel elektronik ve optik özelliklere sahip bir bileşik yapmaktadır.

Bridgman kristal büyütme metodu Czochralski büyütme yöntemine benzemektedir. Bu yöntemde tüm ısıtma ve soğutma işlemleri sırasında büyütülecek elementler vakumlu pota içinde tutulur. Elementler ile doldurulmuş kuvars bir pota, bir büyütme fırınının içine yerleştirilir. Pota sıcak bölgeden soğuk bölgeye çekilirken, çekirdek kristal tek kristal büyütmesine sebep olur. Sonuçta oluşan kristalin şekli bu potanın şekliyle belirlenir. Elde edilen GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin çatlaksız, az kusurlu ve birçok deneysel işlemlerin yapılmasına elverişli olarak büyütülmüştür.

Katkısız ve Cd katkılı külçe GaTe tabakalı yarıiletkenler, modifiye edilmiş Bridgman-Stockbarger tekniği kullanılarak büyütülmüştür. Büyütülen GaTe yarıiletkenin yapısal analizleri XRD tekniği ile morfolojik analizleri SEM tekniği ile elemental analizi EDX tekniği ile topolojik analizleri AFM tekniği ile optiksel özellikleri soğurma ölçümleri ile incelenmiştir. Ayrıca, büyütülen GaTe yarıiletkeni kullanılarak Schottky diyod elde edilmiş ve I-V analizleri yapılmıştır.

X-ışınları kırınımı bulguları incelendiğinde GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin monoklinik yapıda olduğu belirlenmiştir ($a= 17,404 \text{ \AA}$; $b= 10,456 \text{ \AA}$; $c=4,077 \text{ \AA}$). Elde edilen bu bulgu literatür (Mandal *et al.* 2011; Yüksek *et al.* 2012; Kunjomana *et al.*

2014; Yu *et al.* 2014) ile uyuşmaktadır. XRD analizleri incelendiğinde GaTe yarıiletkenine Cd katkılama sonucu pik şiddetlerinde ciddi bir artışın olduğu, bazı piklerin kaybolduğu [(311), ($\bar{6}$ 40) ve ($\bar{4}$ 22)] ve yeni piklerin [($\bar{4}$ 10), ($\bar{6}$ 42), (612) ve (642)] ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Ayrıca Cd katkılamanın bir sonucu olarak tanecik büyüklüklerinin yarıçaplarının arttığı görülmüştür. GaTe yarıiletkeni için 418,2 nm ve GaTe:Cd için ise 557,6 nm olarak hesaplanmıştır. Tavlamanın GaTe yarıiletkene ait kristal parametreleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tavlama yapıldıktan hemen sonra alınan XRD sonuçları incelendiğinde; 100 °C'de 10, 20 ve 30 dakika süre ile tavlama neticesinde, GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin tanecik büyüklüklerinin büyüdüğü, diğer parametrelerin küçüldüğü bulunmuştur. Burada önemli bir nokta 100 °C'de ve 20 dakika tavlama değerlerinin diğer sıcaklık değerlerine zıt olması dikkat çekmektedir. Tavlama sıcaklığı arttıkça (100°C'den 700 °C'ye) yapıda bir yüzeysel bozulma olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca numuneler tavlandıktan sonra bazı yeni piklerin ortaya çıktığı [($\bar{2}$ 30), (240), (050) ve ($\bar{3}$ 51)] gözlemlenmiştir. Tavlama sıcaklığı artırıldıkça atomların sahip olduğu termal enerji artmakta birbirleriyle daha yoğun etkileşme söz konusu olmaktadır. Bu durumun bir sonucu olarak bu yeni piklerin ortaya çıkmasına yani piklerin belirgenleşmesine sebep olduğu gibi bazılarında sönümlenmiş olmasında muhtemeldir. Zubiaga *et al.* (2008) tarafından yapılan bir çalışmada GaTe yarıiletkeni üzerinde tavlamanın etkisine bakılmıştır. Çalışmanın sonucuna göre 400 °C'den sonraki sıcaklıklarda GaTe yarıiletkenin içerisindeki atomların kazandıkları termal enerjilerinden dolayı bozulduğu bildirilmiştir. Benzer sonuçlar ilgili çalışma kapsamında da elde edilmiştir. Yapılan XRD analizinde en şiddetli pikin ($\bar{4}$ 20) (Mandal *et al.* 2011; Yüksek *et al.* 2012; Kunjomana *et al.* 2014; Yu *et al.* 2014; Chew *et al.* 2017) olduğu ve $2\theta = 24,197^\circ$ 'ye karşılık geldiği bulunmuştur. Diğer pikler ise sırasıyla şu şekildedir; ($\bar{2}$ 10) piki (Mandal *et al.* 2011; Yüksek *et al.* 2012), ($\bar{4}$ 10) piki (Balitski *et al.* 2008; Mandal *et al.* 2011), ($\bar{2}$ 30) piki (Mandal *et al.* 2011), (311) piki (Mandal *et al.* 2011; Yu *et al.* 2014), (240) piki (Mandal *et al.* 2011), ($\bar{4}$ 40) piki (Reshmi *et al.* 2011; Yüksek *et al.* 2012), ($\bar{6}$ 40) piki (Yüksek *et al.* 2012; Kunjomana *et al.* 2014), (050) piki (Mandal *et al.* 2011), (440) piki (Mandal *et al.* 2011), ($\bar{3}$ 51) piki (Yüksek *et al.* 2012), ($\bar{4}$ 22) piki (Mandal *et al.* 2011), (420) piki (Kolesnikov *et al.* 2013), (10,0,0) piki (Mandal *et al.* 2011; Yüksek *et al.*

2012; Kunjomana *et al.* 2014; Yu *et al.* 2014), (612) piki (Yüksek *et al.* 2012), ($\bar{6}42$) piki (Mandal *et al.* 2011), (252) piki (Yüksek *et al.* 2012), (642) piki (Mandal *et al.* 2011) ve ($\bar{8}80$) piki (Mandal *et al.* 2011) olarak bulunmuştur.

XRD analizlerinin sonuçları özetlendiğinde;

- GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin monoklinik yapıda olduğu belirlenmiştir ($a=17,404 \text{ \AA}$; $b=10,456 \text{ \AA}$; $c=4,077 \text{ \AA}$).
- GaTe yarıiletkenine Cd katılama sonucu pik şiddetlerinde ciddi bir artışın olduğu, bazı piklerin kaybolduğu, yeni piklerin ortaya çıktığı ve piklerin yarı genişliğinin azaldığı gözlemlenmiştir.
- GaTe yarıiletkeni $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 30 dakika tavlama yapıldığında; pik şiddetlerinin arttığı, pik yarı genişliklerinin azaldığı ve kristallerin tanecik büyüklüklerinin arttığı tespit edilmiştir.
- GaTe yarıiletkeni $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 30 dakika tavlama yapıldığında; pik şiddetlerinin arttığı, pik yarı genişliklerinin azaldığı ve kristallerin tanecik büyüklüklerinin arttığı tespit edilmiştir.
- $500 \text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üstündeki tavlamalarda GaTe yarıiletkenin içerisinde belli oranlarda var olan galyum ve selenyum numune yüzeyinden buharlaşmakta ve yüzey yapısında kusur oluşturmaktadır. Bunu önlemenin yolu, öncelikle kalın numune seçerek (1mm) tavlama yapmak, daha sonra aynı numunenin atma düzleminden yeni ince ($40\text{-}50 \text{ }\mu\text{m}$) numuneler elde ederek XRD analizlerini yapmak gerekmektedir.

GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerinin morfolojik özelliklerini belirlemek amacıyla taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. SEM görüntüleri incelendiğinde kristallerin homojen yapıya sahip oldukları ve tipik tabakalı GaTe (merdiven yapısı) yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar (Balitski 2006; Reshmi *et al.* 2011; Konjumana *et al.* 2014) GaTe tabakalı yarıiletkenin SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlara göre taneciklerin ortalama büyüklüğü yaklaşık olarak $490\text{-}980 \text{ \AA}$ civarında olduğu elde edilmiştir. Hesaplanan bu değerler XRD analizi sonucu elde edilen sonuçlara yakın olduğu ve XRD sonuçlarını doğruladığı belirlenmiştir. SEM görüntüleri

incelendiğinde GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerin yüzeylerinde herhangi bir safsızlık ve kirlilik oluşumu gözlenmemiştir. SEM görüntülerinde belirtilen özellikleri doğrulamak amacıyla EDX analizi yapılmıştır.

EDX sonuçları incelendiğinde GaTe ve GaTe:Cd yarıiletkenlerini oluşturan elementler dışında herhangi bir safsızlık ve kirlilik oluşumunun olmadığı ve büyütme tekniğinde kullanılan stokiyometrik oranlarla uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. GaTe için yapılan EDX tekniği ile atomik oranlarına göre %62,01 Ga elementi %37,99 ise Te elementinin olduğu ve ağırlıkça Ga elementi bileşiğin %47,14'ünü Te elementi ise %52,86'sını oluşturduğu bulunmuştur. Benzer şekilde GaTe:Cd yarıiletkeni için yapılan işlemde; atomik ağırlığa göre Ga elementi bileşiğin %46,82'sini, Te elementi %52,67'sini ve Cd elementi ise %0,51'ini oluşturmakta ve ağırlıkça Ga elementi bileşiğin %32,50'sini, Te elementi %66,92'sini ve Cd elementi ise %0,57'sini oluşturduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar büyütülen yarıiletkenlerin saf ve homojen olduklarını göstermektedir.

Bridgman-Stockbarger büyütme yöntemi kullanılarak büyütülen külçe GaTe ve GaTe:Cd tabakalı yarıiletkenlerinin topolojik özelliklerinin tayin edilmesi amacıyla atomik kuvvet mikroskobundan faydalanılmıştır. Yarıiletkenlerin topografi görüntüleri Hitachi 5100N cihazı ile kontaklız modda yaklaşık olarak 300 kHz titreşim frekansında, 0,7 Hz tarama hızında, $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ lik alan taranarak, oda sıcaklığında ve hava ortamında alınmıştır. AFM görüntüleri incelendiğinde, büyütülen ikili bileşiklerin homojen bir yüzeye sahip oldukları ve bu sonucun XRD, SEM ve EDX ile uyumlu oldukları gözlenmektedir. GaTe yarıiletkenin AFM sonuçları incelendiğinde, maksimum tepe noktası ile minimum çukur noktası arasındaki farkın yaklaşık olarak 5 nm olduğu ve ortalama yüzey pürüzlük değerinin ise 0,514 nm olduğu bulunmuştur. Bu sonuçlara göre GaTe yarıiletkenin yüzey tipografisinin düz ve homojen olduğu görülmektedir. Benzer sonuçlar Mandal *et al.* (2011) ve Susoma *et al.* (2017) tarafından da rapor edilmiştir (toplam pürüzlük değeri 5 nm ve ortalama pürüzlük değeri ise 2,50 nm). Elde edilen değerler irdelendiğinde kristal taneciklerinin homojen ve sık bir dağılıma sahip olduğu ve yüzeydeki dağılımlarının rasgele olduğunu belli bölgelerde topaklanmanın

olmadığını göstermektedir. GaTe: Cd yarıiletkenine ait AFM sonuçlarında ise maksimum pikin tepe noktası ile minimum çukur noktası arasındaki farkın 6.503 nm olduğu ve ortalama yüzey pürüzlüğünün ise 0,710 nm olduğu gözlemlenmiştir. Bu değerler Cd katkılı GaTe yarıiletkeninin de düz ve homojen bir yüzeye sahip olduğunu göstermektedir. GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerin AFM sonuçları karşılaştırıldığında, GaTe: Cd yarıiletkeninde yapının biraz daha düzensiz olduğu ve tanecik büyüklüğünün biraz daha büyüdüğü görülmektedir. Bu durumun temel bir nedeni olarak Cd elementinin yapı içinde bir kusur oluşturmuş olmasından dolayı olabilir. Susoma *et al.* (2017) tarafından yapılan çalışmada GaTe yarıiletkenine oksijen elementi katkılı olduğunda toplam pürüzlük değeri ve ortama pürüzlük değerinin arttığı bulunmuştur.

Büyütülen GaTe ve GaTe: Cd tabakalı yarıiletkenlerinin optiksel özelliklerinin incelenmesi amacıyla soğurma ölçümleri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak alınmıştır. Soğurma ölçümleri 320-10 K aralığında ve 10 K'lik adımlarla alınmıştır. Soğurma ölçümleri için Perkin Elmer UV/VIS Lambda 2S Spektrometresi kullanılmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda; GaTe ve GaTe: Cd yarıiletkenlerine ait sıcaklığın bir fonksiyonu olarak soğurma katsayısı ve yasak enerji aralıkları belirlenmiştir. GaTe yarıiletkeninin kalınlığı 58 μm ve GaTe: Cd yarıiletkeninin kalınlığı ise 52 μm olarak ölçülmüştür.

GaTe yarıiletkeninin temel soğurma spektrumu incelendiğinde (Şekil 4.21), azalan sıcaklık ile birlikte spektrumda bir kaymanın olması olgusu gözlemlenmiştir. GaTe yarıiletkeninin optoelektronik özellikleri taşıyıcıların geçiş özelliğini etkilediğinden dolayı kirlilik atomlarına yüksek derecede bağımlı olduğu ve bundan dolayı tavlamanın önemli bir etkiye sahip olduğu bildirilmiştir (Kunjomana *et al.* 2014). Bu bağlamda katkısız ve Cd katkılı GaTe yarıiletkenleri tavlansız ve tavlandıktan sonra soğurma ölçümleri alınmıştır. GaTe yarıiletkeni tavlandıktan sonra (350°C'de 30 dakika) alınan soğurma ölçümlerinde, hem kaymanın hem de soğurma katsayısının çok düşük bir değişim gösterdiği bulunmuştur. Kaymanın temelinde fonon-kusur etkileşimlerinin olması muhtemeldir. Sıcaklık arttığı zaman kristal örgüsünün titreşiminin artması sonucu kristal örgüsünde değişime sebep olmakta ve böylece valans bandının iletkenlik bandına

yaklaştığı görülmektedir. Bu yaklaşma sonucu soğurma daha uzun dalgaboyuna sahip bölgelere kaymaktadır (Gauthier *et al.* 1989). Ayrıca bant aralığının bu kadar değişim göstermesindeki diğer etkenler de kristallik derecesi, stokiometrik oranlar, galyum boşluklarının olduğu da bilinmektedir (Kunjomana *et al.* 2014). Şekil 4.25’de görüldüğü gibi tavlamanın GaTe yarıiletkeni üzerinde bir etkiye sahip olduğunu ve yapıda bir iyileştirme yapmış olduğunu söyleyenebilir. Benzer olarak Cd katkılı GaTe yarıiletkenin de tavlama sonucu olumlu yönde bir etki oluşturmuştur. Ayrıca tavlama sonucu soğurma spektrumlarının daha dikleştiği görülmektedir. Tavlama sonucunda soğurma spektrumlarının daha dikleşmesinin altında yatan neden kirlilik atomlarının optikçe aktivitelerini azalması ve yapının homojen hale gelmesi gösterilebilir. Cd katkılama sonucu soğurma spektrumlarında nasıl bir değişimin olduğu incelendiğinde (Şekil 4.27 ve 4.28), tavlamanın yapı üzerinde iyileştirici bir etki oluşturduğu gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda katkılamanın etkisi daha belirgin iken, düşük sıcaklıklarda bu etki daha düşük görülmektedir.

Tavlamanın yasak enerji aralığı üzerindeki etkisi, GaTe yarıiletkeni için yüksek sıcaklık değerlerinde tavlama sonucu yasak enerji aralığında yaklaşık olarak 0,01 eV’luk bir artışın olduğu görülmektedir. Fakat sıcaklık değeri düştükçe aradaki farkın da azaldığı gözlemlenmiştir. GaTe:Cd yarıiletkeninde ise tavlamanın hem düşük hem de yüksek sıcaklık değerlerinde çok küçük bir etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. Cd katkılama sonucu yasak enerji aralığının etkisi irdelendiğinde, hem düşük sıcaklık değerlerinde hem de yüksek sıcaklık değerlerinde yaklaşık olarak 0,1 eV’luk bir artışın olduğu gözlemlenmiştir. Bu artışın temelinde galyum atomları yerine Cd atomlarının yerleşmesi sonucunda bant yapısında meydana gelen değişimlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Susoma *et al.* (2017) tarafından yapılan bir çalışmada GaTe yarıiletkenine oksijen elementi katkılандığında yapı içinde değişimin olduğu gözlemlenmiştir. GaTe yarıiletkeninde meydana gelen Ga ve Te boşlukları kusurlarının bant yapısı üzerinde önemli etkilerinin olduğu bildirilmiştir (Rak *et al.* 2008; Rak *et al.* 2010). Tavlamanın yasak enerji aralıklarının azalan sıcaklıkla arttığı gözlemlenmiştir. GaTe için yasak enerji aralığı 1,75 ile 1,62 eV aralığında

iken GaTe: Cd için yasak enerji aralığı 1,77 ile 1,63 eV aralığında olduğu hesaplanmıştır ve literatürde de bu durum rapor edilmiştir (Gupta and Srivastava 1981; Rahman and Belal 2000; Nassary 2006; Çınar *et al.* 2014; Kunjomana *et al.* 2014; Fonseca *et al.* 2016).

III-VI grubu bileşiklerinden olan GaTe farklı tabakalı yapısı ve teknik uygulamalarından dolayı teknolojiye özel bir ilgi görmektedir. Fakat GaTe kullanılarak hala güvenilir Schottky diyodların yapılmamış olması bu malzemeyi bu yönden günümüze kadar gizemli kılmaktadır. GaTe yarıiletkenin tabakaları zayıf Van der Waals bağları ile bağlı olduğundan kolayca birbirinden ayrılabilen ve yüzeyinde doymamış bağların sayısı çok az olduğu için yüzey oksidasyonu yavaş olmakta ayrıca yüzey hallerinin olmadığı bir yapıya sahiptir. GaTe yarıiletkenin bu özellikleri onu ideal Schottky diyod üretimi için aday bir malzemeye dönüştürmektedir. Büyütülen GaTe ve Cd katkılı GaTe yarıiletkenlerinden faydalanılarak Schottky diyod elde edilmiştir. Bunun için ilk olarak külçe kristallerin bir tarafına indiyum ile omik kontak yapılmış diğer tarafına ise kalay kullanılarak Schottky kontak yapılmıştır. Daha sonra elde edilen diyodun I-V ölçümleri karanlık ortamda, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak (25-360 K aralığında) alınmıştır. Daha sonra veri seti analiz edilerek diyod için önemli parametreler olan idealite faktörü ve engel yüksekliği hesaplanmıştır. Sn/p-GaTe Schottky diyodunun I-V karakteristikleri termoiyonik emisyon teorisi temelinde yorumlanmaya çalışılmıştır. Kontak yapıların I-V karakteristiklerinden Sn/p-GaTe'nin 0-0,4 V aralığında oldukça lineer termal emisyon değişimlerine sahip oldukları görülmüş ve bu değişimlerden ilk bakışta homojensizliklerin etkisinin çok sınırlı olabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca Sn/p-GaTe'de özellikle yüksek sıcaklıklarda termal emisyon bölgelerinde tamamen lineer olmayan değişimlerin azalan sıcaklıkla birlikte lineerleştiği bildirilmiştir. Ancak I-V eğrilerinin yüksek uygulama gerilimi bölgesinde akım değerlerinin hızla azaldıkları görülmüştür. Sn/p-GaTe diyodu için sıcaklık arttıkça idealite faktörünün ideal değere yaklaştığı ve engel yüksekliğinin arttığı gözlemlenmiştir. 25 K'de idealite faktörü 14,85 iken 300 K'de 1,59 olduğu bulunmuştur. Engel yüksekliği ise 0,01 ile 0,59 eV aralığında olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak engel yüksekliği ve idealite faktörü değerlerinin yüksek sıcaklık değerleri

için görülen kararlı ve monoton değişimi düşük sıcaklıklar için bozulduğu ve bu parametrelerinin sıcaklığa kararlı ve kuvvetli bir bağıllık sergiledikleri tespit edilmiştir. Literatürde benzer sonuçların rapor edildiği görülmektedir (Clemen *et al.* 1978; Bose and Pal 1997; Abay *et al.* 2002; Coşkun *et al.* 2003; Gülnahar 2008; Çınar *et al.* 2014). Bu sonuçlara göre Sn/GaTe Schottky diyodun kabul edilebilir parametrelere sahip olduğu görülmektedir.

Bu araştırma kapsamında düşük sıcaklık değerlerindeki büyük idealite faktör değerlerinin sebebi, metal/yarıiletken ara yüzeyinde akımın iletilmesi sıcaklığın bir fonksiyonu olduğundan, düşük sıcaklığa sahip elektronlar yüksek sıcaklıktaki engel yükseklerinden daha küçük olan engel yükseklerinden geçmektedir (Duman 2006; Duman *et al.* 2007). Sıcaklık arttıkça elektronların geçeceği engel yüksekliği de artacağından idealite faktörünün değeri de düşecektir (Sullivan *et al.* 1991; Duman 2006). İdealite faktörü 1 değerine yaklaştığında diyodun ideal olması söz konusudur. Buna göre ilgili araştırma kapsamında (Çizelge 4.12'ye bakınız) ideal diyod için en uygun sıcaklık aralığı 260 K ile 360 K aralığında olduğu görülmektedir.

Diyodun yüksek sıcaklık bölgelerinde ideal özellik sergilediği ve termiyonik emisyon modeline uyum sağladığı görülmekte iken, düşük sıcaklık bölgelerinde ise ideal özellikten saptığı ve termiyonik emisyon teorisine uyum sağlamadığı görülmüştür. Diyodun ideal durumdan sapmasının birçok nedeni bulunmaktadır. Bunlar; ara yüzey halleri, imaj kuvvetleri, tünelleme akımı, homojensizlikler, jenerasyon-rekombinasyon akımları ve seri direnç etkisidir (Chand and Kumar 1995; Pattabi *et al.* 2007). Gülnahar (2008) tarafından yapılan çalışmada idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak davranmaları homojensizliklere ve “freeze out” etkisiyle olduğu belirtilmiştir. İlgili çalışma kapsamında idealite faktörünün ve engel yüksekliğinin sıcaklıkla kuvvetli bir şekilde değişmesinin nedeni homojensizlikler ve ara yüzey halleri olduğu düşünülmektedir. Literatür incelendiğinde, GaTe yarıiletkenin yapısında var olan galyum boşlukları (V_{Ga}) kusurlarının soğurma ve elektrik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bildirilmiştir (Kim *et al.* 2011; Olmos-Asar *et al.* 2017).

Sonuç olarak I-V karakteristiğine göre GaTe yarıiletkenin yüksek sıcaklıklar için ideal diyod parametrelerine sahip olduğu bulunmuştur. Bu bağlamda yüksek sıcaklık bölgelerinde çalışan sistemler için Sn/p-GaTe Schottky diyodlarının uygun malzeme olarak kullanılabileceği söylenebilir.



KAYNAKLAR

- Abay, B., Çankaya, G., Güder, H. S., Efeoğlu, H., and Yoğurtçu, Y. K., 2002. Barrier characteristics of Cd/p-GaTe Schottky diodes based on I–V–T measurements. *Semiconductor science and technology*, 18(2), 75-81.
- Agulló-López, F., Catlow, C. R. A., and Townsend, P. D. 1988. *Point defects in materials*. Academic Press.
- Alp, U., 2011. RuSr₂RECu₂O₈ (RE = Eu, Gd ve Ho) Süper iletkenlerinin Mekaniksel Özelliklerinin Nanoçentme ve Atomik Kuvvet Mikroskobu ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat.
- Aubry, V., and Meyer, F. 1994. Schottky diodes with high series resistance: Limitations of forward I- V methods. *Journal of Applied Physics*, 76(12), 7973-7984.
- Aydoğan, Ş., 2003. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Bacino, W., Ferguson, T., Nodulman, L., Slater, W., Ticho, H., Diamant-Berger, A., Donaldson, G., Duro, M., Hall, A., Irwin, G., Kirkby, J., Merritt, F., Wojcicki, S., Burns, R., Condon, P., Cowell, P., and Kirz, J., 1979. Semileptonic Decays on the D Meson. *Phys. Rev. Lett.*, 43(15), 1073-1076.
- Bae, C. J., McMahan, J., Detz, H., Strasser, G., Park, J., Einarsson, E., and Eason, D. B. 2017. Influence of thickness on crystallinity in wafer-scale GaTe nanolayers grown by molecular beam epitaxy. *AIP Advances*, 7(3), 035113.
- Balitskii, O. A., 2006. Self-organised nanostructures, obtained by oxidation of III–VI compounds. *Materials Letters*, 60(5), 594-599.
- Balitskii, O. A., Jaekel, B., and Jaegermann, W. 2008. Surface properties of GaTe single crystals. *Physics Letters A*, 372(18), 3303-3306.
- Binnig, G., Quate, C. F., and Gerber, C., 1986. Atomic force microscope. *Physical review letters*, 56(9), 930-934.
- Binnig, G., Rohrer, H., Gerber, C., and Weibel, E., 1982. Surface studies by scanning tunneling microscopy. *Physical review letters*, 49(1), 57-61.
- Bose, D. N., and Pal, S. 1997. Schottky barriers on anisotropic semiconductor GaTe. *Philosophical Magazine B*, 75(2), 311-318.
- Bose, D. N., and Pal, S., 2001. Photoconductivity, low-temperature conductivity, and magnetoresistance studies on the layered semiconductor GaTe. *Physical Review B*, 63(23), 235321.
- Bragg W. H., and Bragg, W. L., 1913. The reflection of X-rays by crystals. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 88(605), 428-438.
- Caferov, T., 1998. Yarıiletken fiziği I. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Cai, H., Chen, B., Wang, G., Soignard, E., Khosravi, A., Manca, M., Marie, X., Chang, S.L.Y., Urbaszek, B., and Tongay, S. 2017. Synthesis of Highly Anisotropic Semiconducting GaTe Nanomaterials and Emerging Properties Enabled by Epitaxy. *Advanced Materials*, 29(8), 1605551 (1-7).
- Camassel, J., Merle, P., Mathieu, H., and Chevy, A. 1978. Excitonic absorption edge of

- indium selenide. *Physical Review B*, 17(12), 4718.
- Chand, S., 2004. On the intersecting behaviour of current-voltage characteristics of inhomogeneous Schottky diodes at low temperatures. *Semiconductor Science and Technology*, 19, 82-86.
- Chand, S., and Kumar, J., 1995. Current-voltage characteristics and barrier parameters of Pd₂Si/p-Si (11100) Schottky diodes in a wide temperature range. *Semicond. Sci. Technol.* 10, 1680-1688.
- Cheung S. K., and Cheung, N.W., 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Appl. Phys. Lett.*, 58, 382.
- Chew, A. R., Fonseca, J. J., Dubon, O. D., and Salleo, A., 2017. Long- Term Structural Evolution of an Intercalated Layered Semiconductor. *Advanced Functional Materials*, 27(14), 1605038.
- Clemen, C., Saldana, X. I., Munz, P., and Bucher, E. 1978. Photovoltaic properties of some semiconducting layer structures. *physica status solidi (a)*, 49(2), 437-443.
- Conway, A. M., Reinhardt, C. E., Nikolic, R. J., Nelson, A. J., Wang, T. F., Wu, K. J., Payne, S.A., Mertiri A., Pabst G., Roy, R., Mandal, K. C., Bhattacharya P., Cui, Y., Groza, M., and Burger, A., 2007. Exploration of GaTe for gamma detection. In *Nuclear Science Symposium Conference Record, NSS'07, IEEE (Vol. 2, pp. 1551-1555), IEEE.*
- Coskun, C., Biber, M., and Efeoglu, H. 2003. Temperature dependence of current-voltage characteristics of Sn/p-GaTe Schottky diodes. *Applied surface science*, 211(1), 360-366.
- Cui, Y., Caudel, D. D., Bhattacharya, P., Burger, A., Mandal, K. C., Johnstone, D., and Payne, S. A., 2009. Deep levels in GaTe and GaTe: In crystals investigated by deep-level transient spectroscopy and photoluminescence. *Journal of Applied Physics*, 105(5), 053709.
- Çınar, K., Çaldıran, Z., Coşkun, C., and Aydoğan, Ş., 2014. Electrochemical growth of GaTe onto the p-type Si substrate and the characterization of the Sn/GaTe Schottky diode as a function of temperature. *Thin Solid Films*, 550, 40-45.
- Duman, S. 2006. n-InSe ve n-InSe:Sn Tek Kristallerinin Yasak Enerji Aralığına Elektrik Alanın Etkisi ve n-InSe:Sn Yarıiletkeninin Schottky Kontak Davranışı. *Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bil. Enst. Erzurum.*
- Duman, S., Gurbulak, B., and Turut, A. 2007. Temperature-dependent optical absorption measurements and Schottky contact behavior in layered semiconductor n-type InSe (: Sn). *Applied surface science*, 253(8), 3899-3905.
- Durlu, T.N., 1996. *Katihal Fizigine Giriş. Zirve Ofset.*
- Ertap, H., Bacioğlu, A., and Karabulut, M., 2015. Photoluminescence properties of boron doped InSe single crystals. *Journal of Luminescence*, 167, 227-232.
- Faifer, V.N., Current, M.I., and Schroder, D.K., 2006. Characterization of ultrashallow junctions using frequency-dependent junction photovoltage and its lateral attenuation. *Applied Physics Letters*, 89 (15), 151123.
- Ferhat-Hamida, A., Ouennoughi, Z., Hoffmann, A., and Weiss, R. 2002. Extraction of Schottky diode parameters including parallel conductance using a vertical optimization method. *Solid-State Electronics*, 46(5), 615-619.
- Fielding, P., Fischer, G., and Mooser, E., 1959. Semiconductors of the type AIII BVI. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 8, 434-437.
- Fischer, G., and Brebner, J. L., 1962. Electrical resistivity and Hall effect of single

- crystals of GaTe and GaSe. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 23(10), 1363-1370.
- Fonseca, J. J., Tongay, S., Topsakal, M., Chew, A. R., Lin, A. J., Ko, C., ... and Dubon, O. D., 2016. Bandgap Restructuring of the Layered Semiconductor Gallium Telluride in Air. *Advanced Materials*, 28(30), 6465-6470.
- Gauthier, M., Polian, A., Besson, J. M., and Chevy, A. 1989. Optical properties of gallium selenide under high pressure. *Physical Review B*, 40(6), 3837.
- Gouskov, L., and Gouskov, A., 1979. Resistivity anisotropy in the layer plane of GaTe. *Physica Status Solidi (a)*, 51(2), 213-215.
- Gouskov, L., Gouskov, A., Lemos, V., May, W., and Sampaio, H., 1977. Electrical properties of GaTe_{1-x} crystals. *Physica Status Solidi (a)*, 39(1), 65-71.
- Grandolfo, M., Gratton, E., Somma, F. A., and Vecchia, P., 1971. Exciton binding energies of layer-type semiconductors GaSe and GaTe. *Physica Status Solidi (b)*, 48(2), 729-735.
- Gupta, V. P., and Srivastava, V. K. 1981. Opto-electronic properties of gallium chalcogenides. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 42(12), 1071-1077.
- Gülnahar, M., 2008. Al-Au/GaTe Schottky yapıların sıcaklığa bağlı akım-gerilim (I-V-T) ve kapasite-gerilim (C-V-T) karakteristikleri. Doktora Tezi, Fen bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Gürbulak, B., 1992. Üçlü (Ternary) CuInSe_2 Tek Kristallerin Büyütülmesi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bil. Enst. Erzurum.
- Gürbulak, B., 1997. İkili (InSe , InSe:Er , GaSe , GaSe:Gd) ve Üçlü (TlGaSe_2 , $\text{TlGaSe}_2:\text{Gd}$) Tek Kristallerin Büyütülmesi Soğurma ve Elektriksel Özelliklerin İncelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bil. Enst. Erzurum.
- Gürbulak, B., Şata, M., Ashkhasi, A., Duman, S., and Turgut, G., 2016. Structural and Electrical Properties of Cd Implanted GaTe Single Crystals Grown by Bridgman Technique. *International Journal of Thales Engineering Sciences (JTHES)*, 2(2), 12-21.
- Hall, E. H., 1879. On a new action of the magnet on electric currents. *American Journal of Mathematics*, 2(3), 287-292.
- Hu, P., Zhang, J., Yoon, M., Qiao, X. F., Zhang, X., Feng, W., ... and Idrobo, J. C., 2014. Highly sensitive phototransistors based on two-dimensional GaTe nanosheets with direct bandgap. *Nano Research*, 7(5), 694-703.
- Huang, S., Tatsumi, Y., Ling, X., Guo, H., Wang, Z., Watson, G., Poretzky, A.A., Geohegan, D.B., Kong, J., Li, J., Yang, T., Saito, R., and Dresselhaus, M.S., 2016. In-plane optical anisotropy of layered gallium telluride. *ACS nano*, 10(9), 8964-8972.
- Irie, T., Endo, S., and Kimura, S., 1979. Electrical-Properties of p-type and n-type CuInSe_2 Single-Crystals. *Japanese Journal of Applied Physics*, 18 (7), 1303-1310.
- Kim, C. E., Kurosaki, K., Ishimaru, M., Muta, H., and Yamanaka, S. 2011. Effect of vacancy distribution on the thermal conductivity of Ga_2Te_3 and Ga_2Se_3 . *Journal of electronic materials*, 40(5), 999-1004.
- Kolesnikov, N. N., Borisenko, E. B., Borisenko, D. N., and Timonina, A. V., 2013. Structure and microstructure of GaTe crystals grown by High-Pressure vertical zone melting. *Journal of Crystal Growth*, 365, 59-63.
- Kunjomana, A. G., Teena, M., and Chandrasekharan, K. A., 2014. Synthesis, growth

- mechanism and physical properties of vapour-deposited GaTe platelets. *Journal of Applied Crystallography*, 47(6), 1841-1848.
- Kurbatov, L. N., Dirochka, A. I., and Sosin, V., 1979. Effect of Exciton Polaritons on the Absorption Edge of GaTe. I. Dependence of Absorption on Temperature. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*, 13(1), 75-82.
- Leao, C. R., and Lordi, V. 2011. Ab initio guided optimization of GaTe for radiation detection applications. *Physical review b*, 84(16), 165206.
- Lee, T. C., Fung, S., Beling, C. D. and Au, H. L., 1992. A systematic approach to the measurement of ideality factor, series resistance and barrier height for Schottky 171 diodes. *J. Appl. Phys.*, 72 (10), 4739-4741.
- Leontie, L., Evtodiev, I., Spalatu, N., Caraman, M., Evtodiev, S., Racovet, O., ... and Focsa, C., 2014. Optical and photosensitive properties of lamellar nanocomposites obtained by Cd intercalation of GaTe. *Journal of Alloys and Compounds*, 584, 542-545.
- Lien, C.D., So, F. C. T. and Nicolet, M.A., 1984. An improved forward I-V method for nonideal Schottky diodes with high. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 31(10), 1502-1503.
- Liu, F., Shimotani, H., Shang, H., Kanagasekaran, T., Zolyomi, V., Drummond, N., Fal'ko, V.I., and Tanigaki, K., 2014. High-Sensitivity Photodetectors Based on Multilayer GaTe Flakes. *Acsnano*, 8(1), 752-760.
- Mamedov, K. K., and Aldzhanov, M. 1978). Specific heat and moments of the vibrational spectrum of gallium monochalcogenides. *Soviet Physics-Solid State*, 20(1), 22-25.
- Mancini, A. M., Manfredotti, C., Rizzo, A., and Micocci, G., 1974. Vapour growth of GaTe single crystals. *Journal of Crystal Growth*, 21(2), 187-190.
- Mandal, K. C., Kang, S. H., and Choi, M. K., 2006. Layered compound semiconductor GaSe and GaTe crystals for THz applications. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 969.
- Mandal, K. C., Krishna, R. M., Hayes, T. C., Muzykov, P. G., Das, S., Sudarshan, T. S., and Ma, S., 2011. Layered GaTe crystals for radiation detectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 58(4), 1981-1986.
- Mandal, K. C., Mertiri, A., Pabst, G. W., Roy, R. G., Cui, Y., Battacharya, P., ... and Nelson, A. J., 2008. Layered III-VI chalcogenide semiconductor crystals for radiation detectors. In *Proc. SPIE*, 7079, 70790O.
- Manfredotti, C., Murri, R., Rizzo, A., Vasanelli, L., and Micocci, G., 1975. Electrical properties of GaTe grown by various methods. *Physica Status Solidi (a)*, 29(2), 475-480.
- Nassary, M. M. 2006. Peculiarities of the Electric and Thermoelectric Properties of GaTe. *Turkish Journal of Physics*, 30(2), 95-102.
- Norde, H., 1979. A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *J. Appl. Phys.*, 50 (7), 5052-5053.
- Olmos-Asar, J. A., Leão, C. R., and Fazio, A. 2017. Novel III-Te-graphene van der Waals heterojunctions for optoelectronic devices. *RSC Advances*, 7(51), 32383-32390.
- Orton, J., 2004. *The Story of Semiconductors*. New York: Oxford University Press Inc.
- Önengüt, G. And Önengüt, D., 2014. *Katıhal Fiziğine Giriş*. Palme Yayıncılık.
- Pal, S., and Bose, D. N., 1996. Growth, characterisation and electrical anisotropy in

- layered chalcogenides GaTe and InTe. *Solid state communications*, 97(8), 725-729.
- Pattabi, M., Krishnan, S., Ganesh, and Mathew, X., 2007. Effect of temperature and electron irradiation on the I-V characteristics of Au/CdTe Schottky diodes. *Solar energy* 81, 111-116,
- Pearson, W. B., 1964. The crystal structures of semiconductors and a general valence rule. *Acta crystallographica*, 17(1), 1-15.
- Prokopyev, A. I., and Mesheryakov, S. A. 2003. Restrictions of forward I–V methods for determination of Schottky diode parameters. *Measurement*, 33(2), 135-144.
- Rahman, M. A., and Belal, A. E. 2000. Single crystal growth and optical energy gap of gallium telluride. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 61(6), 925-929.
- Rák, Z., Mahanti, S. D., Mandal, K. C., and Ferneliuss, N. C. 2010. Defect-induced rigidity enhancement in layered semiconductors. *Solid State Communications*, 150(27), 1200-1203.
- Rak, Z., Mahanti, S. D., Mandal, K. C., and Ferneliuss, N. C., 2008. Theoretical studies of defect states in GaTe. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 21(1), 015504.
- Reshmi, P. M., Kunjomana, A. G., Chandrasekharan, K. A., Meena, M., and Mahadevan, C. K., 2011. Structural, electrical and mechanical properties of GaTe for radiation detector applications. *Int. J. Soft Comput. Eng.*, 1(5), 228-232.
- Rhoderick, E. H. and Williams, R.H., 1988. *Metal-Semiconductor Contacts*, 2nd ed.(Clerendon, Oxford). 1-252.
- Sanchez-Royo, J. F., Pellicer-Porres, J., Segura, A., Muñoz-Sanjosé, V., Tobías, G., Ordejón, P., Canadell, E., and Huttel, Y. 2002. Angle-resolved photoemission study and first-principles calculation of the electronic structure of GaTe. *Physical Review B*, 65(11), 115201.
- Sanchez- Royo, J. F., Segura, A., and Munoz, V., 1995. Anisotropy of the refractive index and absorption coefficient in the layer plane of gallium telluride single crystals. *Physica Status Solidi (a)*, 151(1), 257-265.
- Sato, K., and Yasumura, Y. 1985. Study of forward I- V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of applied physics*, 58(9), 3655-3657.
- Shay, J. L., and Wernick, J. H., 2013. *Ternary Chalcopyrite Semiconductors: Growth, Electronic Properties, and Applications: International Series of Monographs in The Science of The Solid State (Vol. 7)*. Elsevier.
- Shenoy, U. S., Gupta, U., Narang, D. S., Late, D. J., Waghmare, U. V., and Rao, C. N. R., 2016. Electronic structure and properties of layered gallium telluride. *Chemical Physics Letters*, 651, 148-154.
- Shih, I., Champness, C. H., Shahidi, A. V., 1986. Growth by directional freezing of CuInSe₂ and diffused homojunctions in bulk material. *Solar Cells*, 16 (1-4), 27-41.
- Sullivan, J. P., Tung, R. T., Pinto, M. R., and Graham, W. R., 1991. Electron-transport of inhomogeneous Schottky barriers-A numerical study, *J. Appl. Phys.* 70(12), 7403-7424.
- Susoma, J., Karvonen, L., Säynätjoki, A., Mehravar, S., Norwood, R. A., Peyghambarian, N., Kieu, K., Lipsanen, H., and Riikonen, J., 2016. Second and third harmonic generation in few-layer gallium telluride characterized by multiphoton microscopy. *Applied Physics Letters*, 108(7), 073103.

- Susoma, J., Lahtinen, J., Kim, M., Riikonen, J., and Lipsanen, H., 2017. Crystal quality of two-dimensional gallium telluride and gallium selenide using Raman fingerprint. *AIP Advances*, 7(1), 015014.
- Tekle, T., 2012. InSe ve InSe:Mn yarıiletkenlerinin yasak enerji aralığına elektrik alanın etkisi ve Schottky diyot davranışları. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Türkay, A., 2017. Taramalı elektron mikroskobu. NANOKON, <http://www.nanokon.yildiz.edu.tr/nanoteknoloji/taramali-elektron-mikroskobu-scanning-elektron-microscope-sem> (08.07.2017).
- Uslu, İ. (2017). Taramalı Tünelleme Mikroskobu (STM) ve Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM), https://www.academia.edu/1748220/Taramal%C4%B1_T%C3%BCnelleme_Mikroskobu_STM_ve_Atomik_Kuvvet_Mikroskobu_AFM_ (08.07.2017).
- Wang, Z., Safdar, M., Mirza, M., Xu, K., Wang, Q., Huang, Y., Wang, F., Zhan, X., and He, J., 2015. High-performance flexible photodetectors based on GaTe nanosheets. *Nanoscale*, 7(16), 7252-7258.
- Wang, Z., Xu, K., Li, Y., Zhan, X., Safdar, M., Wang, Q., Wang F., and He, J., 2014. Role of Ga vacancy on a multilayer GaTe phototransistor. *ACS nano*, 8(5), 4859-4865.
- Werner, J. H., 1988. Schottky barrier and pn-junction I/V plots-small signal evaluation. *Appl. Phys. A*, 47, 291-300.
- Yu, G., Liu, Z., Xie, X., Ouyang, X., and Shen, G., 2014. Flexible photodetectors with single-crystalline GaTe nanowires. *Journal of Materials Chemistry C*, 2(30), 6104-6110.
- Yüksek, M., Ertap, H., Elmali, A., Yaglioglu, H. G., Mamedov, G. M., Karabulut, M., and Öztürk, M. K., 2012. Two photon absorption characteristics of bulk GaTe crystal. *Optics & Laser Technology*, 44(7), 2178-2181.
- Yükseltürk, A. (2008). NANO 101-Atomik Kuvvet Mikroskobu. <http://nanoturkiye.blogspot.com.tr/2008/04/nano-101-atomik-kuvvet-mikroskopu.html> (08.07.2017).
- Zhao, Q., Wang, T., Miao, Y., Ma, F., Xie, Y., Ma, X., ... and Xi, S., 2016) Thickness-induced structural phase transformation of layered gallium telluride. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 18(28), 18719-18726.
- Zubiaga, A., Garcia, J.A., Plazaola, F., Munoz-Sanjose, V., and Martinez-Toma, C., 2008. Thermal creation of defects in GaTe. *Japanese Journal of Applied Physics*, 47(12), 8719–8722.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet ŞATA 1987 yılında Van Edremit'te doğdu. İlk ve orta öğrenimini Edremit ilçesine bağlı Çiçekli beldesinde lise öğrenimini ise Edremit Lisesinde tamamladı. 2006 yılında Atatürk Üniversitesi Kazım Karabekir Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği Bölümünü kazandı. 2010 yılında bu bölümden başarıyla mezun oldu. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Yüksek Lisans öğrenimine başladı ve TUBİTAK-BİDEB yurt içi yüksek lisans bursunu kazandı. 2012 yılında Yüksek Lisans eğitimini tamamladıktan sonra aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında Doktora öğrenimine başladı. 2013 yılında ÖYP programı kapsamında Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesine araştırma görevlisi olarak atanmıştır. Halen aynı kurumda araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.