



T.C.

SIVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DALGABOYU GENİŞLETİLMİŞ SWIR DEDEKTÖR
UYGULAMASI İÇİN (100) InP ALTTAŞ ÜZERİNE BÜYÜTÜLEN
ZENGİN İNDİYUM İÇERİKLİ In_xGa_{1-x}As EPİTAKSİYEL
KATMANLARIN KAREKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

REYHAN KEKÜL

(20209252005)

Nanoteknoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. İsmail ALTUNTAŞ

SIVAS

2023

Reyhan KEKÜL'ün hazırladığı “**DALGABOYU GENİŞLETİLMİŞ SWIR DEDEKTÖR UYGULAMASI İÇİN (100) InP ALTTAŞ ÜZERİNE BÜYÜTÜLEN ZENGİN İNDİYUM İÇERİKLİ $In_xGa_{1-x}As$ EPİTAKSİYEL KATMANLARIN KAREKTERİZASYONU**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **NANOTEKNOLOJİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı **Doç. Dr. İsmail ALTUNTAŞ**
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Jüri Üyesi **Doç. Dr. İlkay DEMİR**
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Jüri Üyesi **Doç.Dr. Sabit HOROZ**
Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nevcihan Gürsoy
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.





Bütün Hakları Saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

Reyhan KEKÜL, 2023



Abime...

ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)' nda yazan kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgi eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgi ve değerlerde değişiklik yapmadığımı
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi ya da başka bir üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı beyan ederim.

20.06.2023

Reyhan KEKÜL

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜRLER

Tez çalışmam boyunca, bilgi ve deneyimleriyle yanımda olan, manevi desteğini hiç esirgemeyen değerli hocam ve danışmanım Doç. Dr. İsmail ALTUNTAŞ' a çok teşekkür ederim.

Lisans eğitimimden bu yana bana yol gösteren ve desteğini hiç esirgemeyen sevgili hocam, Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi müdürü Doç. Dr. İlkay DEMİR' e çok teşekkür ederim.

Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi' nde çalışma fırsatı bulduğum sürece, tezimin hazırlanması sırasında yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Çalışmalarımın her aşamasında benimle olan, yardımını esirgemeyen ve desteğini hayatımda her an hissettiğim, canım dostum İrem Şimşek' e çok teşekkür ederim.

Hayatımın dönüm noktalarında yanımda olan, hayatımdaki yerlerini hiçbir zaman tam olarak ifade edemeyeceğim can dostlarım Cansu Akyol' a, İlayda Karamukluoğlu' na ve çok teşekkür ederim.

Her anımı büyük bir özenle paylaşan ve hayatımda olması benim için paha biçilemez olan canım Asel Kekül' e çok teşekkür ederim.

Ayrıca, Tuba Duran Çınar' a, Yeşim Fatma Toksoy' a, Gamze Kekül Tüzün' e, Melek Kekül Şapcı' ya Dudu Hatice Ünal' a, Ferhan Kübra Özbakır' a ve dualarıyla hep yanımda olduklarını hissettiren herkese çok teşekkür ederim.

Son olarak, hayatımın boyunca benim için hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan, her zaman yanımda olan ve hayatımı gerçek manada anlamlı kılan canım annem Yasemin Kekül' e, canım babam Metin Kekül' e, sevgisini daima yüreğimde sakladığım kıymetli abim Ahmet Kekül' e, canım kardeşlerim Alperen Kekül' e ve Furkan Kekül' e çok teşekkür ederim.

ÖZET

DALGABOYU GENİŞLETİLMİŞ SWIR DEDEKTÖR UYGULAMASI İÇİN (100) InP ALTTAŞ ÜZERİNE BÜYÜTÜLEN ZENGİN İNDİYUM İÇERİKLİ In_xGa_{1-x}As EPİTAKSİYEL KATMANLARIN KAREKTERİZASYONU

Reyhan KEKÜL

Yüksek Lisans Tezi

Nanoteknoloji Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İsmail ALTUNTAŞ

2023, 92+xvii sayfa

Bu tez çalışmasında, Metal Organik Buhar Fazı Epitaksi (MOVPE) tekniği kullanılarak zengin In içerikli ($x > 0.53$) In_xGa_{1-x}As yapıları (100) InP alttaş üzerine epitaksiyel olarak büyütülmüş ve detaylı karakterizasyonları yapılmıştır. Bu kapsamda, örgü uyumsuz In_xGa_{1-x}As/InP yapılarının kristal kalitesi, yapılan gaz akışı çalışmaları, Si katkılama çalışması ve büyütme sıcaklığı çalışması olmak üzere, farklı optimizasyon koşulları altında araştırılmıştır. Si katkılı ve katkısız olarak büyütülen zengin In içerikli In_xGa_{1-x}As epitaksiyel ince filmlerin yapısal karakterizasyonu yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HR-XRD) cihazı ile, elektriksel karakterizasyonu Hall ölçümü cihazı ile ve optik karakterizasyonu Fotolüminesans (PL) ölçüm sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan karakterizasyon çalışmaları sonucunda, zengin In içerikli In_xGa_{1-x}As yapılarının alaşım oranının, kristal kalitesinin, elektriksel ve optik özelliklerinin tez kapsamında incelenen parametrelere bağlı olarak etkilendiği görülmüştür. Sonuç olarak, en düşük In içeriği $x=0.610$ dan en yüksek In içeriği $x=0.675$ e olmak üzere 12 adet zengin In içerikli örgü uyumsuz In_xGa_{1-x}As/InP yapısı genişletilmiş SWIR (1.7-3 μm) dedektör yapıları için MOVPE tekniği ile başarılı bir şekilde büyütülmüştür.

Anahtar kelimeler: MOVPE, genişletilmiş SWIR, HR-XRD, InGaAs, fotodedektör.

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF INDIUM RICH $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ EPITAXIAL LAYERS GROWN ON (100) InP SUBSTRATE FOR EXTENDED WAVELENGTH SWIR DETECTOR APPLICATION

Reyhan KEKÜL

Master of Science Thesis

Department of Nanotechnology Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. İsmail ALTUNTAŞ

2023, 92+xvii sayfa

In this thesis, Indium-rich ($x>0.53$) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ structures were grown on (100) InP substrate epitaxially by Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE) technique and were characterized in detail. In this context, the crystal quality of In-rich $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ / InP structures has been investigated under different optimization conditions including Si doping, gas flow, and growth temperature studies. Structural characterization, electrical characterization, and optical characterization of In-rich $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ epitaxial thin films with Si-doped and undoped growth were analyzed with high-resolution X-ray diffraction (HR-XRD) device, Hall measurement device, and Photoluminescence (PL) measurement system, respectively. The result of the characterization studies has been seen that the alloy ratio, crystal quality, and electrical and optical properties of indium-Rich $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ structures were affected depending on the parameters examined in the thesis. As a result, the 12 lattices mismatched $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ structures, with the lowest In content from $x=0.610$ to the highest In content $x=0.675$, were successfully grown by the MOVPE technique for extended SWIR (1.7-3 μm) detector applications.

Key words: MOVPE, extended-SWIR, HR-XRD, InGaAs , photodetector.

İÇİNDEKİLER

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜRLER.....	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT.....	ix
İÇİNDEKİLER.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xii
TABLolar LİSTESİ.....	xv
SİMGELER DİZİNİ.....	xvi
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
1.GİRİŞ.....	1
2. YARIİLETKEN TEMEL BİLGİLER.....	3
2.1 Yarıiletkenlerde Katkılama	5
2.2 Kristal Yapı	8
2.3 Kristal Yapı Kusurları.....	10
2.3.1 Noktasal Kusurlar.....	11
2.3.2 Çizgisel Kusurlar.....	12
2.3.3 Düzlemsel Kusurlar	14
2.3.4 Hacimsel Kusurlar	15
2.4 Örgü Uyumsuz Yapıların Epitaksiyel Büyütülmesi.....	16
3. KIZILÖTESİ TEMEL BİLGİLER.....	19
3.1 Elektromanyetik Spektrum.....	19
3.2 Kara Cisim Işıması	20
3.3 Atmosferik İletim Pencereleri ve Kızılötesi Bölgeler	22
3.3.1 SWIR Bandının Kullanım Avantajları ve Uygulama Alanları.....	24
3.4 Kızılötesi Dedektör Sistemleri.....	31
3.4.1 Kızılötesi Termal Dedektörler	31
3.4.2 Kızılötesi Fotodedektörler	32
3.4.3 Kızılötesi Fotodedektörler için Bazı Anahtar Parametreler	39
4. SWIR FOTODEDEKTÖR MALZEME SİSTEMLERİ.....	41
4.1 Ge _{1-x} Sn _x Tabanlı SWIR Algılama	42
4.2 Hg _x Cd _{1-x} Te (MCT) Tabanlı SWIR Algılama	44
4.3 Tip-II Süper Örgü Tabanlı SWIR Algılama	46

4.4 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /InP Tabanlı SWIR Algılama.....	47
5. METOD	50
5.1 Metal-Organik Buhar Fazı Epitaksi (MOVPE) Yöntemi	50
5.1.1 Yerinde (in-situ) Karakterizasyon Tekniği.....	54
5.2 X-Işını Kırınım (X-Ray Diffraction - XRD) Tekniği	57
5.2.1 Theta/2Theta ($2\theta/\theta$) Taraması	60
5.3 Hall Etkisi Ölçümü	61
5.4 Fotolüminesans Ölçüm Sistemi.....	64
6. GENİŞLETİLMİŞ SWIR DEDEKTÖR UYGULAMASI İÇİN ZENGİN In İÇERİKLİ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /InP YAPILARININ BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU	65
6.1 Si Katkısının Etkisi ve Sabit V-III Oranı ile Artan In Alaşım Oranı.....	69
6.2 SiH_4 Gaz Akış Miktarı Çalışması	76
6.3 AsH_3 Gaz Akış Miktarı Çalışması	78
6.4 Sıcaklık Çalışması	80
SONUÇ	83
KAYNAKÇA.....	85

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 1 Bir yarıiletkenin mutlak sıfıra (0K) eşit bir sıcaklıkta band yapısı.	3
Şekil 2. 2 Elementel ve bileşik yarıiletkenler elde etmek için kullanılan temel elementler. ...	4
Şekil 2. 3 III-V grubu yarıiletkenler için bant aralığı enerjisine karşı örgü sabiti diyagramı. .	5
Şekil 2. 4 Si yarıiletken kristalinin P atomu ile n-tipi katkılanması.	6
Şekil 2. 5 Si yarıiletken kristalinin Ga atomu ile p-tipi katkılanması.	7
Şekil 2. 6 Bir yarıiletkenin bant diyagramında a) bir akseptör, b) bir donör katkı maddesinin oluşturduğu enerji seviyeleri.	7
Şekil 2. 7 Öteleme vektörleri ve iki vektör arasındaki açıları içeren üç boyutlu bir örgü yapısı.	8
Şekil 2. 8 ZnS kristal yapısı.	9
Şekil 2. 9 Noktasal kusurların basit şematik gösterimi.	12
Şekil 2. 10 Kenar tipi (edge-type) dislokasyonunun şematik gösterimi ve atomların kayma hareketi.	12
Şekil 2. 11 Vida tipi (screw type) dislokasyonunun şematik gösterimi.	13
Şekil 2. 12 Karışık tip (mixe-type) dislokasyonun şematik gösterimi [14].	14
Şekil 2. 13 a) istifleme hatası ve b) ikiz sınırın şematik gösterimi.	15
Şekil 2. 14 a) alttaşın örgü sabitinin epitabakanın örgü sabitinden büyük olduğu, ve b) alttaşın örgü sabitinin epitabakanın örgü sabitinden küçük olduğu durumlar için kritik kalınlığın altındaki büyütme kristal yapıların maruz kaldıkları gerilmeler.	17
Şekil 2. 15 $In_xGa_{1-x}As/InP$ ($x=0.82$) yapısına ait geçirmeli elektron mikroskobu (TEM) görüntüleri. Beyaz oklar yapıda oluşan çizgisel kusurları göstermektedir [17].	18
Şekil 2. 16 $In_xGa_{1-x}As/InP$ ($x=0.82$) yapısına ait Yüksek çözünürlüklü geçirmeli elektron mikroskobu (HR-TEM) görüntüleri. Resimlerde; a) misfit çizgisel dislokasyonu, b) stracking istifleme hatalarını, c) therading dislocation gösterir [17].	18
Şekil 3. 1 Görünür bölge ve kızılötesi bölge için spektral alt bölümler ile birlikte tüm elektromanyetik spektrum.	19
Şekil 3. 2 Planck Eğrisi	21
Şekil 3. 3 Dalga boyuna karşı spektral atmosferik geçirgenlik.	22
Şekil 3. 4 Farklı nesnelere H_2O ve CO_2 absorpsiyon yoğunluklarını içeren SWIR bandının spektral özelliği [26].	24
Şekil 3. 5 a) bir elmanın ve b) Silikon yarıiletkeninin SWIR kamera ve görünür bölgeyi algılayan bir kamera kullanılarak elde edilen görüntüleri.	25
Şekil 3. 6 Ayın çeşitli görünüşleri altında gece parıltısı spektrumu [30].	26
Şekil 3. 7 Aysız bir gecede a) açık bir gökyüzü, b) bulutlu ve tamamen kapalı bir gökyüzü altında alınan SWIR görüntüleri [31].	27
Şekil 3. 8 Gündüz alınan görünür ve SWIR kamera görüntüleri [32].	28
Şekil 3. 9 Gece bir cam arkasından alınan MWIR termal kamera ve SWIR kamera görüntüleri [32].	29
Şekil 3. 10 Farelerde beyin (a) ve arka bacak (b) damar sisteminin SWIR ve NIR görüntüleri [35].	30
Şekil 3. 11 Kızılötesi fotodedektörlerdeki temel optik uyarım süreçleri. a) banttan banda uyarılma (intrinsic), b) katkı seviyesinden uyarılma (extrinsic).	32
Şekil 3. 12 foto-iletken tip dedektörün şematik gösterimi.	33

Şekil 3. 13 p-n eklemının bir foton detektörü olarak çalışması. (a) p-n eklem yapısı, (b) enerji-bant diyagramı, (c) elektrik alanı, (d) akım-gerilim karakteristikleri.	34
Şekil 3. 14 p-i-n fotodedektörün (a) yapısı, (b) enerji bant diyagramı, (c) elektrik alan durumu.	35
Şekil 3. 15 a) Metal ve yarıiletken teması ile oluşan Schottky bariyeri b) genel Schottky diyotunun temel yapısı.	36
Şekil 3. 16 MSM fotodedektörün (a) yandan görünümü, (b) üstten görünümü, (c) enerji bat yapısı [40].	37
Şekil 3. 17 a) PNP, ve b) NPN fototransistör yapılarının temel şematik gösterimi.	38
Şekil 4. 1 SWIR fotodedektörler için genel bakış.....	41
Şekil 4. 2 Kızılötesi bölgede çalışan fotodedektörler için kullanılan bazı malzeme sistemleri [46].....	42
Şekil 4. 3 Sn (x) içeriğinin bir $Ge_{1-x}Sn_x$ a) foto-iletken detektörün, ve b) PIN fotodedektörün kesme dalga boyuna etkisi [47].....	42
Şekil 4. 4 (a) 77 K ve (b) 300 K sıcaklıklarda $Ge_{1-x}Sn_x$ foto-iletken detektörler için spesifik dedektivite (A-F numuneleri için Sn (x) içerikleri sırasıyla %12,5, %15,9, %15,7, %17,9, %20,0 ve %22,3' dür).	43
Şekil 4. 5 77 ve 300 K sıcaklıklarda bir $Ge_{0,89}Sn_{0,11}$ PIN fotodedektörü için spesifik dedektivite.....	44
Şekil 4. 6 77 K' de değişen x miktarına göre $Hg_{1-x}Cd_xTe$ yapısı için karşılık gelen örgü sabiti, bant aralığı ve kesme dalga boyu.	45
Şekil 4. 7 InAs/GaSb tip-II süper örgü sisteminin Tip-II bant hizalanması: Tip-II süper örgü yapısının enerji bant aralığının gösterimi ve yapay bant aralığı oluşumu.....	46
Şekil 4. 8 Değişen In içeriğine (x) göre $In_xGa_{1-x}As$ üçlü alaşımının örgü parametresi ve kesilme dalga boyunun değişim.	48
Şekil 4. 9 Örgü uyumlu ($x=0.53$) $In_xGa_{1-x}As$ / InP ve örgü uyumsuz ($x>0.53$) genişletilmiş $In_xGa_{1-x}As$ / InP yapıları için epitaksiyel tabakaların örgü yapılarındaki değişim.	48
Şekil 5. 1 Tipik bir Kimyasal Buhar Biriktirme sürecinin adımları.	50
Şekil 5. 2 Tipik bir MOVPE sisteminin çalışma şeması.....	52
Şekil 5. 3 Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde kurulu olan AIXTRON 200/4 RF-S model MOVPE büyütme sistemi.....	53
Şekil 5. 4 Yerinde yansıma ölçümünde altaş, epitaksiyel tabaka ve ortamın kırılma indisi farkından dolayı gelen ve yansıyan ışığın şiddet değişiminin şematik gösterimi.	54
Şekil 5. 5 Yerinde yansıma ölçümünde yüzeyden ve arayüzlerden yansıyan ışıkların oluşturduğu girişim deseninin zamana göre şiddet grafiği. Burada T tam bir osilasyon oluşması için geçen zamanı belirtmektedir.	55
Şekil 5. 6 Yansıma eğrileri (a) ideal büyütme, (b) artan optiksel dalgalanma, (c) artan yüzey pürüzlülüğü.	56
Şekil 5. 7 Bragg yasasının şematik gösterimi . d kristal düzlemler arasındaki mesafeyi, θ gelen x-ışını ile yüzey arasındaki açıyı, 2θ ise gelen ve yansıyan x-ışınları arasındaki açıyı temsil eder.	58
Şekil 5. 8 Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde kurulu bulunan Rigaku SmartLab HR-XRD sistemi.	59
Şekil 5. 9 out-plane $2\theta/\theta$ tarama geometrisi. b) gelen, yansıyan ve geçen x-ışınlarına ait dalga vektörleri, c-d) taramanın ters uzayda örgü noktalarından geçişi [68].	60

Şekil 5. 10 Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde kurulu bulunan Hall ölçümü sistemi.	62
Şekil 5. 11 a) Hall etkisi olayının ve b) numune üzerinde alınan kontak noktalarının şematik gösterimi [70].	63
Şekil 6. 1 MOVPE sistemi ile büyütülen $In_xGa_{1-x}As/InP$ yapısının şematik gösterimi.	65
Şekil 6. 2 InP alttaş üzerine büyütülen ara katman InP tampon tabakası ve $In_xGa_{1-x}As$ tabakasının büyütmesine ait yansıma ve sıcaklık eğrisi.	67
Şekil 6. 3 Zengin In içerikli ($x=0.61$) $In_xGa_{1-x}As$ yapısı için Si katkısının $In_xGa_{1-x}As$ tabakasına etkisinin $2\theta/\theta$ taraması.	70
Şekil 6. 4 Zengin In içerikli ($x=0.62$) $In_xGa_{1-x}As$ yapısı için Si katkısının $In_xGa_{1-x}As$ tabakasına etkisinin $2\theta/\theta$ taraması.	71
Şekil 6. 5 Si katkısının $In_xGa_{1-x}As$ yapısındaki In içeriğine ve yapının FWHM değerine etkisi.	71
Şekil 6. 6 Sabit V-III oranı ile artan In içeriğine bağlı $In_xGa_{1-x}As/InP$ yapılarının $2\theta/\theta$ taraması.	72
Şekil 6. 7 $In_xGa_{1-x}As/InP$ yapısı için artan In içeriğinin külçe taşıyıcı yoğunluğuna etkisi. ...	74
Şekil 6. 8 Farklı In içeriklerine sahip A1 ve A3 numuneleri için düşük sıcaklıkta (30K) elde edilen PL spektrumu.	75
Şekil 6. 9 Zengin In içerikli $In_xGa_{1-x}As/InP$ yapıları için SiH_4 akış miktarının $In_xGa_{1-x}As$ tabakasına etkisinin $2\theta/\theta$ taraması.	77
Şekil 6. 10 SiH_4 akış miktarının, In içeriği (x) ve FWHM değerleri ile ilişkisi.	77
Şekil 6. 11 Artan SiH_4 akışının külçe taşıyıcı yoğunluğuna etkisi.	78
Şekil 6. 12 Zengin In içerikli $In_xGa_{1-x}As/InP$ yapıları için AsH_3 akış miktarının $In_xGa_{1-x}As$ tabakasına etkisinin $2\theta/\theta$ taraması.	80
Şekil 6. 13 Zengin In içerikli $In_xGa_{1-x}As/InP$ yapıları için büyütme sıcaklığının $In_xGa_{1-x}As$ tabakasına etkisinin $2\theta/\theta$ taraması.	81
Şekil 6. 14 Büyütme sıcaklığının, In içeriği (x) ve FWHM değerleri ile ilişkisi.	82

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2. 1 Bravais örgü sistemleri [13].	8
Tablo 2. 2 Kristal yapı kusurlarının boyutlarına göre sınıflandırılması.	11
Tablo 3. 1 Atmosferik iletimde kızılötesi bölgelerin dalga boyu aralığı.	23
Tablo 6. 1 Tez çalışmasındaki tüm numunelere ait büyütme parametreleri.	66
Tablo 6. 2 Tez kapsamında yapılan çalışmalar ve numuneler.	66
Tablo 6. 3 "A" seti için genel bilgiler.	69
Tablo 6. 4 Farklı In içeriğine sahip numuneler için HR-XRD sonuçları ve hesaplanan dislokasyon yoğunluğu değerleri.	73
Tablo 6. 5 Değişen In içeriğine göre PL sonuçları.	75
Tablo 6. 6 "K" seti için genel bilgiler.	76
Tablo 6. 7 "R-AsH ₃ akış" seti için genel bilgiler.	79
Tablo 6. 8 "R-Sıcaklık" seti için genel bilgiler.	80

SİMGELER DİZİNİ

\AA	Angström
a	Örgü Sabiti
A	Kesit alanı
B_z	Manyetik alan
c	Işık hızı
D	Dedektivite
D^*	Spesifik dedektivite
d	Kalınlık
d_c	Kritik kalınlık
d_{hkl}	Örgü düzlemleri arasındaki uzaklık (hkl; Miller indisler)
E_g	Yarıiletken bant aralığı,
g	Dedektör kazancı
h	Planck sabiti
I	Spektral şiddet
I_B	Akım
k	Boltzman sabiti
L	Kesit uzunluğu
n	Taşıyıcı yoğunluğu
η	Kuantum verimliliği
R	Direnç
R	Foto-cevap (Responsivity)
S_n	Gürültü
T	Sıcaklık
V_H	Hall voltajı
q	Elektron yükü
ϵ	Gerilme
μ	Mobilite
λ	Dalga boyu
α	Alfa açısı
β	Beta açısı
γ	Gama açısı
θ	Theta açısı
π	Pi sayısı
σ	İletkenlik
σ	Stefan-Boltzman sabiti
ρ	Dislokasyon yoğunluğu
Δf	Frekans bant genişliği

KISALTMALAR DİZİNİ

APD	: Çığ Fotodiyotlar (Avalance Photodiode)
AsH₃	: Arsine
bcc	: Body Centered Cubic
CdSe	: Kadmiyum Selenid
CdTe	: Kadmiyum Tellür
CdZnTe	: Kadmiyum Çinko Tellür
CÜNAM	: Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
F_B	: Manyetik alan kuvveti
F_E	: Elektrik Alan Kuvveti
fcc	: Face Centered Cubic
FWHM	: Yarı Yükseklik Tam Genişliği
GaAs	: Galium Arsenic
GaAs	: Galium Arsenic
GaSb	: Gallium antimonid
Ge	: Germanyum
HgCdTe	: Cıva Kadmiyum Tellür
HR-XRD	: Yüksek Çözünürlüklü X-Işını Kırınımı
InAs	: Indium Arsenic
InGaAs	: Indium Galium Arsenic
InP	: Indium Phosphide
InSb	: Indium Antimonide
LWIR	: Uzun dalga boylu kızılötesi
MOCVD	: Metal Organik Kimyasal Buhar Depolama
MOVPE	: Metal Organik Buhar Fazı Epitaksi
MWIR	: Orta dalga boylu kızılötesi
NEP	: Gürültü Eşiti Güç
NIR	: Yakın kızılötesi
PH₃	: Phosphine
PL	: Fotoluminesans
RF	: Radyo Frekans
sc	: Simple Cubic
SCCM	: Dakikada Standart Santimetreküp
Si	: Silikon
Sn	: Kalay
SWIR	: Kısa dalga boylu kızılötesi
TMGa	: Trimethylgallium
TMAI	: Trimethylaluminum
TMIn	: Trimethylindium
VPE	: Buhar Faz Epitaksi
VH	: Hall Voltajı
V_{hh}	: Ağır boşluk bandı
V_{lh}	: Hafif boşluk bandı
VPE	: Buhar Faz Epitaksi
XRD	: X Işını Kırınımı
ZnS	: Çinko Sülfür
ZnSe	: Çinko Selenid

1.GİRİŞ

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ üçlü alaşımları çeşitli uygulamaları nedeniyle dikkat çeken önemli bir III-V grubu malzemedir. Bu malzeme sisteminin bant aralığı, askeri, tıbbi, endüstriyel, bilimsel ve spektroskopik uygulamalar için ilgili atmosferik iletim penceresine karşılık gelen 1–3 μm kızılötesi spektrumunun geniş bir aralığında tasarlanabilir [1]–[3]. Kızılötesi algılama sistemleri, aktif görüntüleme, keşif ve uzaktan algılama, 3D Lidar gibi optoelektronik uygulamaları için giderek daha fazla talep görmektedir[4],[5]. Bu sebeple, bu amaçlarla kullanılacak lazerlerin ve fotodedektörlerin (PD'ler) performansları oldukça önemlidir. Bu uygulama alanlarından biri olan kısa dalga boylu kızılötesi-SWIR (Short-wave infrared) fotodedektörleri, uygulamalarını spektroskopik cihazlarda ve görüntüleme sistemlerinde bulur. Son zamanlarda bu sensörler geniş uygulama alanları nedeniyle artan bir ilgi görmektedir. Bu alanda geliştirilen fotodedektörler için alternatif olarak üç malzeme sistemi vardır, bunlar Cıva Kadmiyum Tellür (HgCdTe), InGaAs ve tip-II Süper Örgü yapılarıdır. Son zamanlarda, kuantum kuyulu kızılötesi fotodetektör (QWIP) teknolojisi ile uzun dalga boyu kızılötesi (LWIR) görüntüleme uygulamaları için önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Buna rağmen nispeten düşük kuantum verimliliği nedeniyle QWIP teknolojisinin SWIR bandında kullanılması, dedektörün gece görüşü gibi çok düşük radyasyon akışına maruz kaldığı uygulamalarda uygun görülmemektedir [6]. Çok sayıda kritik özelliği arasında, SWIR sensörlerin en çok vurgulanan yeteneklerinden biri, ayışığı olmayan koşullarında bile pasif gece görüşü kabiliyetine sahiptir [7]. Bu özellik, çok düşük karanlık akım değerleri gerektirir. Örgü uyumlu ($x=0.53$) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ tabanlı fotodedektörler bu amaç için en uygun adaydır [8]. Bu kapsamda, InP alttaş üzerine büyütülen örgü uyumlu $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapısı, gece görüşü için ticari olarak en iyi performans/maliyet oranını sunar. Ancak mükemmel örgü uyumlu $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ sensörlerin kesme dalga boyu (cut-off wavelenght) $\sim 1,7 \mu\text{m}$ ile sınırlıdır. Düşük ışık seviyeli sistemler, astronomik gözlemler, hava durumu tahminleri ve kaynak gözlemleri vb. gibi birçok uygulama için 1.0-2.5 μm veya daha yüksek bir kesme dalga boyuna ihtiyaç duyulmaktadır[9]. Bu durumda daha uzun dalga boyu bölgesindeki ($>1,7 \mu\text{m}$) uygulamalar indiyum içeriğini artırmayı gerektirir. Yüksek In içerikli ($x>0.53$) ve örgü uyumsuz bu yapı genişletilmiş $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ olarak bilinir. Bu sayede daha yüksek kesme dalga boyunda çalışan uygulamaların elde edilmesi mümkündür. Ancak InP alttaş kullanılarak

büyütülen $x > 0.53$ 'ten indiyum içeriğine sahip $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapılarının örgü uyumsuz olarak büyütülmesi yapının kristal kalitesini olumsuz etkilemektedir [10]. Örneğin $\sim 2.7 \mu\text{m}$ 'lik kesme dalga boyunu veren bileşimlerde InP ve ($x > 0.83$) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ arasındaki örgü uyumsuzluğu $\sim 2\%$ 'ye ulaşır.

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapısı için artan bir örgü uyumsuzluğu söz konusuysen, bir rakip olarak HgCdTe II-VI grubu olan HgCdTe tabanlı malzemeler InGaAs ile aynı dalga boyu aralığını kapsar ve piyasada birçok ticari cihaz bulunmaktadır. Aynı zamanda HgCdTe yapısı Kadmiyum Çinko Tellür (CdZnTe) alttaş kullandığı durumlarda örgü uyumsuzluğu sınırlamasından da etkilenmez. Fakat yüksek kaliteli CdZnTe alttaşlar, nispeten küçük boyutu, yüksek üretim maliyeti III-V muadilleri kadar geniş ve erişilebilir değildir ve bu alttaşlar ile silikon entegre okuma devresi arasındaki termal genleşme katsayısı farkı ciddi dezavantajlar sağlar [11]. Bu da bu teknolojiyi özellikle ticari uygulamaları için hala pahalı hale getirir ve bu sensörlerin üretim maliyetini ticari uygulamalar için uygun seviyelere düşürmek önemli bir sınırlamadır. Ayrıca, HgCdTe dedektörleri çevreye zararlı maddeler içerir ve kullanımı için ek olarak bir soğutma sistemi gerektirirken, InGaAs fotodedektörleri oda sıcaklığında zaten verimli bir şekilde çalışabildikleri için herhangi bir soğutma sistemine ihtiyaç duymazlar [12]. InGaAs fotodedektör yapısı için diğer bir rakip malzeme olan Tip-II süper örgü teknolojisi ise henüz kuantum verimliliği ve karanlık akım seviyelerinde beklenen dedektör performansını sunamamıştır.

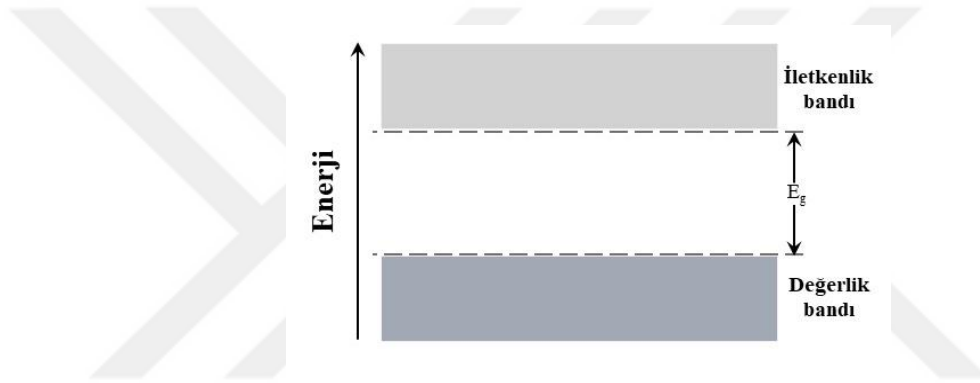
Tüm bunlar göz önüne bulundurulduğunda, III-V grubu malzemeleri için gelişmiş tesislerinin daha erişilebilir olması, cihaz işlem teknolojisi, dedektörlerin daha yüksek çalışma sıcaklığında daha iyi performans sergilemesi InGaAs tabanlı e-SWIR fotodedektörleri için açık bir avantajdır ve çok çeşitli III-V yarı iletkenler, farklı tampon katmanları ve süper örgülerin kullanılması yoluyla InGaAs tabanlı e-SWIR fotodedektörleri için fotodedektör yapısının optimizasyonuna yönelik çalışmalar ek esneklik sağlar.

Bu tez kapsamında genişletilmiş SWIR fotodetektör yapısı için InP alttaş üzerine büyütülen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ epitaksiyel katmanındaki In alaşım oranının değişimi ve yapının kristal kalitesinin büyütme parametreleri ile değişimini araştırmak amacıyla;

- Si katkılama etkisi çalışması,
- Sıcaklık etkisi çalışması,
- Gaz akışı çalışmaları, yapılmıştır.

2. YARIİLETKEN TEMEL BİLGİLER

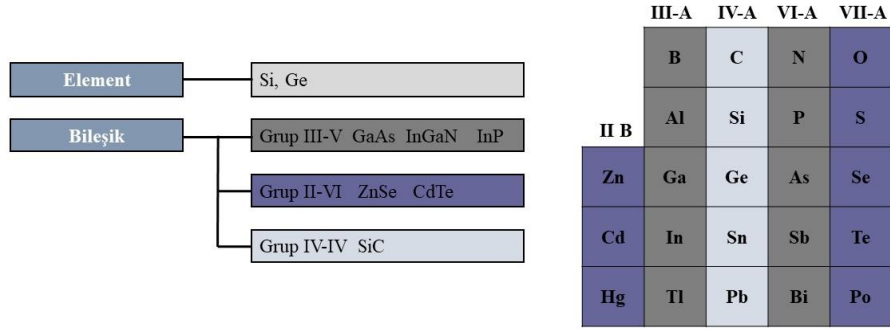
Yarıiletken bilimi, elektronik çip ve bilgisayarlar da dahil olmak üzere tüm modern cihaz fiziğinin merkezinde yer alır. Metallerden farklı olarak, yarı iletkenlerdeki elektrik yükleri, küçük bir elektrik alanın etkisi altında serbestçe hareket edemez; önce "uyarılmış" olmaları gerekir. Örneğin, malzemenin bağ yapısının oluşturduğu yasak enerji bandından ışık veya ısı enerjisi yardımıyla geçmek gibi. Bu enerji bandı aralığı (E_g), malzemenin belirli bir dalga boyuna duyarlılığını belirler ve yarıiletkenin tipine göre değişir. Yarıiletkenler için bu enerji bandı aralığı büyük ölçüde tasarlanabilir. Şekil 2.1' de bir yarıiletkenin mutlak sıfıra (0K) eşit bir sıcaklıkta band yapısı verilmiştir. Bu durumda yarıiletkenin değerlik bandının neredeyse tamamı doluyken iletim bandının neredeyse tamamı boştur.



Şekil 2. 1 Bir yarıiletkenin mutlak sıfıra (0K) eşit bir sıcaklıkta band yapısı.

Yarıiletkenleri tasarlamak ve anlamak için, diğer malzemeler gibi yarıiletkenlerin de birbirine bağlı farklı türde atomlardan oluştuğunu anlamak gerekir. En kullanışlı ve iyi bilinen yarıiletkenler elementel yarıiletken olan silikon (Si) ve germanyum (Ge) elementleridir. Bu elementlerin her biri dört değerlik elektronuna sahiptir. Bunlar, Grup IV-IV yarıiletkenlerini oluşturur. Yarıiletkenler, aynı zamanda GaAs veya InAs gibi periyodik tablonun III-A ve V-A grubu elemanlarının birleştirilmesiyle de oluşturulabilir. Grup III-V bileşik yarıiletkenler için; elementlerin dış kabuklarında sırasıyla üç ve beş değerlik elektron vardır ve bağlanma, beşten üçe bir elektron aktararak, silikonda olduğu gibi, dört tetrahedral bağ oluşturmayı mümkün kılarak gerçekleşir. III-V bileşiklerinin birçok örneği vardır ve bunlar teknoloji için son derece önemlidir. Benzer şekilde, periyodik tablonun II-VI Grubu elementleri (CdTe, CdSe) kullanılarak bileşik yarıiletkenler oluşturulabilir. Burada ise iki elektron

VI'dan II'ye aktarılır ve tekrar 4-4 bağ yapılır. Şekil 2.2' de elementel ve bileşik yarıiletkenler elde etmek için kullanılan temel elementler verilmiştir.



Şekil 2. 2 Elementel ve bileşik yarıiletkenler elde etmek için kullanılan temel elementler.

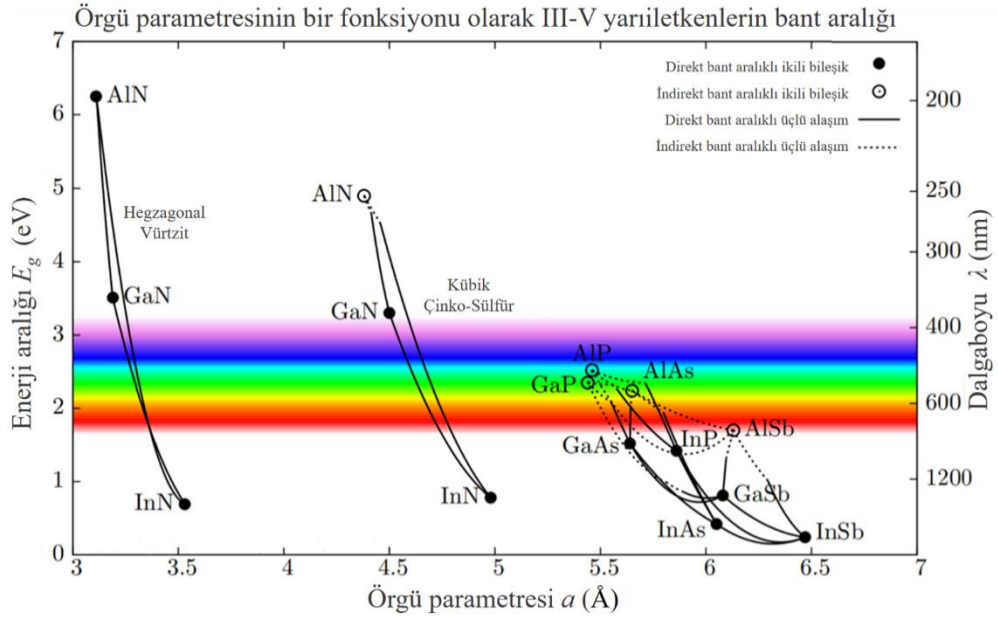
Bileşik yarıiletkenler ikili (binary), üçlü (ternary) ve dördlü (quarternary) bileşikler olarak elde edilebilir. Grup III-V yarıiletkenleri özelinde örneklendirecek olursak;

III-V ikili (binary); yarıiletkenler; periyodik tablonun grup III sütunlarından ve grup V sütunlarından bir element içeren en basit III-V bileşiklerdir ve daha karmaşık üçlü veya dördlü bileşiklerin temelini oluştururlar.

III-V üçlü (ternary); yarıiletkenler; Grup III veya grup V'den ek bir element mevcut olduğunda, $III_xIII_{1-x}V$ veya $IIIIV_yV_{1-y}$ gibi üçlü alaşımlar elde edilebilir. Burada x ve y, 0 ile 1 arasında değerlere sahip indekslerdir.

III-V dördlü (quarternary); yarıiletkenler; Benzer şekilde, grup III veya grup V sütunlarından toplam dört farklı element olduğunda dördlü bileşikler elde edilebilir.

Bu alaşımlar, malzeme sisteminin bant aralığını ve kristal yapının örgü parametresini değiştirir. Alaşımın bileşimini kontrol ederek hem bant aralığı enerjisini hem de örgü parametresini kontrol etmek mümkündür. Böylece yarıiletken malzemelerin optik özellikleri değiştirilebilir. Şekil 2.3' de III-V grubu yarıiletkenler için bant aralığı enerjisine karşı örgü sabiti diyagramı verilmiştir.



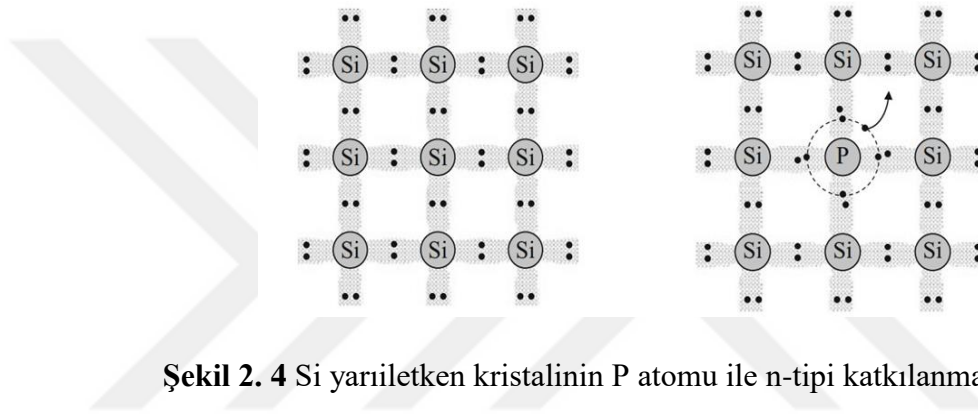
Şekil 2. 3 III-V grubu yarıiletkenler için bant aralığı enerjisine karşı örgü sabiti diyagramı.

Modern yarıiletken teknolojisinin temelini oluşturan bu yarıiletken malzeme sistemleri genellikle yüksek kusursuzluğa ve saflığa sahip tek kristallerden oluşur. Bu malzeme sistemlerinin üretimi, birinin üzerine bir dizi ince tabakanın yerleştirilmesini gerektirir. Bunun için epitaksiyel kristal büyütme gereklidir. Bu terim, kristalin bir alttaş üzerine tek bir kristal filmin oluşumunu ifade eder. Epitaksiyel büyüme, kullanılan alttaş ve büyütülen filmin doğasının bir fonksiyonudur. Buna göre, homoepitaksi ve heteroepitaksi olmak üzere iki tür epitaksiyel büyütme vardır. Homoepitaksiste kullanılan alttaş ve üzerine büyütülen film malzemesi aynıdır. Heteroepitaksiste ise film ve alttaş farklı malzemelerden oluşur. Bunun sonucu olarak, heteroepitaksi, film ile alttaş arasındaki örgü parametrelerinin ve termal genleşme katsayılarının farklılığına bağlı olarak kusurlu bir kristal yapı ile sonuçlanabilir.

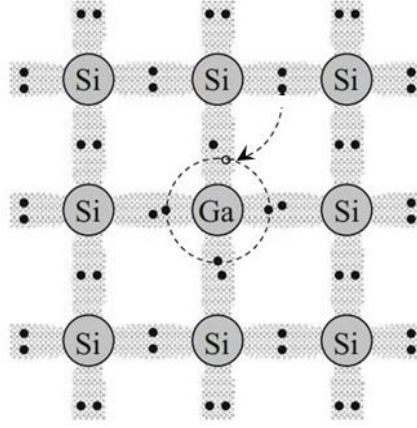
2.1 Yarıiletkenlerde Katkılama

Yarıiletkenin $^0K'$ de değerlik bandı tamamen elektronlarla doludur ve iletim bandında elektron yoktur. Bu nedenle saf bir yarıiletken, $^0K'$ de yalıtkandır. Serbest elektronların sayısını artırmak veya potansiyel bir elektronun hareket edebileceği "boşlukların" (boş enerji seviyeleri) sayısını artırmak için yarıiletkene katkılama (doping) yapılır ve böylece kristalde safsızlık seviyeleri oluşturulur. Katılan katkı maddesinin yapısına bağlı olarak iki tür doping vardır, n-tipi katkı ve p-tipi katkı.

Katkılama türlerini bir Si atomu özelinde örneklendirecek olursak; N-tipi katkılama, Si atomunun dış kabukta daha fazla elektron içeren bir atomla değiştirilmesiyle elde edilir. Bunun için dış kabuğunda beş elektron bulunan periyodik tablonun V sütunundaki bir element olan P kullanılabilir. Şekil 2.4' te her bir Si atomunun dış kabuğundaki elektronların dağılımını, ve n-tipi katkılama için bir Si atomunun bir P atomu ile değiştirildiği Si yarıiletken kristali şematik olarak verilmiştir. Burada P atomuna ait beşinci elektron bağlanmaya katkıda bulunmadığından, kristal içinde hareket etmek için serbest (iyonize) olabilir. P atomu bu nedenle donör olarak adlandırılır, çünkü elektriksel iletkenliğe katılabilecek bir elektron verebilir.

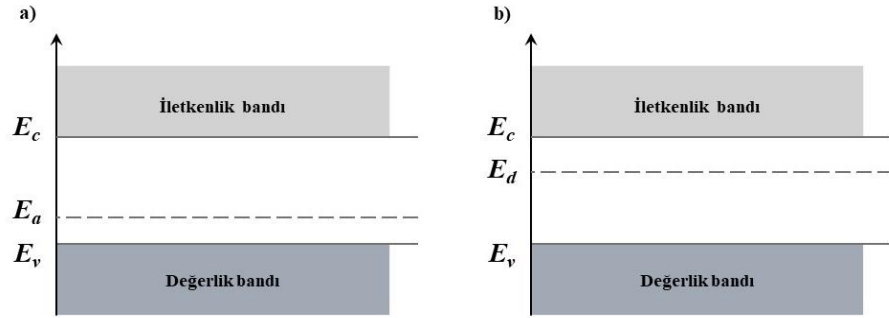


P-tipi katkılama ise, bir Si atomunun dış kabukta daha az elektrona sahip bir atomla yer değiştirilmesiyle elde edilir. Bunun için ve dış kabuğunda üç elektron bulunan, periyodik tablonun III. sütunundan bir element olan Ga kullanılabilir. Şekil 2.5' te p-tipi katkılama için bir Si atomunun bir Ga atomuyla değiştirildiği bir Si yarı iletken kristalinin şeması verilmiştir. Burada, Ga atomunun dış kabuğundaki üç elektronun tümü, komşu dört Si atomundan üçü ile bağ yapar. Böylece Ga atomu, komşu bir bağdan bir elektron kabul edebilir ve bu kristal içinde bir boşluğun hareketine izin verir. Negatif yüklü bir iyon haline gelen Ga atomu akseptör (alıcı) olarak adlandırılır.



Şekil 2. 5 Si yarıiletken kristalinin Ga atomu ile p-tipi katkılanması.

Yarıiletkenlerde katkılama, kristal örgünün periyodikliğinde bir bozulma yarattığından, bant aralığında ek enerji seviyelerinin oluşmasına neden olur. Şekil 2.6' da bir yarıiletken kristalde donör veya akseptör oluşumuna neden olan katkı maddesinin, yarıiletkenin enerji bandında oluşturduğu enerji seviyeleri verilmiştir. Buna göre, n-tipi katkılamada donörün oluşturduğu enerji seviyesi iletkenlik bandının kenarına daha yakinken, p-tipi katkılamada akseptörün oluşturduğu enerji seviyesi değerlik bandının kenarına daha yakındır.



Şekil 2. 6 Bir yarıiletkenin bant diyagramında a) bir akseptör, b) bir donör katkı maddesinin oluşturduğu enerji seviyeleri.

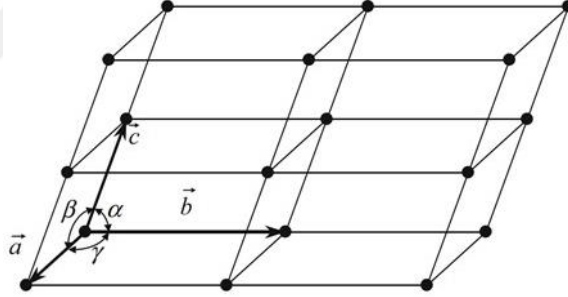
Yarıiletken malzeme sistemlerinin kontrol edilebilirliği, yarıiletkenleri elektronik cihaz tasarımında oldukça kullanışlı hale getirir. Bu cihaz tasarımları yapılırken yarıiletkenin kristal yapısı ve bant yapısı önem arz eden iki unsurdur.

2.2 Kristal Yapı

Kristal yapı, atomların katı halde oluşturduğu ve üç boyutta da periyodik olarak tekrar eden düzeni olarak tanımlanabilir. Kristal yapının periyodik düzenlenmesi bir örgü yapısı ile temsil edilir ve bu örgü noktalarına eklenen bir tek atom veya atom grupları (baz) kristal yapıyı oluşturur. Şekil 2.7' de üç boyutlu bir örgü yapısı verilmiştir. Burada \vec{a}, \vec{b} ve \vec{c} örgüye ait öteleme vektörlerini temsil eder. Örgü, bu vektörlerin herhangi biri veya bu vektörlerin herhangi bir tamsayı toplamı aracılığıyla ötelemeden sonra değişmez. Herhangi bir örgü noktası, Eşitlik 2.1' de verildiği gibi, genellikle bir \vec{R} vektörü ile temsil edilir.

$$\vec{R} = n_1\vec{a} + n_2\vec{b} + n_3\vec{c} \quad n_{1,2,3} = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad [2.1]$$

Buna göre olası tüm örgüler, yönelimlere ve örgü öteleme vektörünün uzunluğuna bağlı olarak Tablo 2.1' de detaylı olarak verilen yedi kristal sistemi altında toplanmıştır. Bu sistemler kendi aralarında Bravais örgüleri olarak bilinen gruplara ayrılırlar. Böylece toplamda 14 tane kristal sistemi tanımlanmış olur.



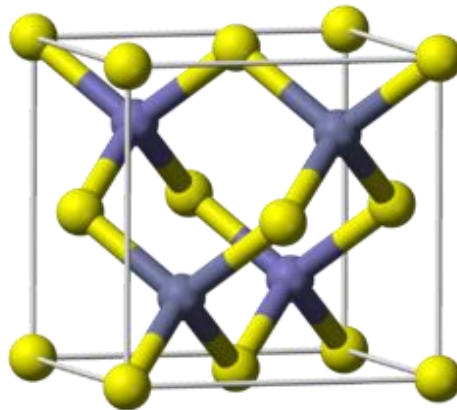
Şekil 2. 7 Öteleme vektörleri ve iki vektör arasındaki açıları içeren üç boyutlu bir örgü yapısı.

Tablo 2. 1 Bravais örgü sistemleri [13].

Kristal sistemleri	Eksen uzunlukları ve açıları	Bravais Örgüleri
Kübik	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	<ul style="list-style-type: none">• basit kübik (sc)• hacim merkezli kübik (bcc)• yüzey merkezli kübik (fcc)
Tetragonal	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	<ul style="list-style-type: none">• basit tetragonal• hacim merkezli tetragonal

Ortorombik	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	<ul style="list-style-type: none"> • basit ortorombik • taban merkezli ortorombik • hacim merkezli ortorombik • yüzey merkezli ortorombik
Trigonal	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma < 120^\circ,$ $\neq 90^\circ$	<ul style="list-style-type: none"> ○ trigonal
Hegzagonal	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = 90^\circ \quad \gamma = 120^\circ$	<ul style="list-style-type: none"> ○ hegzagonal
Monoklinik	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	<ul style="list-style-type: none"> • basit monoklinik • taban merkezli monoklinik
Triklinik	$a \neq b \neq c,$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	<ul style="list-style-type: none"> ○ triklinik

Tez kapsamında kullanılan ikili InP bileşiği ve üçlü InGaAs alaşımı bir kübik kristal sistemine ait, yüzey merkezli kübik kristal yapısı tabanlı olan ve çinko sülfür (ZnS) olarak bilinen yapıya sahiptir. Şekil 2.8' de verilen ZnS kristal yapısı temelde elmas (diamond) yapısı ile aynı olup tek fark; elmas yapıyı oluşturan tek tip atom yerine iki tip atomun yapıyı oluşturmasıdır. Bu yapı iç içe geçmiş iki yüzey merkezli kübik yapının köşegen boyunca köşegen uzunluğunun çeyreği ($\frac{1}{4}$) kadar ötelenmesiyle oluşur ve birim hücrelerinde 8 atom bulundurulur.



Şekil 2. 8 ZnS kristal yapısı.

2.3 Kristal Yapı Kusurları

İdeal bir kristal, yapıyı oluşturan atomların kimyasal özelliklerine dayanan periyodik bir yapıya sahiptir. Ancak gerçek kristaller mükemmel değildir. Her zaman kusur olarak adlandırılan fazla/eksik atomlar veya safsızlıklar gibi kusurlara sahiptirler. Kusurların varlığı, örgü yapısının potansiyelini bozar ve bu, kristallerdeki bant diyagramını değiştirir. Kristal sistemlerin birçok özelliği periyodik örgü düzenlemesine bağlıdır. Ayrıca, birçok ek özellik kristale kusurlar veya katkı maddeleri eklenerek manipüle edilebilir. Bu özellikler, modern yarıiletken teknolojisi dünyasında çeşitli cihazların imal edilmesini sağlar. Öte yandan, kasıtsız olarak ortaya çıkan kusurlar da malzemelerin özellikleri veya bu cihazların performansı üzerinde derin bir etkiye sahip olabilirler. Bu nedenle, kristallerdeki kusurların kontrol edilmesi zorlu bir hedeftir. Bu bölümde, kristallerdeki kusurların nasıl oluştuğunu ve bu tür kusurların olası nedenlerinden veya kaynaklarından bahsedilecektir. Bunlar kabaca şöyle özetlenebilir:

Temel fizik yasalarından kaynaklanan kusurlar: Temel fizik yasalarına göre yapıda var olması gereken kusurlar vardır. Bu kusur bir boşluk olabilir. Herhangi bir sonlu sıcaklıkta, atomlar belli bir dereceye kadar titreşimsel yer değiştirmeye maruz kalır. Sıcaklık yükseldikçe, yer değiştirmeler o kadar büyük olabilir ki, atomlar kalıcı olarak normal yerlerinden taşınır. Bu atomlar yerlerinden ayrılır ve boşluklar oluşur.

Doğal minerallerden kaynaklanan kusurlar: Malzemeler asla %100 saf değildir. Bu nedenle, tüm kristaller yapıda olması gerekenden farklı atomlara sahiptir.

Kristal büyümesinden kaynaklanan kusurlar, kristal büyümesi sırasında ortaya çıkabilir. Safsızlıkların türleri, büyütme yöntemine ve büyütme sistemini oluşturan maddelere bağlıdır.

Gerilimden kaynaklanan kusurlar: kristal örgü parametrelerinin uyumsuzluğu yapıda gerilmeyi artırır ve istenmeyen kusurların/dislokasyonların oluşmasına neden olur. Özellikle yarıiletken teknolojisinde, gerinimden kaynaklanan kusurlar, heteroepitaksiyel ince film büyütme için oldukça önemlidir. Çünkü, yarıiletken lazerler ve entegre optik cihazlar genellikle benzer örgü sabitine sahip çok katmanlı yapılardan tasarlanır. Örgü uyumsuzluğunun neden olduğu kusurlar, optik cihazların performansını düşürdüğü için bunlardan kaçınılmalıdır. Ancak bu gerinim etkisini pozitif olarak kullanan cihazlar da mevcuttur. Bu uygulamalar için gerilmeden

kaynaklanan kusurlar aktif tabakayı oluşturmaktadır. Bir transisör tipi olarak HEMT'ler bunun için örnek verilebilir.

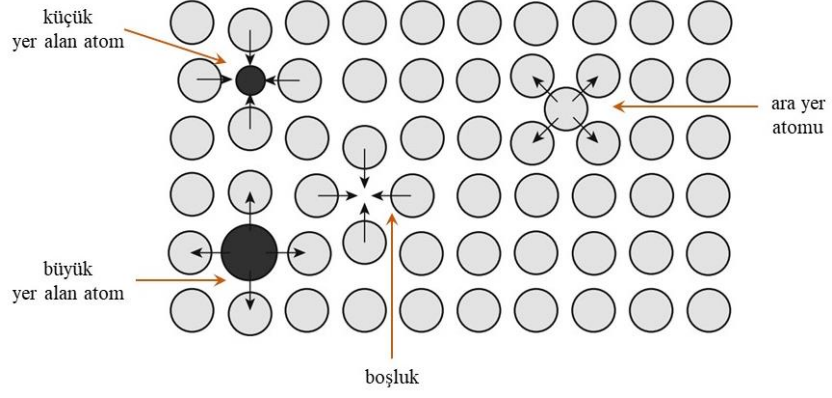
Kusurlar, kusur yapısının boyutuna göre dört gruba ayrılabilir. Bunlar, nokta kusurları (0D), çizgi kusurları (1D), düzlemsel kusurlar (2D) ve hacimsel kusurlardır (3D). Tablo 2.2' de bu boyutsal kusurlar örnekleriyle verilmiştir.

Tablo 2. 2 Kristal yapı kusurlarının boyutlarına göre sınıflandırılması.

Boyut	Örnekler
0D noktasal kusurlar	Boşluklar (points), arayer atomu (self-interstitials), safsızlıklar (impurities)
1D çizgisel kusurlar	Kenar dislokasyonları (Edge dislocations), vida dislokasyonları (screw dislocations), karışık tip dislokasyonlar (mixed-type dislocations)
2D düzlemsel kusurlar	İstifleme hataları (Stacking faults), ikiz sınırlar (twin boundaries), tane sınırları (grain boundaries), fazlar arası sınırlar (interphase boundaries), dış yüzeyler (external surfaces)
3D hacimsel kusurlar	Çökelti (Precipitates), boşluklar (voids)

2.3.1 Noktasal Kusurlar

Nokta kusurları kristal örgü içindeki eksik, fazla veya yanlış yerleştirilmiş atomları ifade eder. Şekil 2.9' da bu kusurların yapı içindeki şematik gösterimleri verilmiştir.

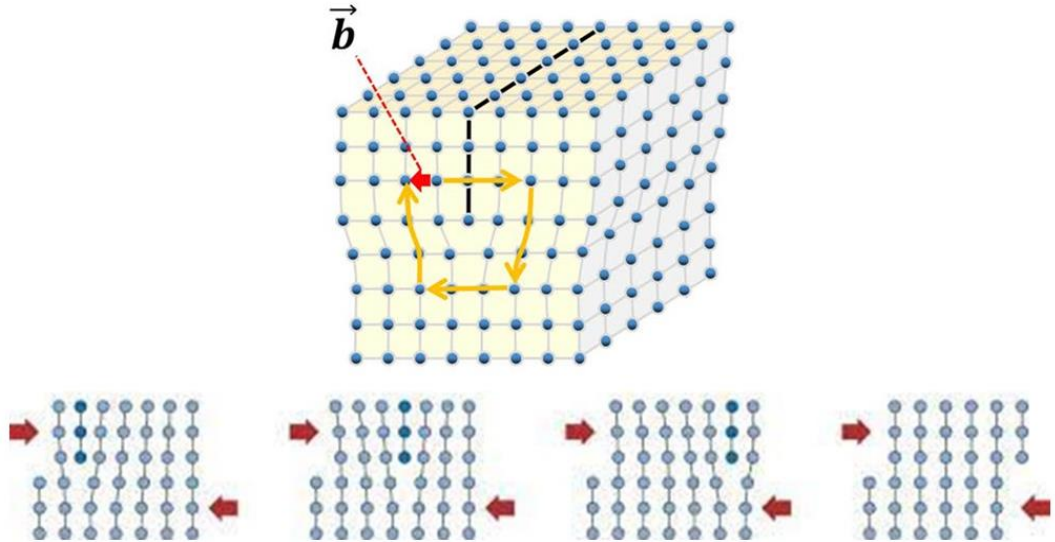


Şekil 2. 9 Noktasal kusurların basit şematik gösterimi.

2.3.2 Çizgisel Kusurlar

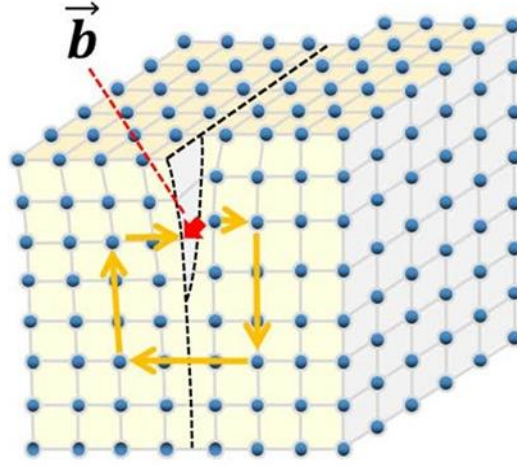
Kristal örgüdeki atom dizilişinde meydana gelen bir düzensizliğin bir çizgi boyunca uzanması çizgisel kusurları tanımlar. İplik dislokasyonları (Threading Dislocations - TD) olarak bilinen çizgi kusurları yalnızca dislokasyonları ifade eder. Kenar (edge) ve vida (screw) olmak üzere iki ana tip dislokasyon vardır. Ancak, bu iki ana tip dislokasyon birleşerek karmaşık dislokasyonların oluşumuna neden olabilirler.

Kenar dislokasyonları, Şekil 2.10' da gösterildiği gibi kristal örgüye yerleşen ve örgüde lokalize bir gerilmenin oluşumuna neden olan fazladan bir atom düzlemi olarak tanımlanabilir.



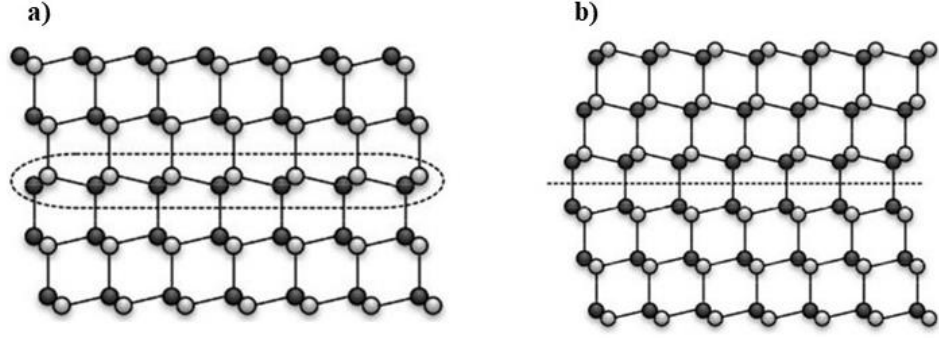
Şekil 2. 10 Kenar tipi (edge-type) dislokasyonunun şematik gösterimi ve atomların kayma hareketi.

Vida dislokasyonları, kristalin bir tarafı kayma gerilimine maruz kaldığında ve diğer tarafı sabit tutulurken en az bir örgü düzlemini kaydırıldığında oluşur. Şekil 2.11' de bir vida tipi dislokasyonunun şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2. 11 Vida tipi (screw type) dislokasyonunun şematik gösterimi.

Karışık tip dislokasyonlar, kenar ve vida dislokasyonlarının herhangi bir kombinasyonudur. Şekil 2.12' de karışık dislokasyon için şematik gösterim verilmiştir. Bir dislokasyon için, dislokasyon hattı ve Burger vektörü (b) olarak iki karakteristik büyüklük tanımlanır. Burada "b" Burger vektörü dislokasyonun hareket doğrultusu ile miktarını gösterir. Bir Burgers vektörü oluşturmak için, dislokasyon etrafında kapalı bir döngü çizilmelidir. Eğer çizilen bu döngü kapanmazsa (eksiklik, fazlalık, dönme vs nedeniyle) bir dislokasyonu çevreliyor demektir ve burada döngüyü kapatacak vektör Burgers vektörüdür. Döngünün başlangıç noktası, devre yönü ve boyutu isteğe bağlıdır. Bu faktörlerden bağımsız olarak, Burger vektörü her zaman kenar dislokasyonu çizgisine dik ve vida dislokasyonu çizgisine paralel olacaktır. Karışık tip bir dislokasyon için Burger vektörünü bulmak genellikle çok karmaşıktır.



Şekil 2.13 a) istifleme hatası ve b) ikiz sınırın şematik gösterimi.

tane sınırları farklı yönelimlere sahip iki veya daha fazla tek kristal buluştuğunda meydana gelir.

ara faz sınırları, bir kristalin malzeme başka bir kristalin malzeme ile bir arayüzü paylaştığında ortaya çıkar. Her bir malzemenin özelliklerine bağlı olarak, arayüz uyumlu, yarı uyumlu veya uyumsuz olacaktır.

Harici düzlemsel kusurlar ise kristalin, bir gaz veya sıvı ortamla etkileşiminden kaynaklanan yüzey kusurlarını ifade eder. Kristal periyodikliği kesintiye uğradığında kristalin yüzeyinde bağlar, koparak sarkan bağların (dangling bonds) oluşumuna neden olur. Kristalin yüzeyinde meydana gelen bu durum en dıştaki atomik katmanları veya yüzey bölgesini etkiler. Bu meydana geldiğinde, yüzeydeki atomlar, yığın kristaldeki atomlardan önemli ölçüde farklı özelliklere sahiptir. Sarkan bağlar, yüzeyin kimyasal ve elektriksel olarak daha aktif olmasına neden olur.

2.3.4 Hacimsel Kusurlar

Hacim kusurları esasen, nokta kusurlarının kümelenmesini tanımlar. Bir nokta kusurları kümesi bir araya gelerek üç boyutlu bir kusur oluşturduğunda ortaya çıkabilir. Bu tür kusurların malzemelerin performansı üzerinde muazzam bir etkisi vardır [15].

2.4 Örgü Uyumsuz Yapıların Epitaksiyel Büyütülmesi

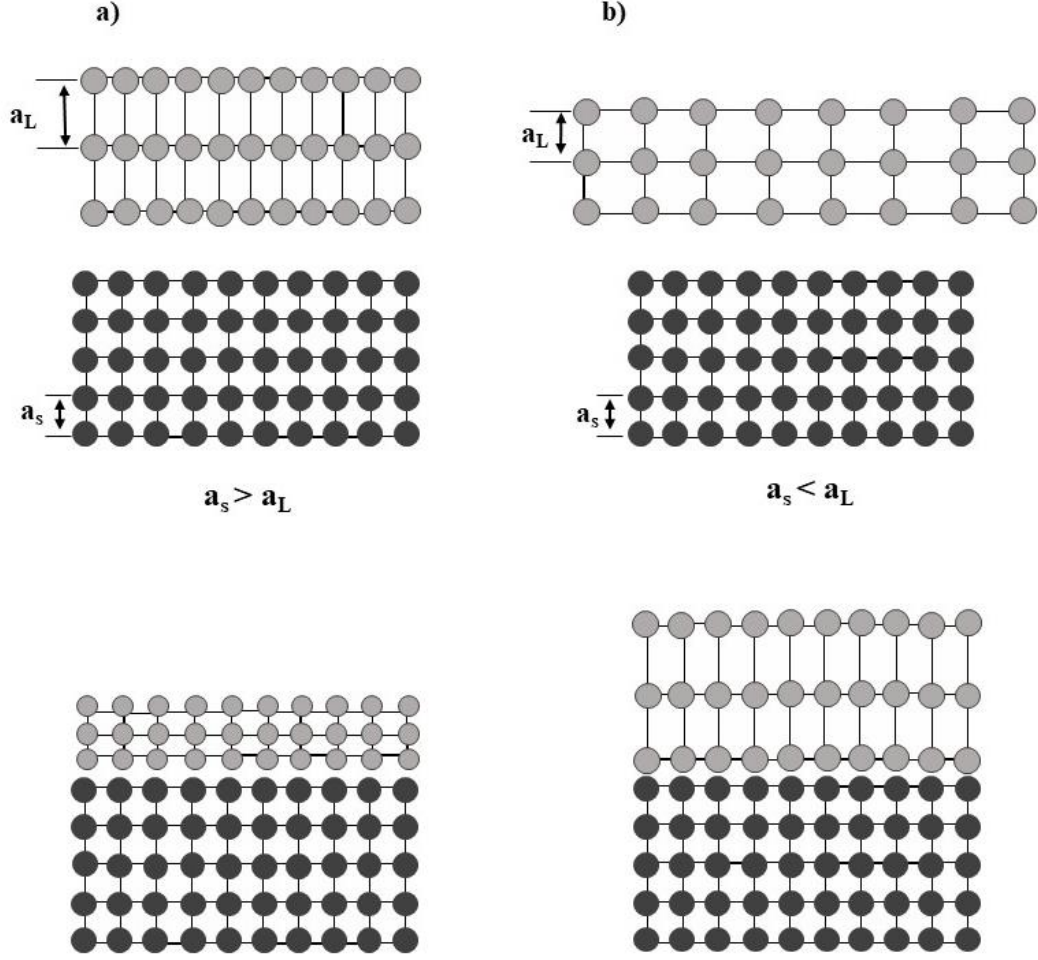
Tez kapsamında örgü uyumsuz olarak büyütülen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ ($x>0.53$) yapıları incelendiğinden, bu durumun karistalde yarattığı sonuçları incelemek faydalı olacaktır.

Düzlemsel kusurlar başlığı altında incelenen ara faz sınırlarının durumu dislokasyon oluşumunun değerlendirilmesi açısından önemlidir. Bir kristalin malzeme başka bir kristalin malzeme ile bir arayüzü paylaşması dislokasyon oluşumunu etkileyen bir durumdur. Örneğin, çizgisel kusurların oluşumundaki en büyük nedenlerden biri uygun alttaş eksikliğidir. Epitaksiyel büyütmelelerde alttaş ile üzerine büyütülen epitabaka farklı örgü sabitlerine ve farklı genleşme katsayılarına sahipse, bu yapılar büyütülürken doğal gerilmeler altında kalır. Büyütülen kristal yapıda; eğer alttaşın örgü sabiti büyütülen epitabakanın örgü sabitinden büyük ise baskı gerilimi ($a_s > a_L$); eğer alttaşın örgü sabiti büyütülen epitabakanın örgü sabitinden küçük ise ($a_s < a_L$) gevşeme gerilimi oluşur. Bu gerilmeler büyütülen epitabakanın kalınlığının kritik kalınlığın altında kaldığı durumlarda meydana gelmektedir. Böylece dislokasyonsuz ancak gerilimli bir yapı oluşur. Ancak kritik kalınlık aşıldığında, dilokasyon oluşumu başlar ve epitabaka artık gerilimsiz bir şekilde kendi örgü parametresiyle büyür. Şekil 2.14' de örgü sabitleri birbirinden farklı olan kristal yapıların, ve bu yapıların kritik kalınlığın altındaki büyütmeleleri için farklı gerilmelerle büyümesinin şematik gösterimi verilmiştir. Kritik kalınlık (d_c) kavramı Eşitlik 2.2' de verilmiştir [16].

$$d_c \cong \frac{a_s}{2|\epsilon|} \quad [2.2]$$

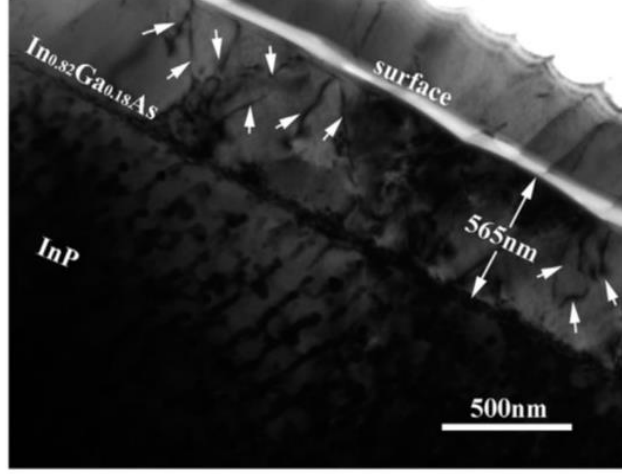
Burada ϵ , gerilmeyi ifade eder ve Eşitlik 2.3' de verilmektedir.

$$\epsilon = \frac{a_s - a_L}{a_L} \quad [2.3]$$

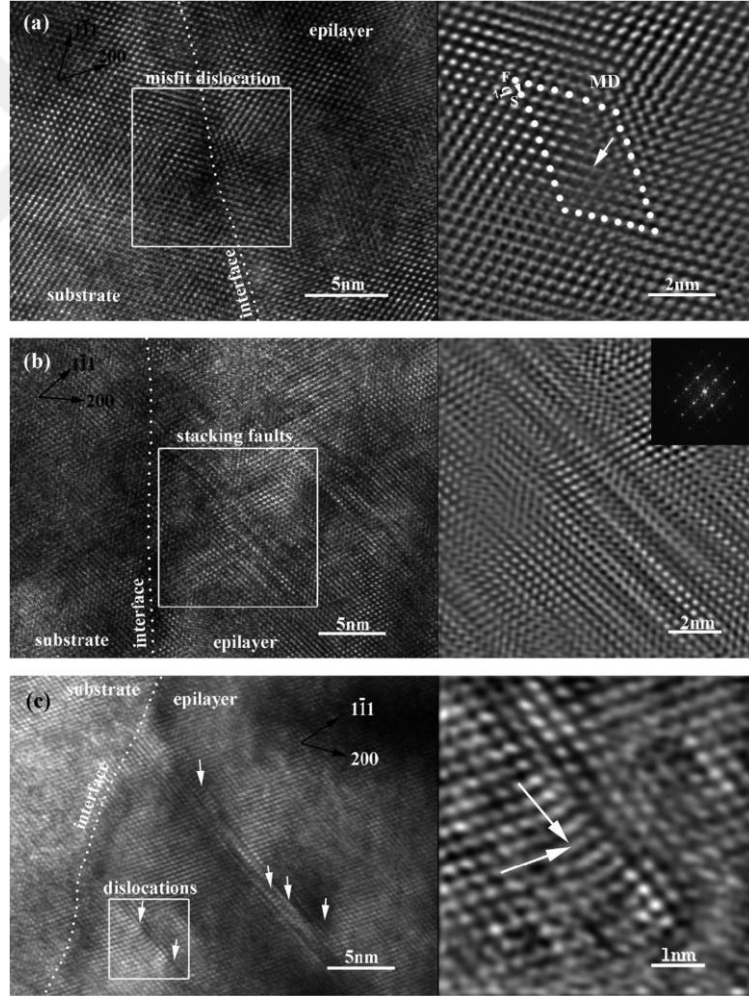


Şekil 2. 14 a) alttaşın örgü sabitinin epitabakanın örgü sabitinden büyük olduğu, ve b) alttaşın örgü sabitinin epitabakanın örgü sabitinden küçük olduğu durumlar için kritik kalınlığın altındaki büyütmelelerde kristal yapıların maruz kaldıkları gerilmeler.

Büyütmelelerde, kritik kalınlık değeri aşıldığında yapıda dislokasyon oluşumları başlar. Tez kapsamında örgü uyumsuz ($x > 0.53$) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ malzeme sistemi incelenecektir. Bu nedenle Şekil 2.15 ve Şekil 2.16' da örgü uyumsuz $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapıları için kristal kusurlar verilmiştir.



Şekil 2. 15 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ ($x=0.82$) yapısına ait geçirmeli elektron mikroskobu (TEM) görüntüleri. Beyaz oklar yapıda oluşan çizgisel kusurları göstermektedir [17].



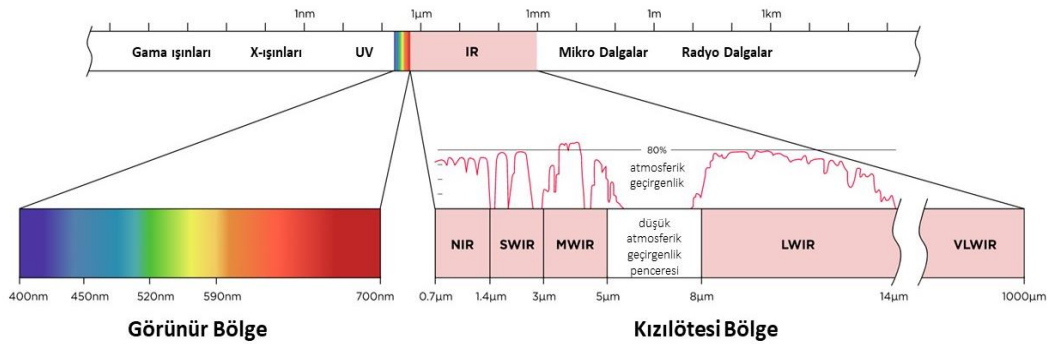
Şekil 2. 16 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ ($x=0.82$) yapısına ait Yüksek çözünürlüklü geçirmeli elektron mikroskobu (HR-TEM) görüntüleri. Resimlerde; a) misfit çizgisel dislokasyonu, b) stracking istifleme hatalarını, c) therading dislocation gösterir [17].

3. KIZILÖTESİ TEMEL BİLGİLER

3.1 Elektromanyetik Spektrum

Enerji, elektromanyetik radyasyon şeklinde yayılır ve adından da anlaşılacağı gibi, bu, elektrik ve manyetik bileşenler olmak üzere iki bileşenden oluşur. Elektromanyetik spektrum, frekans ve dalga boyuna göre düzenlenmiş tüm elektromanyetik dalgaları kapsar. Güneş, Dünya, Ay ve Evrendeki diğer tüm cisim ya da parçacıklar enerjisine bağlı olarak değişen dalga boylarında elektromanyetik bir enerji yayarlar [18].

İnsan gözü, görünür ışık bölgesi olarak adlandırılan elektromanyetik spektrumun yalnızca küçük bir bölümünü görebilir. Bu bölge görünür bölge olarak adlandırılır ve 400 nm ila 700 nm dalga boyu arasındadır. Görünen spektrumun en kısa dalga boyundan daha küçük dalga boyuna sahip bölgeye ultraviyole-morötesi bölge; en uzun dalga boyundan daha büyük dalga boyuna sahip bölgeye ise kızılötesi bölge denir. Görünür bölge ve kızılötesi bölge için spektral alt bölümler de dahil olmak üzere tüm elektromanyetik spektrum Şekil 3.1' de verilmiştir.



Şekil 3. 1 Görünür bölge ve kızılötesi bölge için spektral alt bölümler ile birlikte tüm elektromanyetik spektrum.

Kızılötesi bölge, yaklaşık 0,7 μm ve 1000 μm dalga boyları arasında yer alır. Bu bölgeyi spektrumun diğer bölgelerinden ayıran ve özel kılan bazı özellikleri vardır. Örneğin, bazı malzemeler için kırılma özellikleri kızılötesi ışık ve görünür ışık için farklılık gösterir. Buna bağlı olarak, görünür ışık altında görünür veya opak olan malzemeler, kızılötesi aydınlatma altında şeffaf veya görünmez olabilir. Ayrıca, sıcaklığı ^0K (mutlak sıfır) üzerindeki tüm nesnelere, elektromanyetik ışınım yapar. Bu termal radyasyonun önemli bir kısmı kızılötesi bölgede meydana gelmektedir [19].

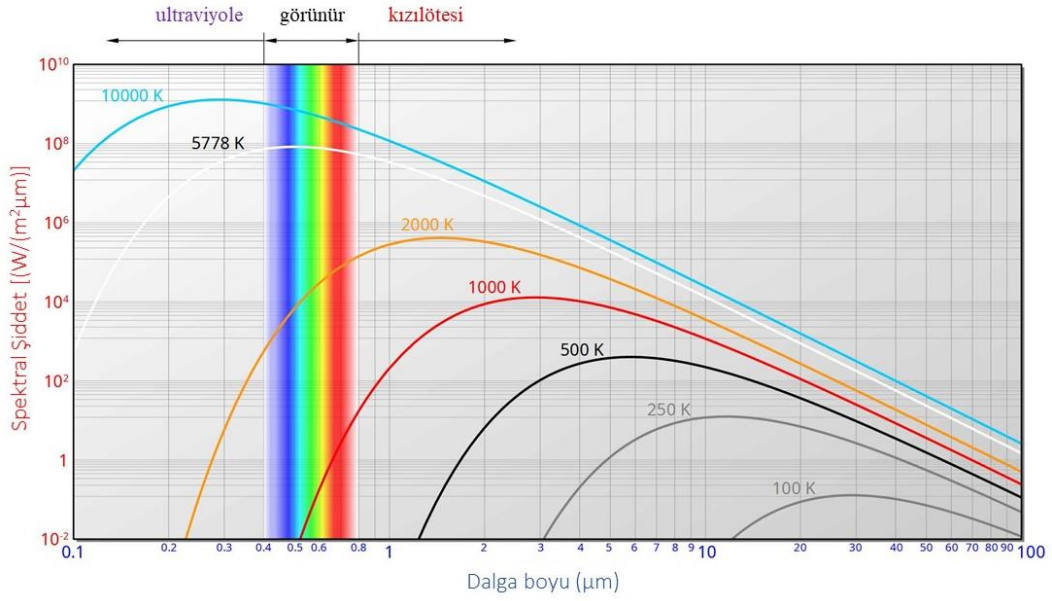
Bu aşamada kızılötesi ışımayı ve önemini daha iyi anlayabilmek için kara cisim ışımasını ve atmosferik pencere kavramlarını incelemek faydalı olacaktır.

3.2 Kara Cisim Işıması

Kara cisim, gelen tüm elektromanyetik radyasyonu soğuran fiziksel bir nesnenin idealleştirilmiş modelidir. Tüm dalga boylarında mükemmel bir soğurucu olduğundan, siyah cisim aynı zamanda ideal bir termal radyasyon yayıcısıdır. Termal radyasyon, mutlak sıfırdan daha yüksek bir sıcaklıkta bulunan bir cisim tarafından yayılır. Ancak bu ışımanın temellendirilebilmesi, mükemmel bir soğurucu ve yayıcı olan kara cismin termal radyasyonunun doğru bir şekilde tanımlanması ile mümkündür. Bu ideal cismin termal radyasyonunu doğru bir şekilde tahmin eden formül, 1900'de Planck tarafından türetilmiştir [20].

$$I(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad [3.1]$$

Planck yasası olarak bilinen bu Eşitlik 3.1 elektromanyetik ışımaya şiddetinin spektral dağılımını sıcaklığa ve dalga boyuna bağlı olarak verir. Spektral şiddet $I(\lambda)$, kara cismin birim alan başına yayılan ışımaya gücü (yüzey güç yoğunluğu) anlamına gelir. Ayrıca, T kara cismin mutlak sıcaklığını, λ dalga boyunu, h Planck sabitini, k Boltzman sabitini ve c vakum ortamındaki ışık hızını temsil etmektedir.



Şekil 3. 2 Planck Eğrisi .

Planck yasası kullanılarak birkaç önemli kavram çıkarılabilir. Bunlardan ilki Stefan-Boltzman Yasasıdır. Planck Yasası için dalga boyu aralığı ($\lambda=0$ ve $\lambda=\infty$) olarak incelendiğinde bu eşitlik Stefan-Boltzman sabiti ($\sigma= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^2)$) adı verilen bir orantı sabiti ile sadeleştirilebilir. Böylece kara cisim ışımasının diğer bir temel özelliği olarak spektral şiddetin (W/m^2) sıcaklığın dördüncü kuvvetiyle orantılı olduğunu gösteren Stefan-Boltzman yasası elde edilir. Eşitlik 3.2’de Stefan-Boltzman yasası verilmiştir.

$$I(\lambda) = \sigma T^4 \quad [3.2]$$

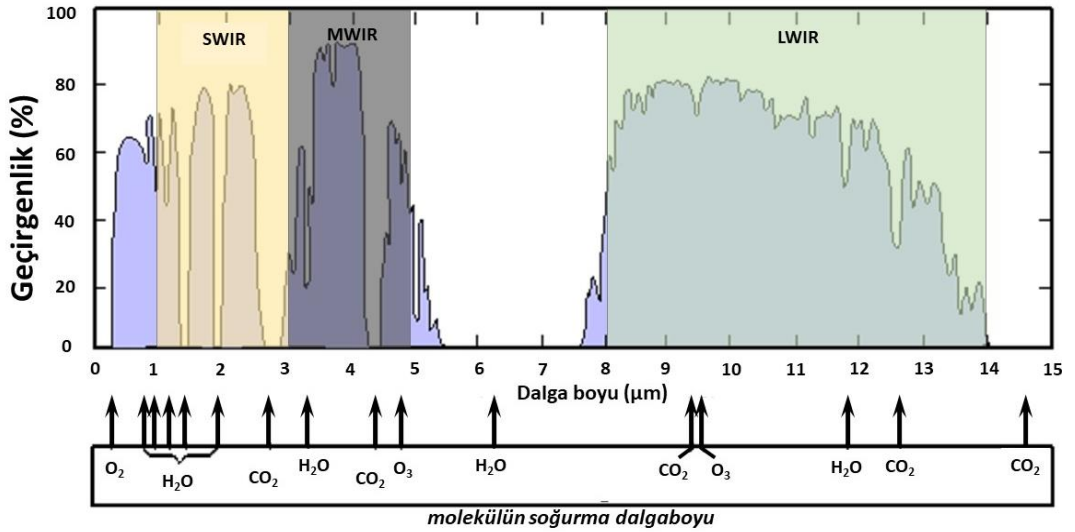
Ayrıca, diğer bir önemli kavram Wien Yer Değiştirme Yasası’dır. Belirli bir kara cisim sıcaklığı için en yüksek emisyon dalga boyu Wien Yer Değiştirme Yasası kullanılarak elde edilebilir. Eşitlik 3.3’de Wien Yer Değiştirme Yasası verilmiştir.

$$\lambda_{max} \propto \frac{a}{T} \quad [3.3]$$

Burada a wien sabitidir ve değeri $2898 \mu\text{m}$ ’ dir. Kaynağın sıcaklığı ile maksimum emisyon dalga boyu arasındaki bu ilişkiyi günlük hayatta da deneyimleriz. Güneşin etkin sıcaklığı 5800 K ’ dir ve en yüksek emisyon dalga boyu $\sim 500 \text{ nm}$ ’ de insan gözünün maksimum hassasiyetine yakındır [21].

3.3 Atmosferik İletim Pencereleeri ve Kızılötesi Bölgeler

Hava, kara cisim radyasyonu için bilinen bir yayılma ortamıdır. Atmosferik iletim, iklim koşulları, nem ve hava bileşimi gibi birçok parametreden etkilenebilir. Atmosfer, dünyayı çevreleyerek zararlı radyasyonlara ve meteorlara karşı kalkan görevi gören bir yapıdır. Elektromanyetik spektrumdaki birçok ışığa gibi bu spektrumun bir parçası olan kızılötesi ışığa da atmosfer boyunca yayılabilmektedir. Ancak bu yayılım sırasında atmosferik gazlar tarafından soğurulma ve saçılma mekanizmaları ile elektromanyetik enerji bir dereceye kadar zayıflar. Atmosferin bazı bölgelerinde moleküllerin soğurmadığı ışıklar atmosferden bir zayıflama olmaksızın yayılabilir. Spektrumun bu soğurulmayan bölgelerine atmosferik pencereler denir [22]. Görüntüleme sistemlerinin büyük çoğunluğu bu atmosferik etkileşimden yararlanır. Bu cihazlar tarafından elde edilen görüntülerin kalitesi büyük ölçüde atmosferik faktörler tarafından belirlenir. Işımanın atmosferdeki soğurulması ve emisyonu da kızılötesi sistemler geliştirilirken göz önünde bulundurulması gereken kritik parametrelerdir [19].



Şekil 3. 3 Dalga boyuna karşı spektral atmosferik geçirgenlik.

Elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinde soğurma, saçılmadan daha önemlidir. Su buharı (H₂O), karbondioksit (CO₂), ozon (O₃) ve oksijen (O₂), atmosferdeki kızılötesi ışığın çoğunu soğurur. Dünyanın atmosferi, bu tür atmosferik

etkilerin bir sonucu olarak elektromanyetik spektrumun geniş bölümleri için opaktır [23] . Şekil 3.3' de atmosferin spektral iletimi gösterilmektedir.

Atmosferin bu iletim özelliklerine göre, atmosferik pencere şu üç kısma ayrılır: kısa dalga boylu kızılötesi (SWIR), orta dalga boylu kızılötesi (MWIR) ve uzun dalga boylu kızılötesi (LWIR). Bu bölgeler için yaygın kullanılan sınıflandırma Tablo 3.1' de verilmiştir. Bu sınıflandırma farklı kaynaklara ve uygulama alanlarına göre farklılık gösterilebilir.

Tablo 3. 1 Atmosferik iletimde kızılötesi bölgelerin dalga boyu aralığı.

Atmosferik iletimde kızılötesi bölgeler	Dalga boyu aralığı (μm)
Kısa Dalga boylu Kızılötesi (SWIR)	1-3 μm
Orta Dalga boylu Kızılötesi (MWIR)	3-5 μm
Uzun Dalga boylu Kızılötesi (LWIR)	8-14 μm

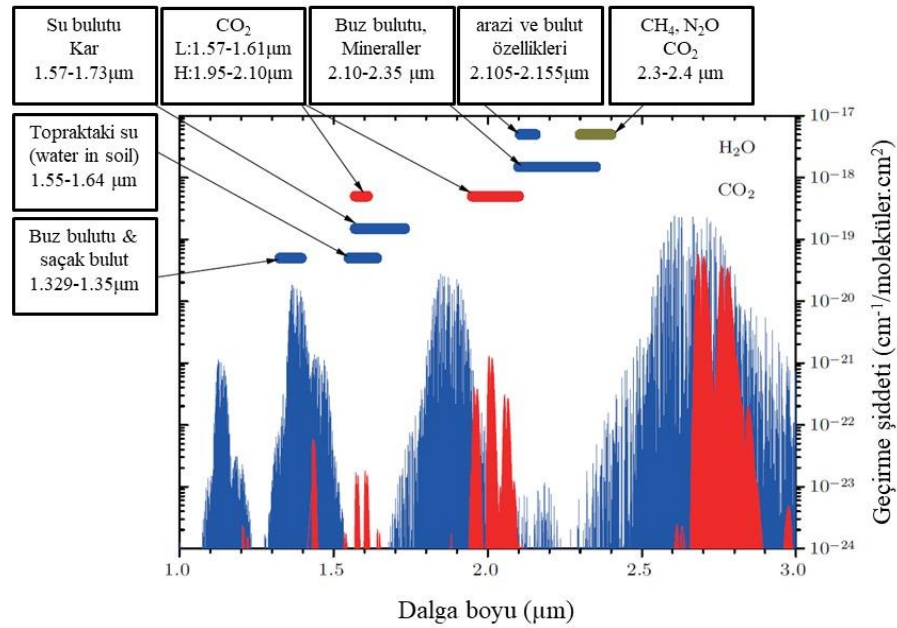
Kızılötesi görüntüleme teknolojileri, gözetleme, keşif ve uzaktan algılama uygulamalarının talepleriyle güçlü bir şekilde yönlendirilmektedir. Orta ve uzun dalga boylu kızılötesi (MWIR ve LWIR) bölgeler için nesnelerin termal radyasyonunu algılayan kızılötesi kameralar, doğal veya yapay ışık kaynaklarından bağımsız olduğundan özellikle gece görüşü için oldukça kullanışlıdır. Ancak ortam ve görüntülenecek cisim arasında yeterli derecede bir sıcaklık farkı yoksa cismin algılanması mümkün olmaz. Buna karşın SWIR bölgesi için ışığın nesnelere etkileşimi MWIR ve LWIR bölgelerinden farklı olarak görünür bölge ile benzerlik gösterir ve temelde görüntü yansıyan ışık ile oluşur.

Her bir bölge sahip olduğu kendine has özelliklere göre çeşitli uygulamalarda kullanım alanları bulur. Bu bölgelerin kendi içinde oldukça avantajlı durumları vardır ve aslında bu bölgeler arasında direkt bir karşılaştırma yapmak pek uygun olmayacaktır. Tüm bu sistemler birbirinin tamamlayıcısı olarak düşünülebilir. Bu tez kapsamında SWIR fotodedektörler odak noktasıdır, bu nedenle önce SWIR bandını özel kılan nedenlere daha sonra SWIR, fotodedektör yapılarına odaklanılacaktır.

3.3.1 SWIR Bandının Kullanım Avantajları ve Uygulama Alanları

1–3 μm dalga boyu aralığında tanımlanan SWIR spektral bandının ana avantajı, benzersiz görüntüleme uygulamaları potansiyelinde yatmaktadır. Bu sayede farklı alanlardaki uygulamalar için ilgi çekici olup aktif bir araştırma alanıdır [24], [25].

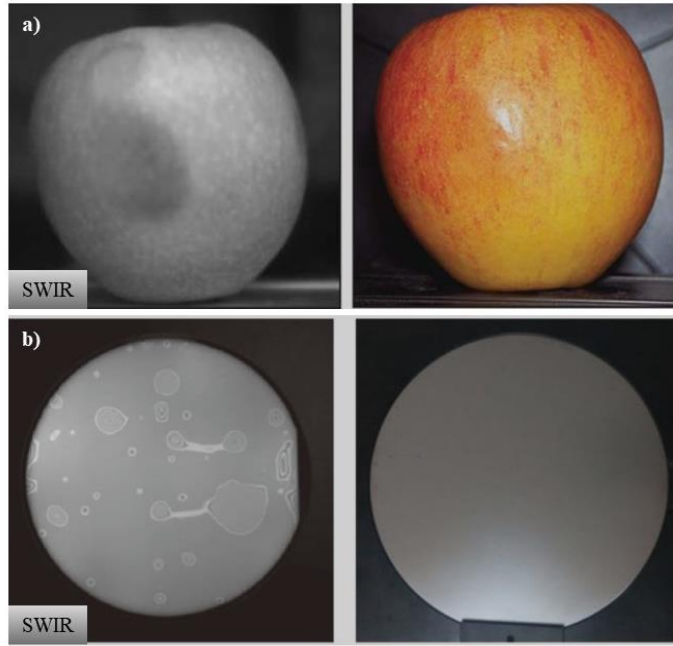
SWIR bandı için özel atmosferik geçirgenlik özellikleri Şekil 3.4' de detaylı olarak verilmiştir. Buna göre dünyadaki en önemli bileşen olan su molekülleri SWIR bandında sırasıyla 1.1, 1.4, 1.9 ve 2.7 μm civarında dört önemli absorpsiyon bölgesine sahiptir ve bunların aralarında net iletim pencereleri bulunur. Ayrıca CO_2 ' de bu bantta özellikle 1.6 μm ve 2.1 μm civarında önemli spektral parmak izlerine sahiptir. SWIR bandının sahip olduğu bu absorpsiyon özellikleri, uzaydan veya yeryüzünden izlemeyi oldukça elverişli hale getirir. Gazların veya sıvıların karakteristik absorpsiyon spektrumları, topraktaki su içeriği, ürün verimi tahmini, bulut ve mineral ayrımı, termal fotovoltaik enerji dönüşümü, rüzgar algılama lidarı vb uygulamalar için kullanılır [26].



Şekil 3. 4 Farklı nesnelerin H_2O ve CO_2 absorpsiyon yoğunluklarını içeren SWIR bandının spektral özelliği [26].

SWIR ışığının su molekülleri tarafından güçlü bir şekilde soğurulmasının sonucu olarak neme karşı gösterdiği hassasiyet, var olan nemi görselleştirmeyi mümkün kılar. Diğer bir deyişle görünür ışık altında şeffaf olan su, SWIR bandında belirli bir dalga boyunu soğurur ve bu nedenle yakalanan bir görüntüde fark edilebilir.

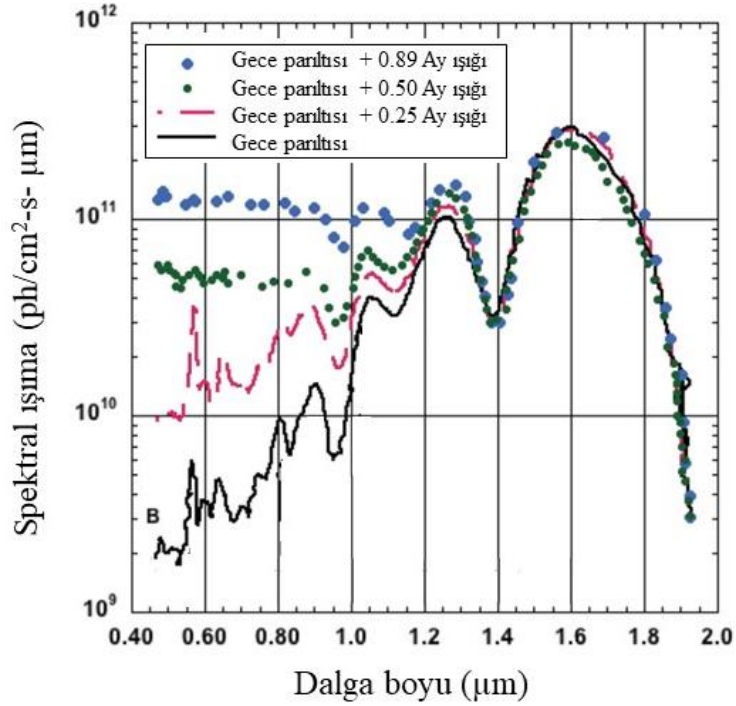
Bu özellik, gıda sektöründe kalite kontrol amacıyla kendine bir uygulama alanı bulur. Örneğin, bir meyve zedelendiğinde hücre duvarları parçalanır ve bu alan daha yüksek bir nem içeriği geliştirir [27]. Böylece var olan nem algılanarak gıda denetimlerinde görünür ışık altında algılanması zor olan çürük ve çizikleri algılamak için kullanılabilir. Buna ek olarak SWIR ışığının Silikon' a nüfus etme özelliğinden yaralanan görüntüleme sistemleri yarıiletken endüstrisinde denetim amaçlı olarak kendine uygulama alanı bulur [28]. Şekil 3.5' de her iki uygulama alanı için de örnekler verilmiştir.



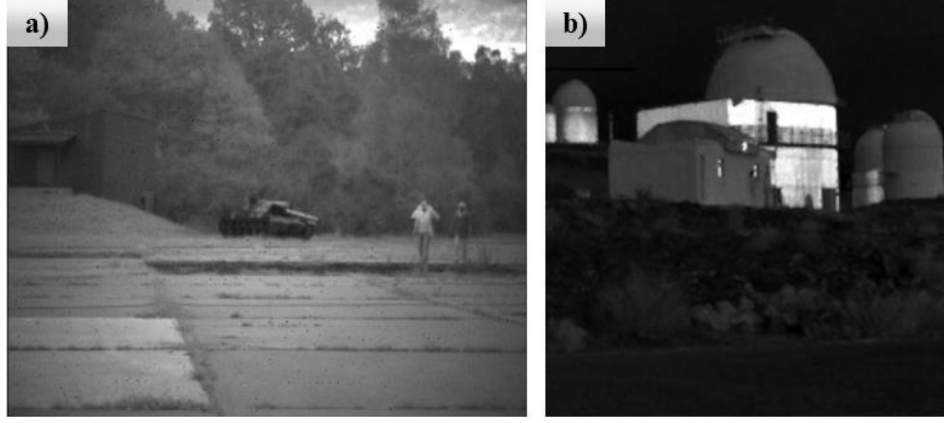
Şekil 3. 5 a) bir elmanın ve b) Silikon yarıiletkeninin SWIR kamera ve görünür bölgeyi algılayan bir kamera kullanılarak elde edilen görüntüleri.

SWIR algılama sistemleri, hem aktif hem de pasif modlarda görüntüleme yapabilme kapasitesine sahip olduğundan zengin bilgiler sunabilmektedir. Aktif görüntüleme için, göze zarar vermeyen SWIR lazerler ve LED'ler gibi harici ışık kaynaklarının kullanılmasının yanı sıra dahili bir sinyal kazancı sağlamak için çığ fotodiyotlara (APD) dayalı SWIR fotodedektörler de kullanılabilir. Pasif SWIR görüntüleme ise ay ışığı doğal bir ışık kaynağı görevi görür. Ancak ay ışığı olmayan bir gecede atmosferin üst kısmında nitrojen (N) ve oksijenin (O) hidroksil iyonları ile reaksiyonundan kaynaklanan "gece parıltısı" olarak bilinen kimyasal ışımaya gece açık gökyüzünde diğer bir doğal ışık kaynağıdır. Bu ışımının neredeyse tamamı

SWIR bölgesinde oluşur ve yıldız ışıklarından 5-7 kat daha yüksek spektral ışınım üretebilmesiyle aysız gece koşullarında bile yeterlidir [5], [29]. Şekil 3.6' da ayın çeşitli fazlarına göre gece parıltısı spektrumu ve Şekil 3.7' de SWIR bandında, ay ışığı olmaksızın elde edilen görüntüler verilmiştir. Böylece görüntüleme yapabilmek için bir ışık kaynağına ihtiyaç duyulan SWIR fotodetektörlerin dezavantajlı bu durumu alternatif doğal ve yapay kaynaklarla telafi edilebilir. Ayrıca yine bu durum, FPA (focal plane array) ve APD'lere dayalı SWIR görüntüleme gibi teknik iyileştirmelerle de telafi edilebilir. Ayrıca APD'lere dayalı SWIR görüntüleme, optik iletişim, kuantum bilgisi, mesafe bulma, tutarlı algılama, tıbbi teşhis, analitik aparat, araç ışığı algılama ve mesafe belirleme (LIDAR) dahil olmak üzere çeşitli potansiyel uygulamalara da sahiptir.



Şekil 3. 6 Ayın çeşitli görünüşleri altında gece parıltısı spektrumu [30].



Şekil 3. 7 Aysız bir gecede a) açık bir gökyüzü, b) bulutlu ve tamamen kapalı bir gökyüzü altında alınan SWIR görüntüleri [31].

Bu bantta görüntülemenin sunduğu bir diğer avantaj ise, SWIR ışığının atmosferik sis, pus veya dumandan etkilenmeyişidir. Atmosferik sis, pus veya duman tarafından saçılmaya karşı hassas olan ve görünür ışıkla karşılaştırıldığında SWIR ışığı, mikron altı parçacıklardan Rayleigh saçılması olmadan geçer. Rayleigh Saçılımı daha uzun dalga boyları için daha az oluşur ve kızılötesi ışık saçılmadan bu sis, toz, pus vb. etmenlerden etkilenmeden geçebilir. Bu sayede SWIR fotodedektörler sert hava koşullarında bile uzun menzilli ve yüksek çözünürlüklü doğal görüntüler üretebilir çünkü SWIR bandında yansıyan ışık görünür ışığa daha yakın ve diğer kızılötesi dalga boylarından daha uzaktır. Şekil 3.8' de görünür ve SWIR kameralar ile alınan görüntüler verilmiştir. Burada, SWIR görüntülemenin dumanlı ortamda gösterdiği performansın yanı sıra duvarın ardındaki bir lazer izi de belirtilmiştir. Böylece keskin nişancılarının tespiti için imzalardan biri olan optik nişangahtan gelen lazer yansıması SWIR bandında tespit edilmiştir [32], [33]. Bunlara ek olarak insan yapımı nesnelere daha düzenli şekillere, daha pürüzsüz yüzeylere ve daha güçlü polarizasyonlara sahiptir; bu nedenle, SWIR görüntüleme, insan yapımı ve doğal nesnelere arasındaki algılama ve ayırma için oldukça etkilidir [34]. Bu durum, kamuflej tespitini mümkün kılar.



Şekil 3. 8 Gündüz alınan görünür ve SWIR kamera görüntüleri [32].

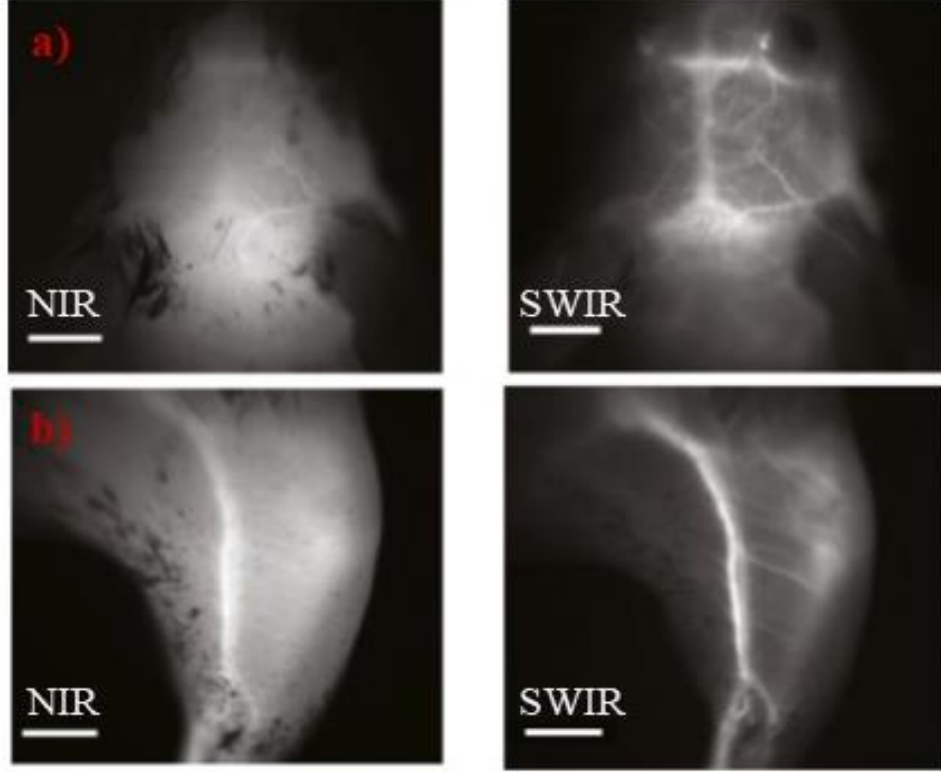
SWIR kameraların bir başka üstünlükleri ise daha uzun dalga boylu gece görüş sistemlerinden farklı olarak cam arkasından görüntü alabilirler. Bu özellikle askeri uygulamalar açısından hayati öneme sahiptir. Böylece zırhlı araç içerisinden dahi inceleme ve gözetleme yapılabilir. Şekil 3.9' da gece alınan MWIR termal ve SWIR görüntüleme sistemlerine ait görüntüleri gösterilmektedir. SWIR kameraya ait görüntüler, bu bölgede camın arkasını görme yeteneği sayesinde arabanın ve binanın camlarının arkasındaki durumu belirlemede çok daha iyi bir performans sergiler [32]. SWIR bandında cam hala şeffaf olduğundan, kamera lensleri pahalı Germanyum veya Çinko-Selenid (ZnSe) yerine camdan yapılabilir. Bu da dedektör sisteminin ekipman maliyetini azaltmak için bir avantajdır [29].



Şekil 3. 9 Gece bir cam arkasından alınan MWIR termal kamera ve SWIR kamera görüntüleri [32].

Tüm bu askeri ve sivil alan uygulamalarının yanı sıra SWIR görüntüleme sistemleri tıbbi alanlarda da ciddi bir kullanım potansiyeline sahiptir. SWIR bandında görüntüleme canlı organizmaların biyolojik süreçlerinin derinlikli incelenmesine de olanak sağlar. İnsan kemiklerinin SWIR bandında şeffaf özelliğe sahip oluşu, bir aydınlatma kaynağı kullanılarak insan vücudundaki mikrovasküler sistemleri gözlemlenebilir kılar. Son çalışmalar, SWIR görüntülemenin hayati belirtilerin temassız izlenmesi, mikrovasküler kan akış haritalarının oluşturulması, gerçek zamanlı metabolik görüntüleme ve moleküler hedefli görüntüleme dahil üzere benzeri görülmemiş görüntüleme fırsatları sağladığını göstermiştir [35]. Yani SWIR görüntüleme sayesinde damar hastalıklarının erken teşhisi sağlanabilir ve cerrahi

komplasyonların önüne geçilebilir. Şekil 3.10' da SWIR görüntüleme farelerde beyin ve arka bacak damar sisteminin NIR görüntülemeye göre daha yüksek çözünürlükle tespit edebildiğini göstermektedir.



Şekil 3. 10 Farelerde beyin (a) ve arka bacak (b) damar sisteminin SWIR ve NIR görüntüleri [35].

Bu aşamada ilk olarak kızılötesi görüntüleme sistemleri teknik olarak detaylandırılacaktır.

3.4 Kızılötesi Dedektör Sistemleri

Bir kızılötesi dedektör, üzerine düşen kızılötesi ışığı algılar ve anlamlı veriler işlemek üzere elektrik sinyallerine dönüştürür. Kızılötesi dedektörlerin algılama mekanizmaları, dedektöre gelen ışığın malzeme ile olan etkileşiminden nasıl etkilendiğine göre farklılık gösterir. Böylece kızılötesi dedektör sistemleri, termal ve foton dedektörleri olarak sınıflandırılır [36] .

3.4.1 Kızılötesi Termal Dedektörler

Kızılötesi Termal Dedektörler, kızılötesi ışığa duyarlı malzemelerde sıcaklık değişikliklerini tetiklemek ve bu sıcaklık değişikliklerini, malzemenin elektriksel özelliklerinde bir değişiklik yaratarak, ölçülebilir elektrik sinyallerine dönüştürmek için algılanan kızılötesi ışığı kullanır [37]. Bolometreler ve Pyroelektrik gibi kızılötesi termal dedektörler bu sınıfta yer alır.

Bolometreler

Bolometrelerin çalışması foto-bolometrik etki ile açıklanır. Bu etki, gelen kızılötesi ışığın soğurulması üzerine maddedeki sıcaklık artışın neden olduğu direnç farkına dayanır.

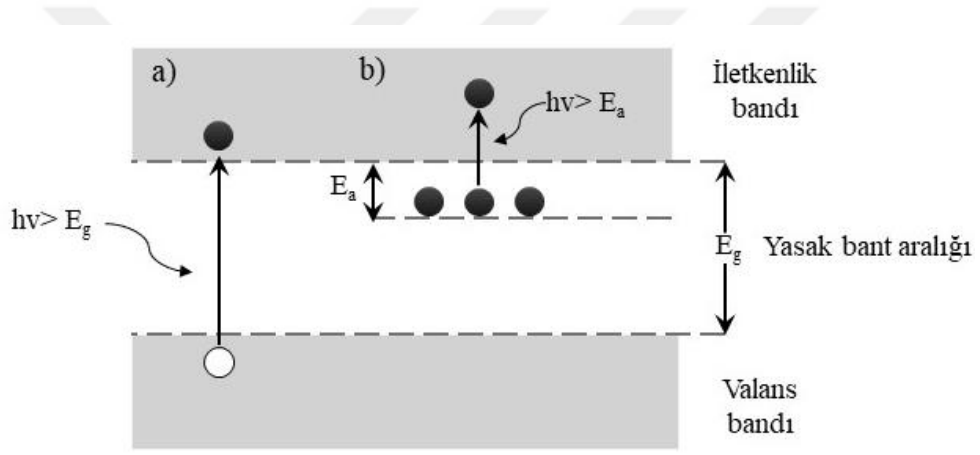
Pyroelektrik detektörler

Pyroelektrik detektörlerde ise, piroelektrik kristallerdeki nadir görülen asimetri özelliğine dayanmaktadır [23]. Sıcaklık değişimi, piroelektrik kristalin yapısındaki atomların konumlarını biraz değiştirebilir, böylece polarizasyonunu da değiştirebilir ve bu da kristal boyunca bir voltaj oluşturur.

Bununla birlikte, bu termal fotodetektörlerin uygulamaları, düşük hassasiyetleri ve yavaş tepkileri nedeniyle büyük ölçüde sınırlıdır ve neredeyse hiç SWIR bandında uygulamaları yoktur.

3.4.2 Kızılötesi Fotodedektörler

Kızılötesi dedektör teknolojisindeki asıl ilerleme foton dedektörleri sınıfına dahil olan yarı iletken kızılötesi dedektörlerine bağlıdır. Bu dedektörlerde gelen radyasyon, malzeme içinde ya örgü atomlarına bağlı elektronlarla, ya katkı atomlarıyla ya da serbest elektronlarla etkileşim yoluyla soğurulur. Böylece malzemenin elektronik enerji dağılımında ortaya çıkan değişikliklerle bir çıkış sinyali üretilir. Foton dedektörlerinde, uyarma mekanizmasının doğası gereği gelen fotonun enerjisini çok hızlı bir şekilde malzemenin elektronik düzeyine transfer edilir ve çıkış sinyali neredeyse anında üretilir. Bu nedenle, dedektör yanıtı çok hızlıdır. Foton dedektörlerinin spektral tepkisi dedektöre gelen ışımının dalga boyuna bağımlılık gösterir [38].



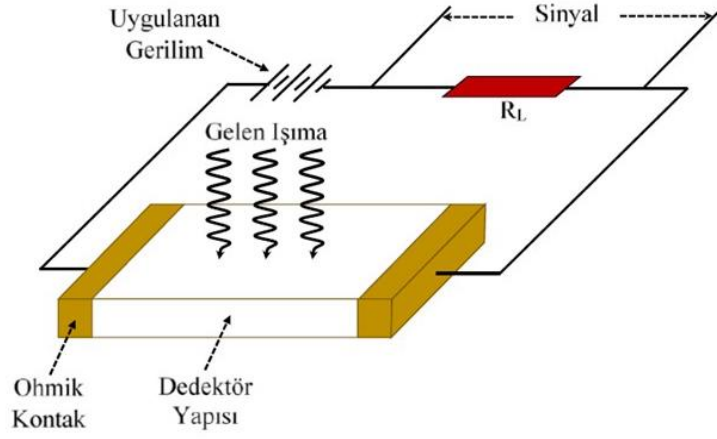
Şekil 3.11 Kızılötesi fotodedektörlerdeki temel optik uyarım süreçleri. a) banttan banda uyarılma (intrinsic), b) katkı seviyesinden uyarılma (extrinsic).

Kızılötesi fotodedektörlerdeki temel optik uyarım süreçleri, Şekil 3.11' de gösterilmektedir. Buna göre kızılötesi ışıma etkileşimin doğasına bağlı olarak banttan banda (intrinsic;asal) ve katkı seviyelerinden uyarılma (extrinsic) olarak iki farklı optiksel uyarma mekanizmasıyla soğurulur.

Optik sinyali bir elektrik sinyaline dönüştüren fotodedektör yapıları şu şekilde sınıflandırılır; foto-iletkenler, PN fotodiyotlar, PIN fotodiyotlar, çığ fotodiyotları (APD'ler), Schottky bariyer fotodiyotları, metal-yarıiletken-metal (MSM) fotodiyotlar, fototransistörler vb.

Foto-iletkenler;

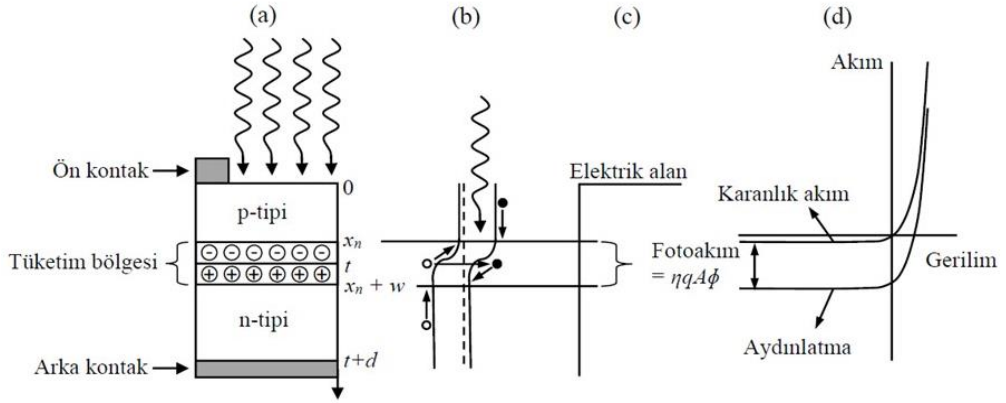
Foto-iletken dedektörler, ışığa karşı duyarlılık gösteren rezistörlerdir. Foto-iletken bir dedektöre gelen yasak enerji aralığından daha büyük enerjili fotonlar serbest taşıyıcılar oluşturarak dedektörün iletkenliğine katkıda bulunur. Bu serbest taşıyıcı sayısındaki artışla birlikte foto-iletken dedektörün elektriksel iletkenliği değişir ve harici olarak uygulanan bir öngerilim voltajı ile toplanarak foto-akım yaratılır. Böylece, dedektöre gelen radyasyonun şiddetinin ölçüsü olan iletkenlikteki değişim miktarı bir dış devre yardımıyla algılanır. Şekil 3.12' de bir foto-iletken dedektörün şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3. 12 foto-iletken tip dedektörün şematik gösterimi.

PN fotodiyotlar:

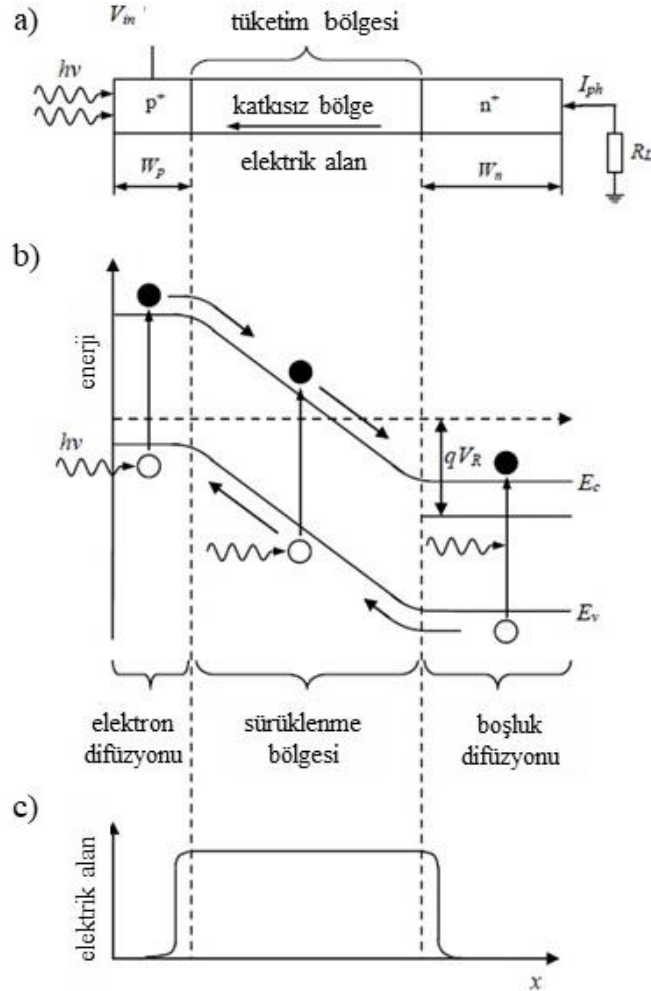
n-tipi ve p-tipi yarıiletken malzemeler metalurjik bir bağlantı oluşturduğunda, bağlantı noktasında çoğunluk yük taşıyıcılarının tükendiği ve yerleşik bir potansiyelin olduğu tüketim bölgesi adı verilen bir bölge oluşur. Bu sırada dedektör üzerine fotonlar düştüğünde eğer foton enerjisi malzeme bant aralığından yüksekse elektron-boşluk çiftlerini serbest elektronlara ve boşluklara ayırabilirler. Oluşturulan bu yük taşıyıcıları, yerleşik potansiyelin oluşturduğu güçlü elektrik alan sayesinde n tarafına ve p tarafına süpürülür. Böylece, negatif veya ters akım boyunca, akım-gerilim özelliklerini değiştirecek biçimde foto-akım oluşur. Bu küçük ters sapma, yük taşıyıcıları dış devrede toplamak için yeterlidir [39]. Şekil 3.13' de bir p-n eklemının fotodedektör olarak çalışmasının şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 3. 13 p-n eklemının bir foton detektörü olarak çalışması. (a) p-n eklem yapısı, (b) enerji-bant diyagramı, (c) elektrik alanı, (d) akım-gerilim karakteristikleri.

PIN fotodiyotlar:

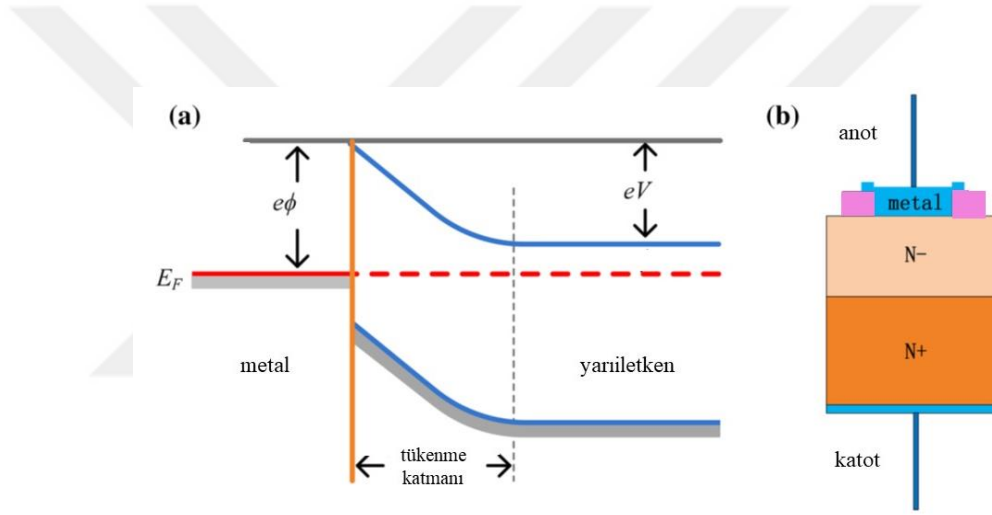
p-i-n yapılı fotodedektörler, foton soğurma verimini artırmaya yönelik olarak p-n eklem yapıları fotodedektörlerden farklı olarak p-tipi ve n-tipi katmanlar arasında katkısız (asal; intrinsic; çok hafif katkılı) bir katman büyütülerek elde edilir. Bu çok hafif katkılı yarıiletken malzemenin eklenmesiyle diyotun algılama için en etkili kısmı olan tükenme bölgesinin genişliği artırılmış olur. P-tipi ve n-tipi katmanlar arasındaki intrinsic (asal) katman çok düşük taşıyıcı yoğunluğuna ve yüksek dirence sahiptir. Bu nedenle, dedektöre uygulanan gerilim tamamen bu bölgeye düşer. Böylece yapının foton soğurma verimi artar [40]. Şekil 3.14' de bir p-i-n fotodedektörün yapısı, enerji bant diyagramı ve elektrik alan durumu şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3. 14 p-i-n fotodedektörün (a) yapısı, (b) enerji bant diyagramı, (c) elektrik alan durumu.

Schottky Bariyer fotodiyotları:

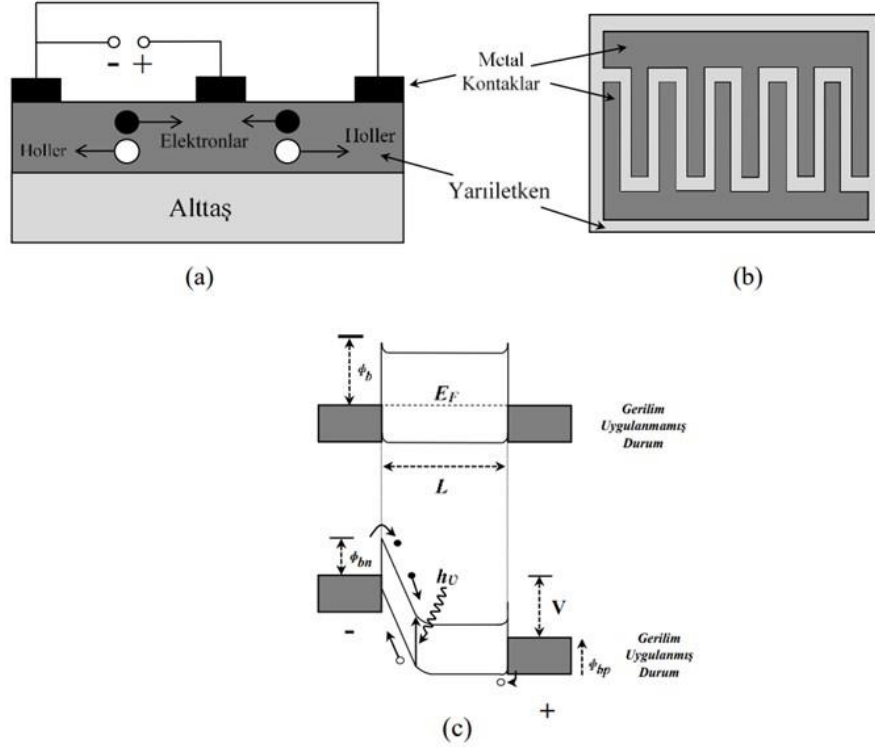
Schottky bariyer diyotları yarıiletken yapının üzerini kaplayan metal kontakta oluşur. Yarıiletken malzeme ve metal kontakın arasındaki temastan önce, yarıiletkenin fermi enerji seviyesi, metalin fermi enerji seviyesinden farklıdır. İkisi temas halindeyken, yarıiletken tarafındaki enerji bandı bükülür, böylece metalin ve yarıiletkenin fermi enerji seviyesi Şekil 3.15 (a)'da gösterildiği gibi değişir. Bandın bükülmesiyle oluşan bariyere Schottky bariyeri denir. Genel bir Schottky diyodunun temel yapısı ise Şekil 3.15 (b)'de gösterilmektedir. Burada, ağır katkılı yarıiletken altta, hafif katkılı yarıiletken epitaksiyel katman olarak kullanılır [41].



Şekil 3. 15 a) Metal ve yarıiletken teması ile oluşan Schottky bariyeri b) genel Schottky diyodunun temel yapısı.

Metal-Yarıiletken-Metal (MSM) fotodiyotlar;

Düzlemsel bir yapıya sahip olan MSM fotodedyektörler, aktif bir katmanın üzerine birbirine geçmiş iki Schottky kontağından oluşur. Bu cihazlar, geniş bir aktif alanı korurken elektrotların yakın aralığı yoluyla taşıyıcı geçiş süresini azaltan birbirine geçmiş kontak yapısı sayesinde, aynı aktif alana sahip diğer fotodedyektörlere kıyasla hızlı tepki ve basit bir yapıya sahiptir. MSM fotodedyektörlerin çalışma prensibi, diğer fotodedyektörlere benzer şekildedir. Dedyektöre gelen radyasyon aktif tabaka tarafından soğurularak elektron-boşluk çifti oluşturur. Uygulanan elektrik alan etkisiyle elektronlar pozitif elektrota ve boşluklar negatif elektrota sürüklenir. Şekil 3.16' da MSM fotodedyektörün (a) yandan görünümü, (b) üstten görünümü, (c) enerji bat yapısı verilmektedir.



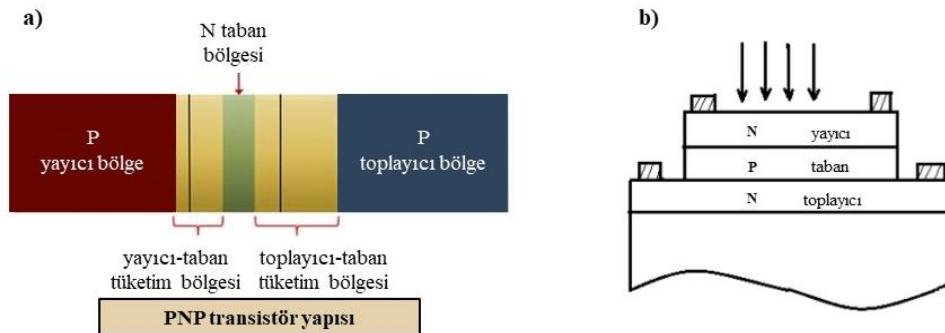
Şekil 3. 16 MSM fotodedyektörün (a) yandan görünümü, (b) üstten görünümü, (c) enerji bat yapısı [40].

Çığ Fotodiyotları (APD):

Çığ fotodiyotları (APD'ler), fotonları elektronlara dönüştüren ve ardından elektronları çoğaltarak güçlendirilmiş bir foto-akım sinyali sağlayan yarıiletken dedektörlerdir. APD'ler, darbeli iyonizasyon yoluyla yük taşıyıcılarını dahili olarak çoğaltır ve gelen optik güç seviyesine yanıt olarak foto-akımı artırır. Çarpma iyonizasyonu ile üretilen taşıyıcıların, bir çığa benzeyen iyonlaşma olaylarının dallanan zincirlerine yol açarak daha fazla darbe iyonlaşmasını başlatabilir. APD'ler, amaçlanan çalışma modlarına ve tepki verdikleri optik dalga bandına göre sınıflandırılır; bu, imal edildikleri yarı iletken alaşımların bir işlevidir. Yüksek hızları ve dahili kazançları nedeniyle optik iletişimde ve hassasiyetin önemli olduğu çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır [42], [43].

Fototransistörler:

Geleneksel transistörler iki p-tipi (n-tipi) yarıiletken malzeme arasında n-tipi (p-tipi) yarıiletken malzeme yerleştirilerek oluşturulan, elektrik akımı taşıyan ve harici devrelerle bağlantı kurmaya yardımcı olan, taban(base)/yayıcı(emitter)/toplayıcı(collector) olmak üzere 3 terminali bir cihazdır. Fototransistörler ise geleneksel bir transistör ve bir fotodiyotun birleşimidir. Temel akım, ışığa duyarlı taban bölgesinin aydınlatılmasıyla üretilir ve fotodiyota düşen ışığın yoğunluğuna bağlıdır. Fototransistörün aydınlatılması, transistörün taban bölgesinde bir pencere ile sağlanır. Fototransistör, bir fotodiyoda kıyasla daha yavaş bir yanıt hızına sahiptir, ancak daha verimlidir [44]. Şekil 3.17' de PNP ve NPN fototransistör yapıları temel olarak şematize edilmiştir.



Şekil 3. 17 a) PNP, ve b) NPN fototransistör yapılarının temel şematik gösterimi.

3.4.3 Kızılötesi Fotodedektörler için Bazı Anahtar Parametreler

Kızılötesi fotodedektörlerin performansı; kullanılan yarıiletken malzeme sistemi, fabrikasyon süreçleri, okuma devresi, elektronik yazılım gibi birçok önemli faktöre bağlıdır. Tüm bu unsurların uyumlu bir şekilde bir araya gelmesi kızılötesi fotodedektörlerin performansını artırmaktadır. Temelde dedektör performansını nicel olarak belirlemek için bazı parametrelere ihtiyaç vardır. Bu parametrelerden bazıları;

Foto-cevap (Responsivity - R)

Foto-cevap veya tepkisellik olarak Eşitlik 3.4' de verilen bu parametre dedektörün çıkış sinyalinin dedektör üzerine düşen radyasyona oranı olarak tanımlanır. Çıkış birimi dedektörün sinyal çıkış tipine göre foto-gerilim (V/W) veya foto-akım (A/W) şeklinde olabilir

$$R = \frac{\text{çıkış sinyali}}{\text{gelen ışımının gücü}} \quad [3.4]$$

Kuantum verimliliği (η)

Kuantum verimliliği, dedektöre gelen foton başına üretilen elektron- boşluk çiftlerinin bir ölçüsüdür. Bir fotodedektörün tepkiselliği kuantum verimliliği ile doğrudan bir ilişkiye sahiptir. Bu ilişki Eşitlik 3.5' da verilmiştir. Buna göre bir fotodedektörün foto-akımını arttıkça kaantum verimliliği de buna bağlı olarakta dedektör hassasiyeti artar.

$$\eta = \frac{R \lambda}{q} \frac{hc}{g} \quad [3.5]$$

Burada, q elektron yükü, g dedektör kazancı (uyarılmış taşıyıcıların ortalama serbest yolunun, dedektörün toplam aktif tabaka kalınlığına oranı), λ gelen ışımının dalga boyu, h Planck sabiti, c boşluktaki ışık hızı olarak tanımlanır.

Sinyal - Gürültü oranı (SNR)

Gürültü, dedektörün sinyalindeki dalgalanmalar veya istenmeyen sinyaller olarak tanımlanabilir. Dedektöre etki eden çeşitli kaynaklar ve mekanizmalar bu sinyal varyasyonlarına neden olur; bu nedenle, kendi bağlamlarında gözden geçirilmelidirler. Yapısal kaynaklı gürültüler genellikle foton geliş hızındaki dalgalanmalardan, yarıiletkendeki örgüsel titreşimlerden ve dedektörün içindeki elektronların rastgele hareketleri sonucu ortaya çıkar [45]. Gürültü seviyesinin yükselmesi dedektörün çıkış sinyalini okumakta zorluk oluşturur. Aşağıda çeşitli gürültü mekanizmaları verilmiştir.

- $1/f$ gürültüsünün kökeni açıkça bilinmemektedir. Geniş bir aralıktaki frekans ile ters orantılıdır. $1/f$ gürültü, dedektörün düşük frekanslarda saptayışını sınırlayabilir.
- *Üretim-Rekombinasyon (G-R) gürültüsü*, belirli bir zaman aralığında taşıyıcı üretimi ve rekombinasyon olaylarının oluşum sayısındaki küçük dalgalanmalardan kaynaklanır. Bu gürültünün kaynağı hem optik, hem de termal üretim süreçleri olabilir.
- *Johnson Gürültüsü*, taşıyıcı yüklerin termal dalgalanmalarıyla oluşur. Sıcaklığa bağlıdır ancak bir soğurma süreci var olduğu sürece, mutlak sıfır sıcaklıkta bile, dalgalanma-dağılma teoremine (fluctuation-dissipation theorem) göre asla tamamen azalmamalıdır.
- *Atış gürültüsü*, fotonların rastgele gelişinden kaynaklanır ve serbest taşıyıcı oluşumunda rastgeleliğe neden olur. Fotonların bu ayrık doğası ve elektrik yükü nedeniyle dedektöre etki eden karanlık akım ve foto-akım bu gürültüye katkıda bulunur.

Dedektivite (D)

Dedektivite, NEP' in (Gürültü Eşiti Güç-Noise Equivalent Power) tersi olarak tanımlanır. Birimi W/\sqrt{Hz} olan ve Eşitlik 3.6' da verilen NEP, bir birim sinyal gürültü oranı üretmek için dedektörün aldığı minimum ışımaya gücü miktarını tanımlar.

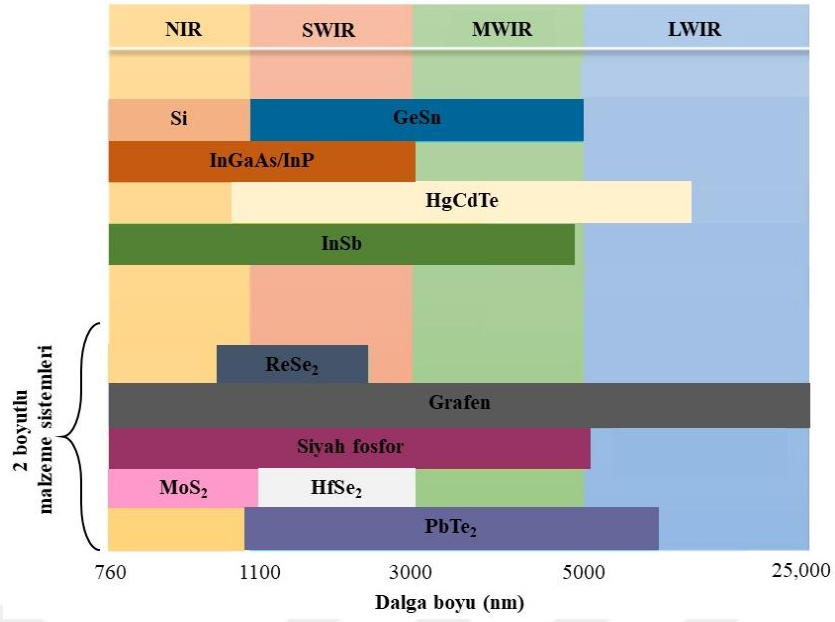
$$NEP = \frac{\text{gürültü}}{\text{foto-cevap}} = \frac{S_n}{R} \quad [3.6]$$

NEP' in tam tersi olarak verilen dedektivite ise Eşitlik 3.7 ile verilir.

$$D = \frac{1}{NEP} \quad [3.7]$$

Yüksek performanslı bir dedektör için NEP'in küçük ve D'nin büyük olması gerektiği açıktır. Bununla birlikte, hem NEP hem de D , test koşulları ve dedektör alanı ile ilgili olarak alınan güç, sinyal ve gürültü ile ilişkilidir. Bu nedenle, aynı tip fakat farklı dedektör alanlarına sahip iki dedektörün karşılaştırılmasına imkan sağlayan, dedektör alanı (A_d)'nin ve frekans bant genişliği (Δf)'nin karekökü ile orantılı olan spesifik dedektivite (D^*) kavramı Eşitlik 3.8 ile verilmiştir.

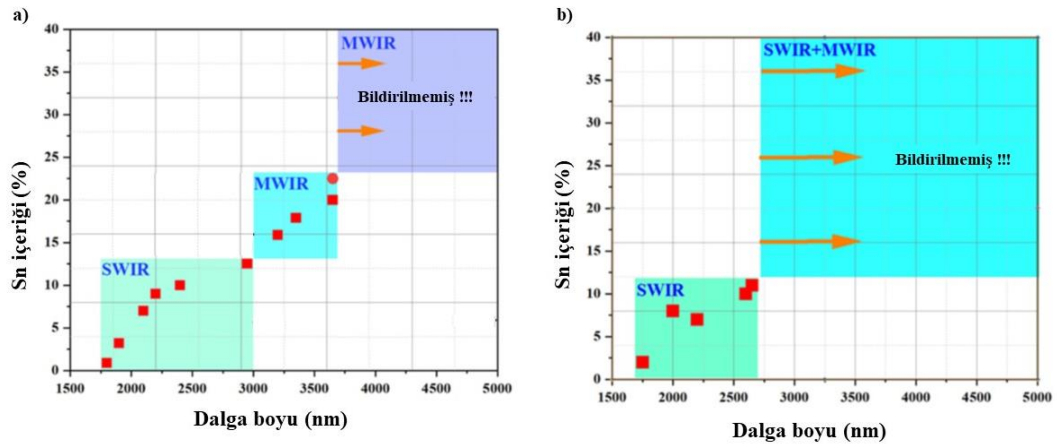
$$D^* = \sqrt{A_d \Delta f} = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{NEP} \quad [3.8]$$



Şekil 4. 2 Kızılötesi bölgede çalışan fotodedektörler için kullanılan bazı malzeme sistemleri [46].

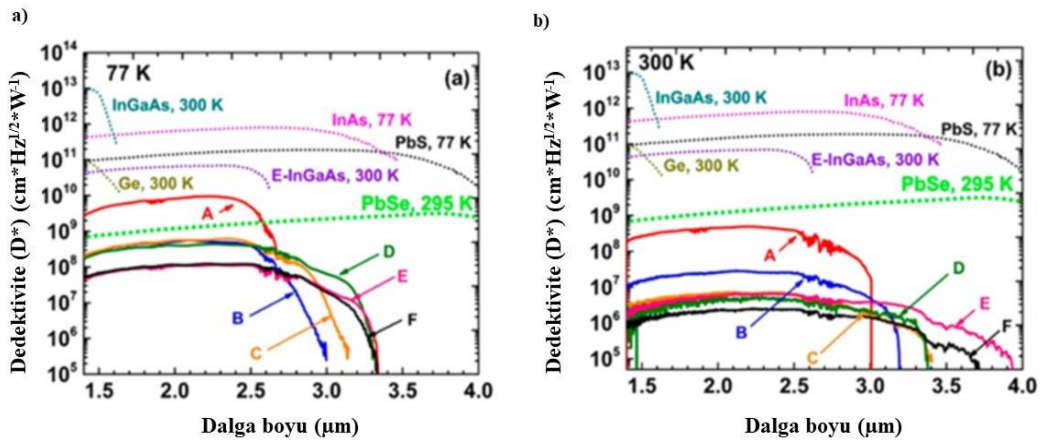
4.1 Ge_{1-x}Sn_x Tabanlı SWIR Algılama

Germanyum kalay (Ge_{1-x}Sn_x) alaşımı, Si, Ge ve diğer IV-A grubu bileşiklerine kıyasla, ayarlanabilir bant aralığı ve üstün optoelektronik özellikleri nedeniyle Grup IV malzemesi olarak oldukça ilgi çekmektedir. Ge_{1-x}Sn_x alaşımının bant aralığı, yapının Sn (x) içeriği değiştirilerek ayarlanabilir. Bu, kızılötesi spektrumun SWIR ve MWIR aralığını kapsayabilecekleri anlamına gelir. Şekil 4.3' de Ge_{1-x}Sn_x tabanlı dedektör sistemleri için Sn içeriğinin dedektörün kesme dalga boyuna etkisi verilmiştir.

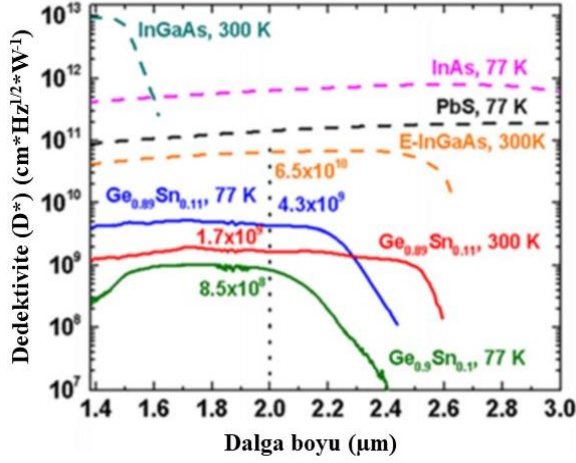


Şekil 4. 3 Sn (x) içeriğinin bir Ge_{1-x}Sn_x a) foto-iletken detektörün, ve b) PIN fotodetektörün kesme dalga boyuna etkisi [47].

Buna göre, bir $Ge_{1-x}Sn_x$ foto-iletken dedektör için, %0.9' den %12.5' e kadar artan Sn (x) içeriği ile dedektörün kesme dalga boyunun 1800 nm' den 2950 nm' ye; %15.9' dan %22.3' artan Sn (x) içeriği ile dedektörün kesme dalga boyunun 3200 nm' den 3650 nm' ye kadar uzadığı bulunmuştur. $Ge_{1-x}Sn_x$ tabanlı foto-iletken dedektör yapıları için, değişen Sn (x) içeriğine göre, belirlenen kesme dalga boyu aralıkları elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesindeki SWIR ve MWIR bölgelerini karşılamaktadır. Bunun yanında, $Ge_{1-x}Sn_x$ tabanlı bir PIN fotodedektör yapısı için ise %2' den %11' e kadar artan Sn (x) içeriği ile PIN fotodedektörün kesme dalga boyu 1750 nm' den 2650 nm' ye uzamıştır. Yani %13' e kadar Sn (x) içeriğine sahip $Ge_{1-x}Sn_x$ tabanlı dedektörler SWIR uygulamaları için umut vericidir. Ancak büyütme teknolojilerinin sınırlamaları nedeniyle 2650 ila 5000 nm dalga boylarındaki PIN dedektörler henüz rapor edilmemiştir. Ayrıca, Şekil 4.4' de $Ge_{1-x}Sn_x$ tabanlı foto-iletken dedektörlerin ve Şekil 4.5' de $Ge_{1-x}Sn_x$ tabanlı bir PIN fotodektörün, Sn içeriğine bağlı olarak değişen dalga boyuna karşı spesifik dedektivite (D^*) grafikleri verilmiştir. $Ge_{1-x}Sn_x$ tabanlı fotodedektörler için elde edilen bu spesifik dedektivite değerleri, her ne kadar genişletilmiş $In_xGa_{1-x}As$ dedektör sistemiyle karşılaştırılabilir olsa da $Ge_{1-x}Sn_x$ dedektörlerinin performansı mevcut büyütme teknolojileri ve, Sn' nin Ge içindeki düşük katı çözünürlüğüne (<%1) bağlı olarak, yapıdaki Sn dağılımının düzenli/eş oranlı (uniform) olmaması gibi etkiler nedeni ile sınırlıdır. Bu da dedektörde düşük bir tepkiselliğe (R) neden olur [47].



Şekil 4. 4 (a) 77 K ve (b) 300 K sıcaklıklarda $Ge_{1-x}Sn_x$ foto-iletken dedektörler için spesifik dedektivite (A-F numuneleri için Sn (x) içerikleri sırasıyla %12,5, %15,9, %15,7, %17,9, %20,0 ve %22,3' dür).

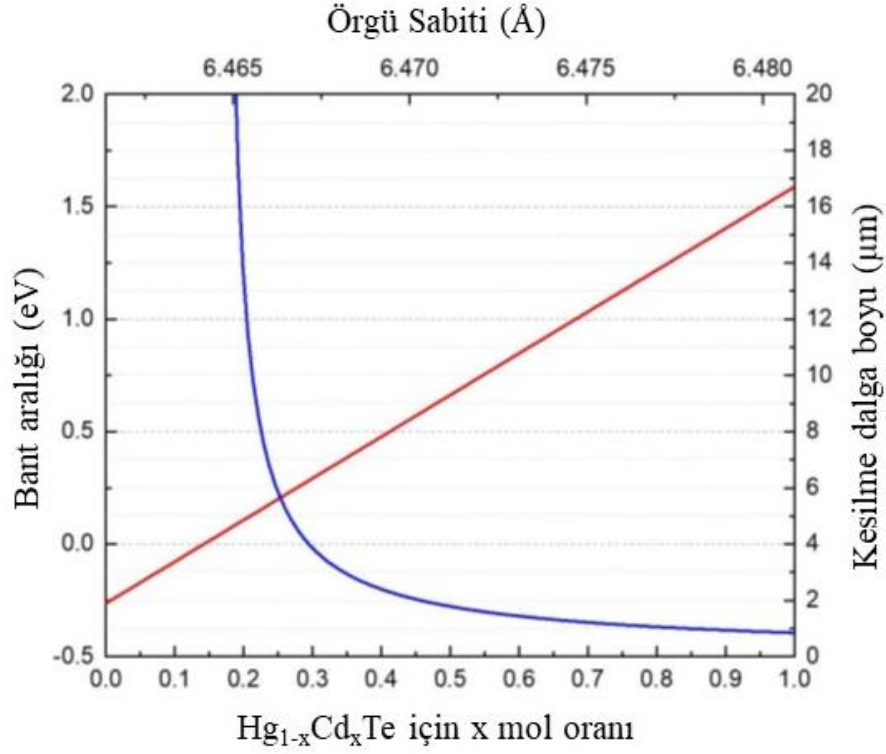


Şekil 4. 5 77 ve 300 K sıcaklıklarda bir $\text{Ge}_{0.89}\text{Sn}_{0.11}$ PIN fotodedektörü için spesifik dedektivite.

Sonuç olarak, $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ tabanlı fotodedektörlerin performans olarak düşük maliyetli SWIR görüntüleme uygulamalarına yaklaştığı gözlemlenebilir, bu da GeSn malzemelerinin yeni nesil gece görüş ve IR görüntüleme sistemlerinde kullanım için büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Ancak, yüksek kaliteli GeSn yapılarının üretilmesi aşılması gereken bir problemdir. Sn' nin Ge içindeki düşük katkı çözünürlüğü (<%1), büyük örgü uyumsuzluğu, uyumsuz termal genleşme katsayısı ve rastgele Sn ayrışması gibi nedenler kristal yapıda çok sayıda iplik dislokasyonuna (TD) ve dolayısıyla düşük kristal kalitesine neden olur. Şu anda $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$ malzemeleri ile hazırlanan cihazlar henüz araştırma geliştirme (Ar-Ge) aşamasında olduğundan, üretimde yaygın olarak kullanılmamaktadır [47], [48].

4.2 $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$ (MCT) Tabanlı SWIR Algılama

Bir II-VI grubu üyesi olan $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ üçlü alaşımı, Hg ve Cd için x mol oranının ayarlanabilir olması sayesinde, kızılötesi spektrumdaki tüm bantlarda algılama için kullanılabilen bir malzeme sistemidir. $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ üçlü alaşımının bant aralığı Hg ve Cd miktarı değiştirilerek, SWIR bandının başlangıcı olan $1\mu\text{m}'$ den $30\mu\text{m}'$ ye kadar ayarlanabilir. Direkt bant aralıklı olan $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ için, x' in değişimi yapının örgü sabitinde büyük değişikliklere neden olmaz. Şekil 4.6' da $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ için değişen x miktarına göre yapının örgü sabitinin ve bant aralığı değişimi verilmiştir [49].



Şekil 4. 6 77 K' de değişen x miktarına göre Hg_{1-x}Cd_xTe yapısı için karşılık gelen örgü sabiti, bant aralığı ve kesme dalga boyu.

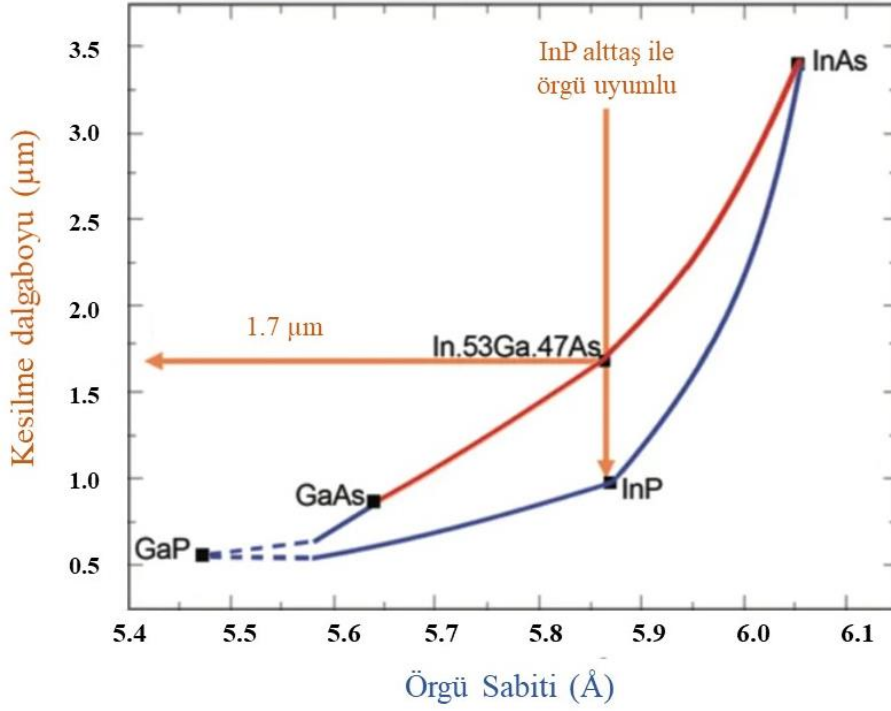
Bu malzeme sisteminin SWIR bandında oldukça başarılı uygulamaları olmasına rağmen beraberinde getirdiği ciddi dezavantajlar da mevcuttur. Yüksek performanslı HgCdTe fotodetektörleri, örgü uyumlu CdZnTe alttaş üzerine büyütülür. Ancak, yüksek kaliteli CdZnTe alttaşların üretim zorluğu, yüksek üretim maliyeti nispeten küçük boyutu, bu malzeme sistemini özellikle ticari uygulamaları için pahalı hale getirir ve bu durum, sistemlerin üretim maliyetini ticari uygulamalar için uygun seviyelere düşürmek adına önemli bir sınırlamadır. Bunun yanı sıra CdZnTe alttaşlar ile silikon entegre okuma devresi arasındaki termal genleşme katsayısı farkı ciddi bir diğer dezavantajdır [11]. Ayrıca HgCdTe malzemesi için yüzeyde ve ara yüzeyde kararsızlıklara neden olan zayıf Hg-Te bağları da bu sistem için hala önemli bir sorundur. Tüm bunlara ek olarak, bu sistemleri hantal ve pahalı hale getiren kriyojenik soğutma gereklidir [26]. Tüm bunlar SWIR bandında HgCdTe yerine kullanılabilecek başka malzeme sistemlerinin arayışları için motivasyon oluşturur. Bu kapsamda, III-V grubu ve tip-II süper örgü dedektör teknolojisi, HgCdTe' e olası bir alternatif olarak güçlü bir şekilde geliştirilmektedir.

Tip-II süper örgü tabanlı dedektör sistemleri teorik olarak öngörülen birçok avantaja, yoğun bant mühendisliği çabalarına, epitaksiyel büyüme ve fabrikasyon tekniklerinin geliştirilmesine rağmen bu dedektörlerin üstün performans vaadi henüz gerçekleşmemiştir [53]. Ancak, çoklu spektral kızılötesi görüntülemeler için son teknoloji malzeme sistemlerinin yerini almak adına potansiyel bir aday olarak güncelliğini korumaktadır [54].

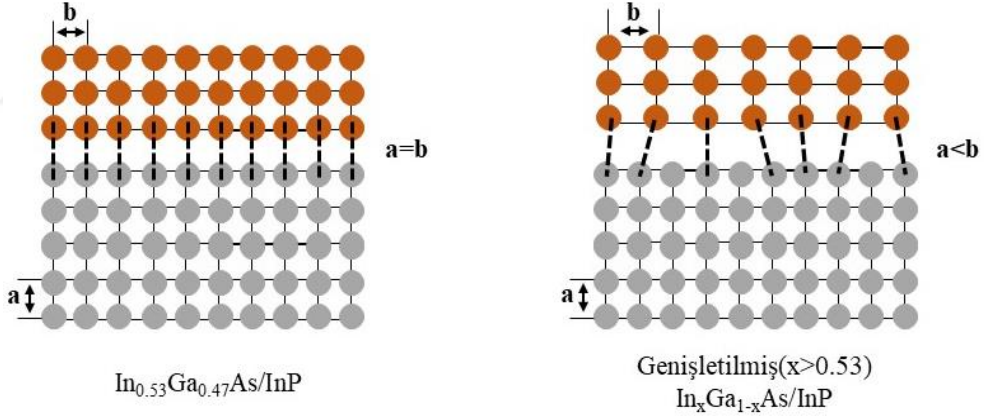
4.4 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /InP Tabanlı SWIR Algılama

Yüksek performanslı SWIR fotodedektörlerinin geliştirilmesi için en uygun yarı iletken malzemelerden biri, bir III-V grubu malzemesi olan $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ üçlü alaşımıdır. Klasik SWIR spektral aralığı için InP alttaş ile örgü uyumlu $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapılı fotodedektörlerin kesme dalga boyu $1.7 \mu\text{m}$ 'ye uzanır. SWIR bandının sunduğu tüm avantajlardan yararlanmak için bu değerin $\sim 2.6 \mu\text{m}$ 'lik bir kesme dalga boyuna genişletilmesi $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapısındaki (x) In alaşım oranının artırılması ile mümkündür. Artan In içeriği ile dedektörün kesilme dalga boyunu daha uzun dalga boyuna genişletilirken, genişletilmiş $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapısının örgü sabitinin artmasına yol açacaktır. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ üçlü alaşımının yapısı InAs ve GaAs alaşımalarında oluşur. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ için $x=0$ olduğu durumda yani GaAs için örgü sabiti değeri 6.058 \AA iken $x=1$ durumunda yani InAs için örgü sabiti değeri 5.653 \AA dur ve x değerinin değişimine bağlı olarak $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapısı için örgü sabiti değişecektir. Örneğin, bir $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ fotodedektörün kesme dalga boyunu oda sıcaklığında $2.6 \mu\text{m}$ 'ye kadar kaydırmak için indiyum bileşiminin $x=0.83$ 'e yükseltilmesi gerekir. Bu durum InP alttaş ile $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}$ tabakası arasındaki örgü uyumsuzluğunu $+2.1\%$ kadar artırır [55]. Burada, GaAs alttaş InP alttaşa göre bir rakip olarak görülebilir ancak sağlamlık ve geniş yüzey avantajları nedeniyle InP alttaş ön plana çıkar. Ayrıca, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ yapısı için $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapısına göre %4 daha fazla örgü uyumsuzluğu ortaya çıkmaktadır., $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}/\text{InP}$ yapısı için %2.1 olan örgü uyumsuzluğu değeri $\text{In}_{0.83}\text{Ga}_{0.17}\text{As}/\text{GaAs}$ yapısı için %5.9 değerlerine ulaşır [56].

Şekil 4.8' de değişen In içeriğine göre $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapısının örgü sabitinin ve kesilme dalga boyunun değişimi verilirken Şekil 4.9' da örgü uyumlu $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapısı ve örgü uyumsuz genişletilmiş $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapısı için bu etkinin epitaksiyel tabakalardaki etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4. 8 Değişen In içeriğine (x) göre $In_xGa_{1-x}As$ üçlü alaşımının örgü parametresi ve kesilme dalga boyunun değişim.



Şekil 4. 9 Örgü uyumlu ($x=0.53$) $In_xGa_{1-x}As / InP$ ve örgü uyumsuz ($x>0.53$) genişletilmiş $In_xGa_{1-x}As / InP$ yapıları için epitaksiyel tabakaların örgü yapılarındaki değişim.

Altaş ile büyütülecek olan yapının örgü sabitleri arasındaki fark nedeniyle ortaya çıkan bir gerilme mekanizması yarıiletken malzemenin fiziksel ve elektronik özellikleri üzerinde ciddi bir etki yaratır. Üzerine büyütme yapılacak olan altaşın örgü sabiti ile büyütülecek epitaksiyel tabakanın örgü sabiti arasındaki uyumsuzluk arttıkça, büyütülen epitaksiyel tabaka ilk birkaç katmanda altaşın örgü sabiti ile büyümeye zorlanacaktır. Ancak bu sırada gerilme ciddi oranda artacağından epitaksiyel tabaka

gevşemeden sonra kendi doğal örgü sabiti ile büyümeye devam edecektir. Epitaksiyel tabakanın gevşediği kalınlığa kritik kalınlık denir. Kritik kalınlık malzemeye ve büyütme koşullarına göre değişiklik gösterebilir. Bu tür bir gevşeme mekanizması kristal yapıda diskolasyon oluşumuna ve yüzey pürüzlülüğüne neden olur. Bu durum cihaz performansını olumsuz etkilediği için istenilen bir durum değildir [57].

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ için $x=0.53$ olduğunda yapı InP alttaş ile örgü uyumlu olarak büyür. Ancak In içeriğinin artmasının ($x>0.53$) örgü sabitine olan etkisi kristal yapıda yüksek bir dış açma dislokasyonuna (screw type dislocation) yol açar ve cihaz performansı bu kusurlardan dolayı olumsuz olarak etkilenir. Zengin In içeriğine sahip $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ için doğal örgü uyumlu bir alttaş yoktur [58], [59]. Kristal kalitesinin bozulması ve cihaz performansının düşmesine neden olan bu etkiyi önlemek için yüksek In içerikli $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ epitabakaları büyütülürken yapının iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda kristal kaliteyi iyileştirilmek adına büyüme koşullarının optimizasyonu ve çeşitli tampon tabakalar kullanılarak bu handikabın getirmiş olduğu olumsuz etkilerin minimize edildiği çalışmalar yapılmıştır [60]–[64].

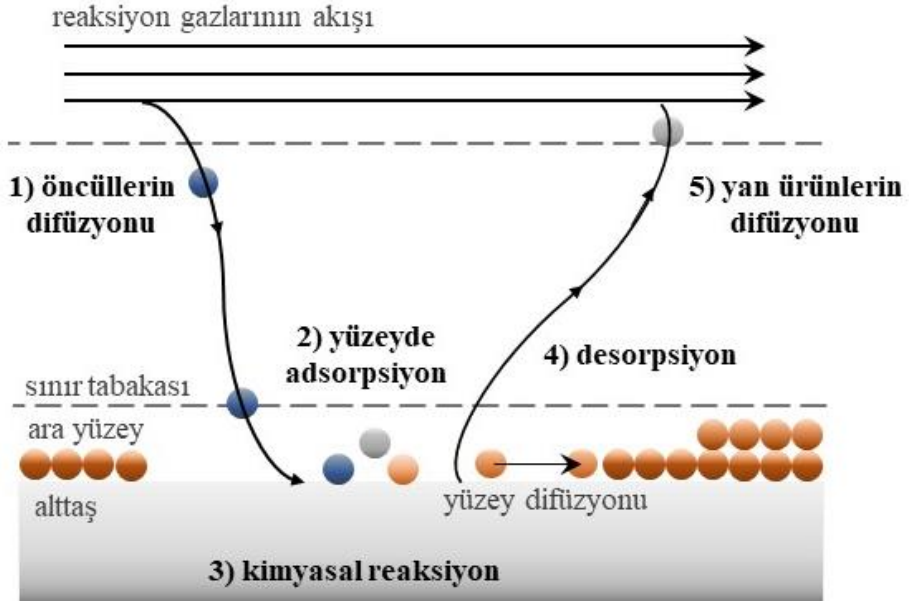
Tez çalışması kapsamında InP alttaş üzerine tek katman olarak büyütülen zengin In içerikli $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapılarının kristal kalitesi farklı optimizasyon şartları (katkılama etkisi, büyütme sıcaklığı ve gaz akışı çalışmaları) altında incelenerek zengin In içerikli $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ tabakasının kalitesine etkisi araştırılmıştır.

5. METOD

Bu bölümde ilk olarak tez kapsamında InP alttaş üzerine epitasiyel olarak büyütülen zengin In içerikli $In_xGa_{1-x}As$ epitabakalarının üretim tekniğinden detaylı olarak bahsedilecektir. Daha sonra bu epitabakaların yapısal ve optik karakterizasyonu için kullanılan sistemler ve bu sistemlerin çalışma prensipleri detaylandırılacaktır.

5.1 Metal-Organik Buhar Fazı Epitaksi (MOVPE) Yöntemi

MOVPE tekniği bir ince film üretme yöntemi olan Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapor Deposition- CVD) yöntemidir. Temelde CVD tekniği buhar fazındaki iki veya daha fazla malzemenin taşıyıcı gazlar yardımıyla reaksiyon bölmesine gönderilmesi ve burada gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucu alttaş üzerinde yeni bir malzeme türünün oluşması şeklinde gerçekleşir. Şekil 5.1' de tipik bir kimyasal buhar biriktirme sürecinin adımları verilmiştir.

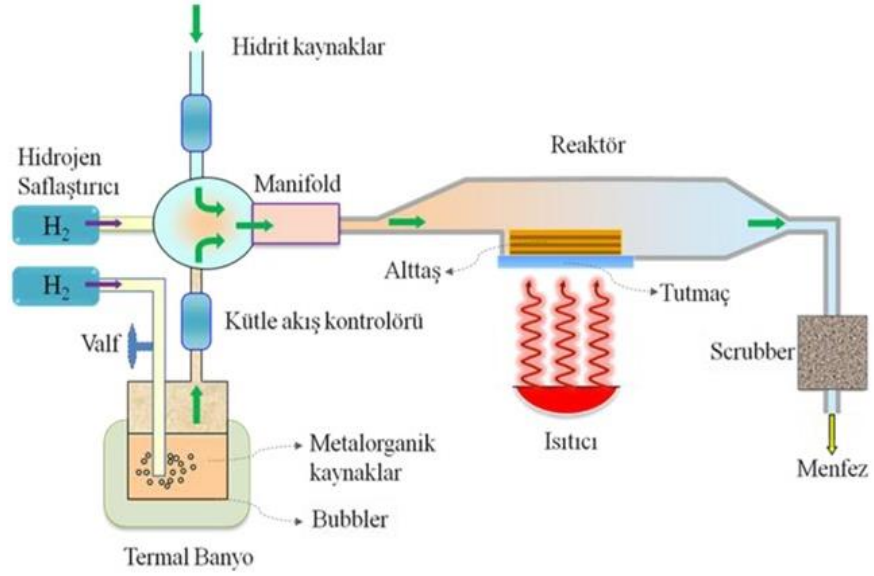


Şekil 5. 1 Tipik bir Kimyasal Buhar Biriktirme sürecinin adımları.

Şekil 5.1' de gösterilen adımlar şu şekilde verilmektedir;

- 1) taşıyıcı gazlar yardımıyla alttaş üzerine taşınan gaz formundaki öncüllerin reaksiyon ortamına difüzyonu,
- 2) alttaş yüzeyindeki moleküllerin/atomların temas ettikleri yüzeydeki çekme kuvvetlerine bağlı olarak yüzeye birleşmesini tanımlayan adsorpsiyonu,
- 3) moleküllerin/atomların kristalizasyon bölgelerine geçişi reaktifler arasındaki kimyasal reaksiyonu,
- 4) kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan yan ürünlerin sınır tabakasından desorpsiyonu
- 5) yan ürünlerin tahliyesi.

Metal-Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) olarak da bilinen MOVPE tekniği en yaygın kullanılan CVD tekniklerinden biridir. Epitaksiyel filmler katı, sıvı veya gaz fazlarından büyütülebilir. Genel olarak, gaz akışı miktarını kontrol ederek gaz fazı epitaksisinde büyüme hızını kesin olarak kontrol etmek daha kolaydır. Bu teknikle gaz fazındaki metalorganik öncüller ve hidrit kaynakları katı fazdaki alttaş üzerine epitaksiyel olarak büyütülür. 1960 yılında ilk kez metalorganik ve hidrit kaynaklar kullanılarak Didchenko ve ekibi tarafından bir III-V yarıiletken bileşik olan InP bileşiği üretilmiştir. Daha sonra 1969 yılında Manasevit'in öncülüğünde yapılan çalışmalarla birçok metal organik kaynaktan çeşitli yarıiletken bileşikler elde etmiş ve H. M. Manasevit bu tekniğe MOCVD adını vermiştir [65], [66]. Tipik bir MOVPE sisteminin çalışma prensibi şematik olarak Şekil 5.2' de gösterilmektedir.



Şekil 5. 2 Tipik bir MOVPE sisteminin çalışma şeması.

MOVPE sisteminde tipik bir III-V grubu bileşenlerinin büyütme süreci III grubu metalorganik ve V grubu hidrit öncüllerinin büyütmenin gerçekleşeceği reaktöre yüksek saflıktaki hidrojen ya da azot gibi taşıyıcı gazlar yardımıyla taşınmasıyla başlar. Reaktöre taşınan bu öncüller reaksiyon çemberinin dışında karıştırılarak reaktörün içinde RF (radyo frekansı) ısıtıcı ile ısıtılan karbon bir tutucu (susceptor) üzerinde hazır bulunan alttaş yönlendirilir. Isınan alttaş, öncüllerin ayrışmasında katalitik bir etkiye sahiptir ve bu etkiyle buhar fazdaki öncüllerin ve katı alttaş yüzeyindeki ilgili türlerin kimyasal reaksiyonları sonucu epitaksiyel katmanların üretimi gerçekleşir. III-V grubu büyütme için genel reaksiyon Denklem [5.1]'de verilmektedir.



Burada R; metil (CH₃) ya da etil (C₂H₅) gibi alkil grubunu, M; Galyum (Ga) Alüminyum (Al) ya da İndiyum (In) gibi III grubu metallerini, N; nitrat büyütme için azotu diğer III-V grubu bileşikleri için ise fosfor (P), arsenik (As) ve antimonu (Sb), H ise hidrojeni temsil etmektedir.

TMIn, TMGa, TMAI MOVPE büyütme sisteminde en çok kullanılan III grubu kaynaklardır. Bu metal organik kaynakların buhar basıncı, piroliz sıcaklığı, toksikliği

ve fazı (katı veya sıvı) epitaksiyel büyütme için oldukça önemlidir. Metil tabanlı malzemeler yüksek buhar basıncı, saflığı ve hidritlerle azaltılmış ön reaksiyon gibi özelliklerinden dolayı diğer metal organik kaynaklara göre (ethyl, butyl, propyl) daha avantajlıdır. Yüksek buhar basıncı büyütme oranını artırır bu da MOVPE sistemini daha verimli ve ekonomik yapar [67].

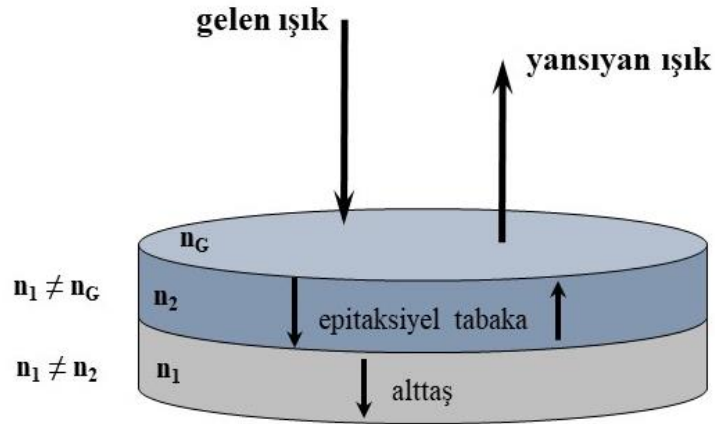
Bu tez çalışması kapsamında InP altaş üzerine büyütülen yüksek In içerikli $In_xGa_{1-x}As$ yapıları Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde kurulu bulunan AIXTRON 200/4 RF-S model MOVPE sistemi ile büyütülmüştür. Bu sistem ülkemizde Ar-Ge amaçlı kullanılan sayılı büyütme sistemlerinden biri olup Şekil 5.3' de sistemin resmi verilmiştir.



Şekil 5. 3 Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde kurulu olan AIXTRON 200/4 RF-S model MOVPE büyütme sistemi.

5.1.1 Yerinde (in-situ) Karakterizasyon Tekniği

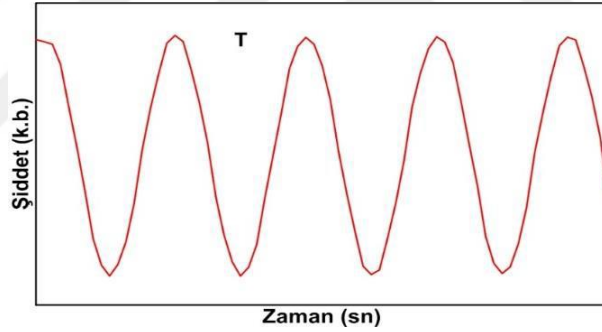
Hemen hemen tüm epitaksiyel büyütme süreçlerinde büyütülen tabakaların karakterizasyonu büyük önem taşır. Büyütülen tabakaların istenilen özelliklere sahip olup olmadığını belirlemek için temelde iki farklı karakterizasyon tekniği kullanılır. Bunlardan ilki büyütme esnasında yapılan yerinde (in-situ) karakterizasyonlar, diğeri ise büyütme süreci tamamlandıktan sonra gerçekleştirilen harici (ex-situ) karakterizasyondur. Büyütme esnasında büyüyen tabakalar hakkında doğrudan bilgi edinebilme yeteneği, büyütme sürecinde birçok bilinmeyen etkinin kaynağını yerinde ve anında tespitini sağlar. Bu yüzden yerinde (in-situ) karakterizasyonlar henüz büyütme tamamlanmadan çözüm üretmek açısından oldukça faydalı ve pratiktir. Büyüyen epitaksiyel tabakalar hakkında doğrudan bilgi alabilmek için kullanılan en yaygın yöntem; bir ışık kaynağından örnek yüzeyine gönderilen ışığın geri yansıyor dedektör tarafından algılanmasına dayanan yöntemdir. Bu yöntem büyütme süreci boyunca büyütme oranı, tabaka kalınlığı, ikili bileşenlerin kompozisyonu ve yüzey pürüzlülüğü gibi tabaka büyütme özelliklerinin karakteristiklerini verir. Bu tez kapsamında MOVPE büyütme sistemi kullanılarak büyütülen tüm numunelerin büyütme sırasındaki kontrolleri yerinde yansıma ölçümü kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. 4 Yerinde yansıma ölçümünde alttaş, epitaksiyel tabaka ve ortamın kırılma indisi farkından dolayı gelen ve yansıyan ışığın şematik gösterimi.

Yerinde yansıma ölçümü esnasında alttaş üzerine büyütülen epitaksiyel tabakaların kırılma indisi farkından yararlanır. Numune yüzeyine gönderilen dalga boyu bilinen monokromatik ışık (lazer) demetinin bir kısmı alttaşa doğru ilerlerken bir

kısmı ortamın (n_G), büyüyen epitaksiyel katmanın (n_2) ve alttaşın (n_1) kırılma indisi farkından dolayı her bir arayüzeyde geri yansır. Şekil 5.4' de kırılma indisleri farkından dolayı gelen ışık ve yansıyan ışık şiddetlerinin değişimi şematik olarak gösterilmiştir. Numune yüzeyinden ya da ara yüzeylerden yansıyan bu ışık demetleri, optik yol farkına bağlı olarak bir faz farkı yüzünden, birbirleriyle yapıcı ve yıkıcı girişimler oluşturarak bir girişim deseni oluştururlar. Büyüme boyunca devam eden bu süreçte yansıyan ışınların zamana karşı değişen girişim şiddetini tanımlayan Fabry-Perot salınımı olarak adlandırılan osilasyonlar meydana gelir. Şekil 5.5' de yerinde yansıma ölçümünde yüzeyden ve ara yüzeylerden yansıyan ışıkların oluşturduğu girişim deseninin zamana göre şiddet grafiği verilmiştir. Bu bilgi büyütülen epitaksiyel tabakalar için parmak izi niteliğindedir. Büyütülen epitaksiyel tabakaların ve kullanılan alttaşın kırılma indisleri biliniyorsa bu girişim deseninden yararlanarak epitaksiyel büyütme için çok önemli olan epitaksiyel tabakaya ait büyüme oranı (hızı) ve bu tabakalara ait film kalınlığı sırasıyla Eşitlik 5.2 ve Eşitlik 5.3 yardımıyla hesaplanabilir.



Şekil 5. 5 Yerinde yansıma ölçümünde yüzeyden ve arayüzlerden yansıyan ışıkların oluşturduğu girişim deseninin zamana göre şiddet grafiği. Burada T tam bir osilasyon oluşması için geçen zamanı belirtmektedir.

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2n} \quad [5.2]$$

$$r = \frac{\Delta d}{T} \quad [5.3]$$

Burada;

Δd : T osilasyon zamanı boyunca büyütülen epitaksiyel filmin kalınlığını,

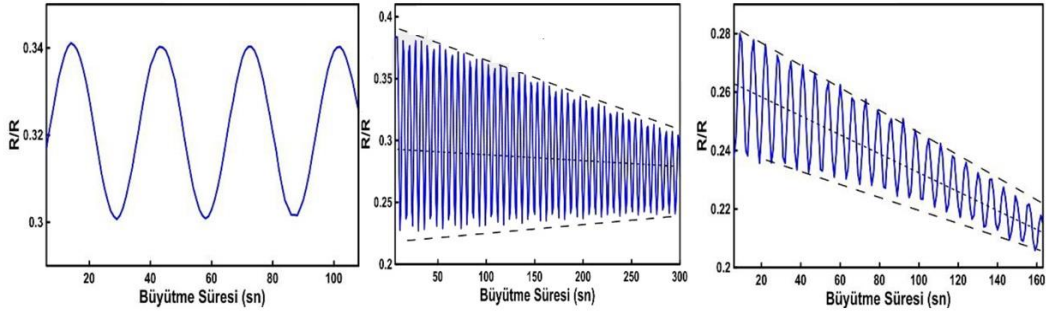
λ : Kullanılan monokromatik ışık kaynağının dalga boyunu,

n : Büyütülen epitaksiyel tabakanın kırılma indisini,

T : Osilasyon için geçen süreyi,

r : büyütme oranını,

tanımlar. Ayrıca, yansıma eğrisindeki bu osilasyonların şekli büyütülen yapıların yüzey pürüzlülüğü ve optiksel dalgalanmaları hakkında da önemli bilgiler sunar. Malzemenin yüzey pürüzlülüğü temelde nano ölçeklerde kalınlık dalgalanmalarıdır. Optiksel dalgalanmalar ise tabaka kalınlığındaki ya da kırılma indisindeki bölgesel dalgalanmaların sonucunda oluşan mikron ölçeğindeki dalgalanmalardır. Bunların yanı sıra malzemedeki gerilme (strain) etkisi ve lokal kompozisyon değişikliğinden kaynaklanan mikron ölçeğinde dalgalanmalar da oluşabilir. Yansıma eğrileri büyütme sırasında takip edilerek, gerekli anlarda gerçekleştirilen iyileştirmeler sayesinde, malzeme kalitesinin bozulması engellenir. Şekil 5.6' da bu durumu açıklayan üç ayrı büyütme için yansıma eğrileri verilmiştir [67].



Şekil 5. 6 Yansıma eğrileri (a) ideal büyütme, (b) artan optiksel dalgalanma, (c) artan yüzey pürüzlülüğü.

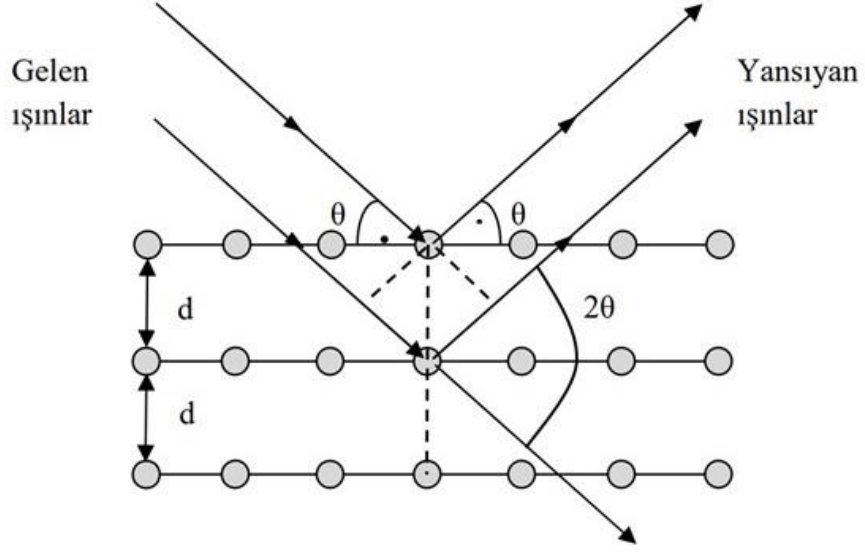
5.2 X-Işını Kırınım (X-Ray Diffraction - XRD) Tekniği

X-ışını kırınım (XRD) tekniği epitaksiyel katmanların kristal yapısını, numunede herhangi bir tahribat yapmadan karakterize etmek için kullanılan bir yapısal karakterizasyon tekniğidir. Yarıiletken ince filmlerin XRD ölçümü, kristal yapı hakkında birçok bilgi sağlar. Büyütülen epitaksiyel tabakaların kimyasal bileşim oranları, kalınlıkları, tabaka yönelimleri, dislokasyon yoğunlukları, ara yüzey pürüzlülükleri ve heteroepitaksiyel olarak büyütülen yapılardaki gerilme ve gevşeme etkileri XRD tekniği ile belirlenebilir.

Bu teknik çeşitli kristal düzlemlerinden saçılan x-ışınlarını dedekte etme prensibine dayanır. X-ışınları demeti bir kristalin üzerine düştüğünde, elektronların salınımlarına neden olur ve böylece gelen ışınla aynı frekansta x-ışınları yayılır. Bu emisyon her yönde meydana gelir ve gelen ışının saçılması olarak adlandırılır. Tek tek atomlardan bu şekilde saçılan radyasyon, kristalin örgü yapısına bağlı olarak belirli seçilmiş yönlerde sistematik yapıcı veya yıkıcı girişime maruz kalır ve böylece bir kırınım deseni elde edilir. Eğer ardışık iki kristal düzleminden yansıyan x-ışınlarının aldıkları yollar arasındaki uzaklık, kullanılan x-ışınının dalga boyunun tam katlarına eşit ise maksimum kırınım (yapıcı), yarım katlarına eşit ise minimum kırınım (yıkıcı) oluşur. Bu durum Eşitlik 5.4 ile verilen ve Şekil 5.7' de şematik olarak gösterilen Bragg şartı ile açıklanmaktadır. Bragg şartı;

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad [5.4]$$

olarak verilir. Burada, λ ölçüm için kullanılan x-ışınının dalga boyunu, d_{hkl} örgü düzlemleri arasındaki uzaklığı ; hkl alt indisi ise tam sayılarla tanımlanan kristalografik Miller indisleri, n yansıma mertebesini ve θ Bragg açısını temsil eder. Bragg yasası için kırınım şartı yalnızca d düzlemler arası mesafe $\lambda \leq 2d$ olduğunda sağlanır.



Şekil 5. 7 Bragg yasasının şematik gösterimi . d kristal düzlemler arasındaki mesafeyi, θ gelen x-ışını ile yüzey arasındaki açığı, 2θ ise gelen ve yansıyan x-ışınları arasındaki açığı temsil eder.

Bragg yasası, kırınıma uğrayan x-ışınlarının açısal konumunu kristalin örgü düzlemleri arasındaki mesafeler ile ilişkilendirir ve tüm XRD ölçümlerinin temelini oluşturur. Kübik kristal sistemleri için örgü düzlemleri arasındaki uzaklık Eşitlik 5.5 ile verilmiştir.

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad [5.5]$$

burada a , kristal yapının örgü sabitidir.

Tez kapsamında MOVPE sistemi ile büyütülen epitaksiyel tabakaların yapısal karakterizasyonu Şekil 5.8' de görüntüsü verilen Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde kurulu bulunan Rigaku SmartLab HR-XRD sistemi ile gerçekleştirilmiştir. X-ışını kaynağı olarak döner anotlu bakır (Cu) hedef kullanılan sistemde üretilen x-ışınının dalga boyu $K_{\alpha 1}=0,154059$ nm ve gücü 9kW' dır (maks. Voltaj 45kV, maks. akım 200mA).

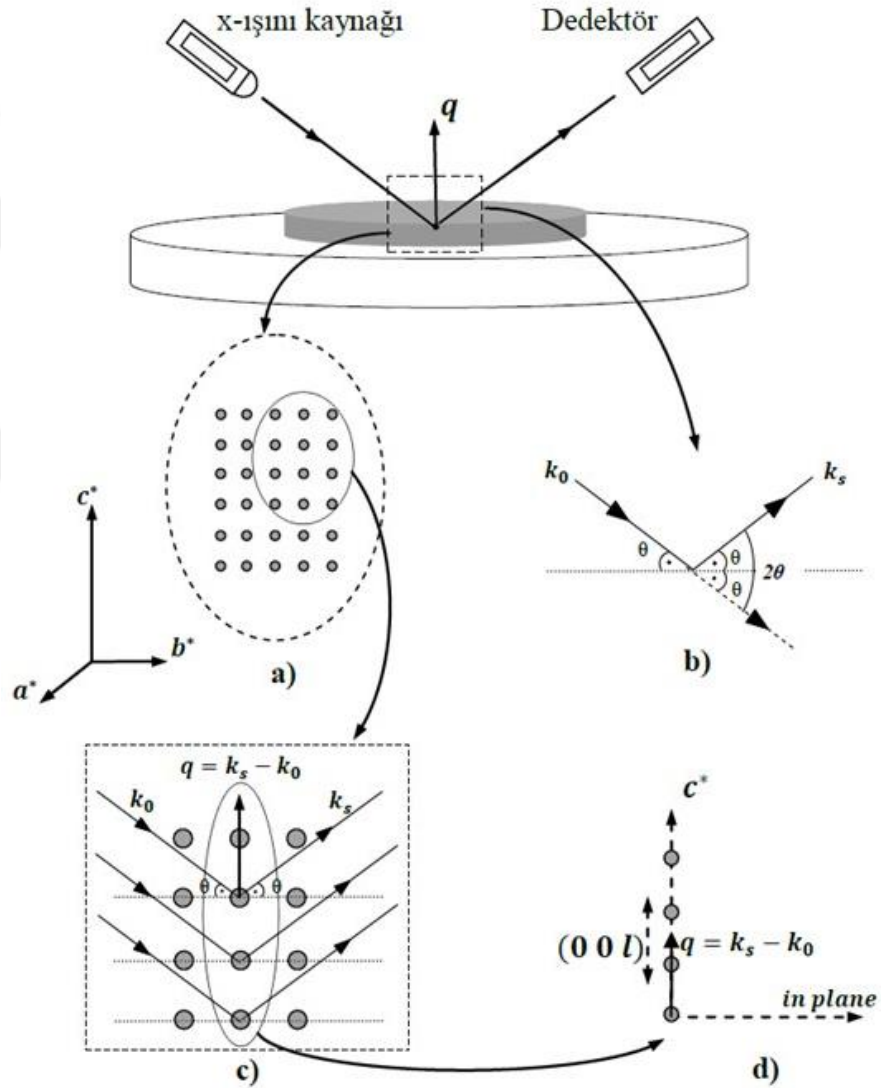


Şekil 5. 8 Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde kurulu bulunan Rigaku SmartLab HR-XRD sistemi.

Tez kapsamında büyütülen numunelerin kristal kalitesini araştırmak, örgü sabitlerini belirlemek ve alaşım oranlarını bulmak için $2\theta/\theta$ ve ω taramaları kullanıldığından aşağıda bu taramaların detayları sunulmuştur.

5.2.1 Theta/2Theta ($2\theta/\theta$) Taraması

X-ışını tarama türleri dedektör ve kaynağın geometrisine göre sınıflandırılır. Bu sınıflandırma için büyütme eksenini ile ilişkili olan momentum geçiş vektörünün (\mathbf{q}) yönü temel alınır. Eğer \mathbf{q} büyütme düzlemi doğrultusunda yani numune düzlemine dik ise out-plane taramalar, numune düzlemine paralel ise in-plane taramalar olarak adlandırılır. $2\theta/\theta$ taraması x-ışınlarının bir düzlemden yansımalarını ölçmek için kullanılır ve hem out-plane hem de in-plane olarak uygulanabilir.



Şekil 5. 9 out-plane $2\theta/\theta$ tarama geometrisi. b) gelen, yansıyan ve geçen x-ışınlarına ait dalga vektörleri, c-d) taramanın ters uzayda örgü noktalarından geçişi [68].

Şekil 5.9' da out-plane $2\theta/\theta$ tarama geometrisi verilmiştir. Buna göre, numune yüzeyine bir θ açısı yapacak şekilde gönderilen x-ışınının yine dedektör tarafından aynı θ açısıyla algılanır. Numune yüzeyine gönderilen X-ışınının uzantısı da numune ile θ açısı yapar yani X-ışınının uzantısı ile dedektör arasındaki açı $2\theta'$ dır. Bu yüzden bu ölçüm $2\theta/\theta$ taraması olarak adlandırılır. Ölçüm boyunca gelen ve yansıyan θ açıları eşit kalmak şartı ile belirli adım ve tarama hızıyla açı değerleri sürekli olarak değiştirilir ve momentum geçiş vektörü \mathbf{q} ilgili kristal düzlemlerine dik olarak hareket ettirilmiş olur. Böylece out-plane $2\theta/\theta$ taramalarında ters örgü noktası etrafında dikey doğrultu boyunca ölçüm yapılır ve ölçüm sonucundan yapı hakkında düşey örgü sabiti, düşey düzlemler arası pürüzlülük, gerilme tipleri vb. birçok bilgi elde edilebilir.

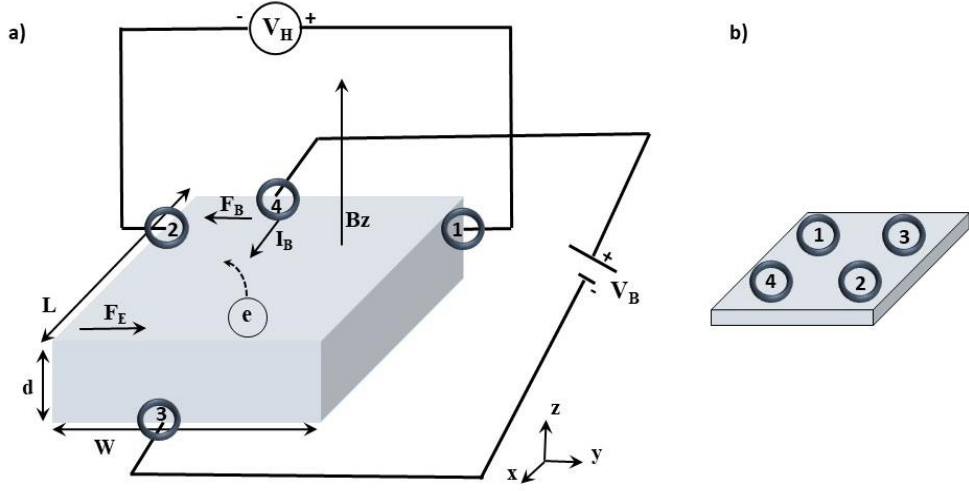
5.3 Hall Etkisi Ölçümü

Hall etkisi ölçümü, yarıiletken çalışmalarında, epitaksiyel olarak büyütülen tabakaya ait taşıyıcı yoğunluğu ve taşıyıcı mobilitesi gibi bilgilerin elde edilmesinde kullanılan en yaygın ve en etkin ölçüm tekniklerinden birisidir. Tez çalışması kapsamında, büyütülen Si-katkılı tek tabaka $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapılarının elektriksel ölçümleri, Şekil 5.10' da resmi verilen ve Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde kurulu bulunan HEMS model 2T manyetik alan şiddetine sahip elektromıknatıslı Hall ölçümü cihazıyla alınmıştır. Yapılan ölçümler dört nokta geometrili Van der Pauw tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiş olup omik kontaklar örneğin dört köşesinden indiyum ile alınmıştır (Şekil 5.11b).



Şekil 5. 10 Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde kurulu bulunan Hall ölçümü sistemi.

Fizikçiler on dokuzuncu yüzyılın sonuna kadar, elektrik akımı taşıyan metal bir telin manyetik alana yerleştirildiğinde bir kuvvete maruz kaldığını biliyorlardı ancak bu kuvvetin kaynağını bilmiyorlardı. 1879' da E.H. Hall, bu kuvvetin yalnızca teldeki hareketli yüklere (elektronlar) uygulandığını kanıtlamaya çalıştı. Bunu yaparken, sabit bir iletkenin manyetik alana dik olarak bir elektrik akımının geçtiği bir deney yaptı. Şekil 5.10a' da Hall etkisi deney geometrisi şematik olarak verilmiştir. Buna göre Eğer bir (B_z) manyetik alanı altında tutulan bir yarıiletken, bu manyetik alana dik o yönde bir (I_B) akımı geçirilirse, bu manyetik alan hareket halinde olan yüklü parçacıklara, hareket doğrultusuna ve manyetik alana dik yönde bir F_B kuvveti uygular ve bu F_B manyetik kuvveti yüklü taşıyıcıları iletkenin bir tarafına itme eğilimi gösterir. Böylece, iletkenin kenarındaki yük birikimi iletkenin iki kenarı arasındaki oluşan ölçülebilir voltaj (Hall voltajı- V_H) ile ve dolayısıyla manyetik alana dik yönde oluşacak bir elektrik alanla (dolayısıyla elektriksel kuvvet F_E) dengelenecektir [69].



Şekil 5. 11 a) Hall etkisi olayının ve b) numune üzerinde alınan kontak noktalarının şematik gösterimi [70].

Bu bilgiler ışığında numuneye ait çoğunluk taşıyıcı yoğunluğu (n) Eşitlik 5.6 ile bulunabilir.

$$n = \frac{I_B B_z}{ed V_H} \quad [5.6]$$

Burada V_H Hall Voltajını, I_B malzeme üzerinden geçen akımı, B_z uygulanan manyetik alanı, d numunenin kalınlığını ifade eder. Ayrıca mobilite (μ) terimi taşıyıcı yoğunluğu ve iletkenlik ile de ilişkili olduğu için Eşitlik 5.7 ile ifade edilebilir.

$$\mu = \frac{\sigma}{nq} = \frac{L}{RA} \quad [5.7]$$

Burada L numunenin uzunluğunu, A numunenin enine kesit alanını R ise ölçülen direnç değerini temsil etmektedir.

5.4 Fotolüminesans Ölçüm Sistemi

Fotolüminesans (Photoluminescence-PL) spektroskopisi, direkt bant aralıklı yarıiletken malzemelerin optiksel karakterizasyonu için kullanılan, numunede tahribat yaratmayan, güçlü bir optik karakterizasyon yöntemidir.

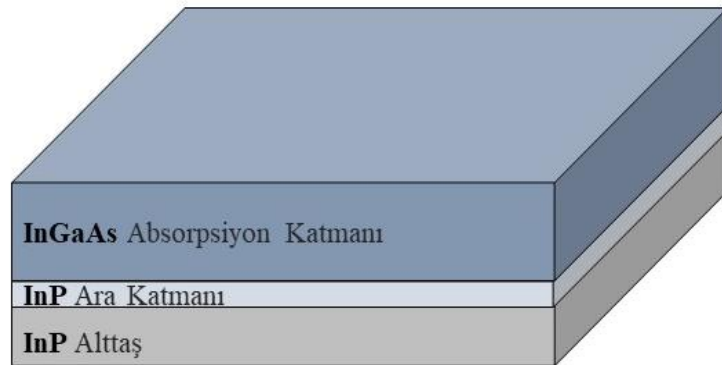
PL ölçümünde, yarıiletken malzeme sahip olduğu optik bant aralığı enerjisinden daha büyük enerjiye sahip bir ışık kaynağı (lazer ışığı) tarafından optik olarak uyarılır. Bu foto-uyarımın etkisiyle elektron-boşluk çifti oluşur ve elektronlar iletkenlik bandına geçer. İletkenlik bandındaki bu elektronlar, fonon saçılmaları ile bu bantta taban durumuna veya en yakın enerjisine ulaşır. Bu durumdaki elektronlar değerlik bandındaki boşluklar ile ışımali (radiative recombination) veya ışımalsız (non-radiative recombination) geçişler yaparak birleşirler. Işımalılı geçişlerde yayılan ışığın enerjisi, uyarılmış durum ile denge durumu arasındaki geçişte yer alan iki elektron durumu arasındaki enerji seviyelerindeki farkla ilgilidir. Yarıiletkenlerde en yaygın ışımali geçiş, bant aralığı olarak tanımlanan, iletim ve değerlik bantlarındaki durumlar arasındadır. Yarıiletkenlerdeki ışımali geçişler ayrıca lokalize kusurları veya safsızlık seviyelerini içerebilir, Bu nedenle PL spektrumunun analizi, belirli kusurların veya safsızlıkların tanımlanmasına olanak tanır. Bir foto-uyarım ve ardından foton-emisyon süreci içinde tanımlanan PL ölçümleri, yarıiletken malzemenin bant aralığını, saflığını, kristal kalitesini ve safsızlık kusur seviyelerini belirlemek için önemlidir. PL spektrumu absorpsiyon spektrumundan oldukça farklıdır, absorpsiyon spektrumu taban durumundan uyarılmış duruma geçişleri ölçerken, PL ölçümü, uyarılmış durumdan taban durumuna geçişleri ele alır [71].

Tez çalışması kapsamında, zengin In içerikli tek tabaka $In_xGa_{1-x}As$ yapılarının düşük sıcaklıkta alınan PL ölçümleri yapıların emisyon dalga boyu belirlemek için yapılmıştır. Bu ölçümler İstanbul Üniversitesi bünyesinde bulunan micro-PL sistemi tarafından alınmıştır. Ölçümler alınırken ışık kaynağı olarak 532 nm dalga boylu lazer, ve dedektör olarak termoelektrik soğutuculu Ge dedektör kullanılmıştır.

6. GENİŞLETİLMİŞ SWIR DEDEKTÖR UYGULAMASI İÇİN ZENGİN In İÇERİKLİ $In_xGa_{1-x}As/InP$ YAPILARININ BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

6.1 Tek Tabaka $In_xGa_{1-x}As$ Yapısının InP Alttaşı Üzerine MOVPE Sistemi ile Büyütülmesi

Tez çalışmasındaki tüm $In_xGa_{1-x}As$ yapıları, Aixtron 200/4 RF-S MOVPE sistemi ile (100) kristal yönelimli InP alttaşlar üzerinde büyütülmüştür. Büyütme ilk olarak InP alttaş üzerine InP epitaksiyel ara katmanının büyütülmesiyle başlamıştır. Epitaksiyel büyütmelemlerin neredeyse hepsinde alttaş üzerine öncelikle bu tür bir homoepitaksiyel büyütme yapılmaktadır. Bu homoepitaksiyel büyütmenin amacı, alttaş yüzeyinden gelebilecek olan olası istenmeyen yapıların asıl büyütülen katmana ilerlemesinin önüne geçmek ve büyütme için daha ideal bir ortam hazırlamaktır. Tez çalışmasındaki tüm numuneler için bu katmanın kalınlığı yaklaşık 150 nm' dir. InP tabakasının büyütülmesinin ardından $In_xGa_{1-x}As$ epitaksiyel katmanların büyütmesine geçilmiştir. Şekil 6.1' de büyütülen $In_xGa_{1-x}As/InP$ yapılarının şematik gösterimi verilmiştir. $In_xGa_{1-x}As$ yapısı için In ve Ga kaynağı olarak sırasıyla yüksek saflıkta TMIIn ve TMGa metal-organik bileşikleri kullanılmıştır. As kaynağı olarak ise inorganik bir bileşik olan AsH_3 hidrit kaynağı kullanılmıştır. Ayrıca büyütmelemlerde taşıyıcı gaz olarak N_2 kullanılmıştır. Tez çalışmasında bazı $In_xGa_{1-x}As$ epitaksiyel tabakaları Si katkılı olarak büyütülmüştür. Si katkısı için kaynak olarak SiH_4 kullanılmıştır. Tablo 6.1' de kaynak gazlarının akış değerlerini ve büyütme sıcaklığını içeren büyütme parametreleri verilmiştir.



Şekil 6. 1 MOVPE sistemi ile büyütülen $In_xGa_{1-x}As/InP$ yapısının şematik gösterimi.

Tablo 6. 1 Tez çalışmasındaki tüm numunelere ait büyütme parametreleri.

Numune ismi	TMI _{In} akışı (sccm)	TM _{Ga} akışı (sccm)	AsH ₃ akışı (sccm)	SiH ₄ akışı (mol/min)	Büyütme sıcaklığı (°C)
A1*	30	0.3	27	6.86x10 ⁻⁵	550
A2	30	0.3	27	-	550
A3*	35	0.3	31	6.86x10 ⁻⁵	550
A4	35	0.3	31	-	550
A5*	50	0.3	43	6.86x10 ⁻⁵	550
K1*	60	0.8	58	2.57 x10 ⁻⁵	610
K2*	60	0.8	58	5.15 x10 ⁻⁵	610
K3*	60	0.8	58	7.89x10 ⁻⁵	610
R1	200	2	68	-	610
R2	200	2	180	-	610
R3	200	2	180	-	580
R4	200	2	180	-	550

Tablodaki numune ismi üzerindeki (*) sembolü In_xGa_{1-x}As yapısının Si katkı olduğunu belirtir.

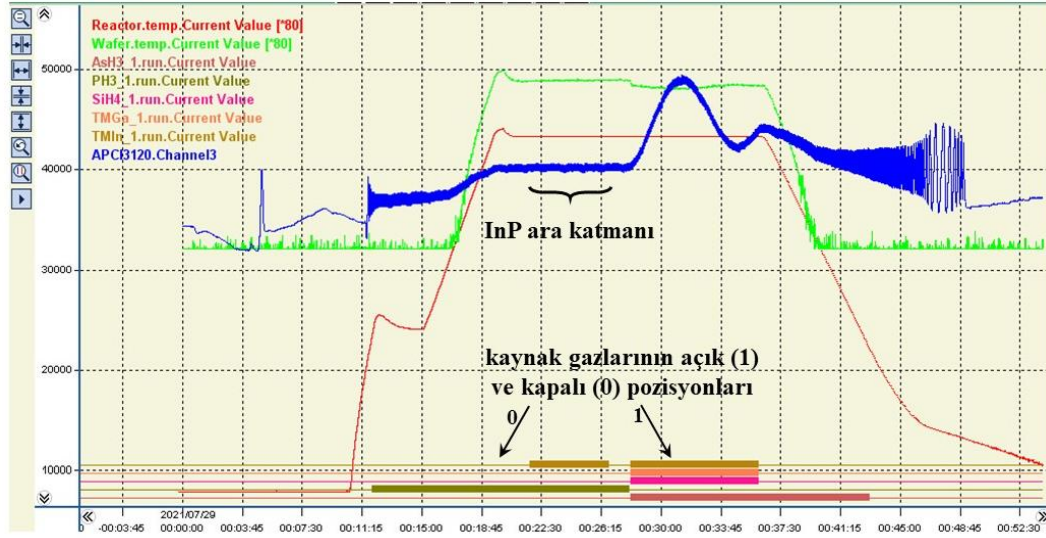
Büyütülen tüm numuneler ayrı setler olarak ele alındığında, tez kapsamında yapılacak olan çalışmalar ve çalışmalardaki setler Tablo 6.2' de verilmiştir

Tablo 6. 2 Tez kapsamında yapılan çalışmalar ve numuneler.

Yapılan çalışma	Numuneler
Si Doping etkisi	A1-A2 ve A3-A4
Sabit V-III oranı ile artan In içeriği	A1-A3-A5
SiH ₄ akış miktarı çalışması	K1-K2-K3
AsH ₃ akış çalışması	R1-R2
Sıcaklık çalışması	R2-R3-R4

InP Alttaş Üzerine Tek Tabaka Büyütölen In_xGa_{1-x}As Yapısının Yerinde Yansıma ve Sıcaklık Ölçümü

Bu aşamada büyötmeye ait daha detaylı bilgi verilecektir. Şekil 6.2' de InP alttaş üzerine büyütölen In_xGa_{1-x}As yapısının yerinde yansıma ölçümü detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 6. 2 InP alttaş üzerine büyütölen ara katman InP tampon tabakası ve In_xGa_{1-x}As tabakasının büyütmesine ait yerinde yansıma ve sıcaklık eğrisi.

Şekil 6.2'de x eksenini boyunca konumlanan çizgiler, kullanılan kaynak gazlarının açık ve kapalı pozisyonlarını temsil eder. Çizginin incelendiği yerler kaynak gazının kapalı olduğu, kalınlaştığı yerler ise kaynak gazının açık olduğu anlamına gelir. Büyütme InP alttaş yüzeyinin yavaşça ısıtılmasıyla başlar, bu süreç boyunca şekilde göröldüğu gibi PH₃ gaz akışı sağlanır. Bunun amacı, ısınan alttaş yüzeyindeki fosfat atomlarının kaçışını önlemektir. Ayrıca sıcaklığın yükseldiği esnada reaktör içinde alttaş tutucu da (susceptor) dönmeye başlar. Bu parçanın dönüş kabiliyeti sırf bu parçaya özel bir gaz hattı ile sağlanır ve dönüş hızının kontrolü, hattaki gaz akışı miktarının değişim sağlanır. Alttaşın dönme rotasyonu ayarlandıktan ve sıcaklık değerisi stable olduktan sonra, devam eden PH₃ gaz akışına ek olarak TMIn gaz kaynağı açılır ve böylece InP ara tabakasının büyütölenmesi başlar. InP/InP gibi iki aynı tür malzemenin büyümesinde bir kırılma indisi farkı olmayacağından yerinde yansıma grafiğinde herhangi bir osilasyon gözlenmemiştir. Ancak bu durum alttaş ve epitabaka aynı taşıyıcı konsantrasyonuna sahipse veya her iki yapıda istemsiz katkı olduğuunda geçerlidir.

InP ara tabaksı istenilen kalınlıkta büyütüldükten sonra ve $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ tabakasının büyütülmesine geçilmeden önce, her iki kaynak gazıda bir süre kapalı tutulur. Böylece yüzeyde $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ gibi bir dörtlü alaşımin büyümesinin önüne geçilmiş olur. Bu bekleme sürecinin ardından TMIIn, TMGa ve AsH_3 kaynak gazları katkısız $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapısının büyütülmesi için açılır. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapısının katkılı olarak büyütülmesinde bu kaynak gazlarına ek olarak yapıda n-tipi katkı için SiH_4 gaz kaynağı büyütme boyunca açılır. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapısının büyümesi istenilen kalınlığa ulaştığında TMIIn ve TMGa kaynak gazları kapatılır. Ancak AsH_3 kaynağı soğuma süresince devam eder. Bu akışın amacı, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapısının yüzeyinden As atomlarının kaçışının önüne geçmektir.

Bu büyütme için meydana gelen en olası kimyasal süreç Denklem 6.1' de verilmiştir.



6.1 Si Katkısının Etkisi ve Sabit V-III Oranı ile Artan In Alaşım Oranı Etkisi

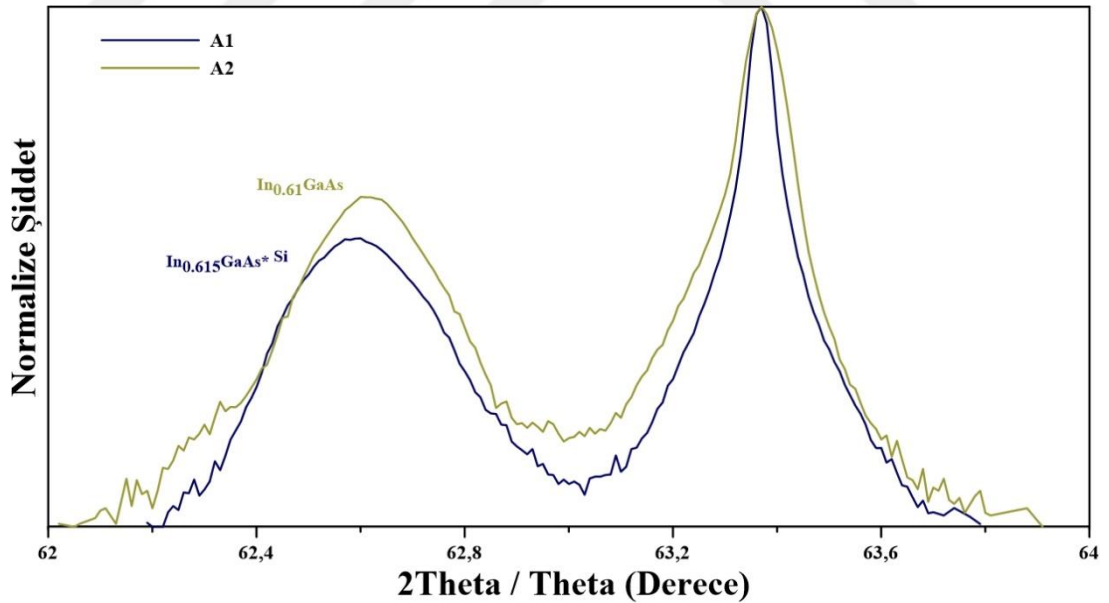
Bu bölümde zengin indiyum içerikli $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapıları için Si katkısının etkisi ve sabit V-III oranına sahip numuneler için artan In içeriğinin etkisi incelenmiştir. Tüm numunelere ait büyütme parametreleri bir önceki bölümde sunulmuştur. Bu başlık altında incelenecek olan, "A" seti olarak isimlendirilen, numuneler için genel bilgiler Tablo 6.3' de verilmiştir. A1 ve A2 olarak isimlendirilen numuneler aynı büyütme parametrelerine sahip olup tek fark olarak A1 numunesinin Si katkılı olmasıdır. Aynı şekilde, A3 ve A4 numuneleri de aynı büyütme parametrelerine sahip olup A3 numunesi Si katkılı olarak büyütülmüştür. Bu numuneler Si katkısının etkisi incelenirken, A1, A3 e A5 numuneleri ikinci bir set olarak sabit V-III oranı ile artan In içeriğinin $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapısındaki etkisi incelenmiştir.

Si katkısının etkisi	
A1 In içeriği; 0.615 *SiH ₄ ($6,86 \times 10^{-5}$ mol/min) taşıyıcı yoğunluğu; $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ FWHM:726 arcsec TMIn/TMGa/AsH ₃ ;30/0.3/27 sccm V-III oranı;128	A2 In içeriği; 0.610 *SiH ₄ yok FWHM:598 arcsec
A3 In içeriği; 0.627 *SiH ₄ ($6,86 \times 10^{-5}$ mol/min) taşıyıcı yoğunluğu; $2,7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ FWHM:884 arcsec TMIn/TMGa/AsH ₃ ;33/0.3/31 sccm V-III oranı;128	A4 In içeriği; 0.620 *SiH ₄ yok FWHM:837 arcsec
A5 In içeriği; 0.656 *SiH ₄ ($6,86 \times 10^{-5}$ mol/min) taşıyıcı yoğunluğu; $2,2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ FWHM:1062 arcsec TMIn/TMGa/AsH ₃ ;50/0.3/43 sccm V-III oranı;128	

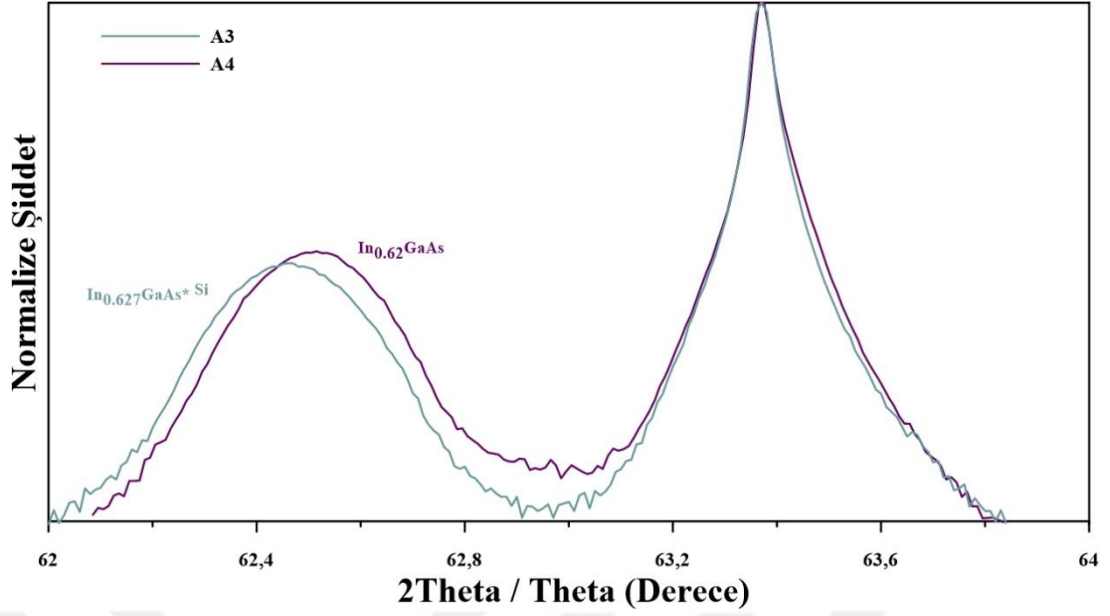
Tablo 6. 3 "A" seti için genel bilgiler.

Si katkısının $In_xGa_{1-x}As$ tabakası üzerindeki etkisi

Si katkısının $In_xGa_{1-x}As$ tabakası üzerindeki etkisinin incelendiği A1-A2 ve A3-A4 numuneleri için HR-XRD sonuçlarından elde edilen alaşım oranları sırasıyla, $x=0.615$ - $x=0.610$ ve $x=0.627$ - $x=0.620$ ' dir. Şekil 6.3 ve 6.4' de Si katkılı ve katkısız olarak büyütülen zengin In içerikli $In_xGa_{1-x}As/InP$ yapılarının $2\theta/\theta$ taramaları verilmiştir. Burada, iki farklı yüksek In içeriğine sahip numuneler için Si katkısının etkisi incelenmiştir. HR-XRD sonuçlarına göre her iki grafik içinde, daha keskin diyebileceğimiz ve yaklaşık $63,4^\circ$ de konumlanmış InP alttaş piki ve alttaş pikinin solunda konumlanmış $In_xGa_{1-x}As$ pikleri görülmektedir. $In_xGa_{1-x}As$ pikinin konumu, yapının alaşım oranına bağlı olarak değişir. $In_xGa_{1-x}As$ yapısındaki Si katkısı, A2 ve A1 numuneleri için, In içeriğinde $x=0.610$ ' den $x=0.615$ ' e; yine aynı şekilde A4 ve A3 numuneleri için, In içeriğinde $x=0.620$ ' den $x=0.627$ ' ye bir artışa sebep olduğu görülmektedir. Yapıya eklenen Si atomu Ga atomunun yerine yerleşerek az da olsa In içeriğinin artmasına neden olmuştur. Alaşım oranındaki bu değişimin etkisiyle $In_xGa_{1-x}As$ piki artan In içeriğiyle birlikte sola kaymaktadır.

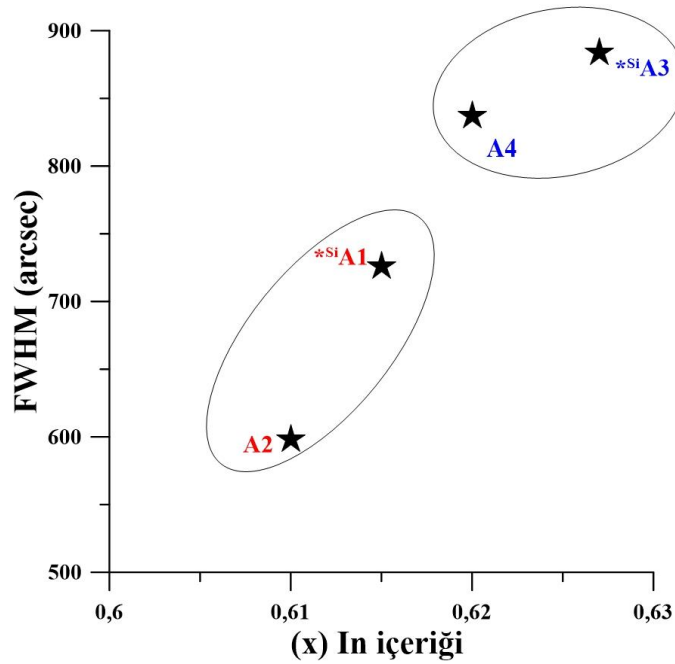


Şekil 6. 3 Zengin In içerikli ($x=0.61$) $In_xGa_{1-x}As$ yapısı için Si katkısının $In_xGa_{1-x}As$ tabakasına etkisinin $2\theta/\theta$ taraması.



Şekil 6. 4 Zengin In içerikli ($x=0.62$) $In_xGa_{1-x}As$ yapısı için Si katkısının $In_xGa_{1-x}As$ tabakasına etkisinin $2\theta/\theta$ taraması.

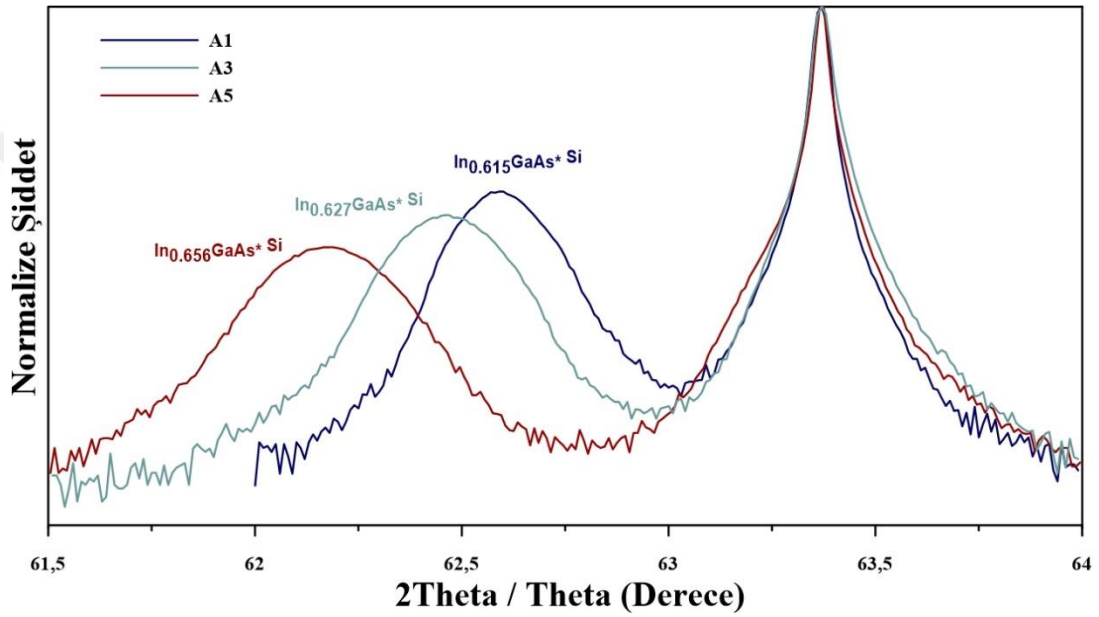
HR-XRD sonuçlarından elde edilen FWHM değerleri, $x=0.610$ In içeriğine sahip A2 numunesi için 589 arcsec, $x=0.615$ In içeriğine sahip A1 numunesi için 726 arcsec, $x=0.620$ In içeriğine sahip A4 numunesi için 837 arcsec, $x=0.627$ In içeriğine sahip A3 numunesi için 884 arcsec olarak belirlenmiştir. Si katkılı ve katkısız olarak büyütülen bu numuneler için Si katkısının $In_xGa_{1-x}As$ tabakasındaki In içeriğine ve FWHM değerlerine etkisi Şekil 6.5' de verilmiştir.



Şekil 6. 5 Si katkısının $In_xGa_{1-x}As$ yapısındaki In içeriğine ve yapının FWHM değerine etkisi.

Sabit V-III oranı ile artan In içeriği

Şekil 6.6' da, sabit V-III oranları ile büyütülen ve A1, A3 ve A5 numuneleri olarak isimlendirilen zengin In içerikli $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapılarına ait $2\theta/\theta$ taraması verilmiştir. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapısı büyütülürken In içeriğini artırmak için artırılan TMIIn gaz akışı değeri ile birlikte AsH_3 gaz akışı değerleri de belirli oranda artırılarak V-III oranı yaklaşık 128 olarak sabit tutulmuştur. Şekil 6.6' da altta pikine göre sol tarafta konumlanan $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapılarına ait piklerin artan In içeriğine bağlı olarak sola kaydığı daha net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 6. 6 Sabit V-III oranı ile artan In içeriğine bağlı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapılarının $2\theta/\theta$ taraması.

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ epitaksiyel katmanına ait pik pozisyonunun, artan In içeriğine bağlı olarak, sola kayması epitaksiyel katmanın örgü parametresinde (out-plane lattice parameter) bir artışa neden olacak şekilde sıkıştırma gerilimi altında olduğu anlamına gelir [3]. HR-XRD sonuçlarından elde edilen FWHM değerlerinden yararlanarak, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ epitaksiyel katmanları ile altta arasındaki gerilim kaynaklı oluşan dislokasyonların ortalama yoğunluğunu belirlemek mümkündür. Zengin In içerikli $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapılarını içeren A1, A2, A3, A4 ve A5 numunelerinin hepsi için için dislokasyon yoğunlukları hesaplanmıştır. Ortalama dislokasyon yoğunluğu hesabı için Eşitlik 6.2 kullanılmıştır ve Tablo 6.4' de tüm "A" seti numuneleri için örgü parametreleri ve hesaplanan dislokasyon yoğunlukları verilmiştir. Artan In içeriği ile orantılı şekilde artan FWHM değerinin, dislokasyon yoğunluğunu etkilediği açıkça görülmektedir.

Si etkisinin incelendiği ilk set için, Si katkısının bir safsızlık atomu olarak yapıya dahil olması ve In içeriğini artırması kristal kalitede bir düşüşe sebebiyet vermiştir. Böylece, Si katkısı ile kristal kalitenin bir parametresi olan FWHM değerleri artmış ve yapıda dislokasyon yoğunluğunun artmasına neden olmuştur. Sabit V-III oranı ile büyütülen numuneler için ise artan TMI'nin akışı ile beraber AsH₃ akışı da artırılarak kristal kalite korunmaya çalışılmıştır. A1 ve A3 arasındaki %1.95'lik bir In artışı %48.6'lık bir dislokasyon yoğunluğu ile sonuçlanırken, A3 ve A5 numuneleri için yaklaşık %4.6'lık bir In artışı %44.2'lik bir dislokasyon yoğunluğu ile sonuçlanır. Bu değerlere bakıldığında A3 ve A5 numuneleri arasındaki %4,6'lık In artışına rağmen In_xGa_{1-x}As/InP yapılarındaki dislokasyon yoğunluğu, A1 ve A3 numuneleri için ortaya çıkan dislokasyon yoğunluğuna kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Literatürde buna benzer şekilde InP alttaş üzerine tek katman olarak büyütülen In_xGa_{1-x}As yapıları için yapılan hesaplamalar sonucu x=0.650 In içeriğinden x=0.667 ye %2.6'lık bir In artışı yapıda %45 oranında dislokasyon yoğunluğunun artmasına neden olmuştur [3].

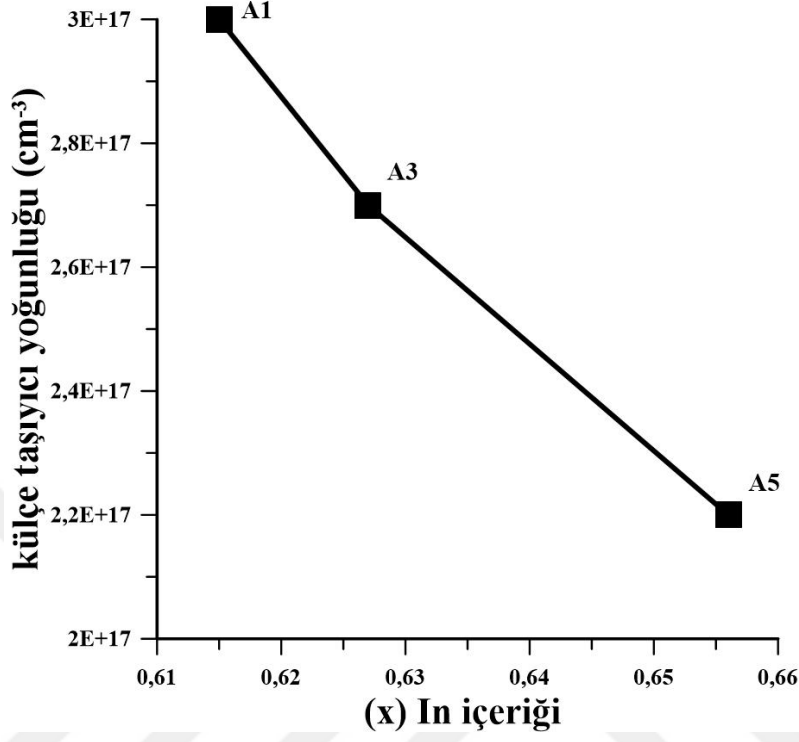
$$\rho_{dis} = 2 \frac{FWHM^2}{9a_0^2} \quad [6.2]$$

Tablo 6. 4 Farklı In içeriğine sahip numuneler için HR-XRD sonuçları ve hesaplanan dislokasyon yoğunluğu değerleri.

Numune ismi	Örgü parametresi (Å)	In içeriği %	FWHM (derece)	Dislokasyon yoğunluğu (cm ⁻²)
A1	5.884143	0.615	0.201	2.59 x10⁸
A2	5.882032	0.610	0.166	1.77 x10⁸
A3	5.889227	0.627	0.245	3.85 x10⁸
A4	5.886259	0.620	0.232	3.45 x10⁸
A5	5.901604	0.656	0.295	5.55 x10⁸

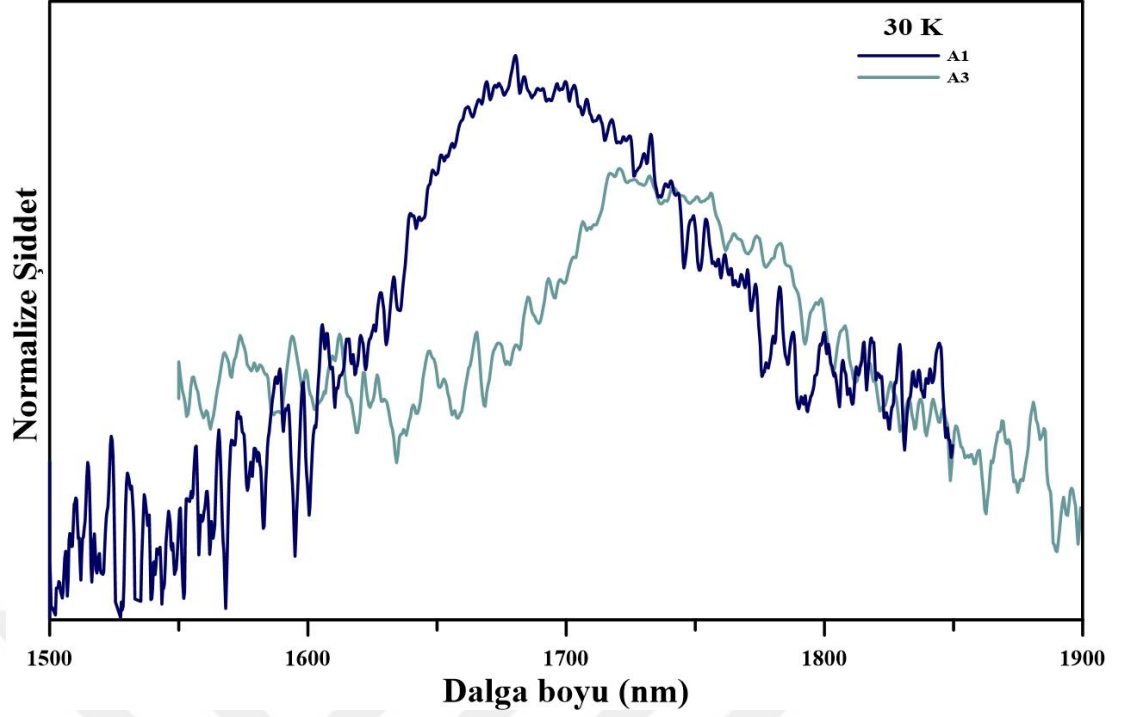
A1, A3 ve A5 numuneleri için SiH₄ akış değerleri aynı (6.86x10⁻⁵ mol/min) olup, Hall ölçümlerinden elde edilen değerlere göre, sırayla külçe taşıyıcı konsantrasyonları x=0.615 In içeriğine sahip A1 numunesi için 3x10¹⁷, x=0.627 In içeriğine sahip A3 numunesi için 2.7x10¹⁷cm⁻³ ve x=0.656 In içeriğine sahip A5 numunesi için

$2.2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ olarak ölçülmüştür. Buna göre, artan In içeriğinin yapıdaki taşıyıcı yoğunluğunda bir düşüşe neden olmuştur. Şekil 6.7' de artan In içeriğine karşı külçe taşıyıcı yoğunluğu grafiği verilmiştir.



Şekil 6. 7 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapısı için artan In içeriğinin külçe taşıyıcı yoğunluğuna etkisi.

Zengin In içerikli A1-A3-A5 numune seti için, HR-XRD analizi ile yapısal karakterizasyonu, Hall tekniği ile elektriksel karakterizasyonu yapıldıktan sonra fotoluminesans sistemi kullanılarak optik karakterizasyonu da yapılmıştır. Şekil 6.8' de düşük sıcaklıkta (30K) elde edilen fotoluminesans sonuçları verilmiştir. Buna göre, $x=0.615$ In içeriğine sahip A1 numunesi için PL piki 1684 nm' de konumlanırken $x=0.627$ ' lik In içeriği ile A3 numunesine ait PL piki 1724 nm' de konumlanmıştır. Bu bilgiler Tablo 6.5' de özetlenmiştir. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapısındaki yaklaşık %2' lik bir In artış PL pikinde, SWIR bandı içinde daha uzun dalga boyuna doğru, 40 nm' lik bir kaymaya sebep olmuştur. Artan In içeriğinin $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ pik pozisyonunu daha uzun dalga boylarına kaydırması nedeni ile In içeriği $x=0.656$ olan A5 numunesi için ölçüm alınamamıştır. Kullanılan dedektör sisteminin ölçüm aralığının A5 numunesi için değer dışında kaldığı veya dedektör veriminin çok düşük olduğu banda denk geldiği düşünülmektedir. Bu yüzden Şekil 6.8 yalnızca A1 ve A3 numunelerini içermektedir.



Şekil 6. 8 Farklı In içeriğine sahip A1 ve A3 numuneleri için düşük sıcaklıkta (30K) elde edilen PL spektrumu.

Tablo 6. 5 Değişen In içeriğine göre PL sonuçları.

	Emisyon dalga boyu (nm)	In içeriği (x)	Hesaplanan emisyon dalga boyu değerleri (nm)
A1	1684	0.615	1860
A3	1724	0.627	1892
A5	Belirlenemedi!	0.656	1975

Ayrıca Eşitlik 6.3 [72] ve 6.4 kullanılarak A1, A3 ve A5 numuneleri için hesaplanan emisyon dalga boyları da Tablo 6.5' de verilmiştir.

$$E_g(x) = 1.425eV + 1.501eV(x) + 0.436(x^2) \quad [6.3]$$

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad [6.4]$$


Bu eşitlikler için x In içeriğini, h Planck sabitini ve c ışık hızını temsil etmektedir.

6.2 SiH₄ Gaz Akış Miktarı Çalışması

Bu bölümde, Si katkılı zengin In içerikli In_xGa_{1-x}As/InP yapıları için SiH₄ akış miktarı çalışması yapılmıştır. "K" seti olarak isimlendirilen SiH₄ akış miktarı çalışmasındaki numuneler için genel bilgiler Tablo 6.6' da verilmiştir. K1, K2 ve K3 numuneleri için tüm büyütme parametreleri sabit tutularak sadece SiH₄ gazının akış miktarları artırılmış ve bunun In_xGa_{1-x}As/InP yapısı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Tüm numuneler için TMin/TMGa/AsH₃ akış değerleri sırayla 60/0.8/58 sccm olup büyütme sıcaklığı 610°C'dir.

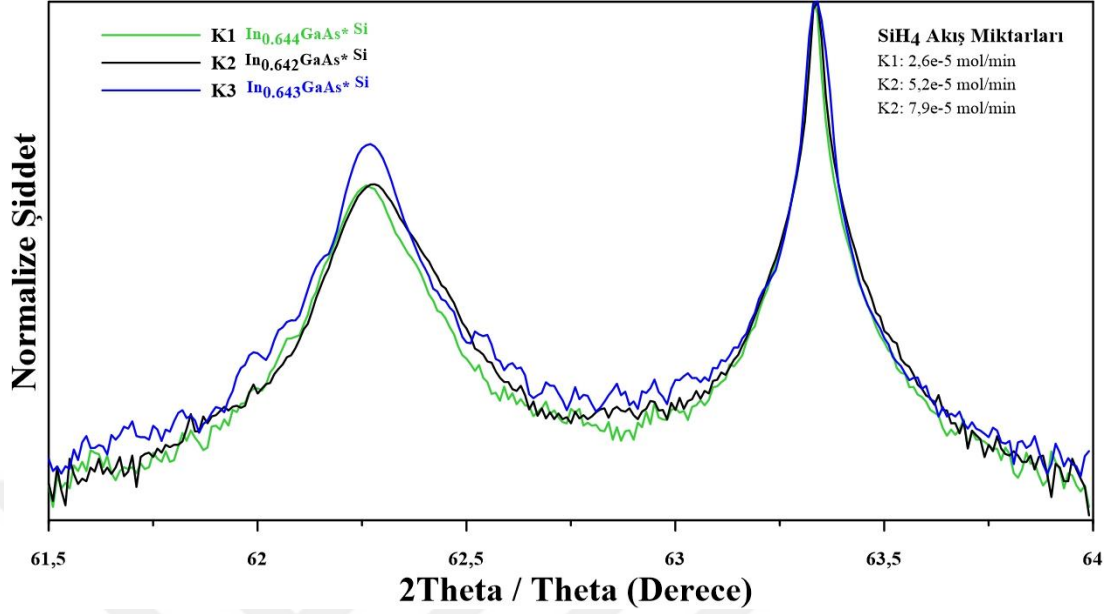
Tablo 6. 6 "K" seti için genel bilgiler.

K1	K2	K3
In içeriği; 0.644	In içeriği; 0.642	In içeriği; 0.643
*SiH ₄ ; 2.57x10 ⁻⁵ mol/min taşıyıcı yoğunluğu; 1.6x10 ¹⁷ cm ⁻³	*SiH ₄ ; 5.15x10 ⁻⁵ mol/min taşıyıcı yoğunluğu; 2.0 x10 ¹⁷ cm ⁻³	*SiH ₄ ; 7.89x10 ⁻⁵ mol/min taşıyıcı yoğunluğu; 3.80 x10 ¹⁷ cm ⁻³
FWHM: 380 arcsec	FWHM: 422 arcsec	FWHM: 334 arcsec

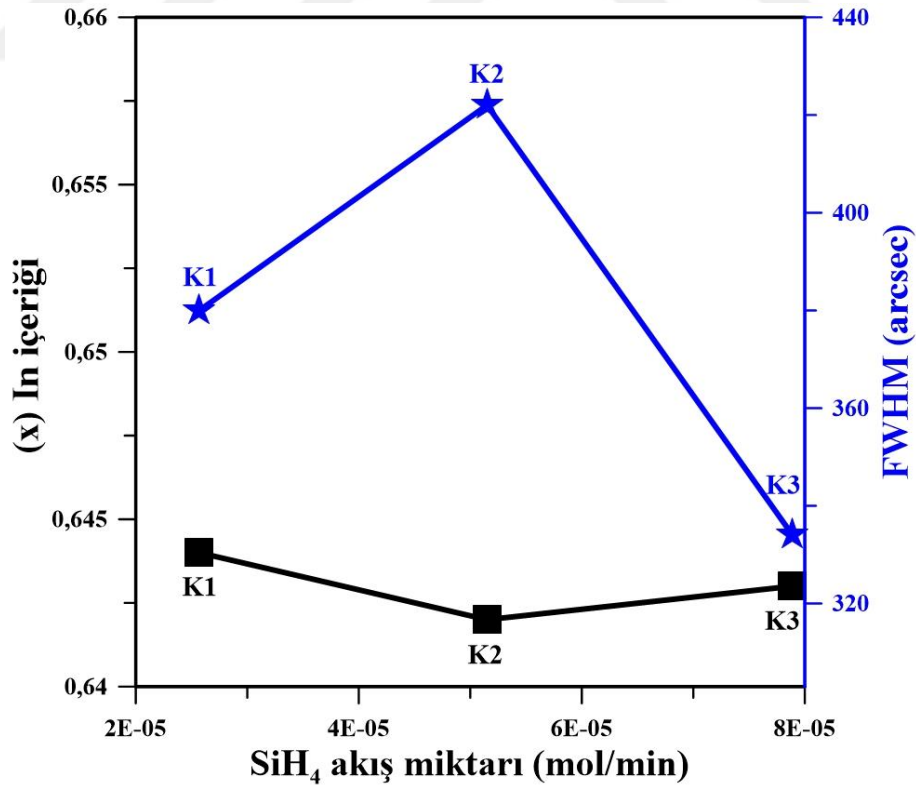

Artan SiH₄ gazı akışı

Artan SiH₄ gazının akış miktarının zengin In içerikli In_xGa_{1-x}As tabakasına etkisinin 2θ/θ taraması Şekil 6.9' da verilmiştir. HR-XRD sonuçlarından elde edilen alaşım oranları K1, K2 ve K3 numuneleri için sırayla x=0.644, x=0.642 ve x=0.643 olarak elde edilmiştir. In içerikleri birbirlerine çok yakın olan In_xGa_{1-x}As yapılarının pik pozisyonları da sırayla 62.25, 62.27 ve 62.26 derecede konumlanmıştır. InP alttaş piki ise "A" setindeki ölçümlerde olduğu gibi yaklaşık 63.4° de konumlanmıştır. FWHM değerlerine bakıldığında, SiH₄ gazının akışının 7.89x10⁻⁵ mol/min değeri için en yüksek olduğu K3 numunesi, 334 arcsec olarak belirlenen FWHM değeriyle en iyi kristal kaliteye sahipken 2.57x10⁻⁵ mol/min akış değerine sahip K1 numunesi için FWHM değeri 380 arcsec, 5.15x10⁻⁵ mol/min akış değerine sahip K2 numunesi için FWHM değeri 422 arcsec olarak belirlenmiştir. SiH₄ gazının akış miktarının, In içeriği ve FWHM değerleri ile ilişkisini gösteren grafik Şekil 6.10' da verilmiştir. Değişen

SiH_4 gaz akışı büyütmenin dinamiğini etkileyerek kristal kalite üzerinde etkili olmuştur.

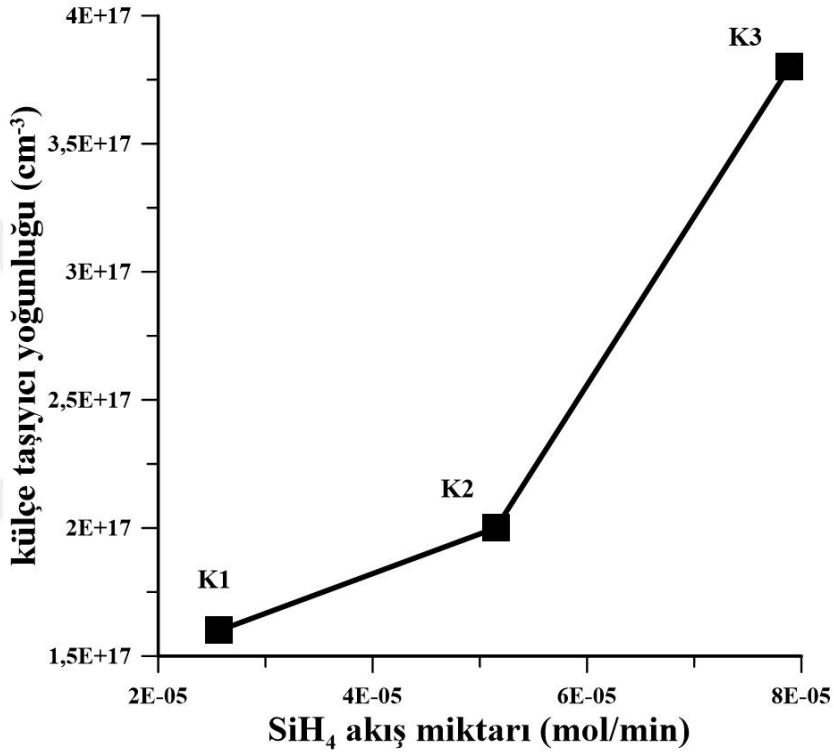


Şekil 6. 9 Zengin In içerikli $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapıları için SiH_4 akış miktarının $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ tabakasına etkisinin $2\theta/\theta$ taraması.



Şekil 6. 10 SiH_4 akış miktarının, In içeriği (x) ve FWHM değerleri ile ilişkisi.

Değişen SiH₄ gazının akış miktarının yapının elektriksel özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için Hall ölçümleri yapılmıştır. Şekil 6.11' de artan SiH₄ gazının akışına karşı külçe taşıyıcı yoğunluğu grafiği verilmiştir. Buna göre, artan SiH₄ akışı ile külçe taşıyıcı yoğunluğu artmıştır. 2.57x10⁻⁵ mol/min SiH₄ akış değerine sahip K1 numunesi için külçe taşıyıcı yoğunluğu 1.6x10¹⁷ cm⁻³, 5.15x10⁻⁵ mol/min SiH₄ akış değerine sahip K2 numunesi için külçe taşıyıcı yoğunluğu 2.0x10¹⁷ cm⁻³, ve 7.89x10⁻⁵ mol/min SiH₄ akış değerine sahip K3 numunesi için külçe taşıyıcı yoğunluğu için 3.80x10¹⁷ cm⁻³ olarak ölçülmüştür.



Şekil 6. 11 Artan SiH₄ akışının külçe taşıyıcı yoğunluğuna etkisi.

6.3 AsH₃ Gaz Akış Miktarı Çalışması

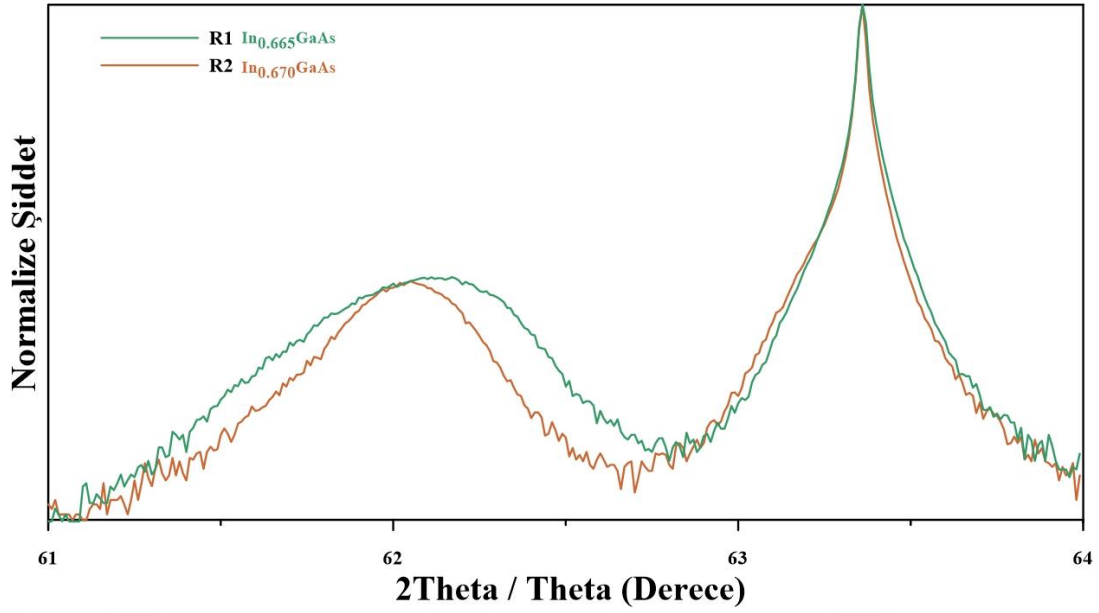
Bu bölümde, AsH₃ gaz akışı miktarının In_xGa_{1-x}As/InP yapısına etkisi incelenmiştir. "R-AsH₃ akış" seti olarak belirlenen ve Tablo 6.7' de genel bilgileri verilen bu set, düşük ve yüksek AsH₃ gaz akışına sahip R1 ve R2 numunelerini içermektedir. Bu iki numune için AsH₃ gaz akışı değerleri dışındaki tüm büyütme parametreleri aynıdır.

Tablo 6. 7 "R-AsH₃ akış" seti için genel bilgiler.

R1	R2
In içeriği; 0.665	In içeriği; 0.670
TMIn/TMGa/AsH ₃ akış değerleri; 200/2/68 sccm	TMIn / TMGa/AsH ₃ akış değerleri; 200/2/180 sccm
FWHM: 1738 arcsec	FWHM: 1061 arcsec

➔
Artan AsH₃ gazı akışı

Şekil 6.12' de AsH₃ gazı akış miktarının In_xGa_{1-x}As tabakasına etkisinin 2θ/θ taraması verilmiştir. HR-XRD sonuçlarına göre R1 ve R2 numunelerine ait In içeriklerinin değerleri sırayla x=0.665 ve R2 için x=0.670 olarak hesaplanmıştır. AsH₃ gazının akış miktarının R1 numunesine kıyasla R2 numunesi büyütülürken yaklaşık 2.6 kat artırılması, In_xGa_{1-x}As yapısındaki In içeriğinde bir artışa neden olmuştur. Aynı zamanda, FWHM değerlerine bakıldığında R1 için 1738 arcsec olarak belirlenen FWHM değeri, R2 numunesi için 1061 olarak belirlenmiştir. Şekil 6.12' de In_xGa_{1-x}As yapılarına ait piklerin şeklinden de bu fark net bir şekilde görülmektedir. R2 numunesine kıyasla R1 numunesine ait pikin genişliği, azalan AsH₃ gazı akışı ile artmıştır. Yani yüksek değerdeki AsH₃ gaz akışı miktarı, AsH₃ desorpsiyon mekanizmasını baskılayarak, In_xGa_{1-x}As/InP yapısının kristal kalitesini düşük AsH₃ gaz akışı miktarına kıyasla artırmıştır.




Şekil 6. 12 Zengin In içerikli $In_xGa_{1-x}As/InP$ yapıları için AsH_3 akış miktarının $In_xGa_{1-x}As$ tabakasına etkisinin $2\theta/\theta$ taraması.

6.4 Sıcaklık Çalışması

Bu bölümde, $In_xGa_{1-x}As/InP$ yapısı için büyütme sıcaklığı etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, katkısız zengin In içerikli $In_xGa_{1-x}As/InP$ yapıları için büyütme, başka bir büyütme parametresi değiştirilmeksizin sadece büyütme sıcaklığı değiştirilerek 550° , 580° ve 610° olmak üzere üç farklı sıcaklık değeri için yapılmıştır. "R-Sıcaklık" seti olarak isimlendirilen sıcaklık çalışmasına ait numuneler için genel bilgiler Tablo 6.8' de verilmiştir.

Tablo 6. 8 "R-Sıcaklık" seti için genel bilgiler.

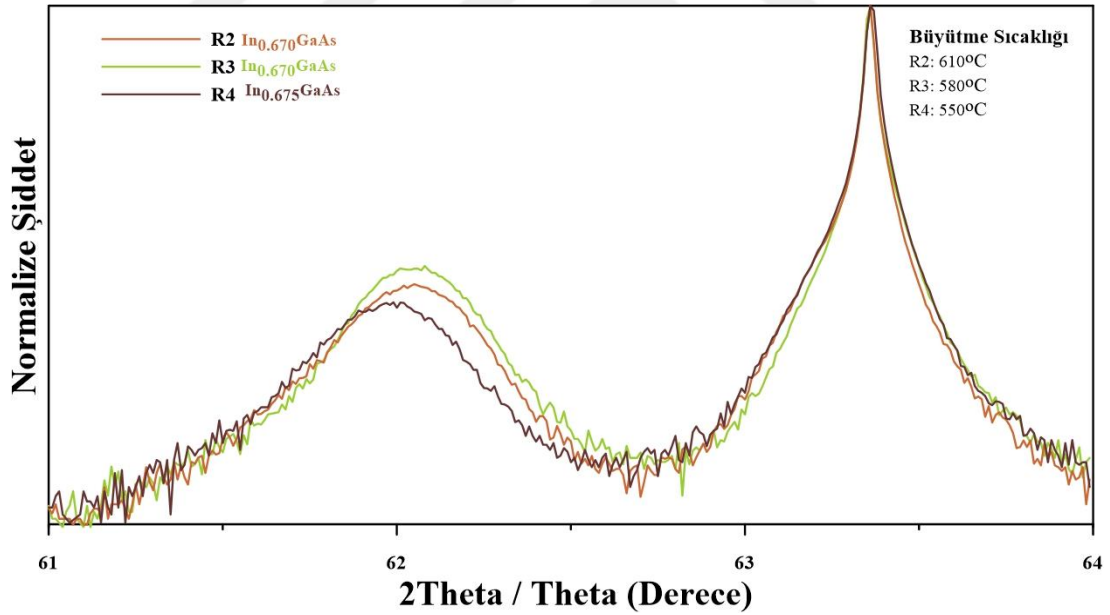
R2	R3	R4
In içeriği; 0.670	In içeriği; 0.670	In içeriği; 0.675
Büyütme Sıcaklığı; 610°C	Büyütme Sıcaklığı; 580°C	Büyütme Sıcaklığı; 550°C
FWHM: 1061 arcsec	FWHM: 1012 arcsec	FWHM: 1125 arcsec



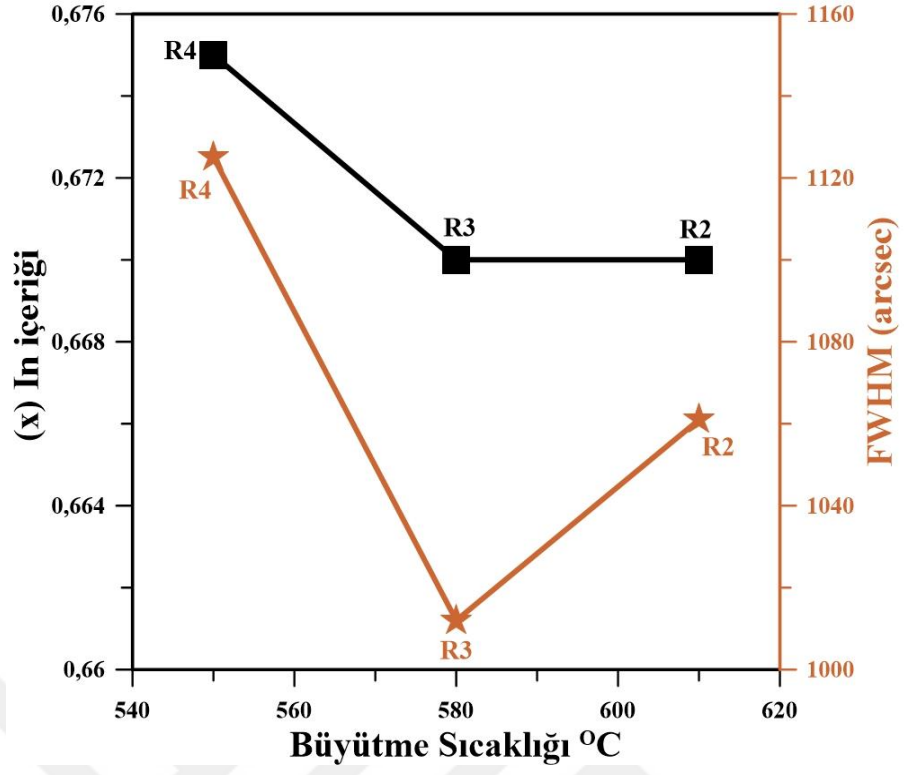
 Azalan Sıcaklık

Şekil 6.13' da büyütme sıcaklığının $In_xGa_{1-x}As$ tabakasına etkisinin $2\theta/\theta$ taraması verilmiştir. HR-XRD sonuçlarından elde edilen alaşım oranları R2, R3 ve R4

numuneleri için sırayla $x=0.670$, $x=0.670$ ve $x=0.675$ ' dir. 580°C ve 610°C de büyütülen R2 ve R3 numuneleri için sıcaklık değişimi $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapılarının In içeriğinde bir etki oluşturmamıştır. Ancak 550°C ' lik büyütme sıcaklığına sahip R4 numunesi için sıcaklık, In içeriğinin $x=0.670$ ' den $x=0.675$ ' e artmasına neden olmuştur. In içeriğindeki bu değişimi, Şekil 6.13' deki zengin In içerikli $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapılarına ait $2\theta/\theta$ taramalarında R2, R3 ve R4 numunelerine ait piklerdeki küçük kaymadan görmek mümkündür. Ayrıca HR-XRD sonuçlarından elde edilen FWHM değerleri de 610°C sıcaklıkta büyütülmüş $x=0.670$ In içeriğine sahip R2 numunesi için 1061 arcsec, 580°C sıcaklıkta büyütülmüş $x=0.670$ In içeriğine sahip R3 numunesi için 1012 arcsec ve 550°C sıcaklıkta büyütülmüş $x=0.675$ In içeriğine sahip R4 numunesi için 1125 arcsec olarak belirlenmiştir. R2 ve R3 numunelerine ait FWHM değerleri birbirlerine oldukça yakın olup en yüksek In içeriğine sahip R4 numunesi için FWHM değeri, artan In içeriğine de bağlı olarak, diğerlerine göre daha yüksektir. Büyütme sıcaklığının, In içeriği ve FWHM değerleri ile ilişkisini gösteren grafik Şekil 6.14' de verilmiştir.



Şekil 6. 13 Zengin In içerikli $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapıları için büyütme sıcaklığının $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ tabakasına etkisinin $2\theta/\theta$ taraması.



Şekil 6. 14 Büyütme sıcaklığının, In içeriği (x) ve FWHM değerleri ile ilişkisi.

SONUÇ

Elektromanyetik spektrumda 1-3 μm aralığında tanımlanan SWIR bölgesi, kızılötesi spektrumun en önemli bölgelerinden biri olup sahip olduğu eşsiz görüntüleme avantajları sayesinde aktif bir araştırma alanıdır. Bu bölgede görüntüleme yeteneğine sahip SWIR dedektörler her geçen gün kendine yeni uygulama alanları bulur. Bu kapsamda üretilen dedektör sistemleri için uygun maliyet, taşınabilirlik ve yüksek cihaz verimi gibi parametreler önem arz etmektedir. SWIR bölgesinde çalışan dedektör sistemleri ile karşılaştırıldığında $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ tabanlı dedektör sistemleri bu özellikleri karşılayabilme potansiyeline sahiptir.

Bu tez çalışması kapsamında, dalga boyu genişletilmiş SWIR dedektör uygulaması için (100) yönelimli InP alttaş üzerine zengin indiyum içerikli ($x>0.53$) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ epitaksiyel katmanları Cumhuriyet Üniversitesi Nanofotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan MOVPE sistemi kullanılarak farklı optimizasyon koşulları altında büyütülmüş ve yine CUNAM bünyesinde kurulu olan HR-XRD sistemi ve Hall etkisi ölçüm sistemi ile yapısal ve elektriksel karakterizasyonları yapılmıştır. Ayrıca bu yapıların optik karakterizasyonu için de İstanbul Üniversitesi bünyesinde kurulu bulunan mikro-PL sistemi kullanılmıştır.

Zengin In içerikli $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapıları için, katkılama etkisi, sıcaklık etkisi ve gaz akışı çalışmaları yapılmıştır. İlk olarak Si katkısının $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapısına etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, farklı In içeriklerine sahip iki numuneye diğer büyütme parametreleri değiştirilmeden Si katkılama yapılmıştır. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapılarına katkı atomu olarak dahil olan Si atomlarının Ga atomunun yerini alarak az da olsa In içeriğini artırdığı görülmüştür. Ancak yapıya safsızlık atomu olarak dahil olan Si atomu, artan In içeriğinin de etkisiyle kristal kalitede düşüşe neden olmuştur. Gaz akışı çalışmaları kapsamında, V-III oranı sabit kalacak şekilde, zengin In içerikli $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ epitaksiyel katmanların üretimi için TmIn ve AsH_3 akışları belirli oranlarda değiştirilmiş ve artan In içeriğinin yapı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapıdaki artan In içeriği FWHM değerlerini yükseltmiş ve kristal kalitede düşüşe neden olmuştur. Yapılan dislokasyon hesaplarına göre %1,95'lik bir In artışı için dislokasyon yoğunluğu %48.6 olarak hesaplanırken, %4,6'lık bir In artışı için %44.2 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca %1,95'lik In artışı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapısı için emisyon dalga boyunun SWIR bandı içinde 40 nm kadar daha uzun dalga boyuna doğru kaymasına neden olmuştur. Akış çalışmaları kapsamındaki bir diğer çalışma ise SiH_4 gaz akışı

miktarı çalışmasıdır. Bu kapsamda 2.57×10^{-5} , 5.15×10^{-5} ve 7.89×10^{-5} mol/min SiH_4 gaz akışı değerlerine sahip üç numune büyütülmüş ve yapı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. SiH_4 gaz akışı miktarının yapıdaki In içeriği üzerinde kayda değer bir etkisi olmadığı görülmüştür. Buna karşın 334 arcsec olarak belirlenen FWHM değeri ile en iyi kristal kalite en yüksek SiH_4 gaz akışı değeri için elde edilmiştir. Değişen SiH_4 gaz akışı büyütmenin dinamiğini etkileyerek kristal kalite üzerinde etkili olmuştur. Diğer bir gaz akışı çalışması olan AsH_3 gaz akışı çalışması kapsamında ise düşük (68 sccm) ve yüksek (180 sccm) AsH_3 gaz akışına sahip iki numune büyütülmüş ve kristal kalite üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yüksek AsH_3 akışının $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapısındaki In içeriğini $x=0.665$ ' den $x=0.670$ ' e arttırdığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, yüksek AsH_3 akışının, AsH_3 desorpsiyon mekanizmasını baskılayarak kristal kalite üzerinde de ciddi bir iyileştirmeye neden olduğu görülmüştür. Yüksek AsH_3 gaz akışı ile büyütülen numune için FWHM değeri 1061 arcsec olarak belirlenirken düşük AsH_3 gaz akış değeri için FWHM değeri 1738 arcsec belirlenmiştir. Son olarak $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapıları için yapılan büyütme sıcaklığı çalışması için 550°C , 580°C ve 610°C olarak üç farklı sıcaklıkta zengin In içerikli $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapıları büyütülmüştür. 580°C ve 610°C büyütme sıcaklığına sahip numuneler için In içeriği $x=0.670$ olarak belirlenmiş olup 550°C de yapılan büyütme sonucunda bu değer $x=0.675$ olarak belirlenmiştir. Artan In içeriğinin etkisi FWHM değerlerine de yansımıştır. 580°C ve 610°C de büyütülen numuneler için FWHM değeri sırayla 1061 arcsec ve 1012 arcsec olarak belirlenirken 550°C de büyütülen numune için 1125 arcsec olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak, en düşük In içeriği $x=0.610$ ve en yüksek In içeriği $x=0.675$ olmak üzere toplamda 12 adet zengin In içerikli ($x>0.53$) $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapıları farklı optimizasyon koşulları altında MOVPE sistemi ile büyütülmüş olup yapısal, optik ve elektriksel karakterizasyonları yapılmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] “Deng, H., Wang, Z., Huang, J., Li, X., & Gong, H. (2018, December). Lateral collection structure for planar type InGaAs infrared detector. In *Optical Sensing and Imaging Technologies and Applications* (Vol. 10846, pp. 866-870). SPIE.”.
- [2] “Uliel, Y., Cohen-Elias, D., Sicron, N., Grimberg, I., Snapi, N., Paltiel, Y., & Katz, M. (2017). InGaAs/GaAsSb Type-II superlattice based photodiodes for short wave infrared detection. *Infrared Physics & Technology*, 84, 63-71.”.
- [3] “Smiri, B., Arbia, M. B., Ilkay, D., Saidi, F., Othmen, Z., Dkhil, B., ... & Maaref, H. (2020). Optical and structural properties of In-rich In_xGa_{1-x}As epitaxial layers on (1 0 0) InP for SWIR detectors. *Materials Science and Engineering: B*, 262, 114769.” *Elsevier*.
- [4] “Xi, S. P., Gu, Y., Zhang, Y. G., Chen, X. Y., Ma, Y. J., Zhou, L., ... & Fang, J. X. (2016). InGaAsP/InP photodetectors targeting on 1.06 μm wavelength detection. *Infrared Physics & Technology*, 75, 65-69.”.
- [5] “Rutz, F., Bächle, A., Aidam, R., Niemasz, J., Bronner, W., Zibold, A., & Rehm, R. (2019, May). InGaAs SWIR photodetectors for night vision. In *Infrared Technology and Applications XLV* (Vol. 11002, pp. 202-208). SPIE.”.
- [6] “Besikci, C. (2018). Extended short wavelength infrared FPA technology: status and trends. *Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XV*, 10540, 110-125.”.
- [7] “Yuan, H., Meixell, M., Zhang, J., Bey, P., Kimchi, J., & Kilmer, L. C. (2012, May). Low dark current small pixel large format InGaAs 2D photodetector array development at Teledyne Judson Technologies. In *Infrared Technology and Applications XXXVIII* (Vol. 8353, pp. 108-115). SPIE.”.
- [8] “Verdun, M., Beaudoin, G., Portier, B., Bardou, N., Dupuis, C., Sagnes, I., ... & Pelouard, J. L. (2016). Dark current investigation in thin PiN InGaAs photodiodes for nano-resonators. *Journal of Applied Physics*, 120(8), 084501.”.
- [9] “Li, X., Li, T., Yu, C., Tang, H., Deng, S., Shao, X., ... & Gong, H. (2017,

September). Extended wavelength InGaAs SWIR FPAs with high performance. In *Infrared Sensors, Devices, and Applications VII* (Vol. 10404, pp. 55-61). SPIE.”.

- [10] “D’Hondt, M., Moerman, I., & Demeester, P. (1998). Dark current optimisation for MOVPE grown 2.5 μm wavelength InGaAs photodetectors. *Electronics Letters*, 34(9), 910-912.”.
- [11] “Du, B., Gu, Y., Chen, X. Y., Ma, Y. J., Shi, Y. H., Zhang, J., & Zhang, Y. G. (2018). Improved performance of high indium InGaAs photodetectors with InAlAs barrier. *Japanese Journal of Applied Physics*, 57(6), 060302.”.
- [12] “Rogalski, A., & Martyniuk, P. (2006). InAs/GaInSb superlattices as a promising material system for third generation infrared detectors. *Infrared Physics & Technology*, 48(1), 39-52.”.
- [13] *Kittel, Charles, and Paul McEuen. Introduction to solid state physics. John Wiley & Sons, 2018.*
- [14] “Şimşek, İ. (2021) Safir Alttaş Üzerine Si Katkılı Aln İnce Filmlerin Epitaksiyel Büyütülmesi Ve Yapısal Karakterizasyonu.”.
- [15] “Narayan, R. (2018). *Encyclopedia of biomedical engineering*. Elsevier.”.
- [16] “Demir, İ. (2011). Safir alttaşlar üzerine büyütülen GaN epitaksiyel tek kristal ince filmlerin XRD yöntemi ile incelenmesi. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi), Sivas.”.
- [17] “Zhao, L., Sun, J. G., Guo, Z. X., & Miao, G. Q. (2013). TEM dislocations characterization of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ (100)($x=0.82$) on mismatched InP substrate. *Materials Letters*, 106, 222-224.”.
- [18] “Ling, S. J., Moebis, W., & Sanny, J. (2016). 16.5 The Electromagnetic Spectrum. *University Physics Volume 2*.”.
- [19] “Erdoğan, M. (2022). Development and Characterization of a Megapixel Swir Imaging System (Doctoral dissertation, Bilkent Üniversitesi (Turkey)).”.
- [20] “Berman, P. R., & Coughlin. (2018). *Introductory Quantum Mechanics*. Cham: Springer International Publishing AG.”.

- [21] “Popescu, G. (2019). Principles of Biophotonics, Volume 2: Light emission, detection, and statistics. IOP Publishing.”
- [22] “Daniels, A. (2007). Field guide to infrared systems. SPIE field guides.”
- [23] “Rogalski, A. (2002). Infrared detectors: an overview. *Infrared physics & technology*, 43(3-5), 187-210.”
- [24] “Wu, Z., Zhai, Y., Kim, H., Azoulay, J. D., & Ng, T. N. (2018). Emerging design and characterization guidelines for polymer-based infrared photodetectors. *Accounts of chemical research*, 51(12), 3144-3153.”
- [25] “Guan, X., Yu, X., Periyagounder, D., Benzigar, M. R., Huang, J. K., Lin, C. H., ... & Wu, T. (2021). Recent progress in short-to long-wave infrared photodetection using 2D materials and heterostructures. *Advanced Optical Materials*, 9(4), 2001708.”
- [26] “Zhang, Y. G., Gu, Y., Shao, X. M., Li, X., Gong, H. M., & Fang, J. X. (2018). Short-wave infrared InGaAs photodetectors and focal plane arrays. *Chinese Physics B*, 27(12), 128102.”
- [27] “Hashagen, J. (2015). Seeing Beyond the Visible: Short-wave infrared (SWIR) cameras offer new application fields in machine vision. *Optik & Photonik*, 10(3), 34-37.”
- [28] “Riza, N. A. (2022, July). First Demonstration of Silicon Wafer Inspection Capability using Visible to Short-Wave Infrared CAOS Camera. In *Applied Industrial Optics: Spectroscopy, Imaging and Metrology* (pp. T1A-4). Optica Publishing Group.”
- [29] “Rutz, F., Aidam, R., Bächle, A., Niemasz, J., Zibold, A., Schepperle, M., & Rehm, R. (2019, October). Low-light-level SWIR photodetectors based on the InGaAs material system. In *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XVI* (Vol. 11159, pp. 29-35). SPIE.”
- [30] “DeWames, R. E., & Schuster, J. (2020, January). Performance and limitations of NIR and extended wavelength eSWIR InP/InGaAs image sensors. In *Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XVII* (Vol. 11288, pp. 89-102). SPIE.”

- [31] “Simoneau, P., Bellisario, C., Derelle, S., Deschamps, J., Henry, D., & Langlois, S. (2017, September). Nightglow studies at Onera for night-vision applications. In *Optics in Atmospheric Propagation and Adaptive Systems XX* (Vol. 10425, pp. 94-100). SPIE.”
- [32] “Breiter, R., Benecke, M., Eich, D., Figgemeier, H., Ihle, T., Sieck, A., ... & Wendler, J. (2018, May). Extended SWIR imaging for targeting and reconnaissance. In *Infrared Technology and Applications XLIV* (Vol. 10624, pp. 11-21). SPIE.”
- [33] “Brännlund, D. B. A. B. C., Gustaffson, M. O. D., & Olsson, S. (2019). Detection and localization of light flashes using a single pixel camera in SWIR.”
- [34] “Park, S., Jeon, J., More, V. M., Lee, R. S., Seo, Y., Kim, M., ... & Lee, S. J. (2022). Monolithic two-color short-wavelength InGaAs infrared photodetectors using InAsP metamorphic buffers. *Applied Surface Science*, 581, 152421.”
- [35] “Carr, J. A., Franke, D., Caram, J. R., Perkinson, C. F., Saif, M., Askoxylakis, V., ... & Bruns, O. T. (2018). Shortwave infrared fluorescence imaging with the clinically approved near-infrared dye indocyanine green. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.”
- [36] “Li, N., Mahalingavelar, P., Vella, J. H., Leem, D. S., Azoulay, J. D., & Ng, T. N. (2021). Solution-processable infrared photodetectors: materials, device physics, and applications. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 146, 100643.”
- [37] “Cao, F., Liu, L., & Li, L. (2022). Short-wave infrared photodetector. *Materials Today*.”
- [38] “Rogalski, A. W., Kopytko, M. E., & Martyniuk, P. M. (2018). Antimonide-based infrared detectors: a new perspective. *SPIE-The International Society for Optics and Photonics*.”
- [39] “Hui, R. (2019). *Introduction to fiber-optic communications*. Academic Press.”

- [40] “Asar, T. (2014). InGaAs Kızılötesi Fotodedektör Üretimi ve Karakterizasyonu (Doctoral dissertation, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 6-7).”
- [41] “Song, J., Zhao, X., Wu, X., & Xuan, R. (2019). High rectification efficiency direct bandgap Ge $1-x$ Sn x Schottky diode for microwave wireless power transfer. *Applied Physics A*, 125, 1-10.”
- [42] “Huntington, A. (2020). InGaAs Avalanche Photodiodes for Ranging and Lidar. Woodhead Publishing.”
- [43] “Kasap, S. O. (2013). Optoelectronics and photonics. Pearson Education UK.,” 2013.
- [44] “Bansal, M., & Maiya, R. R. (2020). Phototransistor: the story so far. *Journal of Electronics*, 2(04), 202-210.”
- [45] “Öztürk, A. (2011). Kızılötesi dedektör teknolojilerinin incelenmesi ve kritik parametrelerin dedektör verimliliği açısından analizi (Master’s thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).”
- [46] “Chen, J., Wang, J., Li, X., Chen, J., Yu, F., He, J., ... & Lu, W. (2022). Recent progress in improving the performance of infrared photodetectors via optical field manipulations. *Sensors*, 22(2), 677.”
- [47] “Miao, Y., Wang, G., Kong, Z., Xu, B., Zhao, X., Luo, X., ... & Radamson, H. H. (2021). Review of Si-based GeSn CVD growth and optoelectronic applications. *Nanomaterials*, 11(10), 2556.”
- [48] “Lin, G., Zhao, Y., Yu, K., Veeramalai, C. P., Ma, R., Zheng, J., ... & Li, C. (2023). Dramatic increase in SWIR detection for GeSn strip detector with graphene hybrid structure. *Journal of Alloys and Compounds*, 945, 169287.”
- [49] “Necati, I. (2022). Active surface passivation for SWIR InGaAs photodetectors (Master’s thesis, Middle East Technical University).”
- [50] “Çırçır, K. (2017). High performance short wavelength infrared focal plane arrays (Master’s thesis, Middle East Technical University).”
- [51] “Rogalski, A., Martyniuk, P., & Kopytko, M. (2019). Type-II superlattice

- photodetectors versus HgCdTe photodiodes. *Progress in Quantum Electronics*, 68, 100228.,” *Elsevier*.
- [52] “Steenbergen, E. H., Morath, C. P., Maestas, D., Jenkins, G. D., & Logan, J. V. (2019, May). Comparing II-VI and III-V infrared detectors for space applications. In *Infrared Technology and Applications XLV* (Vol. 11002, pp. 299-307). SPIE.”.
- [53] “Plis, E. A. (2014). InAs/GaSb type-II superlattice detectors. *Advances in Electronics*, 2014.,” *downloads.hindawi.com*.
- [54] “Razeghi, M., Dehzangi, A., & Li, J. (2021). Multi-band SWIR-MWIR-LWIR Type-II superlattice based infrared photodetector. *Results in Optics*, 2, 100054.”.
- [55] “Du, B., Gu, Y., Zhang, Y. G., Chen, X. Y., Xi, S. P., Ma, Y. J., ... & Gong, H. M. (2016). Effects of continuously or step-continuously graded buffer on the performance of wavelength extended InGaAs photodetectors. *Journal of Crystal Growth*, 440, 1-5.”.
- [56] “Chen, X. Y., Gu, Y., Zhang, Y. G., Ma, Y. J., Du, B., Zhang, J., ... & Zhu, Y. (2018). Growth temperature optimization of GaAs-based In_{0.83}Ga_{0.17}As on In_xAl_{1-x}As buffers. *Journal of Crystal Growth*, 488, 51-56.”.
- [57] “Demir, İ. (2017). In_xGa_{1-x}As/In_yAl_{1-y}As Tabanlı Kuantum Çağlayan Lazer Yapılarının Büyütülmesi ve Karakterizasyonu. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi (Doktora Tezi), Sivas.”.
- [58] “Wang, S., Ma, Y., Liu, Y., Wang, H., Deng, S., Gu, Y., ... & Gong, H. (2022). Dislocation Evolvement in Metamorphic In_{0.83}Ga_{0.17}As/InP Photodetectors Through Ex-Situ Rapid Thermal Annealing. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 58(3), 1-7.”.
- [59] “Zhang, J., Chen, X. Y., Ma, Y. J., Gong, Q., Shi, Y. H., Yang, N. N., ... & Zhang, Y. G. (2019). Optimization of In_{0.6}Ga_{0.4}As/InAs electron barrier for In_{0.74}Ga_{0.26}As detectors grown by molecular beam epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, 512, 84-89.,” *Elsevier*.
- [60] “Gu, Y., Huang, W., Liu, Y., Ma, Y., Zhang, J., Gong, Q., ... & Gong, H.

- (2020). Effects of buffer doping on the strain relaxation of metamorphic InGaAs photodetector structures. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 120, 105281.”.
- [61] “Chen, X. Y., Gu, Y., Zhang, Y. G., Ma, Y. J., Du, B., Shi, H. Y., ... & Zhu, Y. (2018). In_{0.83}Ga_{0.17}As photodetectors with different doping concentrations in the absorption layers. *Infrared Physics & Technology*, 89, 381-386.”.
- [62] “Gu, Y., Zhang, Y. G., Wang, K., Fang, X., Li, C., Zhou, L., ... & Li, H. (2013). Effects of growth temperature and buffer scheme on characteristics of InP-based metamorphic InGaAs photodetectors. *Journal of crystal growth*, 378, 65-68.”.
- [63] “Xi, S. P., Gu, Y., Zhang, Y. G., Chen, X. Y., Zhou, L., Li, A. Z., & Li, H. (2015). Effects of continuously graded or step-graded In_xAl_{1-x}As buffer on the performance of InP-based In_{0.83}Ga_{0.17}As photodetectors. *Journal of Crystal Growth*, 425, 337-340.”.
- [64] “Albo, A., Fekete, D., & Bahir, G. (2019). The opportunity of using InGaAsN/AlGaAs quantum wells for extended short-wavelength infrared photodetection. *Infrared Physics & Technology*, 96, 68-76.”.
- [65] “Didchenko, R., Alix, J. E., & Toeniskoetter, R. H. (1960). Reactions of phosphine with trimethylindium. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*, 14(1-2), 35-37.”.
- [66] “Cheng, K. Y. (2020). III–V Compound Semiconductors and Devices.,” 2020.
- [67] “Kizilbulut, A. A. (2020). 9xx-10xx nm dalga boyunda ışığı yüksek güçlü lazer diyot yapısının tasarımı ve mocvd yöntemi kullanılarak epitaksiyel tabakaların büyütülmesi.”.
- [68] “Bulut, A. (2010). Epitaksiyel Tek Kristal İnce Filmlerin XRD Yöntemi İle İncelenmesi. Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalı (Yüksek Lisans Tezi), 108s, Sivas.”.
- [69] “Altun, D. (2017). Safir Alttaş Üzerine Mocvd İle Büyütülen Mavi Led Yapısının Elektriksel Karakterizasyonu. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

(Doktora Tezi), Sivas.”.

- [70] “Peter, Y. U., and Manuel Cardona. Fundamentals of semiconductors: physics and materials properties. Springer Science & Business Media, 2010.”.
- [71] “Vallikkodi, M. (2018). Synthesis, growth and characterization of piperazinium P-aminobenzoate and piperazinium P-chlorobenzoate nonlinear optical single crystals. Alagappa University, Karaikudi, India.”.
- [72] “Nahory, R. E., Pollack, M. A., Johnston Jr, W. D., & Barns, R. L. (1978). Band gap versus composition and demonstration of Vegard’s law for $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ lattice matched to InP. Applied Physics Letters, 33(7), 659-661.”.