

InGaAs
KIZILÖTESİ FOTODEDEKTÖR
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Tarık ASAR

DOKTORA TEZİ
FİZİK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NİSAN 2014
ANKARA

... *Aileme* ...

Tarık ASAR tarafından hazırlanan “InGaAs KIZILÖTESİ FOTODEDEKTÖR ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU” adlı bu tezin DOKTORA TEZİ olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK
Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Fizik Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY
Elektrik-Elektronik Müh. Anabilim Dalı,
Bilkent Üniversitesi

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK
Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet KASAP
Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Tofig MEMMEDLİ
Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Aytunç ATEŞ
Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı,
Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi : 08 / 04 / 2014

Bu tez ile Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu DOKTORA derecesini onaylamıştır.

Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Tarık ASAR

InGaAs
KIZILÖTESİ FOTODEDEKTÖR
ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

(Doktora Tezi)

Tarık ASAR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2014

ÖZET

Bu tez çalışmasında, InGaAs tabanlı kızılötesi fotodedektörler üretilerek, karakterize edildi. Dedektör üretiminde kullanılan, InGaAs/InP yarıiletken yapıları moleküler demet epitaksi (MBE) yöntemi ile büyütüldü. Büyütülen InGaAs/InP yapılarının yapısal özellikleri yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD) ve ikincil iyon kütle spektropisi (SIMS) analizleri ile belirlendi. Oda sıcaklığında, soğutucu kullanmaksızın, yüksek performansla çalışabilen, metal-yarıiletken-metal (MSM), tekli ve 64x64, 128x128, 320x256 formatlı p-i-n InGaAs/InP kızılötesi fotodedektörlerin tasarımları yapıldı. Bu tasarımlara uygun prototip kızılötesi fotodedektör üretimleri gerçekleştirildi. Fotodedektörlerin çalışma özelliklerini belirleyen çıktı parametreleri, Hall Etkisi ve Akım-Gerilim ölçüm sistemleri ile yapılan analizler sonucunda belirlendi. MSM aygıtlarının taşıyıcı ömrü, mobilite, difüzyon uzunluğu, idealite faktörü, doyum akımı ve bariyer yüksekliği değerleri yarı-deneysel formüller ve modellemeler kullanılarak elde edildi. InGaAs/InP tekli ve dizinli kızılötesi fotodedektörlerin karanlık akım, aşağı kırılma voltajı, çalışma dalgaboyu, kızılötesi/uzak kızılötesi kontrast, dedektivite ve gürültü eşiti güç değerleri belirlendi. Bu verilere ek

olarak, InGaAs/InP p-i-n dizinli kızılötesi fotodedektörlerin, 1 KHz'deki spektral gürültüleri ve dizinleri oluşturan piksellerin çalışma olasılıkları bulundu. 320x256 formatlı InGaAs/InP p-i-n kızılötesi fotodedektör dizinleri kullanılarak kızılötesi foton kamerası geliştirildi ve yüksek çözünürlükte görüntüler elde edildi.

Kızılötesi fotodedektörlerin çıktı parametreleri incelendiğinde, satışa sunulan fotodedektörlerin özelliklerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bu durumun, ülkemiz teknolojisinin, milli bilginin, becerinin ve tecrübenin gelişmesi açısından önemli olduğu düşünülmektedir.

Bilim Kodu : 202.1.147

Anahtar Kelimeler : MBE, SIMS, InGaAs, Kızılötesi Fotodedektör

Sayfa Adeti : 176

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

**THE FABRICATION AND CHARACTERIZATION
OF
InGaAs INFRARED PHOTODETECTOR**

(Ph. D. Thesis)

Tarık ASAR

**GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE**

April 2014

ABSTRACT

In this thesis, InGaAs based infrared photodetectors were fabricated and characterized. Molecular beam epitaxy (MBE) technique was used to growth InGaAs/InP structures for photodetector fabrication. The structural analyses of the structures were carried out by means of high resolution X-ray diffraction (HRXRD) and secondary ion mass spectroscopy (SIMS) analyses. The MSM, single and 64x64, 128x128, 320x256 arrays p-i-n types of prototype uncooling InGaAs/InP infrared photodetectors which work with high performance at room temperature were designed and then fabricated. The output parameters which determine the operating characteristics of the photodetectors were obtained by means of Hall Effect and Current-Voltage measurements. The values of carrier density, mobility, diffusion length, ideality factor, saturation current and barrier height were determined for the MSM devices by using semi-empirical formulas and models. The values of dark current, break-down voltage, operating wavelength, infrared/far infrared contrast, detectivity and noise equivalent power were obtained for the InGaAs/InP single and array infrared photodetectors. In addition, the values of spectral noise at 1 KHz and working possibility of the pixels were found for the InGaAs/InP p-i-n array infrared

photodetectors. The infrared photon camera was developed by using the 320x256 array InGaAs/InP p-i-n infrared photodetector and high resolution images were taken by this infrared photon camera.

When the output parameters of the prototype infrared photodetectors are examined, it is seen that these parameters are quite close to the offered for sale infrared photodetector specifications. This situation is thought to be important for the development of our country's technology, national knowledge and experience.

Science Code : 202.1.147
Keywords : MBE, SIMS, InGaAs, Infrared Photodetector
Page : 176
Supervisor : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

TEŞEKKÜR

Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini hiç esirgemeyen, bana olan inancını ve güvenini hiç kaybetmeyen Anneme ve Babama sonsuz teşekkür ederim.

Hayatıma eşlik eden, sevgili eşim Arş. Gör. Dr. Yasemin ŞAFAK ASAR'a çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca bana her türlü imkânı sağlayan, yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi (Gazi FOTONİK) Müdürü değerli danışman hocam Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e çok teşekkür ederim.

Fotodedektörlerin üretilmesine ve karakterize edilmesine imkân sağlayan Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM) Direktörü Prof. Dr. Ekmel ÖZBAY'a ve beraber çalıştığımız NANOTAM araştırma mühendislerine çok teşekkür ederim.

Birlikte uzun yıllar çalıştığımız, kıymetli hocam Prof. Dr. Tofig MEMMEDLİ'ye desteklerini hiçbir zaman esirgemediği için çok teşekkür ederim.

Benden bilgisini ve desteğini hiç esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Mehmet KASAP'a teşekkürlerimi sunarım.

Beraber gece-gündüz demeden çalıştığımız Gazi FOTONİK çalışanlarına ve öğrencilerine gönülden teşekkür ederim.

Bu tez, Kalkınma Bakanlığı'nın 2011K120290 numaralı projesi tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xv
RESİMLERİN LİSTESİ	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxi
1. GİRİŞ	1
2. KIZILÖTESİ TEMEL BİLGİLER	4
2.1. Kızılötesi Işıma.....	4
2.1.1. Karacisim ışıması	4
2.1.2. Kızılötesi atmosferik pencere.....	6
2.2. Kızılötesi Dedektörler	7
2.2.1. Kızılötesi termal dedektörler	8
2.2.2. Kızılötesi fotodedektörler.....	10
2.2.3. InGaAs / InP kızılötesi fotodedektörler	16
2.3. Kızılötesi Dedektör Parametreleri	18
2.3.1. Fotocevap (Responsivity - R).....	18
2.3.3. Sinyal - Gürültü oranı (SNR)	19
2.3.4. Gürültü Eşiti Güç (Noise Equivalent Power – NEP)	20
2.3.5. Dedektivite (<i>D</i>).....	21
2.4. Odak Düzlem Matrisi (Focal Plane Array – FPA).....	21
2.4.1. Monolitik FPA.....	22

Sayfa

2.4.2. Hibrit FPA	23
2.4.3. Monolitik ve Hibrit FPA karşılaştırması	24
3. DENEYSEL TEKNİKLER.....	25
3.1. InGaAs/InP Yarıiletkenleri Büyütme Yöntemi	25
3.1.1. Moleküler Demet Epitaksi (MBE)	25
3.2. InGaAs/InP Yarıiletkenlerinin Karakterizasyon Teknikleri.....	27
3.2.1. Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD)	27
3.2.3. Hall etkisi ölçüm sistemi (HMS).....	30
3.2.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)	31
3.3. InGaAs/InP Kızılötesi Fotodedektörlerin Fabrikasyon Adımları	32
3.3.1. Numune kesimi ve temizliği.....	33
3.3.2. p ⁺ kontak yapılması	33
3.3.3. Aygıt adacığı aşındırması	33
3.3.4. n ⁺ kontak yapılması	33
3.3.5. Numunenin tavlama	34
3.3.6. Numune yüzeyine dielektrik malzeme kaplanması.....	34
3.4. Fotodedektör Parametre Analiz Metodları	34
3.4.1. Akım-Voltaj (I-V) karakteristiği ölçümü	35
3.4.2. Spektral fotoakım ölçümü	37
3.4.3. Düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümü	39
3.4.4. Dizin verim ölçümü.....	40
4. InGaAs/InP MSM KIZILÖTESİ PROTOTİP FOTODEDEKTÖR ÜRETİMİ ve KARAKTERİZASYONU	43
4.1. InGaAs/InP MSM Kızılötesi Fotodedektörlere Giriş.....	43
4.2. InGaAs/InP MSM Kızılötesi Fotodedektör Üretimi	44
4.3. InGaAs/InP MSM Kızılötesi Fotodedektör Karakterizasyonu	47
4.4. InGaAs/InP MSM Kızılötesi Fotodedektör Parametreleri	60

Sayfa

5. InGaAs/InP TEKLİ KIZILÖTESİ PROTOTİP FOTODEDEKTÖR ÜRETİMİ ve KARAKTERİZASYONU	61
5.1. InGaAs/InP Tekli Kızılötesi Fotodedektörlere Giriş.....	61
5.2. InGaAs/InP Kızılötesi Fotodedektör Yapısının Tasarlanması	61
5.3. InGaAs/InP Kızılötesi Fotodedektör Yapısının Kuantum Verim Simülasyonları.....	62
5.4. InGaAs/InP Tekli Kızılötesi Fotodedektör İçin Fotomaske Tasarımı	64
5.5. InGaAs/InP Kızılötesi Fotodedektör Yapısının Büyütülmesi	67
5.6. InGaAs/InP Tekli Kızılötesi Prototip Fotodedektör Üretimi	69
5.7. InGaAs/InP Tekli Kızılötesi Prototip Fotodedektörün Paketlenmesi	79
5.8. InGaAs/InP Tekli Kızılötesi Prototip Fotodedektörün Karakterizasyonu	81
5.8.1. Akım-Voltaj karakteristiği ölçümü	82
5.8.2. Spektral fotoakım ölçümü	85
5.8.3. Düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümü	89
5.9. InGaAs/InP Tekli Kızılötesi Prototip Fotodedektör Parametreleri	95
6. InGaAs/InP p-i-n KIZILÖTESİ FOTODEDEKTÖR DİZİNLERİNİN (InGaAs/InP IP FPA) ÜRETİMİ ve KARAKTERİZASYONU.....	97
6.1. InGaAs/InP p-i-n Kızılötesi Fotodedektör Dizinlerine Giriş	97
6.2. InGaAs/InP p-i-n Kızılötesi Fotodedektör Dizinlerinin Tasarımı.....	98
6.2.1. Epitaksiyel yapı tasarımı	98
6.2.2. Fotomaske tasarımı	99
6.3. InGaAs/InP p-i-n Kızılötesi Fotodedektör Yapısının Büyütülmesi.....	104
6.4. InGaAs/InP p-i-n Kızılötesi Fotodedektör Dizinlerinin (FPA) Üretimi.....	106
6.5. 64 x 64 Formatlı InGaAs/InP p-i-n Kızılötesi Fotodedektör Dizininin (FPA) Karakterizasyonu	113

Sayfa

6.5.1. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA Akım-Voltaj karakteristiği ölçümü	113
6.5.2. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA spektral fotoakım ölçümü	115
6.5.3. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümü	118
6.5.4. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA dizin verim ölçümü.....	121
6.5.5. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA Parametreleri.....	123
6.6. 128 x 128 Formatlı InGaAs/InP p-i-n Kızılötesi Fotodedektör Dizininin (FPA) Karakterizasyonu	123
6.6.1. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA Akım-Voltaj karakteristiği ölçümü	124
6.6.2. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA spektral fotoakım ölçümü	125
6.6.3. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümü	128
6.6.4. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA dizin verim ölçümü.....	130
6.6.5. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA Parametreleri.....	132
6.7. 320 x 256 Formatlı InGaAs/InP p-i-n Kızılötesi Fotodedektör Dizininin (FPA) Karakterizasyonu	133
6.7.1. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA Akım-Voltaj karakteristiği ölçümü	133
6.7.2. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA spektral fotoakım ölçümü	135
6.7.3. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümü	138
6.7.4. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA dizin verim ölçümü.....	140
6.7.5. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA Parametreleri.....	142
7. 320x256 FORMATLI InGaAs/InP p-i-n KIZILÖTESİ KAMERA	143
7.1. InGaAs p-i-n IP FPA İndiyum Bağlantı Metalizasyonu	143
7.2. InGaAs p-i-n IP FPA Kesimi	145

Sayfa

7.3. Okuma Devresi (ROIC) İndiyum Bağlantı Metalizasyonu	145
7.4. InGaAs Kızılötesi Kamera Bağlantıları	147
7.5. InGaAs Kızılötesi Kamera Görüntüleri.....	149
8. SONUÇLAR	152
KAYNAKLAR	155
ÖZGEÇMİŞ	166

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Kızılötesi bölgelerin dağılımı	7
Çizelge 2.2. Termal dedektörlerin ve fotodedektörlerin avantajları ve dezavantajları	8
Çizelge 4.1. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapılarının BEP değerleri ve Si sıcaklıkları.....	44
Çizelge 4.2. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapısının örgü sabiti, tanecik boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve zorlanma değerleri.....	49
Çizelge 4.3. InGaAs/InP MSM aygıtlarının elektriksel parametreleri.....	55
Çizelge 4.4. MSM aygıtlarının taşıyıcı yoğunluğu, mobilite, difüzyon katsayısı, taşıyıcı ömrü ve difüzyon uzunluğu verileri	59
Çizelge 5.1. InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısı için sıcaklık ve akı değerleri.....	69
Çizelge 5.2. Çinko difüzyonundan sonra InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinin tabaka kalınlıkları.....	74
Çizelge 6.1. InGaAs/InP IP FPA üretiminde kullanılacak yapı.....	99
Çizelge 6.2. InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısı için sıcaklık ve akı değerleri.....	106
Çizelge 6.3. -500 mV polarlama geriliminde 64 x 64 formatlı kızılötesi fotodedektör piksellerinin fotocevap akım ölçümleri	122
Çizelge 6.4. -500 mV polarlama geriliminde 128 x 128 formatlı kızılötesi fotodedektör piksellerinin fotocevap akım ölçümleri	131
Çizelge 6.5. -500 mV polarlama geriliminde 320 x 256 formatlı kızılötesi fotodedektör piksellerinin fotocevap akım ölçümleri	141

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Sıcaklığa ve dalgaboyuna bağlı karacisim ışıması	5
Şekil 2.2. Atmosferik pencere	6
Şekil 2.3. Bolometrenin şematik gösterimi	9
Şekil 2.4. Yarıiletkende optik uyarılma (a) Bandtan banda uyarılma (intrinsic) (b) Katkı seviyesinden uyarılma (extrinsic)	11
Şekil 2.5. Fotoiletken dedektör	12
Şekil 2.6. p-n eklem fotodedektörün şematik gösterimi (a) p-n eklem yapısı (b) enerji-bant diyagramı (c) elektrik alanı (d) akım-gerilim karakteristikleri	13
Şekil 2.7. p-i-n fotodedektörün (a) yapısı (b) enerji bant diyagramı (c) taşıyıcı oluşum özellikleri (d) elektrik alan durumu	14
Şekil 2.8. Schottky engelli fotodedektörün şematik gösterimi	15
Şekil 2.9. MSM fotodedektörün (a) yandan görünümü (b) üstten görünümü (c) enerji bat yapısı (d) akım-gerilim karakteristikleri	16
Şekil 2.10. InGaAs/InP p-i-n fotodedektör yapısı.....	17
Şekil 2.11. Monolitik FPA (a) Tamamen silikon yapı (b) Silikon üzerine büyütülmüş yapı (c) Silikon olmayan yapı (HgCdTe CCD gibi)	22
Şekil 2.12. Hibrit FPA (a) Flip-çip bağlama tekniği (b) Kovuk (loophole) tekniği	24
Şekil 4.1. MSM yapılarının (a) yandan şematik gösterimi (b) enerji bant diyagramı	46

Şekil	Sayfa
Şekil 4.2. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapılarının (004) simetrik düzlemlerde ω -2 θ taraması.....	48
Şekil 4.3. PD1 ($\text{In}_{0.541}\text{Ga}_{0.459}\text{As}/\text{InP}$) yapısının SIMS profili.....	50
Şekil 4.4. PD2 ($\text{In}_{0.543}\text{Ga}_{0.457}\text{As}/\text{InP}$) yapısının SIMS profili.....	51
Şekil 4.5. PD3 ($\text{In}_{0.5575}\text{Ga}_{0.4425}\text{As}/\text{InP}$) yapısının SIMS profili	51
Şekil 4.6. InGaAs/InP yapılarının In ve Ga SIMS derinlik profilleri	52
Şekil 4.7. MSM aygıtlarının oda sıcaklığındaki yarı-logaritmik I-V grafiği	54
Şekil 4.8. MSM aygıtlarının sıcaklığa bağlı taşıyıcı yoğunluğu grafiği	56
Şekil 4.9. MSM aygıtlarının sıcaklığa bağlı mobilite grafiği.....	57
Şekil 4.10. MSM aygıtlarının taşıyıcı ömrü (τ) - taşıyıcı yoğunluğu (N) grafiği	58
Şekil 5.1. Tasarlanan InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısı	62
Şekil 5.2. Tasarlanan InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısının kuantum verimi- dalgaboyu simülasyon grafiği.....	63
Şekil 5.3. Tasarlanan InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısının ve 385 nm kalınlıklı dielektrik malzeme (Si_3N_4) kaplamasının kuantum verimi- dalgaboyu simülasyon grafiği.....	63
Şekil 5.4. Çinko difüzyon maskesi.....	64
Şekil 5.5. p-metali maskesi	65
Şekil 5.6. Yansıma önleyici malzeme maskesi	66
Şekil 5.7. Tamamlanmış bir fotomaskenin görünümü	67
Şekil 5.8. Si_3N_4 kaplanmış InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesi	70
Şekil 5.9. Fotodirenç tabakası kaplanmış InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesi.....	71
Şekil 5.10. Si_3N_4 tabakasının yüzeyden uzaklaştırılmaya hazırlanmış hali	72
Şekil 5.11. Çinko difüzyonuna hazır olan InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesi.....	72
Şekil 5.12. 12 x 12 cm^2 'lik InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesi	73
Şekil 5.13. Çinko difüz ettirilmiş InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesi	73
Şekil 5.14. Si_3N_4 tabakası kaldırılmış InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesi	74
Şekil 5.15. InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinin kesilmesi.....	75

Şekil	Sayfa
Şekil 5.16. p^+ kontak metalizasyonu tamamlanmış InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinin şematik gösterimi	75
Şekil 5.17. İzolasyon yapılan InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör	76
Şekil 5.18. Tel bağlamaya hazır InGaAs/InP kızılötesi fotodedektörün şematik gösterimi	77
Şekil 5.19. n^+ kontak metal kaplaması tamamlanan numunenin şematik gösterimi	78
Şekil 5.20. 88 adet tekli InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör.....	78
Şekil 5.21. InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün karanlıktaki I-V grafiği	82
Şekil 5.22. InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün karanlıktaki ve ışık altındaki I-V grafiği.....	83
Şekil 5.23. InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün R-V grafiği.....	84
Şekil 5.24. InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün η -V grafiği	85
Şekil 5.25. Optik güç-Dalgaboyu grafiği	86
Şekil 5.26. Fotodedektörün -3V gerilim altında Fotocevap-Dalgaboyu grafiği.....	87
Şekil 5.27. Fotodedektörün -8V gerilim altında Fotocevap-Dalgaboyu grafiği.....	88
Şekil 5.28. Fotodedektörün Kuantum Verimi-Dalgaboyu grafiği	89
Şekil 5.29. Fotodedektörün gürültü gücü-frekans grafiği	90
Şekil 5.30. Fotodedektörün spektral gürültü-frekans grafiği	91
Şekil 5.31. Data analiz programında çizilen I-V grafiği	92
Şekil 6.1. Piksel boyutları ve periyodu	100
Şekil 6.2. Piksel aygıt adacığı ve p kontak adımı deseninin fotomaske çizimi	101
Şekil 6. 3. n kontak desenini gösteren fotomaske çizimi.	101
Şekil 6.4. In bağlantı metali deseni	102
Şekil 6.5. Fotomaskede kullanılan hizlama işaretleri.....	102
Şekil 6.6. TLM desenleri.....	103
Şekil 6.7. Test fotodedektörleri fotomaske çizimi	103
Şekil 6.8. Yonganın fotomaske çizimi	104

Şekil	Sayfa
Şekil 6.9. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik karanlık ve 1540 nm aydınlanma değerinde I-V karakteristiği.	114
Şekil 6.10. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik kırılma gerilimi grafiği.	115
Şekil 6.11. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik fotocevap-dalagaboyu grafiği.	116
Şekil 6.12. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için kuantum verimi-dalgaboyu grafiği.	117
Şekil 6.13. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için fotoakım-gerilim grafiği.	118
Şekil 6.14. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik gürültü karakteristiği.	119
Şekil 6.15. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik karanlık ve 1540 nm aydınlanma değerinde I-V karakteristiği.	124
Şekil 6.16. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik kırılma gerilimi grafiği.	125
Şekil 6.17. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik fotocevap-dalagaboyu grafiği.	126
Şekil 6.18. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için kuantum verimi-dalgaboyu grafiği.	127
Şekil 6.19. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için fotoakım-gerilim grafiği.	128
Şekil 6.20. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik gürültü karakteristiği.	129
Şekil 6.21. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik karanlık ve 1540 nm aydınlanma değerinde I-V karakteristiği.	134
Şekil 6.22. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik kırılma gerilimi grafiği.	134
Şekil 6.23. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik fotocevap-dalagaboyu grafiği.	136
Şekil 6.24. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için kuantum verimi-dalgaboyu grafiği.	136
Şekil 6.25. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için fotoakım-gerilim grafiği.	137
Şekil 6.26. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik gürültü karakteristiği.	138

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. V80H model MBE sistemi.....	26
Resim 3.2. Bruker D8 Discover cihazının genel görünümü	28
Resim 3.3. Hiden Analytical SIMS Workstation sistemi.....	29
Resim 3.4. Lakeshore 7700 serisi Yüksek Empedans Hall etkisi ölçüm sistemi	
(1) He tüpü	
(2) Kapalı devre He soğutma ünitesi	
(3) Mekanik pompa destekli turbo moleküler vakum pompası	
(4) Kryostat	
(5) Elektromıknatıs	
(6) Elektromıknatıs güç kaynağı	
(7) Bilgisayar	
(8) Sıcaklık kontrol ünitesi	
(9) Su soğutma sistemi	31
Resim 3.5. Taramalı elektron mikroskobu.....	32
Resim 3.6. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ kızılötesi fotodedektörün ölçümlerinde kullanılan cihazlar	
(1) Sonda İstasyonu	
(2) Ayarlanabilir Lazer Kaynak	
(3) Yarıiletken Parametre Analizörü.....	35
Resim 3.7. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ kızılötesi fotodedektörün n^+ ve p^+ bölgelerine yapılan kontaklar	36
Resim 3.8. Fiber sonda.....	36
Resim 3.9. Ayarlanabilir lazer kaynak.....	37
Resim 3.10. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ kızılötesi fotodedektörün spektral ölçümlerinde kullanılan cihazlar	
(1) Tungsten lamba güç kaynağı	
(2) Tungsten lamba	
(3) Tekrenklendirici	
(4) Yarıiletken Parametre Analizörü.....	38
Resim 3.11. Tekrenklendirici çıkışında bulunan odaklayıcı mercek ve fiber optik kablo	39
Resim 3.12. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ kızılötesi fotodedektörün, düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümlerinde kullanılan cihazlar	
(1) Güç kaynağı	
(2) Akım yükselteci	
(3) Sinyal Analizörü	40

Resim	Sayfa
Resim 5.1. p^+ kontak metalizasyonu tamamlanmış InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinin optik mikroskop görüntüsü	76
Resim 5.2. Tel bağlamaya hazır InGaAs/InP kızılötesi fotodedektörün optik mikroskop görüntüsü	77
Resim 5.3. TO5 paket malzemesi üzerine yapıştırılmış InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektör	80
Resim 5.4. Tel bağlantısı yapılmış InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektör.....	80
Resim 5.5. Elektriksel ölçümlere hazır InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektör.....	81
Resim 6.1. p^+ kontak litografisi yapılmış InGaAs/InP IP FPA	108
Resim 6.2. p^+ kontak metali yapılmış InGaAs/InP IP FPA	109
Resim 6.3. Aygıt adacığı litografisi yapılmış InGaAs/InP IP FPA.....	110
Resim 6.4. Aygıt adacığı adımı tamamlanmış InGaAs/InP IP FPA	110
Resim 6.5. n^+ kontak litografisi yapılmış InGaAs/InP IP FPA.....	111
Resim 6.6. n^+ kontak metali yapılmış InGaAs/InP IP FPA	112
Resim 6.7. Tavlama işlemi yapılmış InGaAs/InP IP FPA	113
Resim 7.1. İndiyum bağlantı litografisi yapılmış InGaAs p-i-n IP FPA.....	143
Resim 7.2. İndiyum metalizasyonu tamamlanmış InGaAs p-i-n IP FPA'ın optik mikroskop görüntüsü	144
Resim 7.3. İndiyum metalizasyonu tamamlanmış InGaAs p-i-n IP FPA'ın SEM görüntüsü	144
Resim 7.4. Okuma devresi	145
Resim 7.5. İndiyum bağlantı litografisi yapılmış okuma devresi	146
Resim 7.6. İndiyum metalizasyonu tamamlanmış okuma devresinin SEM görüntüsü.....	147
Resim 7.7. InGaAs p-i-n IP FPA ve okuma devresinin bağlantılarını gösteren SEM görüntüsü.....	148
Resim 7.8. PCB'ye monte edilmiş InGaAs p-i-n IP FPA	149
Resim 7.9. Kızılötesi görüntüleme sistemi	149
Resim 7.10. InGaAs kızılötesi kamera görüntüsü - 1	150
Resim 7.11. InGaAs kızılötesi kamera görüntüsü - 2	150
Resim 7.12. InGaAs kızılötesi kamera görüntüsü - 3	151
Resim 7.13. Camın ve suyun InGaAs kızılötesi kamera görüntüsü.....	151

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
A^*	Richardson Sabiti
$\text{\AA}$	Angstrom
a	Örgü Sabiti
A	Aygıtın Aktif Alanı
Ar	Argon
As	Arsenik
Au	Altın
B	Radiatif Rekombinasyon Katsayısı
Be	Berilyum
c	Vakum Ortamındaki Işık Hızı
D	Dedektivite / Tanecik Boyutu
D^*	Özel Dedektivite
g	Dedektör Kazancı
Ga	Galyum
h	Planck Sabiti
H_2	Hidrojen Molekülü
k	Boltzman sabiti
$k.b.$	Keyfi Birim
I_0	Doyum Akımı
In	İndiyum
L	Difüzyon Uzunluğu
n	İdealite Faktörü
n	Negatif
n^+	Yüksek Katkılı Negatif
N	Azot

Simgeler	Açıklama
N	Hall Taşıyıcı Yoğunluğu
N_2	Azot Molekülü
Ni	Nikel
T	Sıcaklık
θ	X-Işını Demetinin Düzleme Gelme Açısı
O_2	Oksijen Molekülü
O_3	Ozon
p	Pozitif
p^+	Yüksek Katkılı Pozitif
P	Fosfor
R	Fotocevap
R_H	Hall Katsayısı
s	Saniye
Si	Silisyum
W	Watt
x	Alaşım Oranı
Zn	Çinko
σ	Stefan-Boltzmann Sabiti
q	Elektrik Yüğü
Φ	Gelen Foton Akı Yoğunluğu
η	Kuantum Verimi
ρ	Özdirenç
δ	Dislokasyon Yoğunluğu
Φ_B	Bariyer Yüksekliği
τ	Taşıyıcı Ömrü
μ	Mobilite
ε	Zorlanma
β	FWHM Değeri
$^{\circ}C$	Santigrat
λ	Dalgaboyu

Kısaltmalar**Açıklama**

AES	Auger Elektron Spektroskopisi
AlGaAs	Alüminyum Galyum Arsenik
Au:Ge	Altın-Germanyum Alaşımı
BCI₃	Boron Triklorit
BEP	Demete Özgü Basınç
CAD	Bilgisayar-Yardımlı Tasarım
CH₄	Metan
CHF₃	Triflorometan
CCD	Yüklenme İliştirilmiş Araç
Cl₂	Klorin
CMOS	Tamamlayıcı Metal Oksit Yarıiletken
CO₂	Karbon Dioksit
DI	De-İyonize
FEG	Alan Emisyonlu Tabanca
FIR	Uzak Kızılötesi
FPA	Odak Düzlem Matrisi
FWHM	Pik Yarı Genişliği
GaAs	Galyum Arsenik
HMS	Hall Etkisi Ölçüm Sistemi
HgCdTe	Civa Kadmiyum Tellür
H₂O	Su
HRXRD	Yüksek Çözünürlüklü X-ışını Kırınımı
ICP- RIE	İndüktif Eşleşmiş Plazma-Reaktif İyon Aşındırma
InAlAs	İndiyum Alüminyum Arsenik
InGaAs	İndiyum Galyum Arsenik
InP	İndiyum Fosfat
IP	Kızılötesi Fotodedektör
IR	Kızılötesi
I-V	Akım-Gerilim
LEED	Düşük Enerjili Elektron Kırınımı

Kısaltmalar**Açıklama****LWIR**

Uzun Dalgaboyu Kızılötesi

mbar

Milibar

MBE

Moleküler Demet Epitaksi

MCT

Civa Kadmiyum Tellür

MIG

Hassas İyon Ölçer

MIS

Metal Yalıtkan Yarıiletken

MOCVD

Metal Organik Kimyasal Buhar Birikimi

M.Ö.

Milattan Önce

MSM

Metal Yarıiletken Metal

MQW

Çoklu Kuantum Kuyusu

MWIR

Orta Dalgaboyu Kızılötesi

NANOTAM

Nanoteknoloji Araştırma Merkezi

NEP

Gürültü Eşiti Güç

NH₃

Amonyak

nm

Nanometre

NIR

Yakın Kızılötesi

N₂O

Diazot Monoooksit

p-n

pozitif-negatif

PCB

Baskılı Devre Kartı

p-i-n

pozitif-katkısız-negatif

RF

Radyo Frekans

RHEED

Yansımali Yüksek Enerjili Elektron Kırınımı

RTA

Hızlı Termal Tavlama

SEM

Taramalı Elektron Mikroskobu

SI

Yarı-Yalıtkan

SIMS

İkincil İyon Kütle Spektroskopisi

Si₃N₄

Silisyum Nitrat

SNR

Sinyal - Gürültü Oranı

SRH

Shockley–Read–Hall

SWIR

Kısa Dalgaboyu Kızılötesi

Kısaltmalar**Açıklama****TLM**

İletim Hattı Modeli

XPS

X-ışını Fotoelektron Spektroskopisi

XRD

X-ışını Kırınımı

UHV

Ultra Yüksek Vakum

UV

Ultraviyole

QE

Kuantum Verimi

VLWIR

Çok Uzun Dalgaboyu Kızılötesi

ZnCdTe

Çinko Kadmiyum Tellür

 μm

Mikrometre

1. GİRİŞ

III-V grubu yarıiletken $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ üçlü alaşımları, güneş hücreleri [1-3], fotoiletken anahtarlar [4], transistörler [5-7] ve fotodedektörler [8-13] gibi yenilikçi optoelektronik aygıtların geliştirilmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. InGaAs tabanlı yarıiletken cihazlar 0.85-3.60 μm dalgaboyu aralığında fabrike edilebilirler [8]. InGaAs üçlü alaşımı, özellikle de oda sıcaklığında 0.75 eV direkt bant aralığına sahip olan $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, InP alttaşı üzerine MOCVD ve MBE gibi yöntemlerle büyütülebilmektedir [8,14-17]. Bununla beraber, tabakalar arasındaki atomik difüzyon ve büyütme süresince büyüme yüzeyindeki atom değişimi bazı kusurlara ve keskin olmayan arayüzlere neden olabilir [18-19]. SIMS, ppm hassasiyetindeki ölçümü ile büyütülen tabakaların; alaşım kompozisyonu, atomik homojenliği, arayüzey özellikleri hakkında mükemmel bilgi verir [20-22]. Büyütme teknolojisindeki gelişmelere bağlı olarak, kızılötesi algılama ve görüntüleme sistemlerinin algı/görüntü kalitesini arttırmaya yönelik yarıiletken malzeme geliştirme çalışmaları güncelliğini korumaktadır. Kızılötesi görüntüleme için geliştirilen bu malzemeler içerisinde küçük yasak bant aralığına sahip olmaları nedeniyle MCT (HgCdTe) alaşımları önem kazanmıştır. Bunun yanı sıra, MCT alaşımların örgü uyumlu olarak büyütülebileceği ZnCdTe gibi alttaşlar, III-V grubu alttaşlardan oldukça pahalıdır. Ayrıca, MCT yapılarının III-V grubu alttaşlara düşük dislokasyon yoğunluğu ile büyütülmesi bazı zorluklar içermektedir [23]. HgCdTe ile beraber InGaAs, MSM ve p-i-n fotodedektörler, kızılötesi aygıt uygulamalarında oldukça yoğun olarak çalışılmaktadır [33-36]. InGaAs dedektör performansı, 1.5-3.7 μm dalgaboyu aralığında benzer bant yapısına sahip olmaları nedeniyle MCT'ninki ile uyumludur [37]. Buna rağmen, InGaAs SWIR dedektörleri düşük karanlık akımları, gürültü değerleri ve oda sıcaklığında çalıştırılabilmesi nedeniyle tercih edilmektedir [38-39]. InGaAs SWIR dedektörlerine ek olarak, InGaAs/InP MSM dedektörleri oda sıcaklığında, MWIR ve LWIR bölgede, kızılötesi görüntülemeye kullanılabilir. InGaAs p-i-n fotodedektörler de farklı dalgaboyları için üretilebilir. InGaAs p-i-n fotodedektörlerde katkısız (i-tipi) bölgenin kalınlığı değiştirilerek, fotodedektörün hangi dalgaboyunda çalışacağı ve fotocevap durumu belirlenebilir [40]. Kaliteli malzeme ve ileri teknoloji ürünü InGaAs dedektörler, iyi geliştirilmiş teoriye ve deneysel çalışmalara sahip olmaları nedeniyle

tercih edilmektedir [37]. Bununla birlikte, InGaAs'ın yüksek sızıntı akımına sebep olan [41] düşük bariyer yüksekliği ($\phi_B=0.2$ eV [42-46]), kaliteli aygıt uygulamaları için yeterli değildir [43]. Bariyer yüksekliğinin arttırılabilmesi için yoğun çalışmalar yürütülmektedir [47-52]. Kontak malzemelerinin ve büyütülen yarıiletkenin kalitesinin büyük önem taşımasının yanı sıra Schottky kontağın fabrikasyon durumu da bariyer yüksekliğinin arttırılabilmesi için oldukça önemlidir [53-55]. Bariyer yüksekliğinin arttırılabilmesi üzerine yapılan çalışmalar farklı yaklaşımlar içermektedir. Bu yaklaşımlardan bazıları 77K veya 300K gibi farklı sıcaklıklarda metalizasyon yapmaktır [14,42]. Bazı çalışmalarda InGaAs üzerine; çok ince InP, GaAs, InAlAs ve AlGaAs bariyer yükseltme tabakası veya yüksek dirence sahip demir katkılı InP tabakası veya oksitli tabakalar büyütülmüştür [46,50,52,55]. Son zamanlarda ise, karanlık akım, tepkisellik, büyütme sıcaklığı ve pasivasyon tabakası gibi InGaAs/InP fotodedektör performansını etkileyen diğer unsurlar üzerinde çalışılmaktadır [56-58].

Bu tez çalışmasında;

- ✚ InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapılarının tasarımı yapıldı.
- ✚ Tasarlanan yapılar MBE yöntemi ile büyütüldü.
- ✚ Büyütülen yapıların yapısal özellikleri belirlendi.
- ✚ Büyütülen yapılar kullanılarak, InGaAs/InP tabanlı MSM, Tekli, 64x64, 128x128 ve 320x256 formatlı p-i-n kızılötesi prototip fotodedektör dizinleri üretilerek, karakterize edildi.
- ✚ Son olarak da, üretilen 320x256 formatlı p-i-n kızılötesi prototip fotodedektör dizini okuma devresine monte edildi.
- ✚ Gerekli elektronik altyapı kurularak, 320x256 formatlı InGaAs/InP p-i-n “kızılötesi foton kamerası” üretildi.

Bu tez çalışması aşağıdaki şekilde organize edildi.

- Birinci bölümde, InGaAs/InP yapısının kullanım alanları verildi. InGaAs/InP fotodedektörlerin çeşitleri incelendi.
- İkinci bölümde, kızılötesi temel bilgiler ana başlığı altında; kızılötesi ışıma, kızılötesi dedektörler, kızılötesi dedektör parametreleri hakkında bilgiler sunuldu.
- Üçüncü bölümde, büyütme yöntemi, karakterizasyon sistemleri, fotodedektör üretimi ve fotodedektör parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan metotlar hakkında bilgiler verildi.
- Dördüncü bölümde, InGaAs/InP MSM kızılötesi fotodedektör üretimi ve karakterizasyonu üzerine yapılan çalışmalar sunuldu.
- Beşinci bölümde, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektör üretimi ve karakterizasyonu üzerine yapılan çalışmalar sunuldu.
- Altıncı bölümde, “InGaAs/InP p-i-n Kızılötesi Fotodedektör Üretimi ve Karakterizasyonu” başlığı altında 64x64, 128x128 ve 320x256 formatlı kızılötesi fotodedektör dizinleri üzerine yapılan çalışmalar sunuldu.
- Yedinci bölümde, 320x256 formatlı kızılötesi fotodedektör dizini ile üretilen InGaAs/InP kızılötesi foton kamerası üzerine yapılan çalışmalar sunuldu.
- Sekizinci bölümde, yapılan çalışmaların sonuçları özetlendi.

Bu tez çalışmasında kullanılan yapılar/numuneler Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi (Gazi FOTONİK)’nde kurulu bulunan Moleküler Demet Büyütme (MBE) sistemi ile büyütüldü. InGaAs/InP kızılötesi fotodedektörler ise, MBE sistemi ile büyütülen numuneler kullanılarak, Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM) bünyesinde üretildi. Üretilen bu aygıtların karakterizasyonları yine NANOTAM bünyesindeki sistemler kullanılarak tamamlandı.

2. KIZILÖTESİ TEMEL BİLGİLER

Evren'deki her cisim ya da parçacık, enerjisine ya da diğer deyişle sıcaklığına bağlı olarak belirli frekansta elektromanyetik ışıma yayar. İnsan gözünün görme yeteneği çok zayıftır ve elektromanyetik spektrumun sadece “görünür bölge” olarak adlandırılan 390 nm ile 770 nm dalgaboyu aralığındaki kısmını algılayabilir [59]. Ancak oda sıcaklığına yakın cisimlerin yaydığı ışıma ise elektromanyetik spektrumda “kızılötesi bölge” olarak adlandırılan 770-10000 nm dalgaboyu aralığına düşmektedir. Bu açıdan kızılötesi bölgenin anlaşılması, bu bölgedeki ışımların tespiti ve cisimlerin görüntülenmesi açısından oldukça önemlidir.

2.1. Kızılötesi Işıma

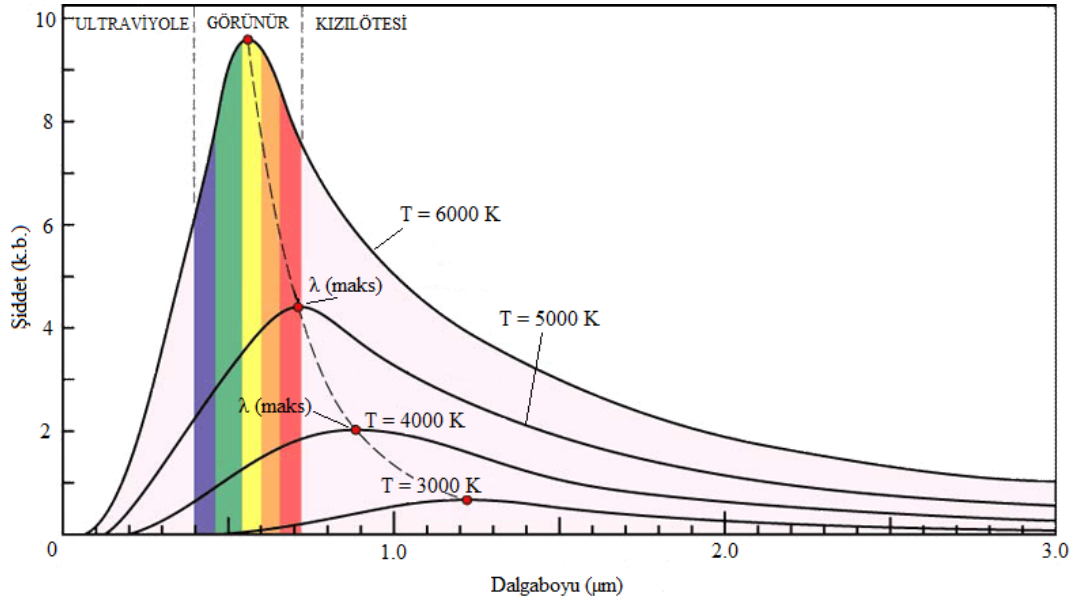
Kızılötesi ışımayı tanımlayabilmek için, tüm ışımları soğuran veya yayan cismin ışımasını (karacisim ışıması), yeryüzündeki kızılötesi ışımların durumunu ve kızılötesi atmosferik pencere kavramını incelemek yararlı olacaktır.

2.1.1. Karacisim ışıması

Termodinamiğin prensiplerine göre, mutlak sıfır sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklara sahip tüm cisimler sürekli olarak elektromanyetik ışıma yayarlar ve soğururlar. Fakat bu ışmanın şiddet ve frekans dağılımı cismin detaylı yapısına bağlıdır. Işımanın anlaşılabilmesi için ışıma yapan cismin özelliklerinin belirlenmesi gerekir. Bundan dolayı bu ışmanın fiziksel anlamını en iyi ve en basit şekilde açıklayabilmenin yolu, mükemmel bir soğurucu ve yayıcı olan bir cismi düşünmekten geçer. Bu ideal cisim “karacisim” olarak adlandırılır. Genel olarak ifade etmek gerekirse, karacisim ideal bir elektromanyetik ışıma kaynağıdır. Sıcaklığa ve dalgaboyuna bağlı elektromanyetik ışıma şiddetinin spektral dağılımı (R) ise Planck Yasası ile verilir [60].

$$R(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (2.1)$$

Eşitlikte yer alan; λ dalgaboyunu, T karacisim sıcaklığını, c vakum ortamındaki ışık hızını, h Planck sabitini ve k Boltzmann sabitini göstermektedir. Şekil 2.1’de sıcaklığa ve dalgaboyuna bağlı karacisim ışıma grafiği görülmektedir.



Şekil 2.1. Sıcaklığa ve dalgaboyuna bağlı karacisim ışıması [61]

Eş. 2.1’de verilen Planck Yasası ile elde edilen yayılan toplam enerji, geniş bir spektrumda ($\lambda = 0$ ve $\lambda = \infty$) verilirse, Stefan-Boltzmann Yasası elde edilir. Bu yasa aşağıdaki şekilde Stefan-Boltzmann sabiti (σ) adı verilen bir sayı ile sadeleştirilebilir.

$$R(T) = \sigma T^4 \quad (2.2)$$

Stefan-Boltzmann sabiti (σ) $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^2\text{)}$ ’dir.

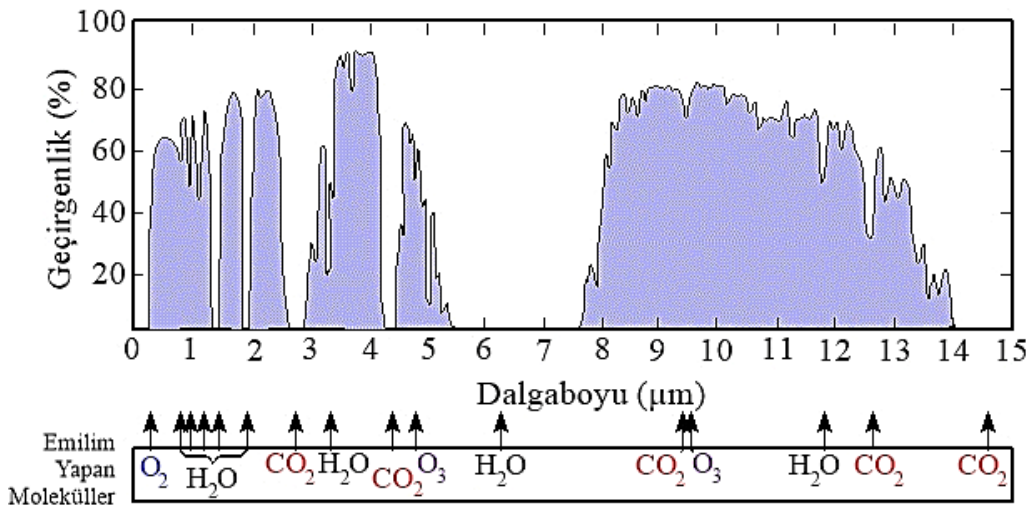
Maksimum spektral dağılım ise Eş. 2.3’te verilen Wien Kayma Yasası ile verilir.

$$\lambda_{\max}(T) = \frac{2898}{T} \mu\text{m} \quad (2.3)$$

Karacisim ışıması güneşin bir modellemesi olduğundan önemlidir.

2.1.2. Kızılötesi atmosferik pencere

Elektromanyetik spektrumun birçok ışınması gibi kızılötesi ışınma da atmosfer içinde ilerleyebilmektedir. Ancak bu ışınmalar saçılma ve soğurulma süreçleri ile zayıflamaktadır. Atmosferin içindeki parçacıklar saçılmalara, atmosferi oluşturan gaz molekülleri ise soğurulmalara sebep olurlar [62]. Atmosferde yaygın olarak bulunan ve kızılötesi ışınmayı soğuran moleküller H_2O , O_3 , N_2O , CO_2 , CH_4 ve N_2 olarak sayılabilir. Bu moleküllerin soğurmadığı belirli dalga boylarındaki ışınmalar atmosfer içerisinde yayılabilmektedir. Soğurulmayan bu dalga boyları bölgeleri, “atmosferik pencere” olarak adlandırılmaktadır. Örneğin, Şekil 2.2’de görüldüğü gibi yakın ve uzak kızılötesi bantlar su (H_2O) ve su buharından etkilenirken, orta kızılötesi bant, karbon dioksit (CO_2) ve ozon (O_3)’dan etkilenmektedir [63].



Şekil 2.2. Atmosferik pencere [64]

Atmosferik pencerenin özellikleri, bağıl nem veya gaz molekülü miktarına bağlı olarak değişim göstermektedir. Buna ek olarak, rüzgârların, termal konveksiyon akımlarının veya yerçekiminin etkisi ile atmosfer homojen bir yapıya sahip değildir ve böylece sürekli değişen bir kırılma indisi oluşturur [65]. Ayrıca, canlıların neden olduğu ortam etkileri de bazı durumlarda kızılötesi ışınmayı önemli ölçüde etkileyebilir [66].

Kızılötesi bölge uygulama alanlarına ve kaynaklara göre farklılık göstermektedir. Yaygın olarak kullanılan kızılötesi bölge sınıflandırmaları Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kızılötesi bölgelerin dağılımı

Kızılötesi Bölge	Dalgaboyu Aralığı (μm)
Yakın Kızılötesi (NIR)	0.7 - 1
Kısa Dalgaboyu Kızılötesi (SWIR)	1 - 3
Orta Dalgaboyu Kızılötesi (MWIR)	3 - 5
Uzun Dalgaboyu Kızılötesi (LWIR)	8 - 12
Çok Uzun Dalgaboyu Kızılötesi (VLWIR)	12 - 25
Uzak Kızılötesi (FIR)	> 25

Kızılötesi dedektör sistemlerinin kullanım alanlarına uygun olarak kızılötesi bölge seçimi hedef işaretime, atmosferik geçirgenliğe ve dedektör tepkisine bağlıdır. Örnek olarak, nem miktarının fazla olduğu deniz uygulamalarında MWIR, az nemli ve soğuk ortamlarda ise LWIR daha uygundur. Kızılötesi görüntüleme sistemlerinin yaygın olarak kullanıldığı savaş alanı koşullarında da LWIR genelde daha uygundur [66].

Kızılötesi dedektörlerdeki optik açıklıktan kaynaklanan girişim miktarının azaltılabilmesi için 1-5 μm dalgaboylarına sahip kızılötesi ışıma yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca, dedektör ile birlikte kullanılan optiğin büyüklüğü optik açıklık ile orantılı olduğundan SWIR ve MWIR dalga boylarında çalışan kameralar daha küçük boyutlu üretilmektedir [67].

2.2. Kızılötesi Dedektörler

Kızılötesi dedektörler, üzerine etkiyen ışımayı soğurup, soğurulan ışımının yoğunluğuna bağlı olarak ölçülebilir bir sinyal verme prensibine göre çalışırlar. Gelen ışımayı soğuran malzemenin, soğurulan ışımadan nasıl etkilendiği termal dedektörler ile fotodedektörler arasındaki farkı belirler.

Çizelge 2.2’de avantajları ve dezavantajları verilen kızılötesi dedektörler; *termal dedektörler* ve *fotodedektörler* (*foton dedektörleri*) olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadır.

Çizelge 2.2. Termal dedektörlerin ve fotodedektörlerin avantajları ve dezavantajları [68]

Termal Dedektörler		Fotodedektörler	
Avantajları	Dezavantajları	Avantajları	Dezavantajları
- Fotodedektörlere göre görüntüleme maliyetleri daha düşüktür. - Kızılötesi bölgede daha geniş bir spektruma sahiptir. - Hafif, sağlam ve güvenilirdir. - Bazı uygulamalar için yeterince hızlıdır.	- Atomik yapının ısınmasından dolayı daha geç tepki verirler. - Fotodedektörlere göre algılama yetenekleri düşüktür.	- Yarıiletkenin bant aralığı ayarlanarak dedektörün hassas olduğu dalgaboyu değiştirilebilmektedir. - Yüksek algılama yeteneğine sahiptir. - Teorik ve pratik çalışmalar oldukça fazladır. - Malzeme özellikleri iyidir. - Birçok uygulama için hızlı tepki verir.	- Malzeme işlemede zorluklar bulunmaktadır. - Üretim maliyetleri yüksektir.

2.2.1. Kızılötesi termal dedektörler

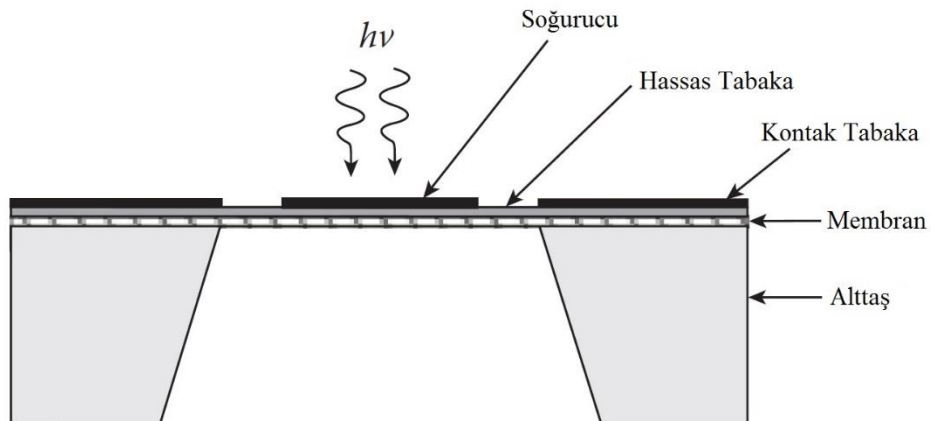
Termal dedektörlerde soğurulan ışıma, dedektör malzemesinin sıcaklığının yükselmesine neden olur. Böylelikle malzemenin fiziksel nicelikleri değişir. Malzemenin fiziksel özelliklerindeki bu değişimler algılanır ve dedektör tarafından bir sinyal üretilir. Termal dedektörler, fotodedektörlere göre, dalgaboyundan bağımsız duyarlılığa ve oldukça yavaş tepki hızına sahiptirler. Farklı ve özel dalga boyları gerekemediği sürece termal dedektörler 77 K üzerindeki çalışma sıcaklıklarında çok iyi performansa sahiptirler [69-70].

Bolometreler ve Pyroelektrik Dedektörler, kızılötesi termal dedektörlere örnek olarak verilebilir.

Bolometreler

Yaygın olarak kullanılan termal dedektörlerden biri de, Şekil 2.3’de şematik olarak verilen Bolometre’dir. Bolometre, çok küçük termal kapasiteye ve büyük sıcaklık katsayısına sahip malzemelerden yapılan direnç elemanıdır. Üzerlerine düşen ve soğurulan ışığa bolometrenin direncinde büyük değişiklik yapar. Termal çiftin aksine, bolometre uygulanan akım ile kontrol edilir. Direncindeki değişim aynı fotoiletkendeki gibidir, ancak temel algılama mekanizması farklıdır. Bolometrelerde, ışığa gücü malzeme içerisinde ısı üretir. Üretilen bu ısı da direnç değişimine neden olur. Yani, fotoiletkenlerdeki gibi doğrudan foton ve elektron etkileşimi yoktur.

İlk bolometre Amerikan astronom S.P. Langley tarafından 1880 yılında güneş gözlemleri yapmak amacıyla tasarlanmıştır [71]. Langley, bu bolometre için kararmış bir platin soğurucu ve basit bir Wheatstone köprüsü algılama devresi kullanmıştır. Bunun sonucunda, termalçiflerden daha hassas bolometreler yapmayı başarabilmiştir. Diğer termal dedektörler geliştirilmelerine rağmen, bolometreler hala en çok kullanılan kızılötesi dedektörlerden biridir. Modern bolometre teknolojisini geliştirme çalışmaları ise, 1980’lerde Honeywell’in vanadyum oksit üzerine ve Texas Instruments’ın amorf silikon (a-Si) üzerine yaptıkları çalışmalar ile başlamıştır [40].



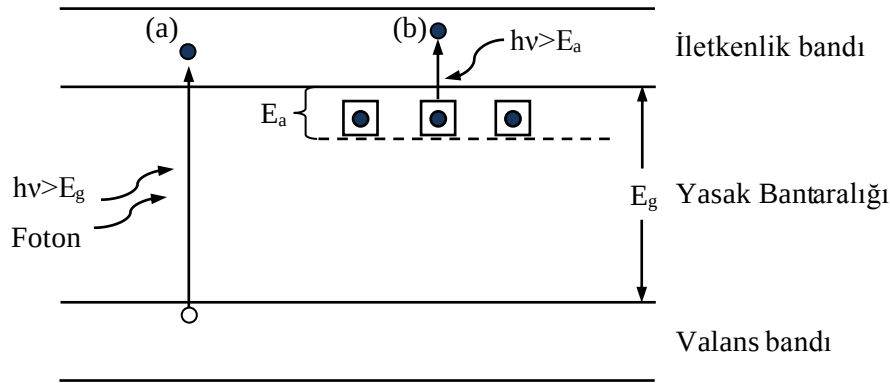
Şekil 2.3. Bolometrenin şematik gösterimi [40]

Pyroelektrik Dedektörler

Pyroelektrik dedektörler, pyroelektrik kristallerden oluşur. Pyroelektrik kristal ise, sıcaklık değişimine maruz bırakıldığı zaman, sıcaklık ile değişen kutuplanmanın sonucu olarak yüzey yükü belirli bir yönde üretilir. Bu etki yüzyıllardır, fiziksel gözlemlenebilir bir fenomen olarak bilinmektedir. Theophrastus'un M.Ö. 315 yılında tanımlamasıyla başlamasına rağmen [72], “*Pyroelektrik*” ismi Brewster koymuştur [73]. Işımanın algılanabilmesi için pyroelektrik etkinin kullanılması fikri Ta tarafından önerilmiştir [74]. Ancak uygulamada, uygun malzeme eksikliği nedeniyle geç kalınmıştır. Kızılötesi algılamada, pyroelektrik etki, yaklaşık son 50 yılda önemli hale gelmiştir [75-77]. Yoğun olarak tercih edilen çalışmayı ise Putley yapmıştır [78]. Putley'in çalışmasından günümüze kadar birçok çalışma yapılmasının yanı sıra, soğutmasız mikro pyroelektrik dedektörler temel sınırlara ulaşmıştır [79-81].

2.2.2. Kızılötesi fotodedektörler

Bazı kaynaklarda foton dedektörleri olarak da yer alan fotodedektörler, üzerlerine düşen ışımaya oldukça hassas olan cihazlardır. Soğurdukları ışımayı elektronik devreler aracılığıyla elektrik akımına dönüştürürler. Foton enerjisinin çok hızlı bir şekilde malzemenin elektronik düzeyine transfer edilmesinden dolayı fotodedektörler çok yüksek frekanslarda çalıştırılabilirler. Kızılötesi fotodedektörlerde, Şekil 2.4' de gösterildiği üzere, kızılötesi ışıma; bantdan banda ve katkı seviyelerinden uyarılma olarak, iki farklı optiksel uyarılma işlemiyle soğurulur. Bir fotodedektörün spektral tepkisi, dedektörün üzerine düşen ışımanın dalga boyuna ve gücüne bağlıdır. Yakın kızılötesi bölgede çalışan dedektörlerin dışında, yarıiletken fotodedektörlerin yük taşıyıcılarının termal olarak üretilmesini engellemek için soğutulması gerekmektedir. Çünkü termal uyarımla oluşan yük taşıyıcıları dedektörün önemli bir parametresi olan karanlık akım değerini yükseltmektedir.



Şekil 2.4. Yarıiletkende optik uyarılma
 (a) Bandtan banda uyarılma (intrinsic),
 (b) Katkı seviyesinden uyarılma (extrinsic) [82]

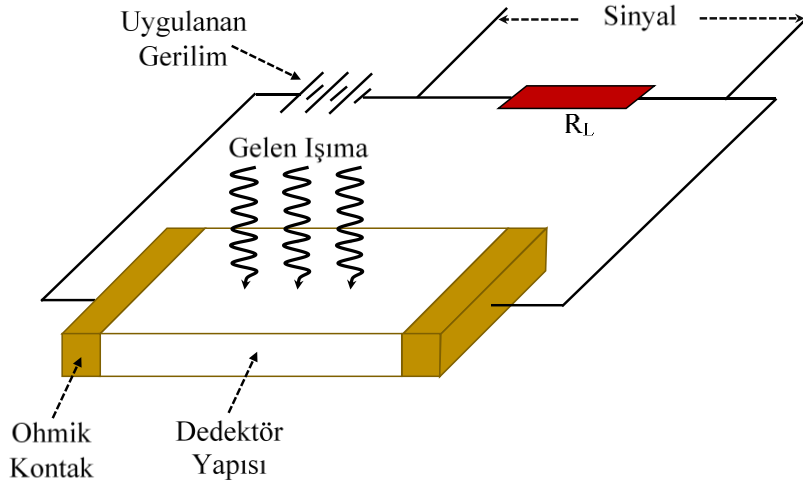
Büyütülen yapıda oluşturulan potansiyel engelinin çevresinde foto-etki ile oluşturulan taşıyıcılar, fotovoltajik etkiyi meydana getirir. Bununla beraber elektrik alan, harici yük devresine bağlı olarak, yük taşıyıcılarının farklı yönlerde gitmesine sebep olur. Bu fotovoltajik etkiye göre çalışan; *fotoiletken*, *p-n eklem*, *p-i-n*, *Schottky bariyer*, *metal-yarıiletken-metal (MSM)* gibi birçok dedektör tipi bulunmaktadır [40].

Fotoiletken Dedektörler

Fotoiletken dedektörler, ışımaya karşı duyarlılık gösteren rezistörlerdir. Şekil 2.5’de gösterilen fotoiletken dedektörüne, yasak enerji aralığından daha büyük enerjili fotonlar geldiğinde, fotonlar soğurularak, elektron-boşluk çifti oluşturur. Soğurulma ile valans bandındaki elektronlar iletim bandına çıkar ve böylece serbest taşıyıcı sayısı artar. Serbest taşıyıcı sayısındaki artış fotoiletken dedektörün elektriksel iletkenliğini değiştirir ve bir dış devre yardımıyla, gelen ışıma şiddetinin ölçüsü olan iletkenlikteki değişim miktarı algılanır.

Hemen hemen tüm dedektörlerde, iletkenlikteki değişim, örneğe bağlantısı yapılan elektrotlar vasıtasıyla ölçülür. Yaklaşık 100 ohmluk dirence sahip malzemelerde, fotoiletken dedektör genellikle Şekil 2.5’de görüldüğü gibi sabit akım devresi ile kontrol edilir. Bu durumda dedektörün seri direnci yarıiletkenin seri direncinden daha büyük olur ve sinyal gerilimdeki değişiklik olarak algılanır. Yüksek dirence sahip

fotoiletken dedektörlerde ise, sabit voltaj devresi tercih edilir ve sinyal akımdaki değişiklik olarak tespit edilir [40].



Şekil 2.5. Fotoiletken dedektör [40]

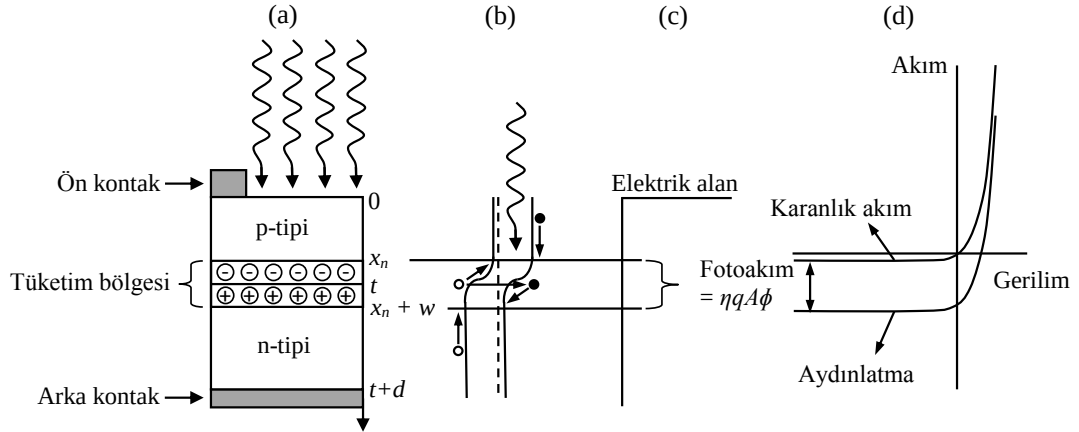
p-n Eklem Fotodedektörler

Fotovoltaiik dedektörlerin en yaygın kullanılanlarından birisi de, p-n eklem fotodiyot olarak da adlandırılan p-n eklem fotodedektörlerdir. Yasak enerji aralığından daha büyük enerjiye sahip fotonlar, p-n eklem her iki tarafında da elektron-boşluk çiftleri oluşturur. Oluşturulan bu elektron-boşluk çiftleri, güçlü elektrik alan vasıtasıyla birbirlerinden ayrılarak, uzay-yük bölgesinden difüzyon derinlikleri kadar uzaklaşır. Azınlık taşıyıcıları, p-n eklem diğer tarafında çoğunluk taşıyıcıları olacak şekilde kolayca hızlandırılır. Böylece, negatif veya ters akım boyunca, akım-gerilim özelliklerini değiştirecek biçimde fotoakım oluşur. Bu akımın miktarı Eş. 2.4 ile hesaplanabilir.

$$I_{foto} = \eta q A \Phi \quad (2.4)$$

Eşitlikte, η kuantum verimini, q elektron yükünü, A fotodedektörün alanını ve Φ gelen foton akı yoğunluğunu göstermektedir [83]. p-n eklem fotodedektörün; p-n eklem

yapısı, enerji-bant diyagramı, elektrik alanı ve akım-gerilim karakteristikleri şematik olarak Şekil 2.6’da verilmiştir.



Şekil 2.6. p-n eklem fotodedektörün şematik gösterimi

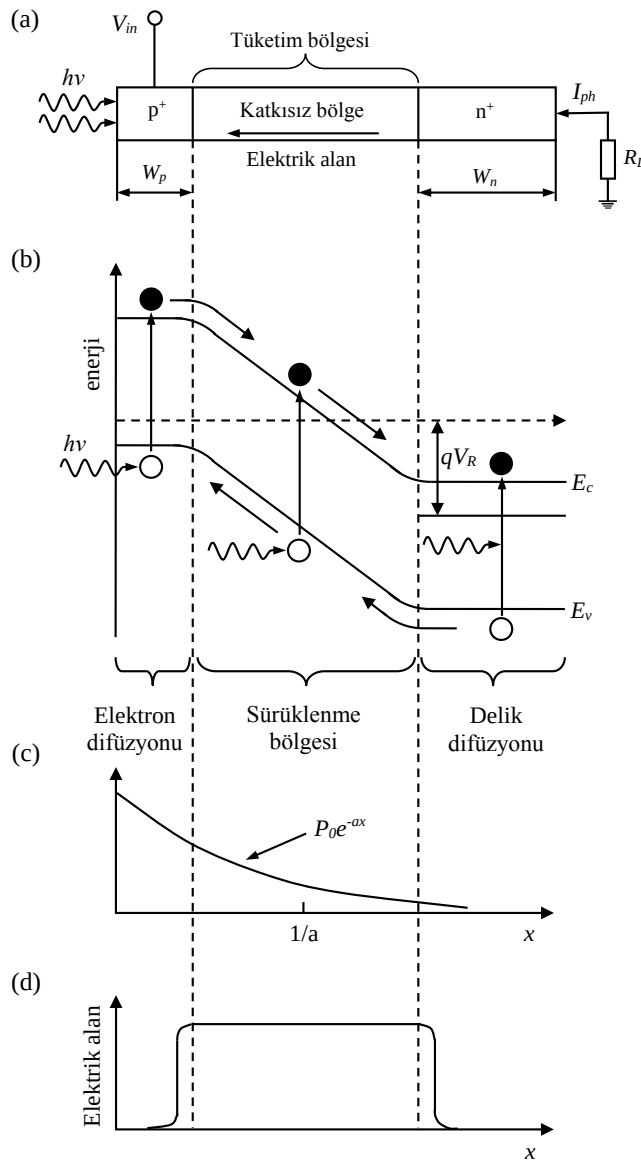
- (a) p-n eklem yapısı,
- (b) enerji-bant diyagramı,
- (c) elektrik alanı,
- (d) akım-gerilim karakteristikleri [40]

p-i-n Fotodedektörler

p-i-n fotodedektörler, optik iletişimde daha hızlı foto algılama özellikleri nedeniyle, p-n eklem fotodedektörlerden daha fazla tercih edilmektedir. Şekil 2.7’de şematik temsili verilen p-i-n fotodedektörlerde, p-n eklem fotodedektörlerden farklı olarak, p ve n tipi katkılı yarıiletkenler arasında katkısız (i tipi) bir yarıiletken büyütülür. Katkısız yarıiletken bölgesinin çok düşük taşıyıcı yoğunluğuna ve yüksek dirence sahip olması nedeniyle, dedektöre uygulanan gerilim tamamen bu bölgeye düşer [40]. Bu nedenle tüketim bölgesi olan katkısız bölgenin kalınlığının iyi ayarlanması önemlidir. Tüketim bölgesinin kalınlığı, kızılötesi dedektörün hangi dalgaboyunda çalışacağını ve fotocevap durumunun belirlenmesinde önemli bir rol üstlenmektedir. Ancak, cevap hızı ve kuantum verimi arasında bir tercih yapmak gerekebilir. Çünkü yüksek cevap hızı için, tüketim bölgesinin kalınlığı düşük olmalıdır. Buna karşın, yüksek kuantum veriminin ve fotocevabın yüksek olması isteniyorsa, tüketim tabakasının kalınlığı daha fazla olmalıdır. Literatürde kuantum verimini arttırmak amacıyla, harici mikro-kavite

yaklaşımı sunulmuştur [84-85]. Bu yaklaşımda, soğurma tabakası bir kavite içine konulmuş ve böylece fotonların büyük bölümü küçük bir hacimde tuzaklanmıştır. Bunun yanı sıra, p-i-n fotodedektörün cevap hızı devre parametrelerine de bağlıdır.

Şekil. 2.7’de p-i-n fotodedektörün, yapısı, enerji bant diyagramı, taşıyıcı oluşum özellikleri ve elektrik alan durumu verilmiştir.

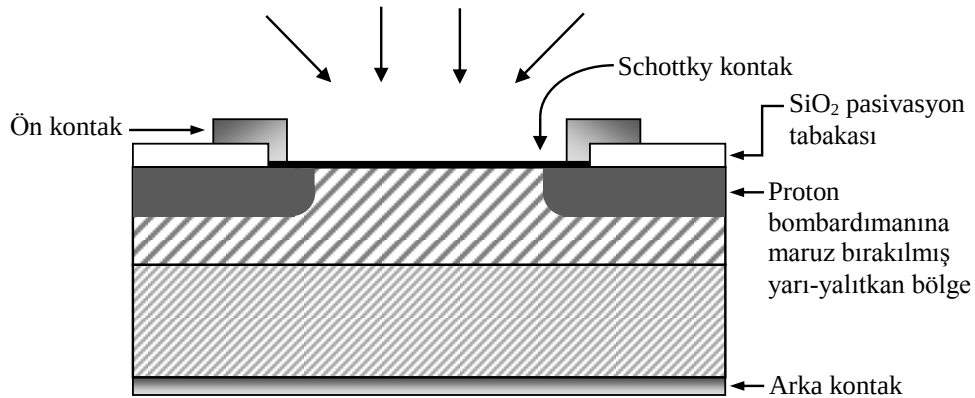


Şekil 2.7. p-i-n fotodedektörün

- (a) yapısı,
- (b) enerji bant diyagramı,
- (c) taşıyıcı oluşum özellikleri,
- (d) elektrik alan durumu [40]

Schottky Engelli Fotodedektörler

Şekil 2.8’de şematik olarak gösterilen Schottky engelli fotodedektörler, katkılı yarıiletkenin üzerini kaplayan çok ince metalden oluşturulur [86]. Yarıiletkenin bir metal ile teması durumunda yarıiletkenin Fermi enerji düzeyi ile metalin Fermi enerji düzeyi ile aynı hizaya gelir. Fermi enerji düzeyleri aynı hizaya geldiğinde metal-yarıiletken yüzeyinde bir potansiyel bariyer meydana gelir. Dedektöre gönderilen ışığa sonucu oluşan fotonlar metal katmanda soğurulur ve elektron-delik çifti oluşur. Uyarılmış elektronlar, metal-yarıiletken yüzeye ulaşmaya kadar metal içerisinde rastgele taşınır. Sadece yeterli enerjiye sahip elektronlar bariyeri geçerek yarıiletkene ulaşır. Böylelikle ışığa soğurularak elektriksel sinyale çevrilir. Schottky engelli fotodedektörler, kullanılan metal kaplamaya bağlı olarak geniş duyarlılık spektrumuna sahiptir.

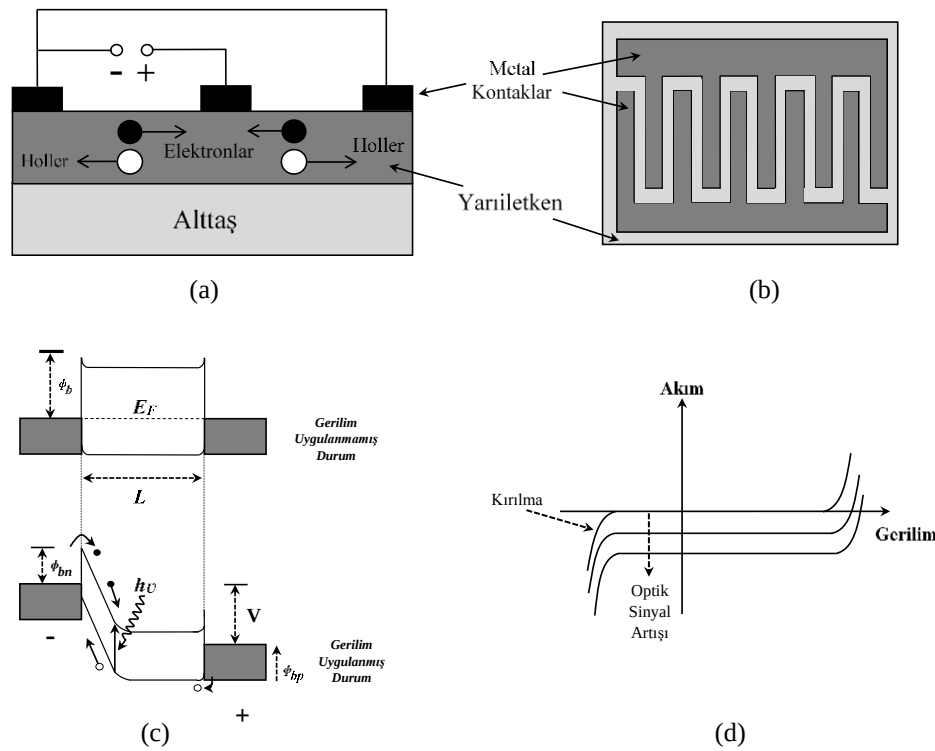


Şekil 2.8. Schottky engelli fotodedektörün şematik gösterimi

Metal-Yarıiletken-Metal (MSM) Fotodedektörler

Metal-yarıiletken-metal (MSM) fotodedektörlerin yapısı fiziksel olarak birbirine kenetlenmiş fotoiletken fotodedektörler ile benzerdir. Farklı olarak, metal-yarıiletken ve yarıiletken-metal eklemleri ohmik kontak yerine, Schottky kontak olarak yapılır. Düzlemsel bir yapıya sahip olan MSM fotodedektörler, tek parça entegrasyona uygundur ve alan etkili transistör yapımı için gerekli olan işlem adımlarının hemen hemen aynıları kullanılarak üretilir [87]. Şekil 2.9’da gösterildiği üzere, MSM

fotodedektörler temel olarak, bir çift arka arkaya bağlı Schottky diyottan oluşur. Bu ikili Schottky bariyer, tekli Schottky diyottan daha düşük karanlık akım sağlar. Diğer fotodedektörlerin prensiplerine benzer şekilde, soğurulan fotonlar yarıiletkende elektron-boşluk çifti oluştururlar. Elektronlar, uygulanan elektrik alanının etkisiyle, artı elektrota sürüklenirken, boşluklar ise eksi elektrota sürüklenir. MSM fotodedektörlerin kuantum verimlilikleri ise metal elektrotların neden olduğu gölgelemeye bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.



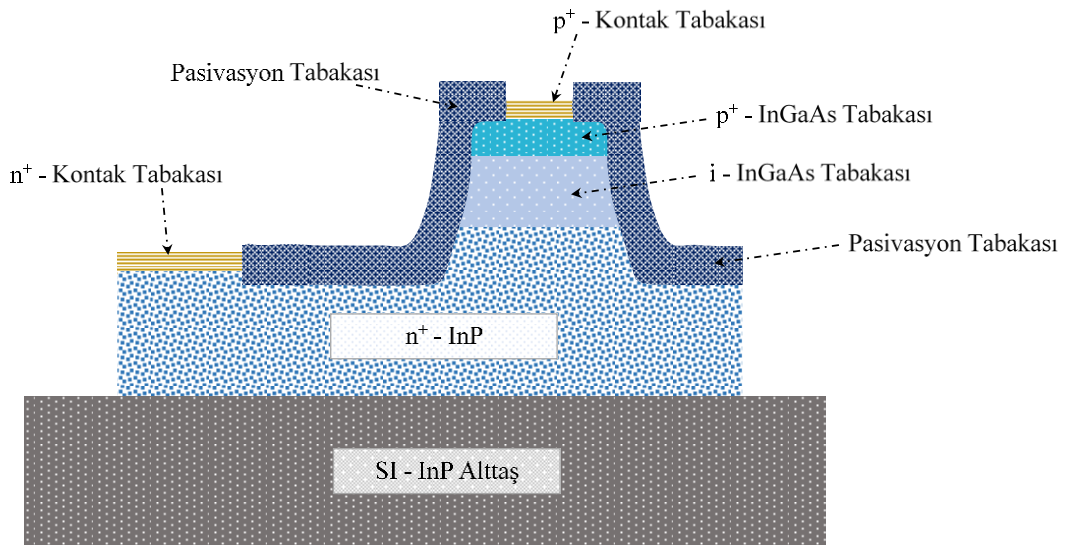
Şekil 2.9. MSM fotodedektörün
 (a) yandan görünümü,
 (b) üstten görünümü,
 (c) enerji bat yapısı,
 (d) akım-gerilim karakteristikleri [40]

2.2.3. InGaAs / InP kızılötesi fotodedektörler

InGaAs / InP yarıiletken yapıları, elektronik ve optik uygulamalar açısından büyük potansiyele sahip oldukları için son yıllarda yaygın olarak çalışılmaktadır [88-90]. InGaAs / InP yapılarının elde edilme sürecinde, yüksek kalitede ince film büyütme

yöntemlerinden biri olan, moleküler demet büyütme (MBE) yöntemi kullanılmaktadır [91-93]. Ultra yüksek vakum şartlarında (10^{-10} - 10^{-11} mbar) malzeme buharlaştırma özelliğine ve yeterliliğine sahip olan MBE, yarıiletkenlerin alaşım oranlarının (x) kesin olarak belirlenebilmesi, kontrollü katkılama sağlanabilmesi ve alttaş sıcaklığının büyük bir doğrulukla kontrol edilebilmesi açısından diğer buharlaştırma yöntemlerinden ayrılmaktadır [94-96]. Ancak burada dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ve InP örgüleri arasındaki uyumsuzluğun giderilmesidir. Bu uyumsuzluğun giderilmesi için $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 'ın alaşım oranı x 'in 0,53 olarak ayarlanması gerekmektedir. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 'ın alaşım oranı x 'in 0,53 olduğu durumda da InP ile mükemmel örgü uyumu sağlanmaktadır [97-98].

Şekil 2.10'da şematik olarak verilen 1.3-1.5 μm optik algılama dalgaboyuna sahip olabilen InGaAs/InP p-i-n fotodedektörleri haberleşme ve kızılötesi görüntüleme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu dedektörlerin fabrikasyonu, SI-InP üzerine büyütülen $\text{n-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ kristalleri kullanılarak yapılabilmektedir. Oluşturulan bu yapının uygun bölgelerine litografik süreçlerle Çinko (Zn) difüzyonu yapılarak, p -tipi bölgeler oluşturulmaktadır. Gerekli metalizasyon prosesleri takip edilerek, fotodedektör fabrikasyonu tamamlanmaktadır.



Şekil 2.10. InGaAs/InP p-i-n fotodedektör yapısı [99]

2.3. Kızılötesi Dedektör Parametreleri

Kızılötesi dedektörlerin performansı; kullanılan yarıiletken, fabrikasyon süreçleri, okuma devresi, elektronik yazılım gibi birçok önemli faktöre bağlıdır. Tüm bu faktörlerin uyumlu bir şekilde bir araya getirilmesi, kızılötesi dedektörlerin kalitesini arttırmaktadır. Kızılötesi dedektörlerin kalitesi ise dedektör çıktı parametrelerinin analizi ile mümkündür.

2.3.1. Fotocevap (Responsivity - R)

Fotocevap veya tepkisellik (R), Eşitlik 2.5’de de görüldüğü üzere çıkış sinyalinin gelen ışımının gücüne oranı olarak tanımlanır [100].

$$R = \frac{\text{Çıkış Sinyali}}{\text{Gelen Işımanın Gücü}} \quad (2.5)$$

Çıkış, foto-gerilim (V/W) veya foto-akım (A/W) olabilir.

Yüksek fotocevap, daha yüksek bir çıkış sinyali için istenen bir durumdur. Ancak tek başına yüksek bir çıkış sinyali elde etmek için de yeterli değildir. Fotocevabı tanımlamak için ayrıca dedektörün ve kamera sisteminin gürültüsünün yanı sıra, spektral fotocevap adı verilen dedektörün hassas olduğu ışım dalgaboyunu da hesaba katmak gerekir.

2.3.2. Kuantum verimliliği (η)

Kuantum verimliliği, genel olarak aygıtların ışımaya karşı olan elektriksel hassasiyeti olarak tanımlanabilir. Fotodedektörlerde ise, elektron-deşik çifti oluşturan fotonların, dedektöre gelen fotonlara göre yüzdesi olarak verilmektedir. Bir fotodedektörün fotoakımı arttıkça, kuantum verimliliği ve buna paralel olarak da hassasiyeti artar. Fotocevap ile kuantum verimliliği arasındaki ilişki aşağıdaki Eşitlik 2.6’da verilmektedir [100].

$$\eta = \frac{R}{\lambda} \frac{1}{g} \frac{hc}{q} \quad (2.6)$$

Bu eşitlikte q elektron yükü, η dedektörün kuantum verimliliği (*optik olarak oluşturulan elektronların, gelen fotonlara oranı*), g dedektör kazancı (*uyarılmış taşıyıcıların ortalama serbest yolunun, dedektörün toplam aktif tabaka kalınlığına oranı*), λ gelen ışımının dalgaboyu, h Planck sabiti, c boşluktaki ışık hızı olarak tanımlanır.

Dedektör kazancı (g) fotovoltaiik dedektörler için her zaman 1'dir. Fotoiletken dedektörler için ise bu değer dedektör yapısına ve uygulanan gerilime bağlı olarak 1'den küçük veya 1'den büyük olabilir. Fotovoltaiik dedektörler için, Eş. 2.6 tekrar düzenlenirse, dedektörün kuantum verimi;

$$\eta = \frac{R}{\lambda} \frac{hc}{q} \quad (2.7)$$

olarak kullanılabilir.

2.3.3. Sinyal - Gürültü oranı (SNR)

Gürültü, çıkış sinyalinde istenmeyen sinyaller olarak tanımlanabilir [101]. Gürültüyü tamamen ortadan kaldırmak mümkün olmasa da; gürültü, Sinyal-Gürültü Oranı (SNR) yüksek olacak şekilde, yeterince düşük seviyelerde tutulabilir. Fotodedektörlerin yapısından kaynaklanan birçok gürültü kaynağı vardır. Önlenemeyen bu gürültüler, genellikle foton geliş hızındaki dalgalanmalardan, yarıiletkendeki örgüsel titreşimlerden ve dedektörün içindeki elektronların rastgele hareketleri sonucu ortaya çıkar [67]. $1/f$, Johnson, Üretim-Rekombinasyon (G-R) ve Vuruş Gürültüsü gibi çeşitli gürültü mekanizmaları bu durumları açıklamaya çalışmaktadır.

$1/f$ gürültüsünün spektral güç yoğunluğu frekansla ters orantılıdır. $1/f$ Gürültüsünün varlığı ve bu gürültünün düşük akım mekanizmaları ile ilişkisi hakkında birçok çalışma vardır [102-104].

Johnson Gürültüsü, yarıiletken sıcaklığının mutlak sıfırın üzerinde olduğu durumlarda meydana gelen termal dalgalanmalardan kaynaklanır [100].

Üretim-Rekombinasyon (G-R) Gürültüsü, üretim ve rekombinasyon süreçlerinin sürekli tekrarlanmasıyla oluşur. Bu gürültü, hem optik, hem de termal üretim ile meydana gelebilir [100].

Vuruş Gürültüsü ise, fotonların rastgele bir varış oranı ile dedektöre geldiği gerçeğinden ortaya çıkar. Bu tip bir gürültü tam olarak dedektörle ilgili değildir. Aslında, elde edilebilir minimum gürültü seviyesini temsil eder [65].

2.3.4. Gürültü Eşiti Güç (Noise Equivalent Power – NEP)

Dedektör üzerinde gürültü miktarı kadar sinyal oluşturabilen kızılötesi güç, gürültü eşiti güç (NEP) olarak tanımlanır. Birimi, $W / \sqrt{Hz}$ 'dir.

NEP, dedektörün sinyal-gürültü oranı (SNR)'nın sabit olmaması ve giriş gücünün artmasına bağlı olarak artması nedeniyle, dedektör hassasiyetini belirlemede uygun değildir. Buna rağmen NEP, dedektör hassasiyet ölçümü olarak tanımlanır. Bir başka deyişle; NEP, birim SNR üretmek için dedektörün aldığı ışıma gücü miktarıdır.

NEP, gürültü voltajının veya akımının fotocevaba bölünmesi ile bulunur [105] ve Eş. 2.8 ile verilir.

$$NEP = \frac{\text{gürültü}}{\text{fotocevap}} = \frac{S_n}{R} \quad (2.8)$$

2.3.5. Dedektivite (D)

Dedektivite (D), NEP'in tersi olarak tanımlanır [40].

$$D = \frac{1}{NEP} \quad (2.9)$$

Dedektör performansının iyileştirilmesi, dedektivitenin arttırılmasına bağlıdır. Birçok dedektör için NEP özel haliyle kullanılır ve özel dedektivite (D^*) adını alır. D^* , dedektör alanı (A_d)'nin ve frekans bantgenişliği (Δf)'nin karekökü ile orantılıdır [106]. Genelleştirilmiş haliyle, NEP ve D^* , dedektör alanına ve frekans bantgenişliğine bağlıdır. D^* , Eş. 2.10'da verildiği üzere tanımlanabilir [106-107]. Birimi, R. C. Jones'a ithafen "*jones*" yani $cm\sqrt{Hz} / W$ 'tır.

$$D^* = D\sqrt{A_d \Delta f} = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{NEP} \quad (2.10)$$

D^* frekans bantgenişliğinden bağımsız olarak, Eş. 2.11'deki biçimiyle de verilebilir [108].

$$D^* = D\sqrt{A_d} = \frac{\sqrt{A_d}}{NEP} \quad (2.11)$$

D^* , farklı dedektör alanlarına sahip aynı tip dedektörlerin karşılaştırılmasına imkân sağlar.

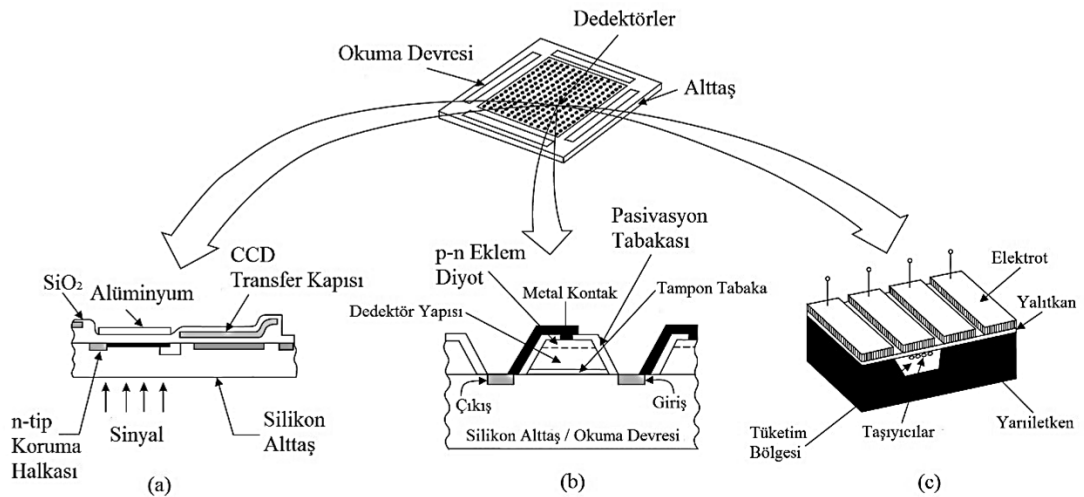
2.4. Odak Düzlem Matrisi (Focal Plane Array – FPA)

Terim olarak odak düzlem matrisi (focal plane array – FPA), tekli dedektörlerin kızılötesi görüntüleme sistemi oluşturmak amacıyla bir araya getirilmesidir. Buradaki her bir kızılötesi dedektör, kameranın bir pikselini oluşturmaktadır. Tek boyutlu

(lineer) dizilerin yanı sıra daha fazla kullanım alanı olan iki boyutlu (2D) dizilerin piksel sayıları arttıkça görüntü kalitesi de değişmektedir. Matris yapısını tanımlamakta kullanılan birçok FPA mimarisi vardır. Bunlardan sıklıkla tercih edilenleri *monolitik* ve *hibrit* olarak tanımlanabilir. Mimarideki temel sorular FPA'nın yüksek performans ile nasıl üretilebileceği hakkındadır. Bu konudaki uygulamalarda; proje programına, bütçesine veya teknik alt yapısına bağlı olarak farklı yaklaşımlar tercih edilebilir [109].

2.4.1. Monolitik FPA

Monolitik (yekpare) FPA uygulamalarında, ışımanın algılanması ve sinyal okuma (çoklama), harici bir okuma devresinden ziyade, dedektör malzemesinin kendisinde elde edilir. Dedektörün ve okuma devresinin tek bir parça olarak entegrasyonu, fabrikasyon ve üretim aşamalarının sayısını azaltır, verimi artırır ve üretim maliyetlerini düşürür. Monolitik FPA'nın en temel bileşeni Şekil 2.11'de gösterilen metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapısıdır. MIS yapısı kızılötesi ışıma ile oluşan fotoakımı algılar ve bu fotoakımın devrede kullanılmasını sağlar [110].



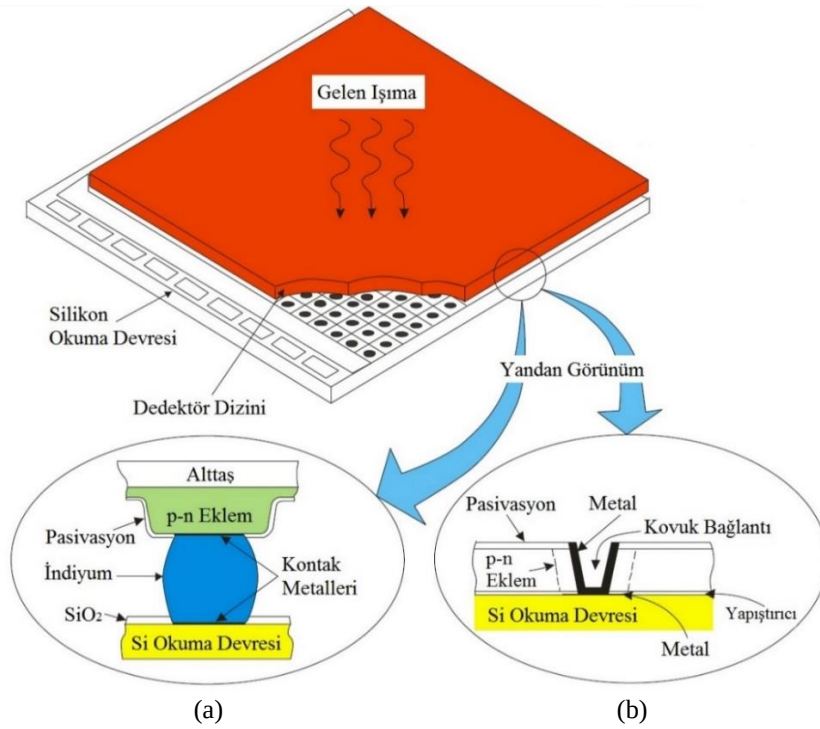
Şekil 2.11. Monolitik FPA

- (a) Tamamen silikon yapı
- (b) Silikon üzerine büyütülmüş yapı
- (c) Silikon olmayan yapı (HgCdTe CCD gibi)

Monolitik FPA'lerin, düşük yasak enerji aralıklı yarıiletkenler kullanılarak, geliştirilmesine yönelik çok fazla çalışma olmasına rağmen, silikon tabanlı FPA teknolojisi pratik kullanım olgunluğuna erişmiş tek teknolojidir. Monolitik FPA'lerin görünür ve yakın kızılötesi (0.7–1.0 μm) bölgede kullanılan yaygın örnekleri ise video kayıt cihazlarında ve dijital fotoğraf makinalarında bulunmaktadır. Silikon teknolojisinin iki ürünü olan CCD'ler (charge coupled devices) ve CMOS'lar (complementary metal-oxide semiconductors) dijital teknoloji dünyasında kendilerine büyük bir pazar payı bulmaktadır.

2.4.2. Hibrit FPA

Hibrit FPA'de dedektör ve okuma devresi farklı alttaşlar üzerine fabrike edilir. Daha sonra dedektör ve okuma devresi Şekil 2.12'de verildiği üzere flip-çip (flip chip) bağlama veya kovuk (loop-hole) arabağlantı teknikleri ile birbirlerine monte edilirler. Bu durumda dedektörü ve okuma devresini bağımsız olarak optimize etmek gerekir. Flip-çip bağlantı tekniğinde hibrit FPA, genellikle FPA'nın ve Si okuma devresinin arayüzlerine kaplanan indiyum tepecikleri (bump)'nin basınç altında kaynaştırılmasıyla elde edilir. Hibrit FPA'de dedektör dizinleri, yarıiletken tabakaların büyütüldüğü ön yüzeyden ya da kızılötesi ışıma için şeffaf olan alttaşın bulunduğu arka yüzeyden aydınlatılabilir. Ancak, arka yüzeyden aydınlatmanın kullanıldığı hibrit FPA'lar daha avantajlıdır [111].



Şekil 2.12. Hibrit FPA

- (a) Flip-çip bağlama tekniği
(b) Kovuk (loop-hole) tekniği

2.4.3. Monolitik ve Hibrit FPA karşılaştırması

Monolitik ve Hibrit FPA'nin karşılaştırılması üretim özelliklerine bağlıdır. Monolitik FPA'ler üretim aşamasında daha az prosese gereksinim duydukları için Hibrit FPA'lerden daha kolay elde edilebilir ve böylece daha az maliyetlidir. Buna karşın, Monolitik FPA'ler genellikle Hibrit FPA'lerden daha düşük performansa sahiptirler. Monolitik FPA'lerde, dedektörü oluşturan yapı ile sinyal yolunun aynı düzlemde olması, yaklaşık %55 gibi düşük dolum oranı (fill factor) ile sonuçlanır. Hibrit FPA'lerin daha fazla üretim adımına ve yüksek maliyete sahip olmalarına karşın dolum oranları %90'lara yaklaşmaktadır. Bu durum Hibrit FPA'lerin kullanıcılara, Monolitik FPA'lerden daha kaliteli görüntüler sunması ile sonuçlanır. Ayrıca, daha yüksek dolum oranı, Hibrit FPA'lerin daha hassas olmalarını sağlar. Özellikle düşük sıcaklıklarda, küçük sıcaklık değişimleri ile yapılan görüntülemelerde oldukça iyi tepki verir. Bazı hibrit FPA kameralar, 0,02°C'lik sıcaklık değişimlerini algılayabilmektedir.

3. DENEYSEL TEKNİKLER

Bu tez çalışmasında incelenen InGaAs/InP fotodedektörlerin yarıiletkenleri, MBE yöntemi ile büyütüldü. Büyütülen numunelerin; yapısal ve elektriksel özellikleri, HRXRD, SIMS ve HMS ölçümleri ile karakterize edildi. Büyütülen numunelerin fabrikasyon işlemleri tamamlanarak, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ prototip fotodedektörler üretildi. Üretilen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ prototip fotodektörler karakterize edilerek, dedektör parametreleri belirlendi.

3.1. InGaAs/InP Yarıiletkenleri Büyütme Yöntemi

MBE ve MOCVD gibi yarıiletken büyütme teknikleri yüksek kaliteli malzemeler elde edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır [112-115]. Bu teknikler arasında MBE tekniği ultra yüksek vakum, devamlı büyüme, hassas olarak kontrol edilebilme ve tekrarlanabilme özelliklerinden dolayı temel araştırmalar için tercih edilmektedir.

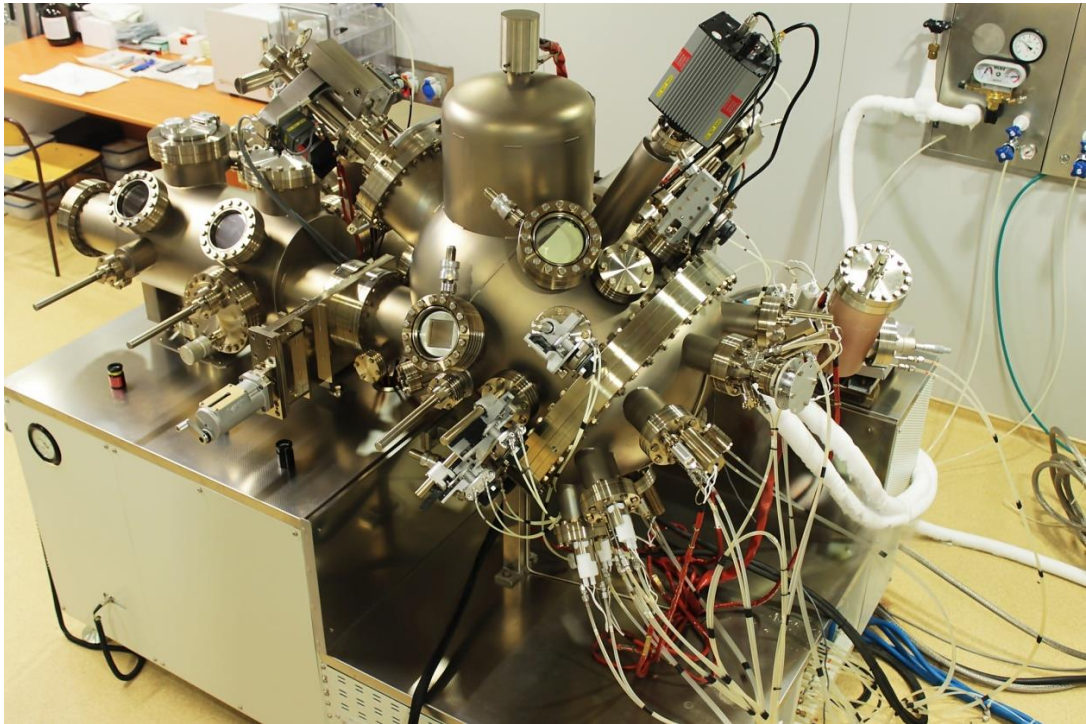
3.1.1. Moleküler Demet Epitaksi (MBE)

MBE, yarıiletken ince epitaksiyel tabakaların büyütülmesi için geliştirilmiş, ultra yüksek vakum ($\sim 10^{-11}$ mbar) şartlarına sahip buharlaştırma tekniklerinden birisidir. Termal kaynaklarda uygun elementlerin buharlaştırılmasıyla üretilen moleküler demetler, ısıtılmış bir alttaş üzerine gönderilerek tek kristal katmanların oluşması sağlanır. Bu katmanların kalınlığı, bileşimi ve katkı seviyeleri demet akılarının hassas bir şekilde ayarlanması ile kontrol edilebilir. Büyütülen filmin istenilen kalınlıkta olabilmesi için ayrıca kaynaklar ve alttaş arasında mekanik kesiciler bulunmaktadır. Büyütülecek filmin homojenliğinin sağlanabilmesi amacıyla, kaynaklar uygun geometride konumlandırılmıştır. Ayrıca büyütme işlemi sırasında alttaşın döndürülmesi yine homojen bir film elde edilmesinde önemli rol oynamaktadır.

MBE’de ultra yüksek vakum (UHV) şartlarının varlığı ve büyütme odasının özel olarak dizaynı ile yansımali yüksek enerjili elektron kırınımı (RHEED), Auger elektron spektroskopisi (AES), X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS), düşük

enerjili elektron kırınımı (LEED), ikincil iyon kütle spektrometresi (SIMS) ve elipsometri gibi alttaş yüzeyi ve büyütme görüntülemek için tanımlama tekniklerinin de aynı anda kullanılmasına izin verir [116].

Resim 3.1’de verilen VG–Semicon V80H–MBE sistemi kısaca; yükleme odası, hazırlık odası, büyütme odası, transfer mekanizmaları ve bilgisayara bağlı kontrol ünitesini içermektedir. Yükleme, hazırlık ve büyütme odası ultra yüksek vakum şartları altında tutulmaktadır. Büyütme odasında; alttaş ısıtıcısı, homojenlik sağlamak için alttaş döndürücü, alttaşı yüklemek ve transfer yapabilmek için hareket edebilen magnetler, kaynak hücreleri, kaynak kesicileri, RHEED cihazının bileşenleri, kütle spektrometresi, akı ölçümü için iyon sayacı ve gözlem pencereleri bulunmaktadır. MBE sisteminde büyütme odası, sıvı azotla soğutulan bir bölge ile çevrilidir. Sıvı azot sayesinde, kaynak hücreler arasında olabilecek termal etkileşme minimuma indirilir ve ortamda bulunan kalıntı gazlar soğuk yüzeyde tuzaklanarak büyütülen filmde istenmeyen safsızlıkların oluşumu önlenir [117].



Resim 3.1. V80H model MBE sistemi

3.2. InGaAs/InP Yarıiletkenlerinin Karakterizasyon Teknikleri

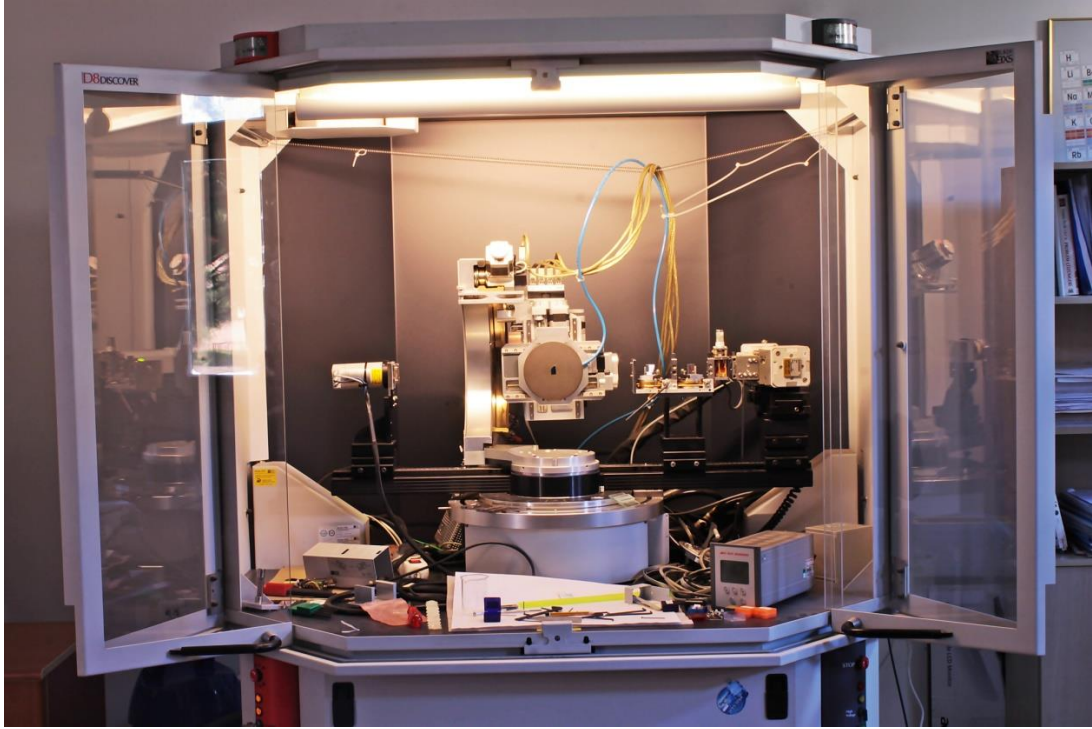
Yarıiletken karakterizasyon teknikleri, yarıiletkenlerin özellikleri hakkında bilgi edinilmesi amacıyla kullanılır. Karakterizasyon işleminden elde edilen bilgi, incelenen yarıiletkenin belli işlevsellığe sahip özel bir aygıtın bileşeni için uygun olup olmadığını belirleme açısından önemlidir. Yarıiletkenin karakterizasyonu genel olarak bir yarıiletkenin büyütülmesinden hemen sonra başlatılır.

3.2.1. Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD)

X-ışını Kırınımı (XRD) büyütülen tabakalarının kalınlığını, çoklu alaşımların mol oranlarını ve ince filmlerde oluşan gerginliği, kusur tiplerini belirlemeye yarayan çok yönlü deneysel bir tekniktir [118]. XRD'nin çalışma prensibi kristaldeki örgü parametreleri ile aynı mertebede dalgaboyuna sahip X-ışını dalgalarının kristal ile kırınımına uğramasına dayanır.

X-ışınları ile örgü sabitleri, kalite analiz eğrisi (Rocking curve) ve çoklu yapıların kalınlık, kalite, alaşım oranı gibi bilgileri elde edilebilir [116].

Bu tez çalışmasında yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı deneyinde ölçüm için Bruker D8 Discover XRD cihazı kullanıldı. Bu cihazda, Ge (220) yönelimli dört kristal tekrenklendirici (monokromatör) ve X-ışını kaynağı olarak $\text{CuK}\alpha_1$ (1.540 Å) kullanılmaktadır. Cihazın genel görüntüsü Resim 3.2'de gösterildi.



Resim 3.2. Bruker D8 Discover cihazının genel görünümü

3.2.2. İkincil İyon Kütle Spektroskopisi (SIMS)

SIMS bir katının yüzeyinde ve içerisinde farklı tipteki atomların türünü ve miktarlarını tanımlamak için kullanılan denysel bir tekniktir. Bu teknikte malzeme, yüksek enerjili (1–30 keV) iyon demeti ile bombardıman edilir ve malzemeden atomların saçtırılması (sputtering) ile oluşan ve “ikincil iyonlar” olarak adlandırılan bu iyonlar manyetik alan altında kütlelerine göre ayrılırlar ve uygun dedektörlerle sayılırlar. Daha sonra bu saçtırılan iyonlar toplanır ve bir kütle spektrometresi ile analiz edilir. Elementlerin konsantrasyonları ikincil iyonlara uygun sayım yapılarak, elementlerin atomik kütleleri vasıtasıyla belirlenir.

Bir SIMS ölçümünün hassasiyeti, ikincil iyon saçtırmasının verimine bağlıdır. Bu yüzden birincil demetin uygun seçimi SIMS’in hassasiyetini arttırmada önemlidir. Düşük iyonlaşma potansiyeline sahip elementleri saçtırmak için genellikle oksijen (O_2) atomları kullanılır. Diğer taraftan elektronegatif elementlerden negatif iyonların

saçtırılmasında sezyum (Cs) atomları daha iyidir. SIMS'in kaydetme limiti, iyon demetinin uygun olmayan seçimi ile ciddi bir şekilde azaltılır.

Genellikle SIMS, *statik* ve *dinamik* olarak çalıştırılır [116].

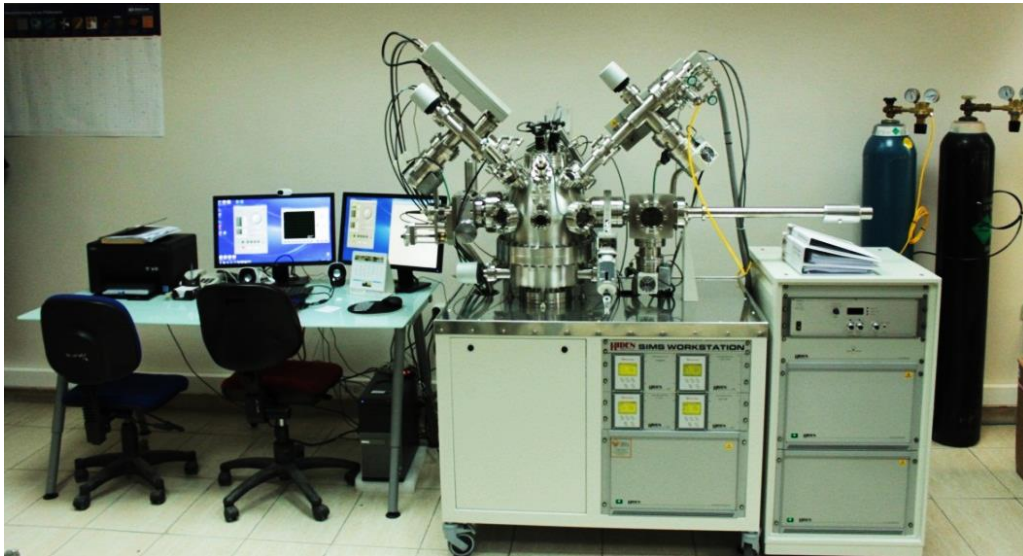
Statik

SIMS, düşük enerjili (0.5–3 keV) iyon kaynakları ile çalışır. Düşük enerji düşük saçtırma oranları ile sonuçlanır. Bu çalışma modu yüzey analizi için uygundur, çünkü iyon bombardımanı ile yüzeyi değiştirmek uzun zaman alacaktır.

Dinamik

SIMS, yüksek enerjili (3 keV'dan daha yüksek) iyon demetleri ile çalışır. Bu durum, yüksek saçtırma oranı ile sonuçlanır. Çalışılan numunelerde, derinlik analizi için uygundur.

Bu tez çalışmasında kullanılan Hiden Analytical SIMS analiz sistemi Resim 3.3'de gösterildi.



Resim 3.3. Hiden Analytical SIMS Workstation sistemi

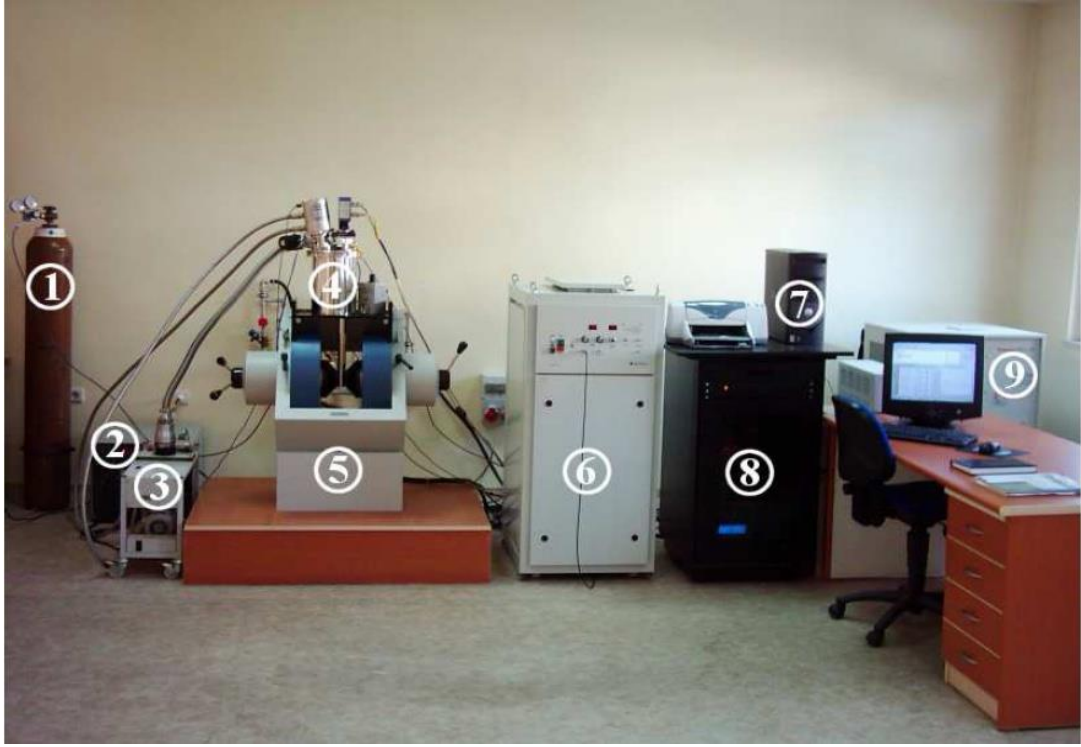
3.2.3. Hall etkisi ölçüm sistemi (HMS)

Hall Etkisi ölçüm sistemi, yarıiletken bir malzemenin veya aygıtın, taşıyıcı yoğunluğu, mobilite gibi elektriksel parametrelerinin deneysel olarak belirlenmesinde kullanılan sistemlerden birisidir. Hall etkisi ölçüm sonuçları ve teorik modellemeler kullanılarak taşıyıcıların, difüzyon uzunlukları ve ömürleri gibi elektriksel çıktı parametreleri bulunabilir.

Ohmik kontakların kalitesi ve boyutları, örneğin homojenliği ve kalınlığının tam olarak bilinmesi ve fotovoltaiik etkilerin minimize edilmesi (örneğin; karanlıkta ölçüm alınması) Hall etkisi ölçümü için gereklidir. Ayrıca örneğin boyutları kontak boyutlarına ve örneğin kalınlığına kıyasla büyük olmalıdır. Son olarak numune sıcaklığını, manyetik alan şiddetini, elektrik akımını ve voltajını doğru bir şekilde ölçebilecek bir düzeneğin olması gerekmektedir [118].

Sistemin kontrol ünitesinden malzemeye uygulanacak olan sabit akım, manyetik alan ve sıcaklık değerleri kontrol edilebilir. Kontrol sisteminin bağlı olduğu bilgisayar, ölçüm sırasındaki verileri alarak programa aktarır ve bu program sayesinde Van der pauw ve Hall ölçüm etkisi tekniklerini kullanarak gerekli olan öz direnç (ρ), Hall taşıyıcı yoğunluğu (n_H) ve Hall katsayısı (R_H) değerlerinin bulunmasını sağlar.

Bu tez çalışmasında kullanılan empedans girişli Lakeshore 7700 serisi Hall ölçüm sistemi Resim 3.4’de verildi.



Resim 3.4. Lakeshore 7700 serisi Yüksek Empedans Hall etkisi ölçüm sistemi

- (1) He tüpü
- (2) Kapalı devre He soğutma ünitesi
- (3) Mekanik pompa destekli turbo moleküler vakum pompası
- (4) Kryostat
- (5) Elektromıknatıs
- (6) Elektromıknatıs güç kaynağı
- (7) Bilgisayar
- (8) Sıcaklık kontrol ünitesi
- (9) Su soğutma sistemi

3.2.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

SEM, çok küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronlarla yüzeyin taranması prensibiyle çalışır. En sık kullanıldığı biçimiyle, yüzeyden yayılan ikincil elektronlarla yapılan ölçüm, özellikle yüzeyin engebeli (topografik) yapısıyla ilişkili bir görüntü oluşturur.

Temel olarak taramalı elektron mikroskobu; tungsten, lantan hekza borit katottan veya alan emisyonlu tabancadan (FEG) ortaya çıkan elektronların, incelenecek malzeme

yüzeyine gönderilmesi sonucu oluşan etkileşmelerin analizidir. Bir taramalı elektron mikroskopunda görüntü oluşumu temel olarak; elektron demetinin incelenen örneğin yüzeyi ile yaptığı fiziksel etkileşmelerin (elastik ve elastik olmayan çarpışmalar gibi) sonucunda ortaya çıkan sinyallerin toplanması ve incelenmesi prensibine dayanır.

Resim 3.5'te Bilkent NANOTAM'da bulunan Raith e-line nanolitografi sistemine entegre SEM sistemi görülmektedir.



Resim 3.5. Taramalı elektron mikroskobu

3.3. InGaAs/InP Kızılötesi Fotodedektörlerin Fabrikasyon Adımları

InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör üretiminde aşağıda listelenen adımlar uygulanır.

- Adım 1:** Numune kesimi ve temizliği
- Adım 2:** p^+ kontak yapılması
- Adım 3:** Aygıt adacığı aşındırması
- Adım 4:** n^+ kontak yapılması
- Adım 5:** Numunenin tavllanması
- Adım 6:** Numune yüzeyine dielektrik malzeme kaplanması

3.3.1. Numune kesimi ve temizliği

Büyütölen InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesi, dilimleme-kesim cihazında fotomaske boyutuna uygun olarak kesilir. Bu kesim sırasında büyütölen yüzey fotodirenç (fotoresist) ile korunur. Kesim işleminden sonra numunenin fabrikasyona hazır hale gelebilmesi için aseton, propanol alkol ve de-iyonize (DI) su ile temizlenir. Daha sonra numune, fotodirenç kaplanarak p^+ kontak yapımına hazır hale getirilir.

3.3.2. p^+ kontak yapılması

p^+ kontak yapımı aşamasında, InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesi üzerine metal kaplama yapılır. Öncelikle, numune yüzeyine fotodirenç bir çevirici (spinner) yardımı ile homojen olarak kaplanır. Maske hizalama cihazı kullanılarak, fotomaskenin p^+ kontak figürü numune üzerine işlenir. p^+ kontak metali kaplanacak yerler metal kaplamaya hazır hale getirilmiş olur. Fotolitografi işleminden sonra kontak bölgelerinin temizliği için numune, O_2 plazma ortamında bekletilir. Daha sonra elektron demeti ile metal buharlaştırma yöntemiyle numune üzerine metal buharlaştırılır. Numune, işlem bittikten sonra aseton, propanol ve DI su ile temizlenir.

3.3.3. Aygıt adacığı aşındırması

InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesi üzerinde bulunan p^+ kontak bölgelerini birbirinden izole etmek amacıyla fotolitografi işlemi uygulanır. Daha sonra, kuru aşındırma yöntemiyle, İndüktif Eşleşmiş Plazma-Reaktif İyon Aşındırma (ICP-RIE) cihazında BCl_3 , Cl_2 ve Ar gaz karışımları kullanılarak işlenen bölgeler istenilen derinliğe kadar aşındırılır. Bu işlemin ardından, aygıt adacıkları hazır hale gelir. Numune, işlem bittikten sonra aseton, propanol ve DI su ile temizlenir.

3.3.4. n^+ kontak yapılması

Fabrikasyonun bu aşamasında, örneğın n^+ kontak kaplaması yapılır. Numunenin ön yüzeyine fotolitografi işlemi uygulanarak, n^+ kontak bölgeler numune üzerine işlenir.

Fotolitografi işleminden sonra kontak bölgelerinin temizliği için numune, plazma temizleme (plasma asher) cihazında, O_2 plazma ortamında bekletilir. Daha sonra elektron demeti ile metal buharlaştırma yöntemiyle numune üzerine metal buharlaştırılır. Numune, işlem bittikten sonra aseton, propanol ve DI su ile temizlenir.

3.3.5. Numunenin tavllanması

Fabrikasyonun bu aşamasında, kaplanan metallerin ohmik özellik kazanmalarını sağlamak için numune, hızlı termal tavlama (RTA) cihazında *forming gaz* ($\%5 H_2 + \%95 N_2$) atmosferinde tavllanır.

3.3.6. Numune yüzeyine dielektrik malzeme kaplanması

Fabrikasyonun son aşaması dielektrik malzeme kaplanmasıdır. Bunun için numune yüzeyine dielektrik litografisi yapılır. Bu litografiden sonra, numune RF Magnetron Püskürtme sistemine yüklenir. Püskürtme sistemi püskürtme şartlarına hazır hale getirilerek, Si_3N_4 malzemesi istenilen kalınlıkta kaplanır. Kaplama sonrası numune aseton propanol ve DI su ile temizlenerek, kontakları dielektrik malzeme kaplanmasından koruyan fotodirenç temizlenir.

Bu son adımla birlikte InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör üretimi tamamlanır.

3.4. Fotodedektör Parametre Analiz Metodları

Üretilen $In_xGa_{1-x}As/InP$ kızılötesi fotodedektörün parametre analizinde aşağıda listelenen adımlar uygulanır.

-  *Akım-Voltaj (I-V) Karakteristiği Ölçümü* ile $In_xGa_{1-x}As/InP$ fotodedektörlerin; karanlık akımı ve aşağı kırılma voltajı belirlenir.
-  *Spektral Fotoakım Ölçümü* ile $In_xGa_{1-x}As/InP$ fotodedektörlerin; çalışma dalga boyu, spektral kuantum verimi ve kızılötesi / uzak kızılötesi kontrastı belirlenir.

- ✚ *Düşük Frekanslarda Gürültü Karakteristiği Ölçümü* ile $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ fotodedektörlerin; spektral gürültü, dedektivite, gürültü eşiti güç değerleri belirlenir.
- ✚ *Dizin Verim Ölçümü* ile $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ fotodedektörlerin istatistiksel metod ile çalışanları ve çalışmayanları belirlenir.

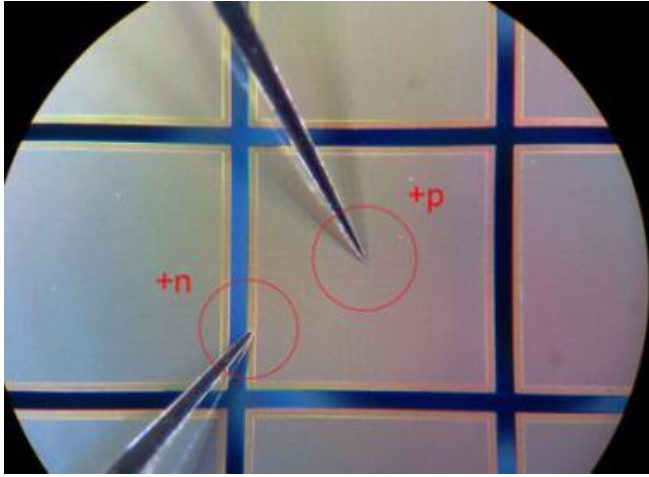
3.4.1. Akım-Voltaj (I-V) karakteristiği ölçümü

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ kızılötesi fotodedektörün, elektriksel ölçümleri kapsamında Akım-Gerilim (I-V) ölçümlerinde, Resim 3.6'da verilen; sonda istasyonu (RF1 Probe Station), ayarlanabilir lazer kaynak (Tunable Laser Source), yarıiletken parametre analizörü (Semiconductor Parameter Analyser), optik güç ölçer ve 1540 nm dalgaboyu için uygun fiber optik kablolar kullanılır.



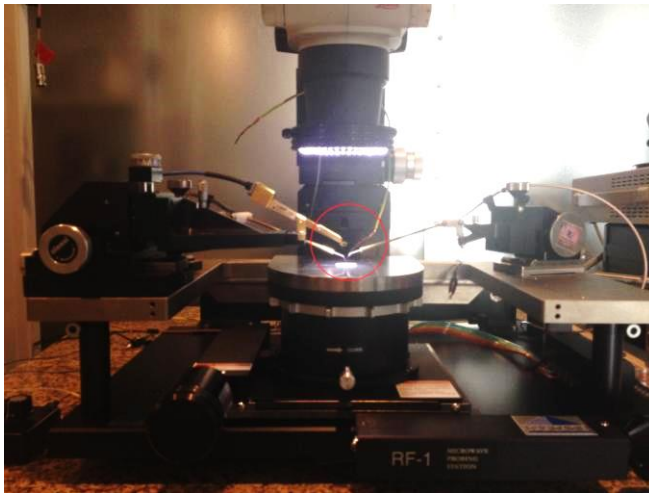
Resim 3.6. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ kızılötesi fotodedektörün ölçümlerinde kullanılan cihazlar
 (1) Sonda İstasyonu (Cascade RF1 Probe Station)
 (2) Ayarlanabilir Lazer Kaynak (Photonetics Tunable Laser Source)
 (3) Yarıiletken Parametre Analizörü (Agilent B1500 Semiconductor Parameter Analyser)

Ölçümler sırasında ayarlanabilir lazer kaynağından çıkan 1540 nm dalgaboyundaki ışık, sonda istasyonu üzerinde bulunan prototip üzerine düşürülür. Bu işlemle beraber, Şekil 3.7’de görüldüğü gibi yarıiletken parametre analizörü mikro sondalar yardımı ile fotodedektörün n^+ ve p^+ uçlarına bağlanır. Bu aşamadan sonra farklı gerilimler altında fotodedektörün oluşturduğu akım analizör tarafından kaydedilir.



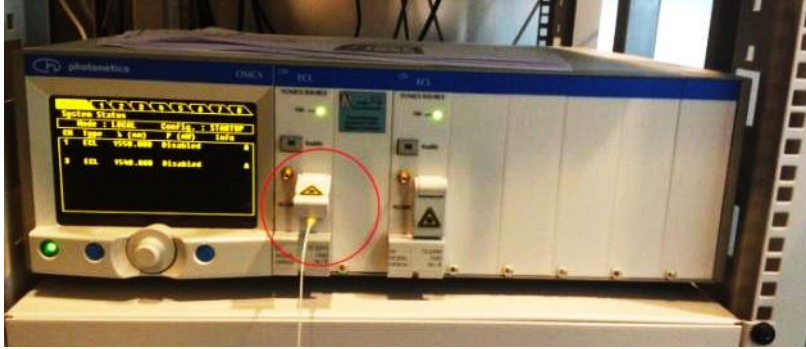
Resim 3.7. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ kızılötesi fotodedektörün n^+ ve p^+ bölgelerine yapılan kontaklar

Resim 3.8’de ayarlanabilir lazer kaynağından çıkan 1540 nm dalgaboyundaki ışığı örneğin üzerine taşımaya yarayan fiber sonda görülmektedir. Resim 3.8’de daire içine alınmış fiber sonda ile 1540 nm dalgaboyuna sahip ışık prototip üzerine düşürülür.



Resim 3.8. Fiber sonda

Ayarlanabilir lazer kaynak sistemi ise Resim 3.9’da gösterilmiştir.



Resim 3.9. Ayarlanabilir lazer kaynak

Resim 3.9’da daire içinde gösterilen çıkıştan alınan 1540 nm dalgaboyundaki ışık bir fiber kablo ile prototip üzerine taşınır.

3.4.2. Spektral fotoakım ölçümü

Resim 3.10’da gösterilen ve $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ kızılötesi fotodedektörün, spektral fotoakım ölçümleri kapsamında kullanılan cihazlar;

- Sonda istasyonu (Probe Station),
- Kızıl ötesi ışık kaynağı (IR Light Source),
- Tekrenklendirici (monochromator),
- Yarıiletken parametre analizörü (Parameter Analyser)

‘dür. Bu cihazların yanı sıra optik ölçümlerde optik güç ölçer ve uygun fiber kablolar kullanılır.



Resim 3.10. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ kızılötesi fotodedektörün spektral ölçümlerinde kullanılan cihazlar

- (1) Tungsten lamba güç kaynağı (AS220)
- (2) Tungsten lamba
- (3) Tekrenklendirici (DK240 Monochromator)
- (4) Yarıiletken Parametre Analizörü (HP 4145A Parameter Analyser)

Tekrenklendirici içerisinde bulunan kırınım ağı istenilen dalgaboyu dışında, bu dalgaboyunun harmonikleri olan dalgaboylarına sahip ışıklarda üretilir. Bu harmonikleri süzmek ve istenilen dalgaboyu aralığında ışık üretmek için Resim 3.11’de görülen odaklayıcı mercek arkasına silikon filtre konulur. Kızılötesi ışık kaynağının spektral aydınlatma gücü, 1050 nm ile 1800 nm aralığında optik güç ölçer ile ölçülür. Tekrenklendiriciden çıkan ışık Resim 3.11’de gösterilen mercek ile fiber optik kablunun girişine odaklanır.



Resim 3.11. Tekrenklendirici çıkışında bulunan odaklayıcı mercek ve fiber optik kablo

Tekrenklendirici kaynaktan çıkan ışık sonda istasyonu üzerinde bulunan test dedektörleri üzerine fiber kablolar ile düşürülür. Dedektörlerin karanlık akımları ve $1050\text{ nm} - 1800\text{ nm}$ dalgaboylu aydınlatmalardaki fotoakımları ölçülür.

$1050\text{nm} - 1800\text{nm}$ dalgaboyu aralığında 500 mV polarlama geriliminde ışık düşürülür. Ölçülen akımlardan karanlık akımlar çıkarılarak, fotoakımlar hesaplanır. Bu değerler kaynağın spektral optik gücü ile bölünerek fotocevaplar hesaplanır.

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ kızılötesi fotodedektörün, kızılötesi / görünür kontrastını belirlemek amacı ile dedektörler 600 nm ve 1420 nm dalgaboyunda aydınlatılırken fotoakımlar ölçülür. Bu fotoakımlar optik güce bölünerek fotocevap hesaplanır. Bu iki fotocevabın oranı ile kızılötesi / görünür kontrastı belirlenir.

3.4.3. Düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümü

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ kızılötesi fotodedektörün, düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümleri kapsamında kullanılan cihazlar Resim 3.12’de verildi.



Resim 3.12. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ kızılötesi fotodedektörün, düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümlerinde kullanılan cihazlar
 (1) Güç kaynağı (HP E3631A Power Supply)
 (2) Akım yükselteci (SRS SR570 Current Preamplifier)
 (3) Sinyal Analizörü (35670A Sinyal Analyzer)

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ kızılötesi fotodedektörün, ölçümünden önce sinyal analizörü ile $0 - 12,5 \text{ kHz}$ frekans aralığında sistem gürültüsü ölçülür ve daha sonra fotodedektörün aynı frekanslarda gürültü ölçümü yapılır.

3.4.4. Dizin verim ölçümü

Dizindeki bütün elemanları test etmek çok zaman alacağından, dizin başarı oranını hesaplamak için istatistiksel örnekleme yapılır. Bu şekilde, dizindeki elemanlardan bazılarını rastgele örnekleyip, örnek başarı ortalamasından ve standart sapmasından, dizindeki çalışan eleman oranının hedeflenen orana eşit veya daha büyük olma olasılığı hesaplanır [119-120].

Dizinde bulunan pikseller için uygun gerilimde fotocevap akım ortalaması ($\bar{I}$) ve fotocevap akımlar için standart sapma (σ) hesaplanır. Fotocevap akım değeri $\bar{I} \pm \sigma$ aralığında bulunan pikseller çalışan, bu aralığın dışında kalan pikseller ise ölü piksel olarak kabul edilir.

Dizindeki n elemanda ölçüm yapılırsa, örnek küme istatistiksel sonuçları Eş. 3.1'e göre hesaplanır.

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{eleman "i" OK} \\ 0 & \text{eleman "i" hasarlı veya ölü} \end{cases} \quad (3.1)$$

n, örneklenen eleman sayısı olmak üzere,, örnek kümedeki çalışan eleman ortalaması $\bar{X}$, Eş. 3.2 ile verilir.

$$\bar{X} = \frac{1}{n}(X_1 + X_2 + \dots X_n) \quad (3.2)$$

Örnek kümenin standart sapması, S ise Eş. 3.3. ile verilir.

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \bar{X}(1 - \bar{X}) \quad (3.3)$$

Yeterince büyük örnek kümelerinde ($n \geq 30$) örnek ortalaması $\bar{X}$ normal dağılımlı bir değişken olarak kabul edilir. $\bar{X}$ değişkeninin ortalama değeri dizindeki çalışan eleman oranıdır (p). Dizin varyantına σ^2 dersek, $\bar{X}$ değişkeninin standart sapması ise Eş. 3.4 ile verilir.

$$\bar{X} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.4)$$

$$Z = \frac{\bar{X} - p}{\bar{X}} \Rightarrow Z = \frac{\bar{X} - p}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad (3.5)$$

Dizin standart sapması, örnek sapmasına eşit varsayıldığında, dizin başarı oranının hedeflenen dizin başarı yüzdesinden (p_0) eşit veya büyük olma olasılığı aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}
 P(p \geq p_0) &= P\left(\frac{\bar{X}-p}{\sigma/\sqrt{n}} \leq \frac{\bar{X}-p_0}{\sigma/\sqrt{n}}\right) \\
 &= P\left(Z \leq \frac{\bar{X}-p_0}{\sigma/\sqrt{n}}\right) \\
 &= P\left(Z \leq \frac{\bar{X}-p_0}{S/\sqrt{n}}\right)
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Bu olasılık değeri, standart normal dağılım tablolarından okunabilir.

Yukarıda da açıklandığı üzere, standart sapma aralığı içerisinde kalan aygıtlar çalışan aygıtlar olarak kabul edilir.

4. InGaAs/InP MSM KIZILÖTESİ PROTOTİP FOTODEDEKTÖR ÜRETİMİ ve KARAKTERİZASYONU

Bu bölüm, “*Structural and Electrical Characterizations of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ Structures for Infrared Photodetector Applications*” ismiyle, *Journal Applied Physics* dergisinde makale olarak yayınlanmıştır [121].

Üç adet farklı In konsantrasyonuna sahip $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapısı, fotodedektör uygulamalarında kullanılmaları amacıyla MBE yöntemi ile büyütüldü. Numunelerin yapısal özellikleri HRXRD ve SIMS ölçümleri ile belirlendi. Üç adet InGaAs/InP metal-yarıiletken-metal (MSM) aygıtı oda sıcaklığında fabrike edildi. MSM aygıtların; idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve doyum akımı gibi elektriksel özellikleri, ileri ve geri beslem Akım-Gerilim (I-V) karakteristikleri ile belirlendi. MSM aygıtlarına ait taşıyıcı rekombinasyon ömrü ve difüzyon uzunluğu, Hall Etkisi ölçümleri sonucu elde edilen taşıyıcı yoğunluğu ve mobilitesi kullanılarak hesaplandı. Elektriksel ölçümler sonucu elde edilen veriler incelendiğinde, MSM aygıtlarının Schottky bariyer yüksekliğinin arttığı gözlemlendi. Özellikle de InGaAs ile InP örgü uyumunun en iyi olduğu MSM aygıtı geleneksel Schottky bariyer yüksekliği olan 0,2 eV değerini 0,642 eV değerine yükseldi. Elde edilen sonuçlar, oda sıcaklığında fabrike edilen InGaAs/InP MSM aygıtlarının kızılötesi fotodedektör uygulamaları için tercih edilebilir olduğunu gösterdi.

4.1. InGaAs/InP MSM Kızılötesi Fotodedektörlere Giriş

Bu çalışmada, kızılötesi fotodedektör uygulamaları için üç adet $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapısı incelendi. Farklı indiyum alaşım oranına sahip $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ince film tabakaları n tipi InP alttaşlar üzerine katı kaynaklı MBE sistemi kullanılarak büyütüldü. Yapıların kristal kalitesi, indiyum alaşım oranı (x), örgü sabiti (a), tanecik boyutu (D), dislokasyon yoğunluğu (δ) ve zorlanma (ε) gibi parametreleri HRXRD ölçümleri ile elde edildi. Büyütülen yapıların arayüzey durumları ve indiyum homojenliği ise SIMS analizi sonucu belirlendi. Üç adet Au/InGaAs/InP/Ni/Au:Ge MSM yapısının fabrikasyonu oda sıcaklığında tamamlandı. MSM aygıtlarının deneysel ileri ve geri

beslem I-V ölçümleri yine oda sıcaklığında yapıldı. İdealite faktörü (n), bariyer yüksekliği (Φ_B) ve doyum akımı (I_0) yapılan I-V ölçümleri ile belirlendi. Ek olarak, MSM aygıtlarının taşıyıcı ömrü (τ) ve difüzyon uzunluğu (L) değerleri, Hall Etkisi ölçümleri sonucu elde edilen mobilite (μ) ve taşıyıcı yoğunluğu (N) verileri kullanılarak hesaplandı.

4.2. InGaAs/InP MSM Kızılötesi Fotodedektör Üretimi

Üç adet n-In_xGa_{1-x}As ince film yapısı, n-InP alttaşlar üzerine In alaşım miktarı değiştirilerek, katı kaynaklı V80H MBE sisteminde büyütüldü. Büyütmeye başlanmadan önce, InP alttaşlar, standart asidik temizleme solüsyonuna eklenen alkalın (sodyum hidroksit) ile hazırlanmış, yeni bir aşındırma ve temizleme işlemi ile kimyasal olarak temizlendi [122]. Alttaşlar MBE sistemine yüklendikten sonra, kalıntı organiklerden temizlenmesi amacıyla, hazırlık odasında 350°C’de 1 saat süreyle ayrı ayrı ısıtıldı. Ardından, alttaşlardan biri büyütmeye odasına transfer edildi ve burada ilk olarak alttaştan oksit uzaklaştırma işlemi, RHEED desenleri gözlenerek, tamamlandı. Si katkılı ve 850 nm kalınlıklı n tipi epitaksiyel In_xGa_{1-x}As tabakası, 560°C alttaş sıcaklığında, farklı zamanlarda n tipi InP alttaşlar üzerinde büyütüldü. Büyütülen bu üç adet In_xGa_{1-x}As/InP yapısı PD1, PD2 ve PD3 olarak isimlendirildi. Her bir In_xGa_{1-x}As/InP yapısında farklı indiyum alaşım oranı elde etmek amacıyla, büyütmeye süresinde, indiyum demetine özgü basınç (BEP) değiştirildi. Buna karşın galyum BEP sabit bir değerde tutuldu. Bütün BEP değerleri ve silisyum hücre sıcaklıkları Çizelge 4.1’de verildi.

Çizelge 4. 1. In_xGa_{1-x}As/InP yapılarının BEP değerleri ve Si sıcaklıkları

<i>Yapı</i>	<i>Ga BEP (mbar)</i>	<i>In BEP (mbar)</i>	<i>Si Hücre Sıcaklığı (°C)</i>
PD1	3.5×10^{-7}	7.4×10^{-7}	1050
PD2	3.5×10^{-7}	7.5×10^{-7}	1100
PD3	3.5×10^{-7}	7.8×10^{-7}	1100

HRXRD ölçümleri, $\text{CuK}\alpha 1$ (1.540 Å) radyasyonu ve Ge (220) simetrik tekrenklendirici kullanılarak, D-8 Bruker Yüksek Çözünürlüklü Difraktometre sistemi ile yapıldı. Difraktometrenin açısal çözünürlüğü Si kalibrasyon numunesi ile 0.004°'dir.

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ numunesinin büyütülmesinden sonra, numune içerisindeki In kompozisyon oranı değişimini belirleyebilmek amacıyla, Hiden SIMS sistemi ile In kompozisyon oranının profili çıkartıldı. In, Ga, As, P ve Si atomlarının değişimi ve In kompozisyonu hakkında bilgi elde edildi. SIMS analizinde, 5 keV O_2 gaz kaynağı aşındırma tabancası olarak kullanıldı. O_2 aşındırma demeti, numune üzerindeki $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 'lik bir alana yönlendirilirken, analiz sinyali aşındırma demetini takip ettirildi. Aşındırma hızı 25 nm/min'de sabit tutularak, daha hassas bir ölçüm gerçekleştirildi. Aşındırılan bölge içerisindeki malzemeler kütle spektrometresi ile sayılarak, analiz tamamlandı. Analiz sonrasında profilometre (Veeco, Dektak 150) ölçümü yapılarak, açılan kraterin derinliği ölçüldü. Gerekli hesaplamalar yapılarak, derinliğe göre atomların dağılımı belirlendi.

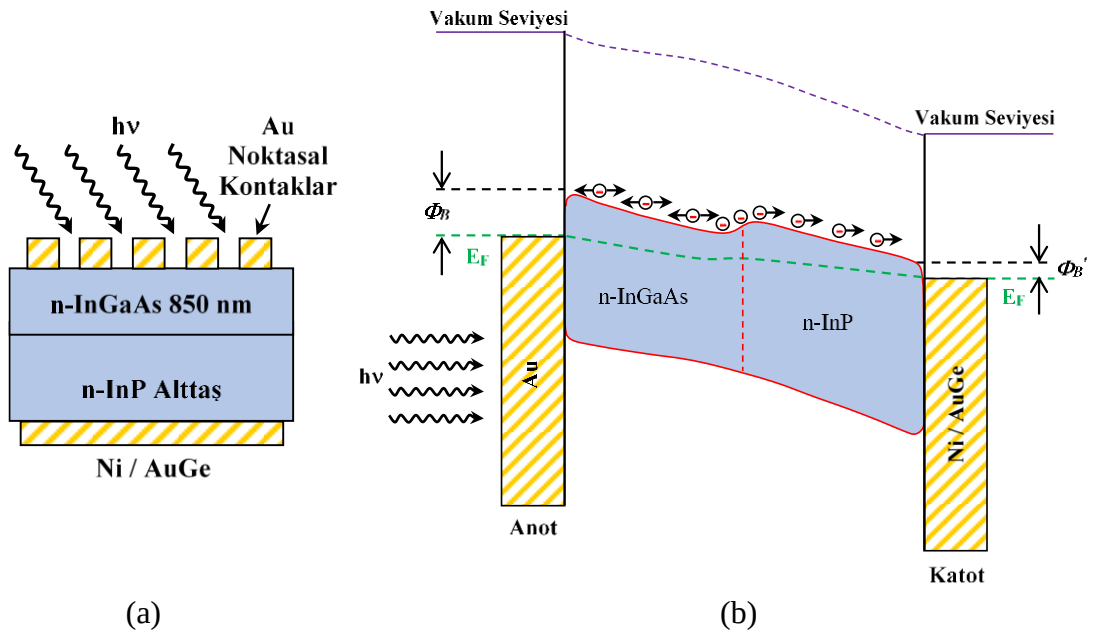
Tüm numuneler aygıt fabrikasyonu yapılmak üzere $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 'lik parçalara bölündü. Aygıt fabrikasyonu, ohmik arka kontak, doğal oksit tabakasının yüzeyden uzaklaştırılması ve Schottky kontak adımlarını içermektedir. Numuneler aseton, metanol ve de-iyonize (DI) su ile temizlendikten ve azot gazı ile kurutulduktan sonra, ohmik arka kontak, 1.0×10^{-8} mbar'lık taban basıncına sahip termal buharlaştırma sisteminde oluşturuldu. Arka ohmik kontak metalizasyonu, InP alttaşlar üzerine yüksek saflıktaki (99.999%) Ni ve Au:Ge'un oda sıcaklığında, 200 Å ve 2000 Å kalınlıkta buharlaştırılması ile tamamlandı. Metalizasyondan sonra, arka kontakların ohmik özellik kazanmaları için numuneler 5.41×10^{-6} mbar basınçta, 360°C'de, 3 dakika tavlandı. Doğal oksit tabakasının InGaAs yüzeyinden kaldırılması için ise numuneler $1\text{H}_2\text{SO}_4:1\text{H}_2\text{O}_2:80\text{DI}-\text{H}_2\text{O}$ çözeltisinde 1 dakika bekletildi ve ardından DI- H_2O içerisinde durularak, azot gazı ile kurutuldu. Son olarak, noktasal Schottky kontaklar, termal buharlaştırma sisteminde, 3.73×10^{-6} mbar'lık basınç altında, yüksek saflıktaki (99.999%) Au'nın, 1200 Å kalınlıkta ve oda sıcaklığında buharlaştırılması ile tamamlandı.

Fabrikasyonu tamamlanan bu aygıtlar;

- MSM1 ($\text{Au}/\text{In}_{0.5410}\text{Ga}_{0.4590}\text{As}/\text{InP}/\text{Ni}/\text{Au:Ge}$),
- MSM2 ($\text{Au}/\text{In}_{0.5430}\text{Ga}_{0.4570}\text{As}/\text{InP}/\text{Ni}/\text{Au:Ge}$),
- MSM3 ($\text{Au}/\text{In}_{0.5575}\text{Ga}_{0.4425}\text{As}/\text{InP}/\text{Ni}/\text{Au:Ge}$)

olarak isimlendirildi.

MSM aygıtların yandan şematik gösterimi ve enerji bant diyagramları, sırasıyla, Şekil 4.1 (a) ve (b)'de verildi.



Şekil 4.1. MSM yapılarının
(a) yandan şematik gösterimi
(b) enerji bant diyagramı

Burada; Φ_B , aygıtın Schottky bariyer yüksekliğini göstermektedir. Φ_B' , kontağın iyi ohmik davranış göstermesi için her zaman sıfıra yakın olmalıdır.

Bir MSM fotodedektörde kızılötesi ışıma, Φ_B bariyer yüksekliğine bağlı olarak, malzeme içerisinde elektron etkileşimleri sonucu soğurulur. Kızılötesi ışımının

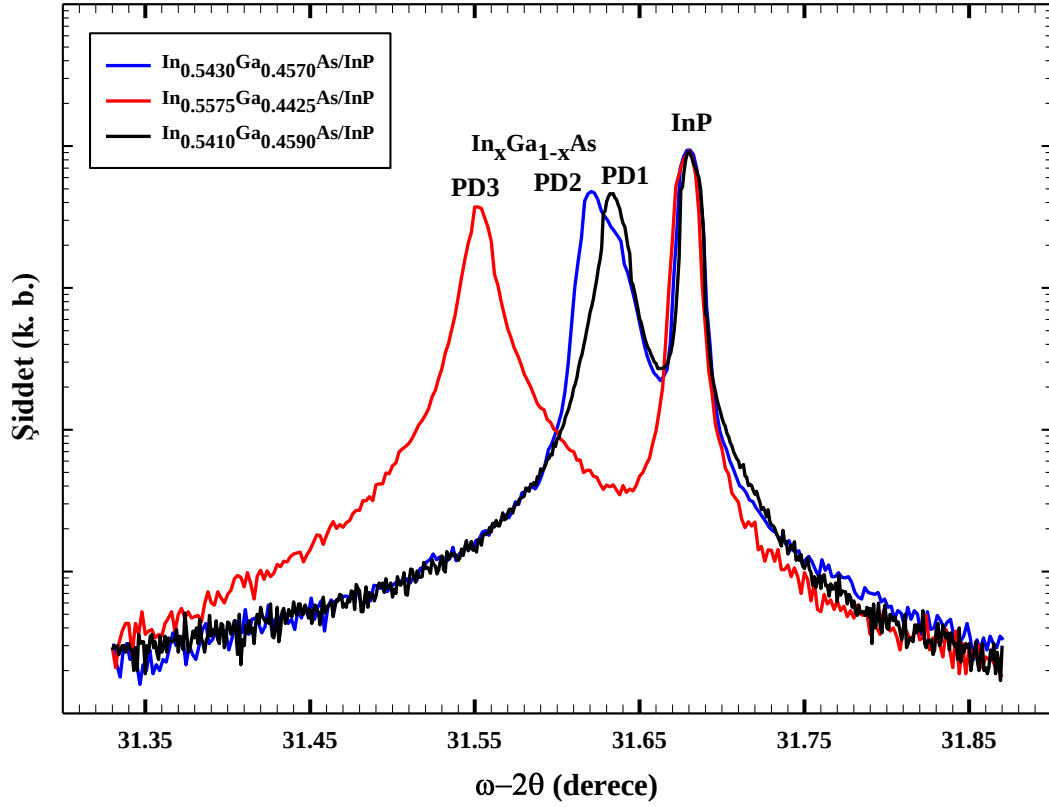
algılanması, malzeme içerisindeki elektronik enerji dağılımının değişimi sonucu üretilen elektriksel sinyalinin ölçümü ile başarılır.

MSM aygıtlarının akım-gerilim (I-V) karakteristikleri Keithley 4200 yarıiletken parametre analizörü ile yapılan ölçümler sonucunda belirlendi.

MSM aygıtların mobiliteleri ve taşıyıcı konsantrasyonları, Lake Shore Hall etkisi sistemi (HES)'nde, yapılan oda sıcaklığı ölçümleri sonucunda belirlendi. Hall etkisi ölçümleri sonucunda elde edilen veriler kullanılarak da aygıtlardaki taşıyıcı ömürleri ve difüzyon uzunlukları hesaplandı.

4.3. InGaAs/InP MSM Kızılötesi Fotodedektör Karakterizasyonu

Büyütülen yapıların indiyum alaşım oran (x)'ları HRXRD analizleri ile belirlendi. Şekil 4.2, üç farklı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapısının, ω - 2θ X-ışını difraksiyon spektrumunu göstermektedir. Yüksek şiddetli pikin InP alttaştan, diğer piklerin ise farklı indiyum alaşım oranına sahip $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ tabakalardan kaynaklandığı şekilde açıkça görülmektedir. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ tabakasına ait olan pik, indiyum alaşım oranının artmasına bağlı olarak, InP alttaş pikinden daha fazla uzaklaşmaktadır. Piklerin ayrılma açısı (θ), indiyum alaşım oranının belirlenmesinde kullanılabilir. Ticari LEPTOS programı [123] kullanılarak, PD1, PD2 ve PD3 yapılarının indiyum alaşım oranları, sırasıyla, 0.5410, 0.5430 ve 0.5575 olarak belirlendi.



Şekil 4.2. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ yapılarının (004) simetrik düzlemlerde ω - 2θ taraması

PD1, PD2 ve PD3 yapılarına ait HRXRD piklerinin, pik yarı genişliği (FWHM) değerleri, sırasıyla, 0.014° , 0.020° ve 0.015° olarak belirlendi. Bu değerler, büyütülen yapıların kaliteli kristal yapıya sahip olduklarını göstermektedir. En düşük FWHM değerine (0.014°) sahip PD1, örgü uyumlu InGaAs/InP yapısına en yakın olan yapıdır.

Büyütülen yapıların; örgü sabiti (a), tanecik boyutu (D), dislokasyon yoğunluğu (δ) ve zorlanma (ϵ) kristal yapı parametreleri Eş. 4.1-4.4 kullanılarak hesaplandı ve Çizelge 4.2’de verildi.

$$a = \frac{\lambda}{2\sin\theta} (\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}) \quad (4.1)$$

$$D = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4.2)$$

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (4.3)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\tan \theta} \left(\frac{\lambda}{D \cos \theta} - \beta \right) \quad (4.4)$$

Bu eşitliklerde; λ X-ışını dalgaboyunu, θ ω - 2θ taramasındaki pik açısını, hkl Miller indislerini belirtmektedir. β ise $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ pikinin FWHM değeridir.

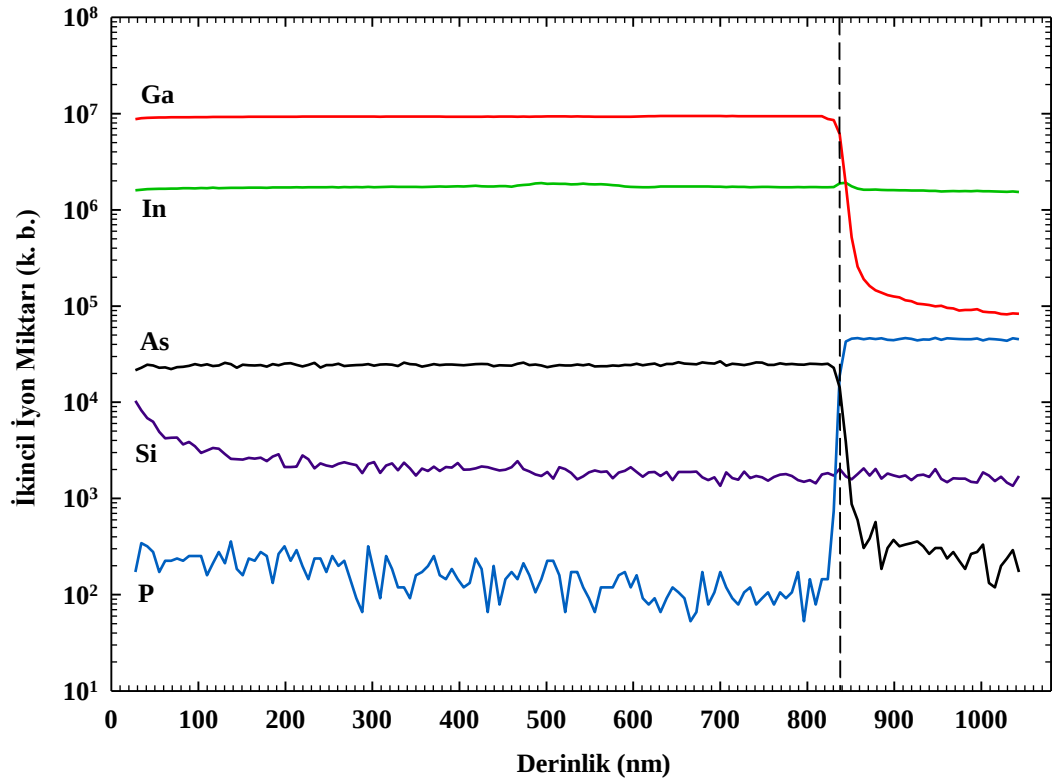
Çizelge 4.2. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ yapısının örgü sabiti, tanecik boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve zorlanma değerleri

Yapı	2θ (derece)	β (derece)	a (Å)	D (nm)	δ ($\times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$)	ε ($\times 10^{-4}$)
PD1	31.633	0.014	11.3047627	589.7777333	0.0028749	0.9583918
PD2	31.621	0.020	11.3089433	412.8321688	0.0058675	1.3696781
PD3	31.551	0.015	11.3333943	550.3477962	0.0033016	1.0296575

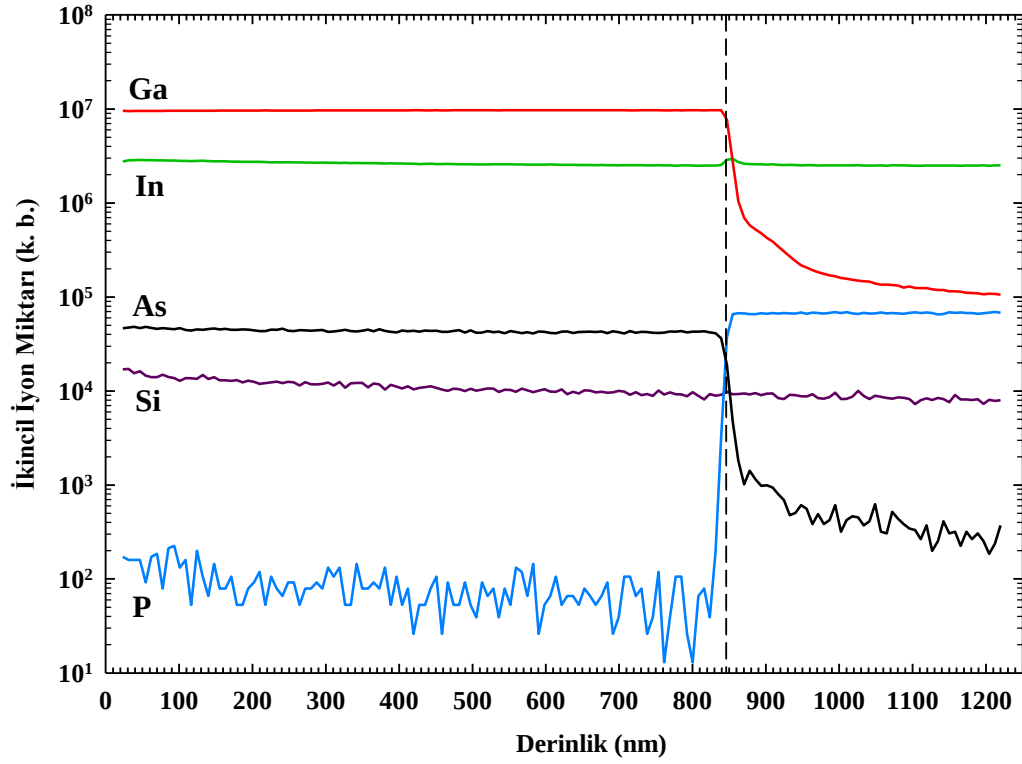
Çizelge 4.2’de verilen sonuçlar incelendiğinde, tüm yapıların kaliteli kristal özelliği sergilediği görülmektedir. Ayrıca, PD1 yapısına ait dislokasyon yoğunluğu ve zorlanma değerleri diğer yapılarınkinden daha düşüktür.

PD1, PD2 ve PD3 yapılarının atomik dağılımları ve arayüzey özellikleri SIMS derinlik ölçümleri ile belirlendi. Yapıların içerisinde bulunan As, Ga, In ve Si atomlarının SIMS derinlik profilleri Şekil 4.3, 4.4 ve 4.5’te verildi. Şekillerde verilen SIMS derinlik profilleri incelendiğinde, numunelerde arayüzey difüzyonunun olmadığı açıkça görülmektedir. Numuneler, InGaAs ve InP arasındaki arayüzeylerde keskin bir P değişimine sahiptir. P’ın InGaAs tabakasına olan difüzyonu da ihmal edilebilir boyutlardadır. Ayrıca, arayüzeylerde Ga miktarının keskin olarak azalmasına karşın P miktarı keskin şekilde artmaktadır. Bütün bunların bir sonucu olarak keskin

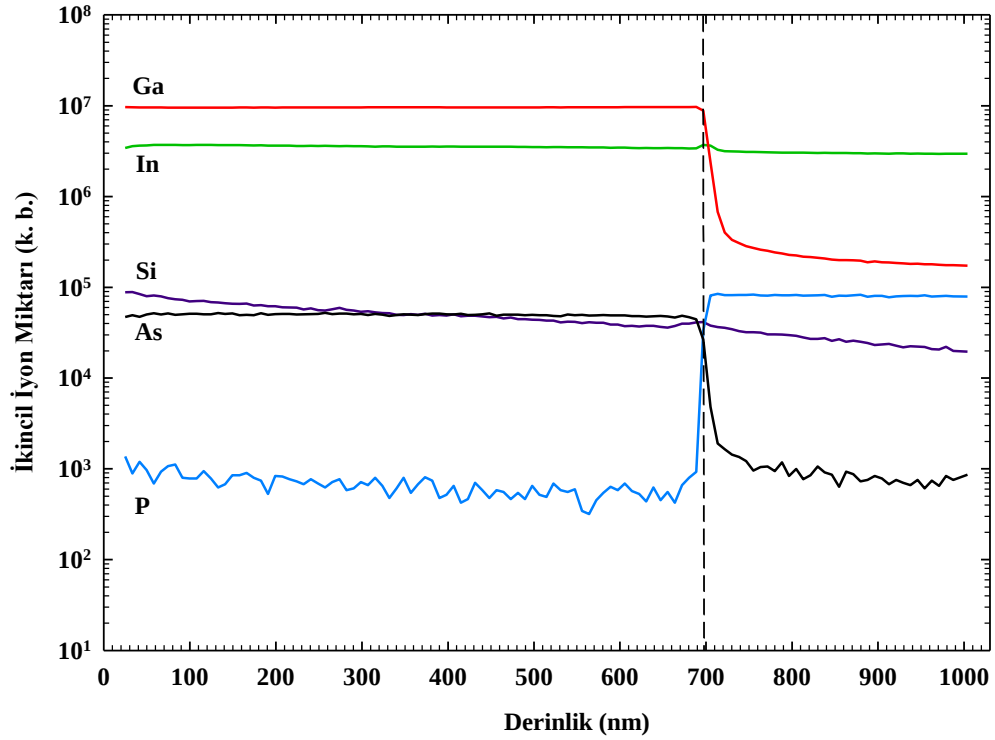
arayüzeyler oluşmuştur. Keskin arayüzey oluşumu, numunelerin kristal yapısının kaliteli olduğunu, bir başka söylemle InGaAs tabakasının InP alttaş üzerine kaliteli bir şekilde büyütüldüğünün göstergesidir. Ayrıca, SIMS analizlerinden InGaAs tabakasındaki Si katkı dağılımının tüm numunelerde benzer özellikler sergilediği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.3. PD1 ($\text{In}_{0.541}\text{Ga}_{0.459}\text{As}/\text{InP}$) yapısının SIMS profili

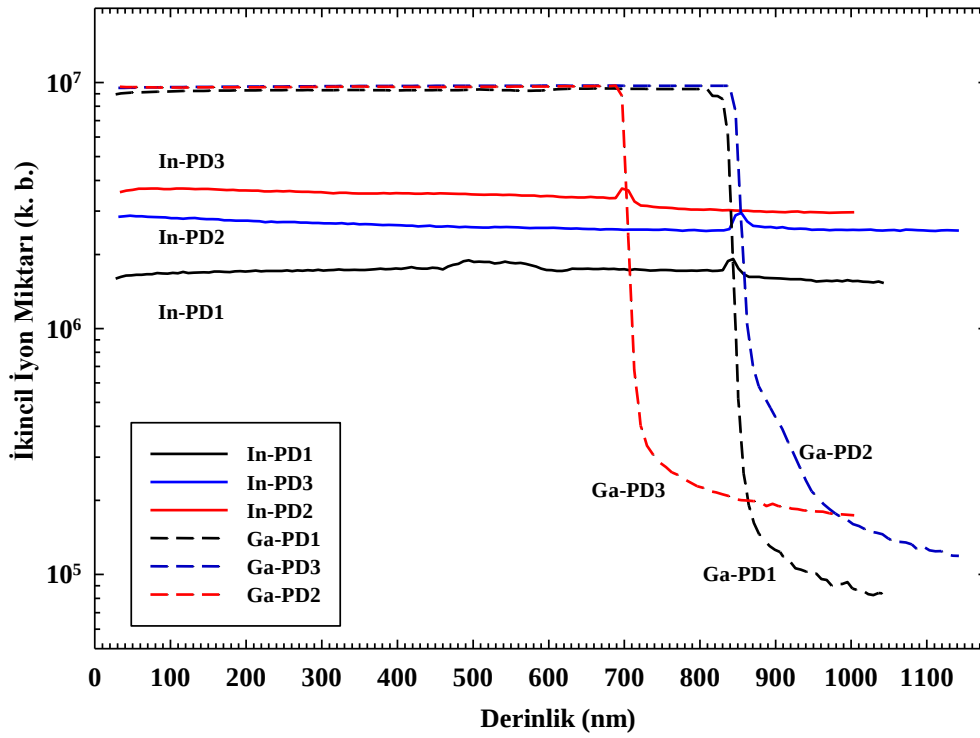


Şekil 4.4. PD2 ($\text{In}_{0.543}\text{Ga}_{0.457}\text{As}/\text{InP}$) yapısının SIMS profili



Şekil 4.5. PD3 ($\text{In}_{0.5575}\text{Ga}_{0.4425}\text{As}/\text{InP}$) yapısının SIMS profili

Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, Ga miktarları neredeyse aynı seviyedeysen, In miktarları PD1 numunesinden PD3 numunesine artış göstermiştir. Bu sonuçlar Ga ve In'un BEP değerleri ile de uyum içerisindedir. Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere, büyütme süresince, Ga BEP değeri sabit tutulurken, In BEP değeri arttırılmıştır. Beklenildiği gibi, BEP değerleri, SIMS ve HRXRD analiz sonuçları birbirleriyle uyum içerisindedir. In BEP değerleri arttıkça, In alaşım oranı da artmış, buna paralel olarak da Şekil 4.6'da görüldüğü üzere, SIMS analizinde In miktarı da artış göstermiştir.



Şekil 4.6. InGaAs/InP yapılarının In ve Ga SIMS derinlik profilleri

InGaAs tabakasının büyütülme sürecinde indiyumun homojen dağılımı, aygıt uygulamaları için önemli olabilir. Şekil 4.6'dan da görüleceği üzere indiyum miktarı büyüme süresince PD1 numunesinde değişim göstermezken, PD2 ve PD3 numunelerinde artış göstermiştir. In miktarındaki değişimin, PD1 numunesinde gözlenmemesi homojen bir yapıda olduğunun kanıtıdır. Bunun yanı sıra, değişim PD2 numunesinde PD3 numunesinden daha fazladır. Büyütme sıcaklıkları tüm numunelerde aynı olmasına karşın, bu tip bir indiyum değişimi büyütmedeki In

kinetiğine bağlı olabilir ve Şekil 4.2’de verilen PD2 numunesine ait HRXRD grafiğinde InGaAs pikinin keskin olmamasına neden olabilir.

HRXRD ve SIMS analizleri incelendiğinde; örgü uyumlu $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ yapısına en yakın olan PD1 ($\text{In}_{0.543}\text{Ga}_{0.457}\text{As}/\text{InP}$) numunesinin büyütülmesinde; indiyum dağılımının, dislokasyon yoğunluğunun ve zorlanmanın, InGaAs ve InP arasındaki keskin arayüzeyin ve HRXRD piklerinin FWHM durumunun önemli etkilere sahip olduğu söylenebilir.

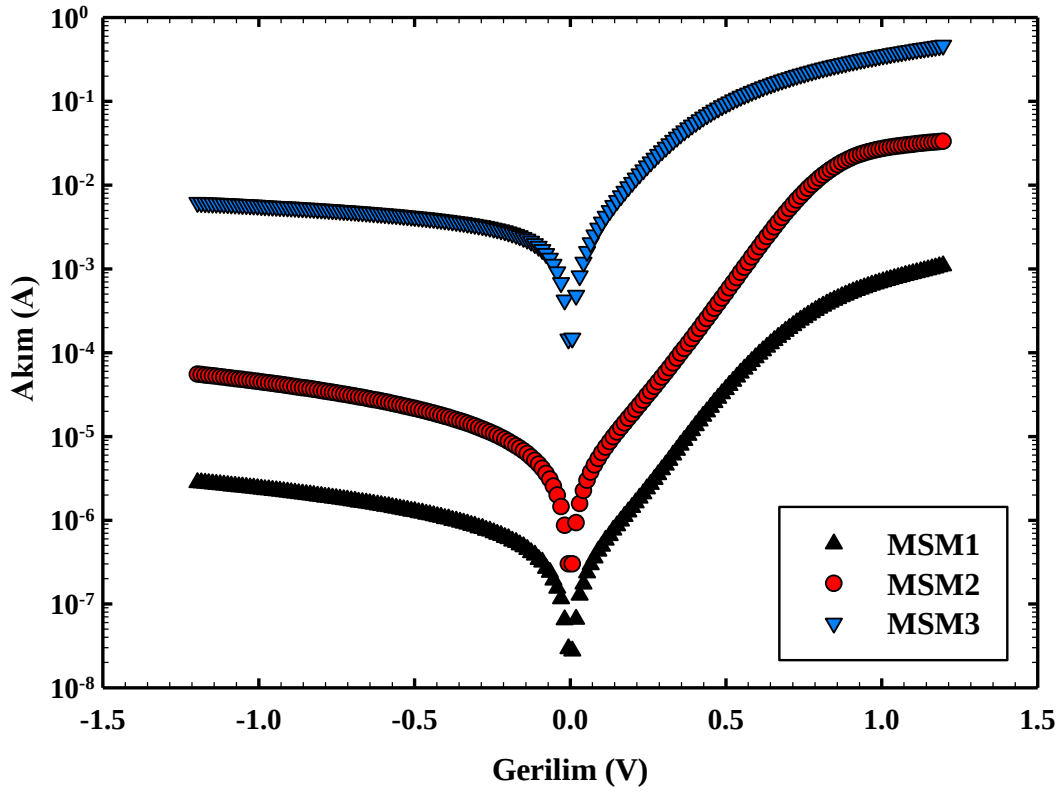
InGaAs/InP MSM aygıtlarının idealite faktörü (n), bariyer yüksekliği (Φ_B) ve doyum akımı (I_0) gibi elektriksel özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ileri ve ters beslem I - V karakterizasyonları tamamlandı. Şekil 4.7, MSM aygıtlarının yarı-logaritmik I - V karakteristiklerini göstermektedir.

Termiyonik emisyon teorisine göre, uygulanan ileri beslem voltajı ile ($V \geq kT/q$) ile akım arasındaki ilişki Eş. 4.5 ile verilebilir [124].

$$I = I_o \left[\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (4.5)$$

Burada, V uygulanan ileri beslem voltajı, n idealite faktörü, k Boltzmann sabiti, T kelvin cinsinden sıcaklık, IR_s terimi aygıtın seri direncinden kaynaklanan gerilim düşmesidir.

Aygıt üzerinden geçen gerilim (V_d), uygulanan gerilim (V) ile aygıtın seri direncinden kaynaklanan gerilim düşmesinin farkı şeklinde, yani $V_d = V - IR_s$ olarak verilebilir.



Şekil 4.7. MSM aygıtlarının oda sıcaklığındaki yarı-logaritmik I-V grafiği

Aygıtların doyum akımları, Şekil 4.7’de verilen eğrilerin düz bölgelerinde çizilen doğruların akım eksenini kestiği yerler, bir başka deyişle bu doğruların sıfır beslemdeki akım değerleri kullanılarak bulunabilir.

Eş. 4.6’daki verilen eşitlik ve belirlenen doyum akımları kullanılarak da MSM aygıtlarının bariyer yükseklikleri (Φ_B) bulunabilir.

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \quad (4.6)$$

Burada, A aygıtın aktif alanı, A^* n-InP için $9.4 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$ olan Richardson sabiti [125], q elektrik yükü ve Φ_B ise sıfır beslem bariyer yüksekliğidir.

Eş. 4.5 kullanılarak idealite faktörü (n), Eş. 4.7’de verilen şekliyle yazılabilir.

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (4.7)$$

İdealite faktörü (n), ideal termiyonik emisyon teorisinden sapmanın hesaplanmasında kullanılır.

Φ_B ; Richardson sabiti, yarı-logaritmik I - V grafiğinden elde edilen I_0 ve Eş. 4.8 kullanılarak hesaplandı.

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (4.8)$$

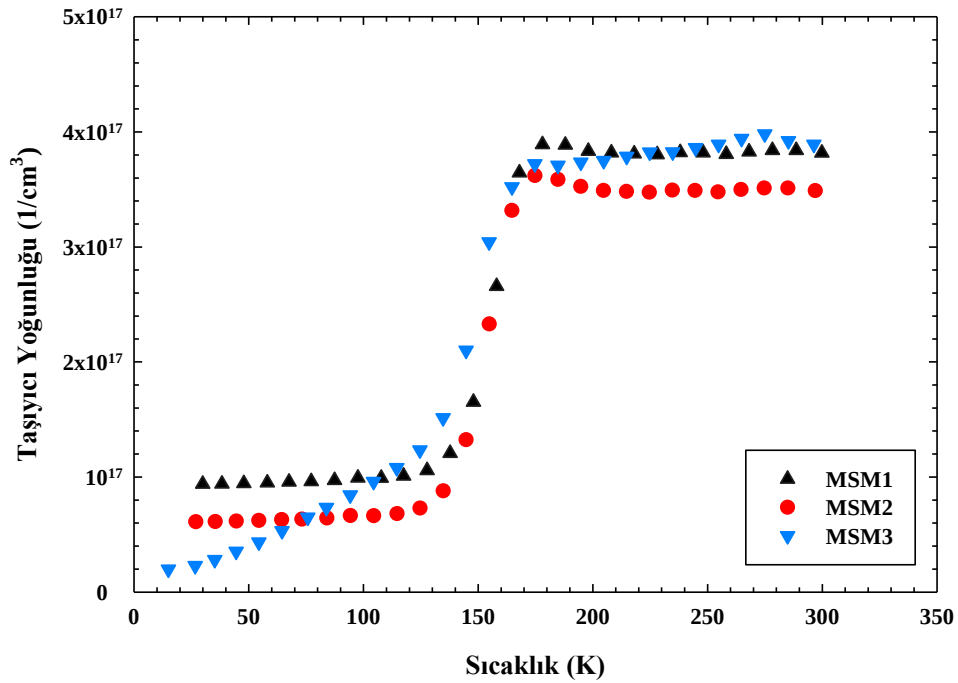
MSM aygıtları için Eş. 4.7 ve Eş. 4.8 kullanılarak hesaplanan n and Φ_B değerleri Çizelge 4.3'te verildi.

Çizelge 4.3. InGaAs/InP MSM aygıtlarının elektriksel parametreleri

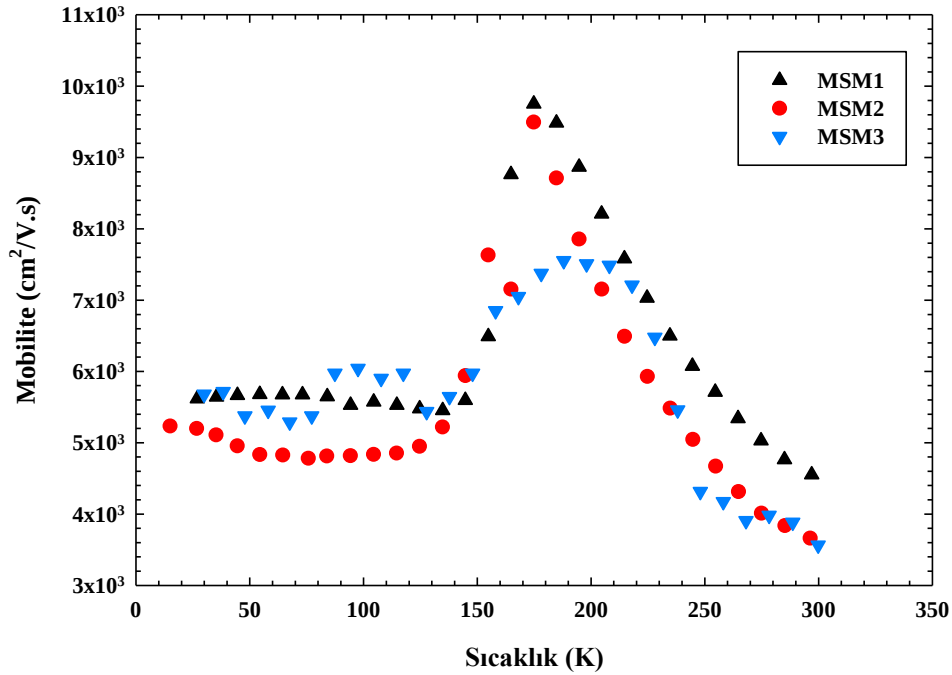
Aygıt	n	Φ_B (eV)	I_0 (A)
MSM1	3.59	0.642	1.78×10^{-7}
MSM2	3.76	0.582	1.97×10^{-6}
MSM3	4.07	0.382	1.46×10^{-3}

Çizelge 4.3'te görüldüğü üzere, MSM1, MSM2 ve MSM3 aygıtlarının Φ_B değerleri, sırasıyla 0.642 eV, 0.582 eV ve 0.382 eV olarak hesaplandı. Bu enerji değerleri 1.931 μm , 2.130 μm and 3.246 μm dalgalı boylarını temsil etmektedir ve kızılötesi fotodedektör uygulamaları için kabul edilebilir. Bu çalışma, düşük sıcaklıktaki fabrikasyon işlemlerini içeren literatür çalışmalarıyla benzer sonuçlara sahiptir. Ancak farklı olarak bu çalışmada fabrikasyon işlemleri “oda sıcaklığında” yapılmıştır. Oda sıcaklığında alınan benzer sonuçlar, yapıların daha iyi kristalografik özelliklere sahip olmasına atfedilebilir.

InGaAs/InP kızılötesi fotodedektörleri de içeren optoelektronik aygıtların performansları; mobilite, taşıyıcı yoğunluğu, rekombinasyon ömrü ve difüzyon uzunluğu gibi bazı önemli ve kritik parametrelere bağlıdır [126]. Bu amaçla, MSM aygıtlarının, sabit manyetik alanda (0.4 T), sıcaklığa bağlı ($30\text{-}300\text{ K}$) Hall etkisi ölçümleri yapıldı. Bu ölçümler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak, sıcaklığa bağlı taşıyıcı yoğunluğu (N) ve mobilite (μ) grafikleri çizildi ve Şekil 4.8 ve 4.9'da verildi.



Şekil 4.8. MSM aygıtlarının sıcaklığa bağlı taşıyıcı yoğunluğu grafiği



Şekil 4.9. MSM aygıtlarının sıcaklığa bağlı mobilite grafiği

InGaAs/InP MSM aygıtlarının rekombinasyon ömrü (τ) ve difüzyon uzunluğu (L), Hall etkisi ölçümleri sonucu elde edilen mobilite (μ) ve taşıyıcı yoğunluğu (N) verileri kullanılarak hesaplandı.

Toplam rekombinasyon ömrü (τ) Eş. 4.9 ile verilebilir [127].

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_A} \quad (4.9)$$

Eş. 4.9 taşıyıcı yoğunluğu (N) ifadesi cinsinden düzenlenirse, Eş. 4.10 elde edilir.

$$\tau = \left[\tau_{SRH}^{-1} + BN + CN^2 \right]^{-1} \quad (4.10)$$

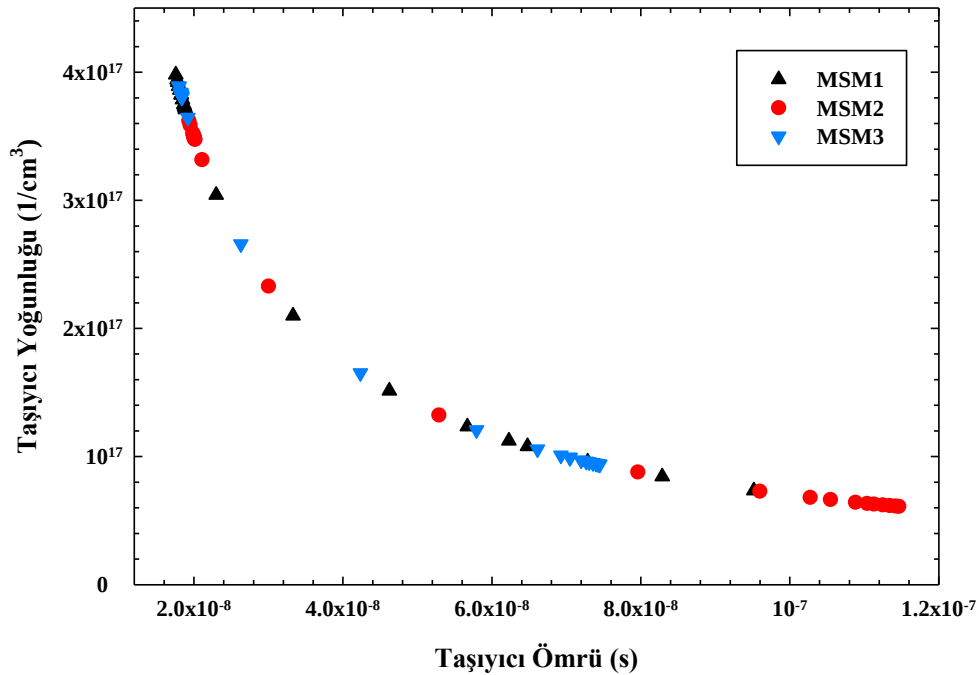
Eş. 4.9 ve 4.10'dan da anlaşılacağı üzere, toplam rekombinasyon ömrü (τ); taşıyıcı yoğunluğu (N)'na bağlı olarak Shockley–Read–Hall (SRH), Auger ve Radiatif olmak üzere üç rekombinasyon mekanizması olarak ele alınabilir.

SRH ve Auger rekombinasyon mekanizmaları, sırasıyla, 10^{15} cm^{-3} 'ten düşük ve 10^{18} cm^{-3} 'ten yüksek katkılama miktarına sahip aygıtlarda baskındır. 10^{16} cm^{-3} ile 10^{18} cm^{-3} katkılama miktarına sahip olan aygıtlarda ise radiatif rekombinasyon mekanizması baskındır ve toplam rekombinasyon ömrü (τ) $1/N$ 'e bağlı olarak Eş. 4.11'de verildiği gibi değişir [128].

$$\tau = [BN]^{-1} \quad (4.11)$$

Burada, radiatif rekombinasyon katsayısı (B), InP için $2 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$, InGaAs için ise $1.43 \times 10^{-10} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ 'dir [128-129].

Eş. 4.11 ve Hall ölçümleri sonucunda elde edilen taşıyıcı yoğunluğu değerleri kullanılarak, her bir taşıyıcı yoğunluğuna karşılık gelen taşıyıcı ömrü değerleri bulundu. Bu veriler kullanılarak da Şekil 4.10'da verilen taşıyıcı ömrü (τ) - taşıyıcı yoğunluğu (N) grafiği çizildi.



Şekil 4.10. MSM aygıtlarının taşıyıcı ömrü (τ) - taşıyıcı yoğunluğu (N) grafiği

Difüzyon uzunluğu (L), rekombinasyon ömrü (τ) ifadesine bağlı olarak Eş. 4.12 ile hesaplanabilir. L , azınlık taşıyıcısı enjeksiyonuna ve difüzyonuna bağlı olarak, taşıyıcıların aygıt içerisindeki dağılımının bir göstergesidir.

$$L_{n,p} = \sqrt{\tau \cdot D_{n,p}} \quad (4.12)$$

Difüzyon uzunluğu (L) ifadesinde verilen difüzyon katsayısı ($D_{n,p}$), Einstein bağıntısı ile Eş. 4.13'deki gibi verilebilir [130].

$$D_{n,p} = \mu_{n,p} \frac{kT}{q} \quad (4.13)$$

Burada; $\mu_{n,p}$ taşıyıcı mobilitesi, k Boltzmann sabiti, q ise elektrik yüküdür.

Oda sıcaklığı Hall etkisi ölçümünden elde edilen deneysel taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite değerleri, yapılan teorik modelleme hesaplamalarında kullanıldı. Böylece, MSM aygıtlarının taşıyıcı ömürleri ve difüzyon uzunlukları bulunarak, Çizelge 4.4'te sunuldu.

Çizelge 4.4. MSM aygıtlarının taşıyıcı yoğunluğu, mobilite, difüzyon katsayısı, taşıyıcı ömrü ve difüzyon uzunluğu verileri

<i>Aygıt</i>	<i>T</i> (K)	<i>N</i> (1/cm ³)	μ (cm ² /V.s)	<i>D</i> (cm ² /s)	τ (ns)	<i>L</i> (μ m)
MSM1	299.839	3.818 x 10 ¹⁷	4553.1	116.519	20.040	15.281
MSM2	296.972	3.490 x 10 ¹⁷	3563.3	92.069	18.314	12.985
MSM3	296.336	3.891 x 10 ¹⁷	3659.6	93.453	17.973	12.960

4.4. InGaAs/InP MSM Kızılötesi Fotodedektör Parametreleri

Bu çalışmada, InGaAs/InP MSM fotodedektörün Schottky bariyer yüksekliğinin, oda sıcaklığında yapılan metalizasyon işlemi ile arttırılabileceği, deneysel ve teorik olarak sunulmaya çalışıldı. Bu amaçla, MBE yöntemi ile büyütülmüş InGaAs/InP numunelerinin yapısal ve elektriksel özelliklerinin, indiyum alaşım oranı (x) ve oda sıcaklığı metalizasyon işleminden nasıl etkilendiği incelendi. InGaAs/InP numunelerinin alaşım oranı, örgü sabiti, tanecik boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve zorlanma gibi yapısal parametreleri HRXRD ölçümleri sonucunda elde edildi. İndiyum homojenliği ve InGaAs tabakası ile InP alttaş arasındaki keskin arayüzey durumu, SIMS derinlik profili ölçümleri ile belirlendi. HRXRD ve SIMS analiz sonuçlarının uyum içerisinde olduğu gözlemlendi. SIMS ölçümlerinde, tüm numunelerin InGaAs ile InP arayüzeyindeki, As ve P değişiminin keskin olduğu belirlendi. InGaAs/InP MSM aygıtlarının idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve doyum akımı gibi önemli elektriksel özellikleri akım-gerilim ölçümleri sonucunda elde edildi. InGaAs/InP MSM aygıtlarının rekombinasyon ömrü ve difüzyon uzunluğu (L), Hall etkisi ölçümleri sonucu elde edilen mobilite ve taşıyıcı yoğunluğu verileri kullanılarak hesaplandı ve Çizelge 4.4'te verildi. MSM1, MSM2 ve MSM3 aygıtlarının Schottky bariyer yüksekliği değerleri, oda sıcaklığında yapılan akım-gerilim ölçümleri sonucunda elde edilen veriler kullanılarak, sırasıyla, 0.642 eV, 0.582 eV ve 0.382 eV olarak hesaplandı. Schottky bariyer yüksekliği 0.2 eV (geleneksel)'dan 0.642 eV'a arttığı görüldü. Bariyer yüksekliğinin arttırılması, oda sıcaklığında yapılan fabrikasyon işlemleri ile sağlandı. MSM aygıtlarının bariyer yüksekliklerindeki bu gelişme, büyütülen numunelerdeki; daha büyük tanecik boyutuna, daha düşük FWHM değerine, daha küçük dislokasyon yoğunluğuna, daha düşük zorlanmaya ve keskin arayüzeylere atfedilebilir. Oda sıcaklığında yapılan fabrikasyonu nedeniyle bu çalışmadaki InGaAs/InP yapıları fotodedektör uygulamaları için tercih edilebilir.

5. InGaAs/InP TEKLİ KIZILÖTESİ PROTOTİP FOTODEDEKTÖR ÜRETİMİ ve KARAKTERİZASYONU

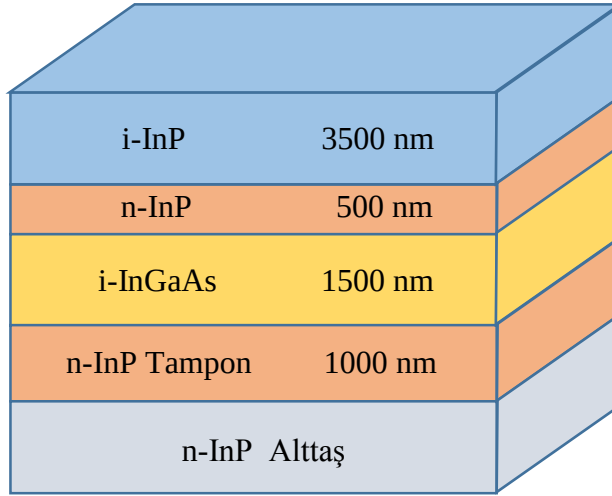
5.1. InGaAs/InP Tekli Kızılötesi Fotodedektörlere Giriş

1.3-1.5 μm optik algılama dalgaboyuna sahip olabilen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ foton dedektörleri haberleşme ve kızılötesi görüntüleme sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu aygıtların fabrikasyonu SI-InP üzerine büyütülen $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ kristalleri kullanılarak yapılabilmektedir. Oluşturulan bu yapıya, uygun bölgelerine p -tipi katkılama için Çinko (Zn) difüzyonu gerçekleştirilerek p -tipi bölge oluşturulmakta ve litografik süreçlerle dedektör fabrikasyonu tamamlanmaktadır.

Bu bölümde, InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısının ve fotomaskelerin tasarlanması, yapının büyütülmesi, büyütülen yapının fabrikasyonunu ve üretilen fotodedektörün karakterizasyonları anlatıldı. InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısı, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi (Gazi FOTONİK)'nde kurulu bulunan, MBE sisteminde büyütüldü. InGaAs/InP kızılötesi prototip fotodedektör üretimi ve üretilen fotodedektörün karakterizasyonları ise Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM)'da tamamlandı.

5.2. InGaAs/InP Kızılötesi Fotodedektör Yapısının Tasarlanması

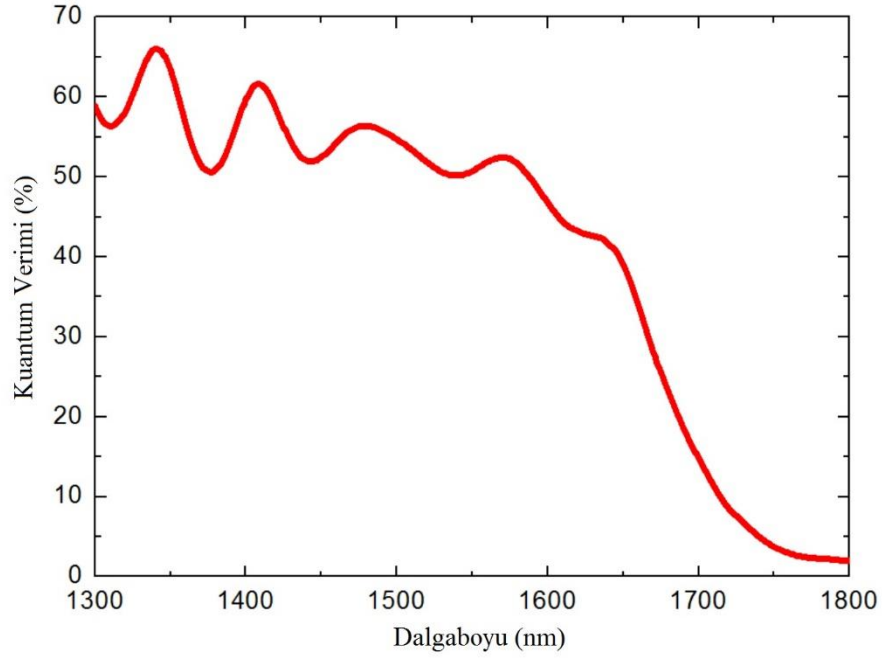
Üretilen fotodedektörün kızılötesi (1.55 μm) dalgaboyu etrafında çalışması istendiğinden bu dalgaboylarında ışığı soğurabilen ve yüksek kalitede büyütülmesi mümkün olan InGaAs temelli fotodedektör yapısı tasarlandı. $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 'ın InP ile örgü uyumu sağladığı için, InP alttaş üzerine dedektör katmanları büyütüldü. Bu tasarımda, n ohmik metal kaplaması numunenin arka yüzeyinde rahat bir şekilde oluşturulabilmesi açısından alttaş, n tipi katkılı InP olarak seçildi. En üst katmandaki InP tabakası, tüm yüzeyin yerine sadece istenilen bölgelerin p tipi katkılanabilmesi amacıyla katkısız olarak tasarlanmıştır. Burada hedef, karanlık akımın düşürülerek, daha verimli bir kızılötesi fotodedektör elde edilmesidir. Tasarlanan InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısı Şekil 5.1'de verildi.



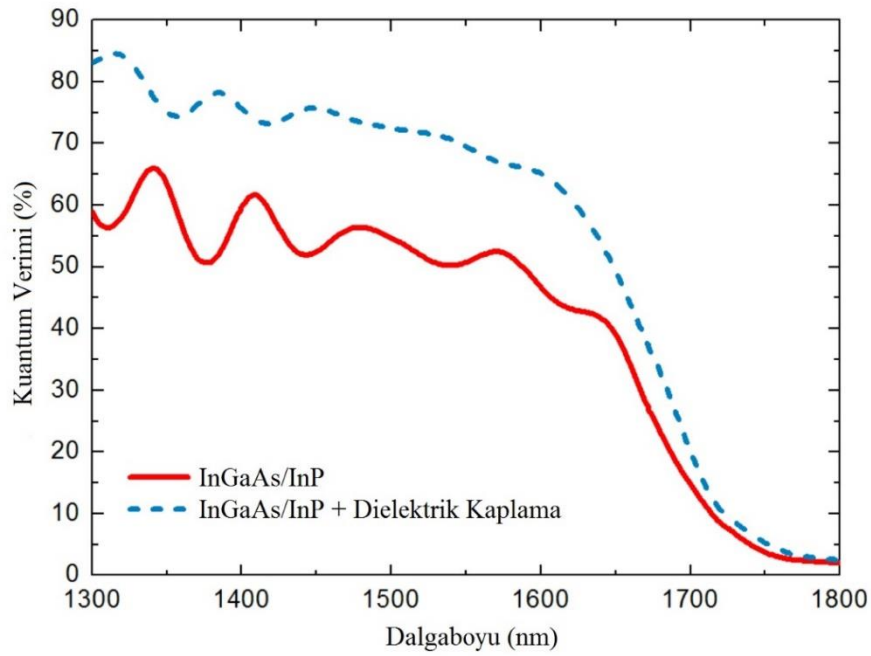
Şekil 5.1. Tasarlanan InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısı

5.3. InGaAs/InP Kızılötesi Fotodedektör Yapısının Kuantum Verim Simülasyonları

Tasarlanan InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısının, transfer matris metodu (TMM) yardımıyla, kuantum verim simülasyonları Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM)'da yapıldı. Şekil 5.2, tasarlanan InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısının kuantum verimi - dalgaboyu simülasyon grafiğini verirken; Şekil 5.3, tasarlanan InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısının ve 350 nm kalınlıklı Si_3N_4 dielektrik malzeme kaplamasının kuantum verimi-dalgaboyu simülasyon grafiğini göstermektedir.



Şekil 5.2. Tasarlanan InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısının kuantum verimi - dalgaboyu simülasyon grafiği



Şekil 5.3. Tasarlanan InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısının ve 350 nm kalınlıklı dielektrik malzeme (Si_3N_4) kaplamasının kuantum verimi-dalgaboyu simülasyon grafiği

5.4. InGaAs/InP Tekli Kızılötesi Fotodedektörler İçin Fotomaske Tasarımı

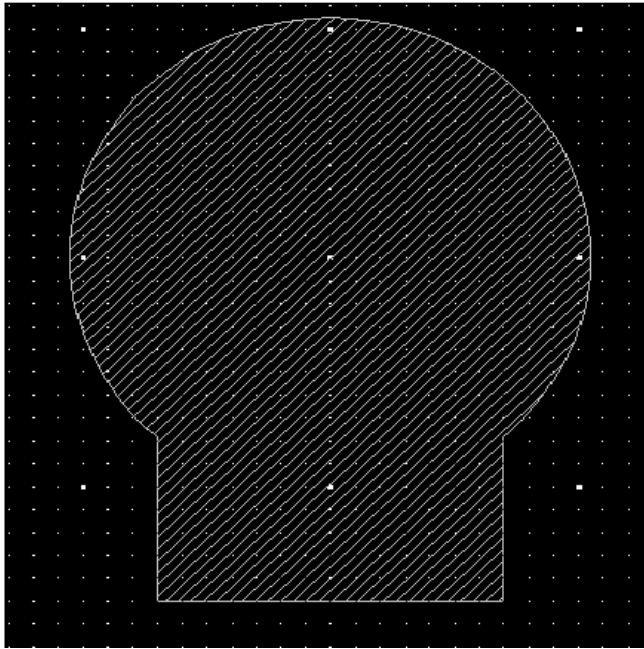
Fotomaske tasarımı, Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM)'da bulunan bilgisayar-yardımlı tasarım (CAD) yöntemi ile yapıldı.

Fotodedektörlerin yeterince ışık almasını sağlamak için çapı 200 μm olan dedektörler tasarlandı. Litografi için kullanılacak maskeye fotodedektörler yerleştirildi. Üretim ve dış elektronik sistemlere uyum kolaylığı sebebiyle “*üstten aydınlatmalı*” fotodedektör yapısının kullanılmasına karar verildi. Dizayn sırasında ohmik bağlantı yapıları buna göre tasarlandı.

Fabrikasyon adımlarına uygun şekilde, maske tasarımı aşağıda anlatılmaktadır.

Çinko Difüzyonu İçin Fotomaske Tasarımı

Bu adımda numunenin tüm yüzeyine kaplanan Si_3N_4 Şekil 5.4’de gösterildiği üzere desenlendirilerek, numune yüzeyine difüzyon yapılacak alanlar belirlenmektedir.

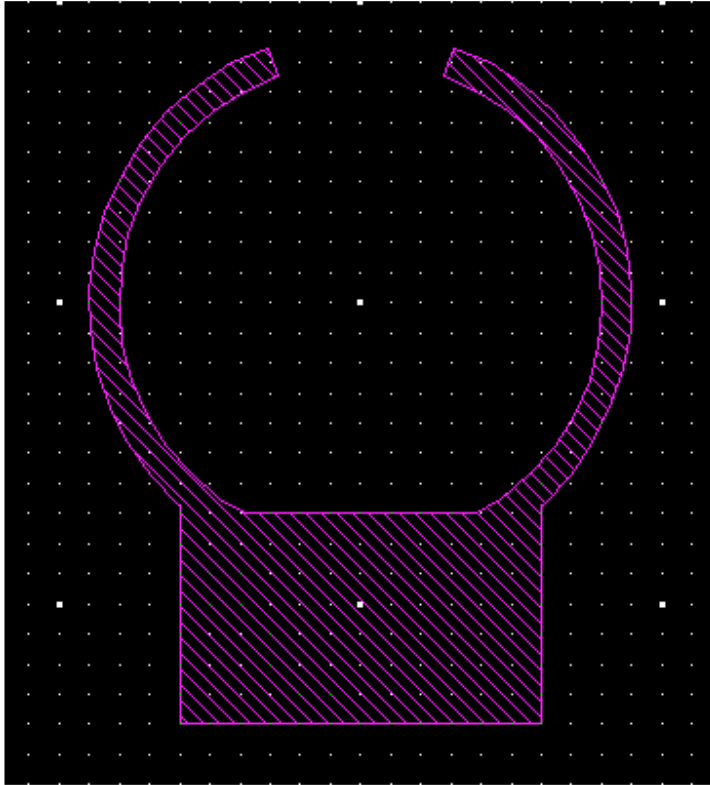


Şekil 5.4. Çinko difüzyon maskesi

Şekil 5.4’de görülen maskede taralı alan içerisinde kalan Si_3N_4 aşındırılarak bu alan içerisinde çinko difüzyonu yapılacaktır. Difüzyon işlemi sonrası Si_3N_4 tüm yüzeyden kaldırılarak örnek bir sonraki adıma hazırlanmaktadır.

p-Metalinin Kaplanması İçin Fotomaske Tasarımı

Prosesin bir sonraki adımı *p*-metali kaplamasıdır. Bu metal kaplanan bölge aynı zamanda dedektörün optik açıklığını da belirleyecek şekildedir. Şekil 5.5’de bu adım için tasarlanan maske gösterilmiştir.



Şekil 5.5. p-metali maskesi

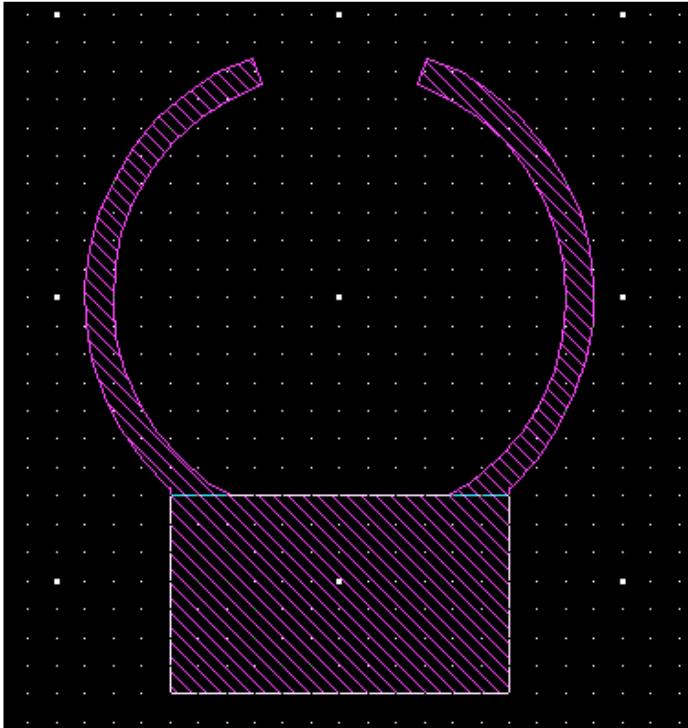
Bu maske aynı zamanda fotodedektör fabrikasyonu sonunda, her bir fotodedektörün bütün bir numuneden kesim işlemi sırasında ihtiyaç duyulan kesim çizgilerini de içermektedir.

n-Metal Kaplanması İçin Fotomaske Tasarımı

Bu adımda birçok fotodedektör yapısını içeren bütün bir numunenin arka yüzeyi metal kaplanacak şekilde bir maske tasarımı kullanılacaktır. Tasarlanan bu maske ile numunenin tüm arka yüzeyi metal kaplanacak ve ardından tavlama işlemi yapılarak kontaklar ohmik kontak hale getirilecektir.

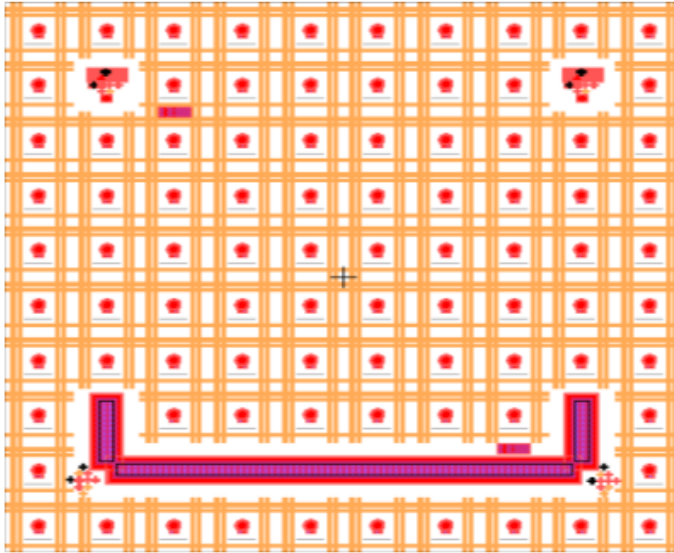
Yansıma Önleyici Malzeme Kaplanması İçin Fotomaske Tasarımı

Kontak işlemlerinin ardından numunenin üst yüzeyine yansıma önleyici dielektrik malzeme kaplaması yapılacaktır. Bu kaplamanın ardından, elektriksel ölçümlerin yapılabilmesi amacıyla kontak üzerindeki dielektrik malzeme açılacaktır. Bunun için Şekil 5.6’de gösterilen beyaz dikdörtgen deseni içeren maske kullanılacaktır.



Şekil 5.6. Yansıma önleyici malzeme maskesi

Fotomaskeye çözünürlük testi ve ayar işaretleri gibi yardımcı desenler de eklenerek fotomaske tasarımı yapılmıştır. Şekil 5.7’de ise tasarlanan tüm bir fotomaskenin tamamlandığındaki görüntüsü verilmektedir.



Şekil 5.7. Tamamlanmış bir fotomaskenin görünümü

5.5. InGaAs/InP Kızılötesi Fotodedektör Yapısının Büyütülmesi

InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısı, Şekil 5.1’de verilen tasarı kullanılarak, n tipi InP alttaş üzerine, Gazi FOTONİK’te kurulu bulunan, VG–Semicon V80H katı kaynaklı MBE sistemi ile büyütüldü.

InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısının büyütülmesindeki şartlar ve adımlar şu şekilde anlatılabilir:

- 2” n-InP alttaş MBE sistemine alınmadan önce kimyasal çözeltiler kullanılarak ilk yüzey temizleme işlemi yapıldı.
- Temizlik işleminden sonra n-InP alttaş MBE sisteminin hazırlık odasında 350 °C’de 1 saat ısıtılarak üzerindeki su buharı ve bu sıcaklıkta alttttaştan buharlaşabilen diğer kirliliklerden temizlenmesi sağlandı.

- Alttaş büyütme odasına transfer edilerek, manipülatöre yüklendi. Alttaş manipülatöre yüklendikten sonra MIG (hassas iyon ölçer), alttaş tutucusunun önüne getirildi. Böylece hem kaynak hücrelerden elde edilen moleküllerin alttaş ısıtıcısı üzerine birikme yapması önlenmiş, hem de akı kalibrasyonunun doğru yapılması için MIG konumlandırılmış oldu.
- Sıvı azot akış hızı büyütme süresince sabit kalacak şekilde ayarlandıktan sonra, kaynak hücreler çok düşük sıcaklık artışlarıyla (6 °C/dak.) ısıtılmaya başlandı.
- InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısını büyütme için; İndiyum (In), Galyum (Ga), Arsenik (As), Galyum Fosfat (GaP) ve Silikon (Si) kaynak hücreleri kullanılacağı için, bu hücrelerin sıcaklıkları Çizelge 5.1 ile verilen büyütme sıcaklık değerlerinin 15–20 °C üzerine kadar ısıtıldı ve bu sıcaklıklarda 10 dakika bekletildi. Bu bekletme sırasında birkaç defa kaynak kesicileri birkaç defa açılarak, hücrenin içinde ısıtılma sonucu ortaya çıkan artık gazların ve oksijenin dışarı atılması sağlandı. Kaynakların sıcaklıkları, oksijen ve diğer artık gazların çıkması sağlandıktan sonra büyütme sıcaklıklarına indirildi.
- InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısının bu ilk hazırlıkları tamamlandıktan sonra büyütme işlemine başlayabilmek için V80H MBE sisteminde Crystal programı ile büyütme işleminde takip edilecek adımlar belirlendi.
- Yüklenen alttaşın üzerinde bulunan oksit tabakasının kaldırılması için alttaş 10% rpm ile döndürülerek, 520 °C 'ye kadar ısıtılmaya başlandı. Alttaş sıcaklığı 520 °C 'ye ulaştığı zaman RHEED voltajı 15 keV civarına kadar çıkarılıp, RHEED akımı yavaşça maksimum 2 A oluncaya kadar artırıldı. 520 °C 'den sonra alttaş yüzeyden ayrılan P atomlarını telafi etmek için P akısı altında 580 °C 'ye kadar tam oksit kaldırma işlemi için ısıtılmaya başlandı.
- Alttaş sıcaklığı 580 °C 'ye ulaşıncaya, 15 dakika tam oksit kaldırma işlemi için beklenildi ve bu süre zarfında alttaş yüzeyinin RHEED deseni incelendi.
- Tam oksit kaldırma işlemi tamamlanınca alttaş sıcaklığı 560 °C' ye düşürüldü.
- n–tipi InP tampon tabakası için In kaynak sıcaklığı 757 °C, Si kaynak sıcaklığı 1050 °C olarak yazılan Crystal programına büyütme işleminin devam etmesi için komut verilerek, 1000 nm kalınlıklı n–tipi InP tampon tabakası büyütüldü.
- n–tipi InP tabakası büyütüldükten sonra aynı alttaş sıcaklığında, 1500 nm kalınlıklı, katkısız (i tipi) InGaAs tabakası büyütüldü.

- i-InGaAs tabakası büyütüldükten sonra, aynı alttaş ve kaynak sıcaklıklarında, Si katkılı 500 nm kalınlıklı n tipi InP tabakası büyütüldü.
- InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısının büyütme işlemi, 3500 nm kalınlıklı i tipi InP tabakasının büyütülmesi ile tamamlandı.

Çizelge 5. 1. InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısı için sıcaklık ve akı değerleri

	Sıcaklık (°C)	Akı (mbar)	Katmanlar	Kalınlık (nm)	Süre (dakika)
Alttaş	350		Outgas		60
Alttaş	580		Oksit uzaklaştırma		10
Alttaş	560		n-InP Tampon	1000	
Alttaş	560		i-InGaAs	1500	
Alttaş	560		n-InP	500	
Alttaş	560		i-InP	3500	
Ga	851	3.5×10^{-7}			
In	757	7.4×10^{-7}			
As	960	2.5×10^{-6}			
Si	1050				

5.6. InGaAs/InP Tekli Kızılötesi Prototip Fotodedektör Üretimi

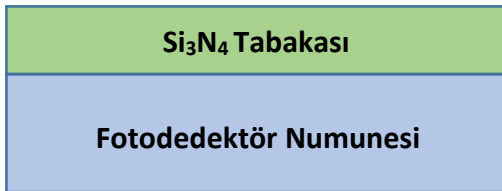
InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör fabrikasyonu BİLKENT-NANOTAM bünyesindeki DPT-HAMİT laboratuvarı temiz odalarında fotolitografik yöntemlerle gerçekleştirildi.

Bu çalışmada aşağıda listelenen adımlar uygulandı.

- Adım 1:** Si_3N_4 tabakasının kaplanması
- Adım 2:** Si_3N_4 pencere açma
- Adım 3:** Çinko (Zn) difüzyonu
- Adım 4:** Si_3N_4 tabakasının kaldırılması
- Adım 5:** İlk kesim
- Adım 6:** p^+ kontak yapılması
- Adım 7:** İzolasyon
- Adım 8:** n^+ kontak yapılması
- Adım 9:** İkinci kesim

Adım 1 : Si_3N_4 Tabakasının Kaplanması

2” çapında büyütülen numune yüzey temizliğini yapmak için, 5 dakika asetonda ve 2 dakika isopropanol alkolde bekletildi. Temizlenen örnek azot ile kurutuldu. Daha sonra, 2” ‘lik InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinin tüm yüzeyine, Şekil 5.8’de görüldüğü üzere, RF magnetron püskürtme yöntemi ile 350 nm kalınlıklı Si_3N_4 kaplaması yapıldı. Bu adımın amacı çinko difüzyonundan önce tüm yüzeyi korumaktır. Kaplama işleminden sonra numune tekrar aseton, isopropanol alkol ve deiyonize su ile temizlendi.

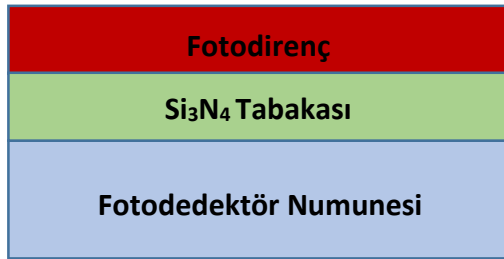


Şekil 5.8. Si_3N_4 kaplanmış InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesi

Adım 2 : Si_3N_4 Pencere Açma

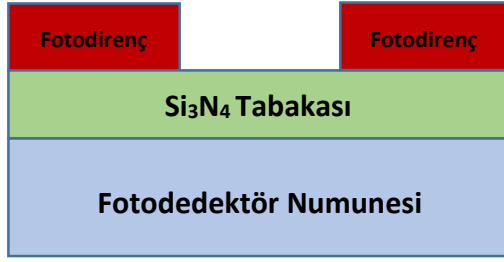
InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinin Si_3N_4 pencere açma adımına, numune yüzeyini tamamen örtecek şekilde AZ5214E fotodirenci damlatılmasıyla

başlandı. Daha sonra numune, dönel kaplama (spin coater) sisteminde, 4000 rpm de 40 saniye döndürülerek fotodirenç yüzeye kaplandı. Bu sayede yüzeyde, Şekil 5.9.'de görüldüğü gibi, 2.3 μm kalınlığında, düzgün dağılmış bir fotodirenç tabakası elde edildi. Fotodirenç 110 C°'de 55 saniye ısıtıcı ocakta (Hot Plate) tavlandıktan sonra, UV pozlama aşamasına geçildi.



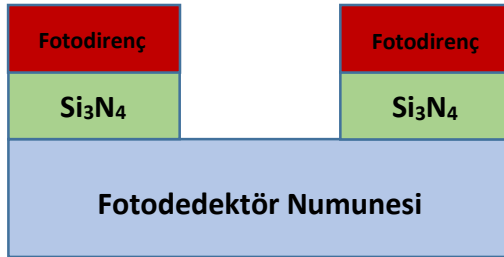
Şekil 5.9. Fotodirenç tabakası kaplanmış InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesi

Pozlama, fotodirenç kaplı numuneyi belli dalgaboyundaki UV ışığa maruz bırakmaktır. Bu işlem için Maske Hizalama cihazı kullanıldı. AZ-5214E fotodirenç, 360 nm dalga boyundaki ışığı soğurmaktadır. 365 nm'den yüksek enerjili Hg-Arc lambası ile sağlanan UV ışığı, maske üzerindeki açık bölgelerden geçer ancak karanlık bölgelerden geçmez. Bu prensiple, pozlama yapıldı ve böylece numune üzerinde Si_3N_4 kaplanacak bölge belirlendi. Ancak, pozlama Si_3N_4 kaplanacak bölgenin açılmasında tek başına yeterli değildir. Numune yüzeyinde, UV ışığa maruz kalan fotodirenç bulunmaktadır. Bu fotodirenç banyo (develop) işlemi ile yüzeyden uzaklaştırıldı. Banyo işleminde AZ-400K Developer maddesi kullanıldı. Sıvı bir madde olan AZ-400K, de-iyonize su ile 1/4 oranında karıştırıldı. Bu karışım içinde numune, 25-30 saniye bekletilerek, Şekil 5.10'de gösterildiği gibi açıklıklar elde edildi. Numune, de-iyonize su ile durulanıp, azot gazı ile kurutuldu.



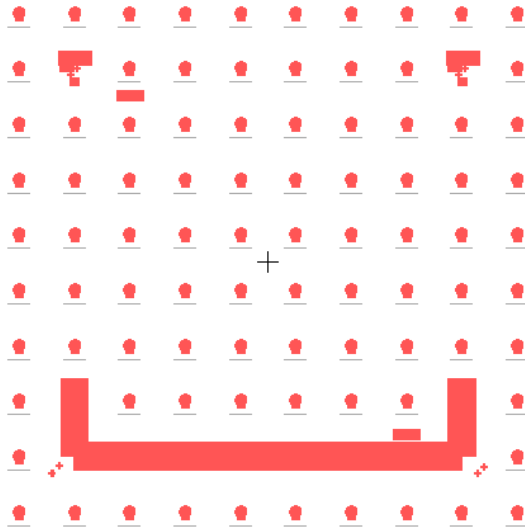
Şekil 5.10. Si_3N_4 tabakasının yüzeyden uzaklaştırılmaya hazırlanmış hali

InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinin çinko difüzyonuna hazır olabilmesi için, Si_3N_4 tabakasının da yüzeyden uzaklaştırılması gerekir. Bu amaçla, Şekil 5.11’de görüldüğü üzere, Si_3N_4 tabakası ICP-RIE cihazı ile aşındırıldı. Bu işlem ICP-RIE sisteminde CHF_3 gazı kullanılarak yapıldı. Böylece, InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinin çinko difüzyonuna hazır hale getirildi.



Şekil 5.11. Çinko difüzyonuna hazır olan InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesi

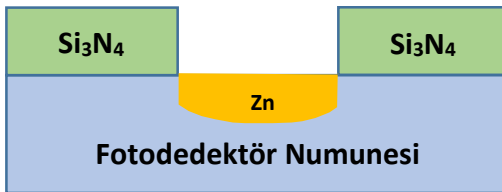
2” lik InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinde, Şekil 5.12’teki çizimi içeren $12 \times 12 \text{ cm}^2$ ’lik 9 tane küçük numune bulunmaktadır.



Şekil 5.12. 12 x 12 cm²'lik InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesi

Adım 3 : Çinko (Zn) Difüzyonu

Çinko difüzyonuna hazır olan InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinin üzeri tamamen çinko kaplandı. Kaplama işleminden sonra numune yüzeyinde bulunan fotodirenç tabakası aseton ile kaldırıldı ve numune isopropanol alkol ve deiyonize su ile temizlendi. Hemen ardından çinko, Şekil 5.13'de görüldüğü üzere, numunenin içine yüzeyden 3 µm derinliğe kadar difüz ettirildi.



Şekil 5.13. Çinko difüz ettirilmiş InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesi

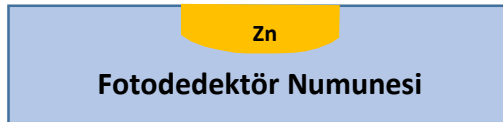
Çinko difüzyonundan sonra InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinin tabaka kalınlıkları Çizelge 5.2'de verildi.

Çizelge 5.2. Çinko difüzyonundan sonra InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinin tabaka kalınlıkları

Katkı	Tabaka	Kalınlık (nm)
Çinko (Zn)	InP	3000
---	InP	500
Silisyum (Si)	InP	500
---	InGaAs	1500
Silisyum (Si)	InP Tampon	1000
n-InP Alttaş		

Adım 4 : Si₃N₄ Tabakasının Kaldırılması

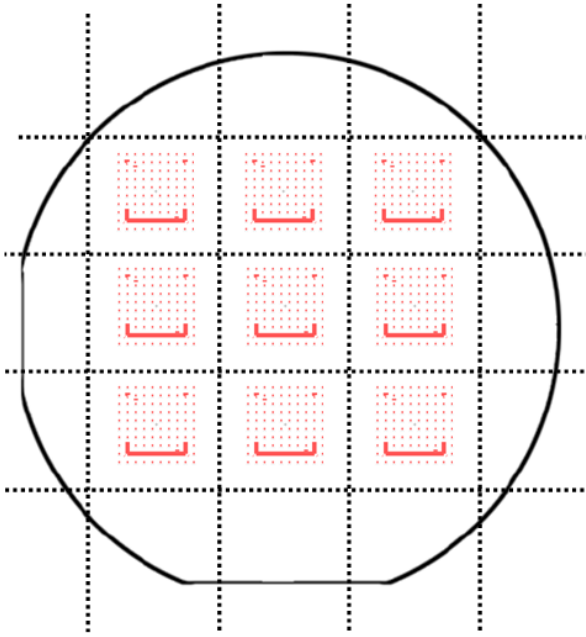
Şekil 5.14’da görüldüğü üzere, InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinin üzerinde bulunan Si₃N₄ tabakası, CHF₃ gazı kullanılarak, ICP-RIE cihazı ile aşındırıldı. Numune; aseton, isopropanol alkol ve deiyonize su ile temizlendi.



Şekil 5.14. Si₃N₄ tabakası kaldırılmış InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesi

Adım 5 : İlk Kesim

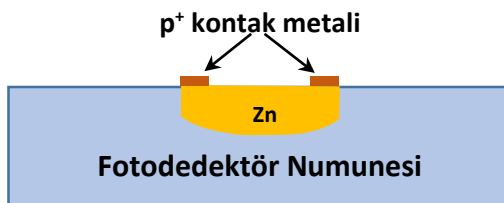
2” lik InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesi kesilmeye başlanmadan önce büyütülen yüzey fotoresist ile korundu. Daha sonra Şekil 5.15’de görülen numune, dilimleme (dicer) cihazında 12 x 12 mm² boyutunda 9 parçaya kesilerek maske boyutuna uygun hale getirildi. Kesim işleminden sonra yeni numuneler isopropanol alkol ve deiyonize su ile temizlendi. Temizlik işleminden sonra p⁺ kontak adımına geçildi.



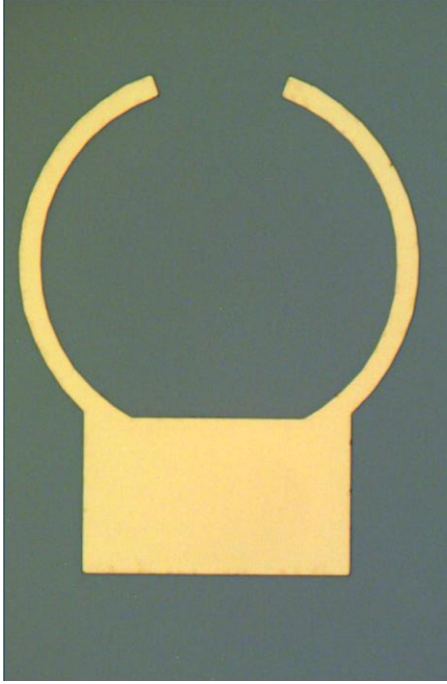
Şekil 5.15. InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinin kesilmesi

Adım 6 : p^+ Kontak

12 x 12 mm² InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinin yüzeyine fotolitografi işlemi uygulanarak, p^+ kontak metalinin yapılacağı yerler metal kaplamaya hazır hale getirildi. Fotolitografi işleminden sonra, InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör için p^+ kontak metali olarak; titanyum ve altın metalleri kullanıldı. Metal buharlaştırma cihazında, önce 20 nm kalınlıklı titanyum ve daha sonra da 200 nm kalınlıklı altın metali buharlaştırıldı. p^+ kontak metalizasyonu tamamlanmış numunenin şematik gösterimi Şekil 5.16'da ve optik mikroskop görüntüsü de Resim 5.1'de verildi.



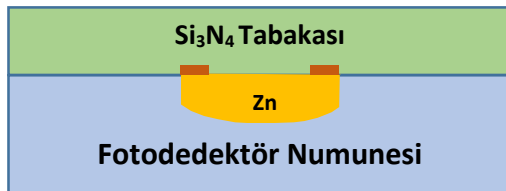
Şekil 5.16. p^+ kontak metalizasyonu tamamlanmış InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinin şematik gösterimi



Resim 5.1. p^+ kontak metalizasyonu tamamlanmış InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinin optik mikroskop görüntüsü

Adım 7 : İzolasyon

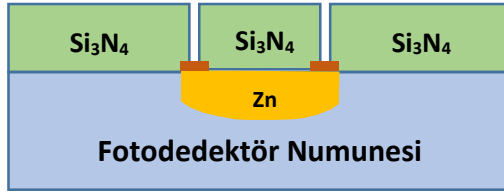
Her bir InGaAs/InP kızılötesi fotodedektörün diğerinden izole edilmesi amacıyla yapılan izolasyon adımı kimyasal buhar kaplama yöntemi kullanıldı. İzolasyon için düşük sıcaklıkta Şekil 5.17’de şematize edilen Si_3N_4 kaplaması yapıldı ve kaplama kalınlığı ve kalitesi profilometre cihazında kontrol edildi.



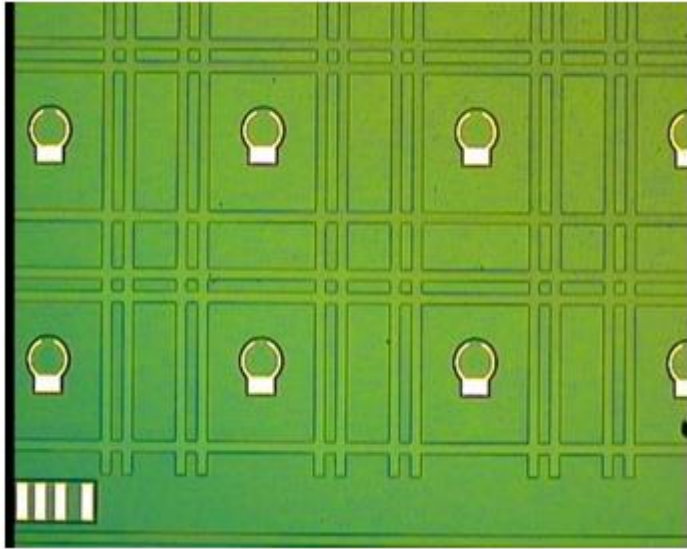
Şekil 5.17. İzolasyon yapılan InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör

Bu aşamadan sonra tekrar bir fotolitografi işlemi yapıldı ve InGaAs/InP kızılötesi fotodedektörlerde, Şekil 5.18’de şematize edilen ve Resim 5.2’de optik mikroskop

görüntüsü verilen bölgeler ölçüm ve tel bağlama işlemlerinde kullanılmak amacıyla açıldı.



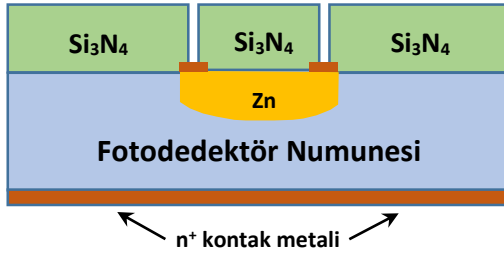
Şekil 5.18. Tel bağlamaya hazır InGaAs/InP kızılötesi fotodedektörün şematik gösterimi



Resim 5.2. Tel bağlamaya hazır InGaAs/InP kızılötesi fotodedektörün optik mikroskop görüntüsü

Adım 8 : n⁺ Kontak

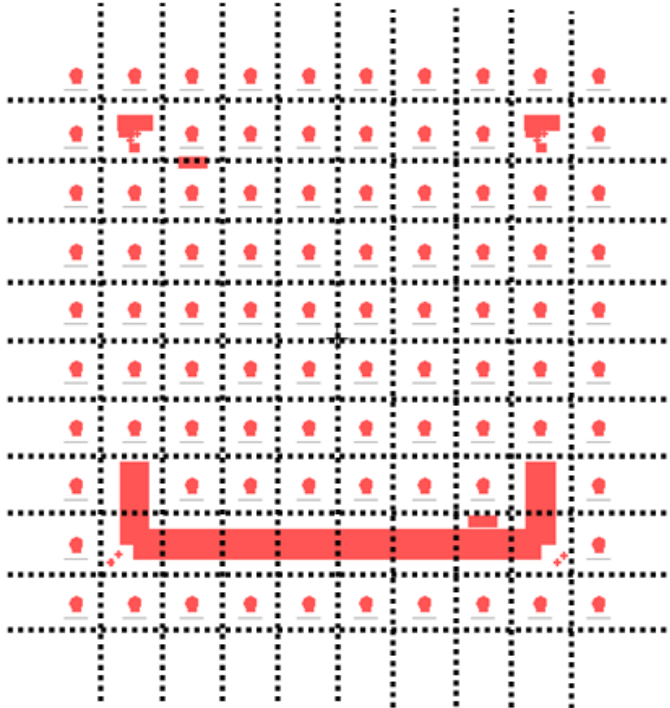
Fabrikasyonda son olarak örneklerin n⁺ kontak kaplaması yapıldı. Öncelikle InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinin ön yüzeyi fotodirenç ile korundu ve ardından metal kaplanacak arka yüzeyi isopropanol alkol ve deiyonize su ile temizlendi. Numunenin arka yüzeyine n⁺ kontak metal kaplaması, Şekil 5.19’te şematize edildiği üzere, germanyum, nikel ve altın metallerinden oluşan bir metal karışımının 200 nm kalınlıkta kaplanması ile tamamlandı.



Şekil 5.19. n^+ kontak metal kaplaması tamamlanan numunenin şematik gösterimi

Adım 9 : İkinci Kesim

Fabrikasyonu tamamlanan fotodedektörlerin ikinci kesim işlemi yapıldı. $12 \times 12 \text{ mm}^2$ 'lık InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör numunesinin üzerinde bulunan 88 tane **tekli** InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör, Şekil 5.20'te gösterildiği gibi, kesim işlemi ile birbirlerinden ayrıldı.



Şekil 5.20. 88 adet tekli InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör

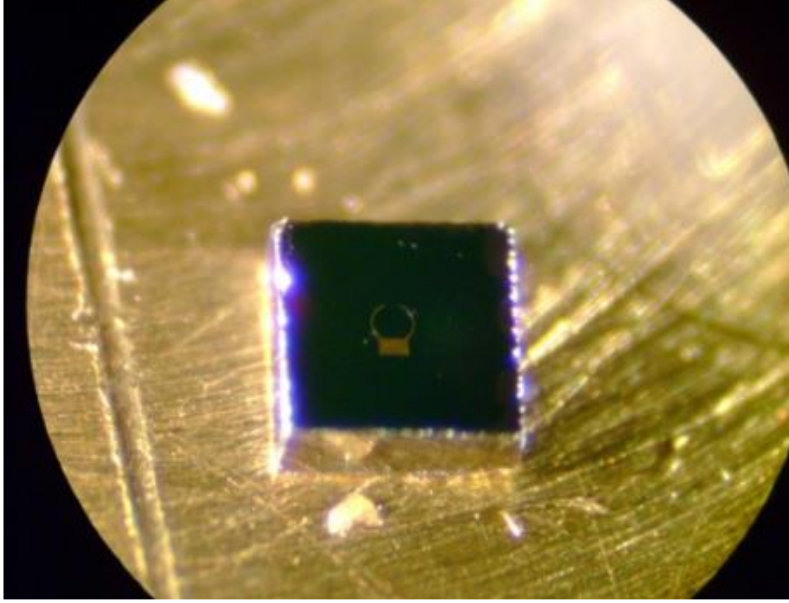
Bu kesim sırasında her iki yüzey tekrar fotodirenç ile korundu. Kesim işleminden sonra fotodedektörler isopropanol alkol ve deiyonize su ile temizlenerek, paketleme işlemleri için hazır hale getirildi.

5.7. InGaAs/InP Tekli Kızılötesi Prototip Fotodedektörün Paketlenmesi

Paketleme işlemi; temel olarak dedektörlerin paketlere yapıştırılması, hassas tel bağlama ve hermetik kaynaklama adımlarından oluşur. Bu aşamalar aşağıda sırasıyla anlatılmıştır.

Fotodedektörün Paket Malzemelerine Yapıştırılması

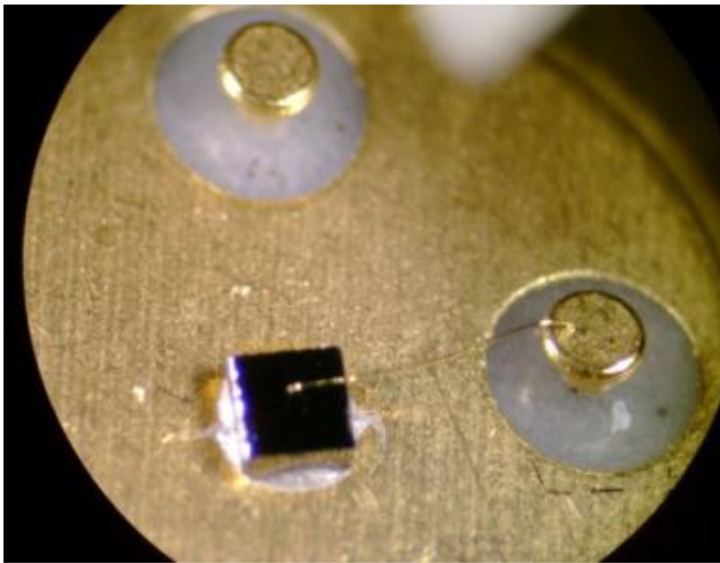
InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün paketlenmesinde TO5 paketi kullanıldı. Dedektörlerin TO5 pakete yapıştırılması için Epoxy Technology firmasının H20E 8OZ Kit Part A ve H20E 8OZ Kit Part B kodlu iki parçalı, iletken, gümüş epoksi malzemesi kullanıldı. Bu iki bileşenin ağırlığı hassas terazide eşit miktarda tartıldı ve malzemeler birleştirilip homojen ve akıcı bir form alıncaya kadar karıştırıldı. Fotodedektör, Resim 5.3’de görüldüğü üzere, TO5 paket malzemesi üzerine bu karışım kullanılarak yapıştırıldı. Yapıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, paketler 150 °C sıcaklıktaki fırında 15 dakika bekletilerek, yapıştırıcının sertleşmesi sağlandı.



Resim 5.3. TO5 paket malzemesi üzerine yapıştırılmış InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektör

Hassas Tel Bağlama İşlemi

Paketlere yapıştırılmış InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektör ile elektriksel bağlantıları sağlayan paket uçları, tel bağlama cihazı yardımıyla, Resim 5.4’de görüldüğü üzere, 25 μm ’lik tellerle birbirine bağlandı.



Resim 5.4. Tel bağlantısı yapılmış InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektör

Hermitik Kaynaklama

Hermitik kaynaklama işlemine, paketlerin yüzeyinde tuzaklanan nemi uzaklaştırmak amacı ile, tüm malzemelerin 125 °C'lik fırında 4 saat vakum ortamında bekletilmesiyle başlandı. Daha sonra paketler, oksijensiz ve nemsiz ortam sağlamak için içerisinden azot gazı geçirilen eldivenli kutunun içerisine alındı. TO5 paketinin içi vakumlandı ve daha sonra içine atmosferik basınçta saf azot gazı doldurularak kaynaklama işlemi gerçekleştirildi.

Resim 5.5'de paketleme adımları bitmiş ve elektriksel ölçümlere hazır InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün görüntüsü verildi.



Resim 5.5. Elektriksel ölçümlere hazır InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektör

5.8. InGaAs/InP Tekli Kızılötesi Prototip Fotodedektörün Karakterizasyonu

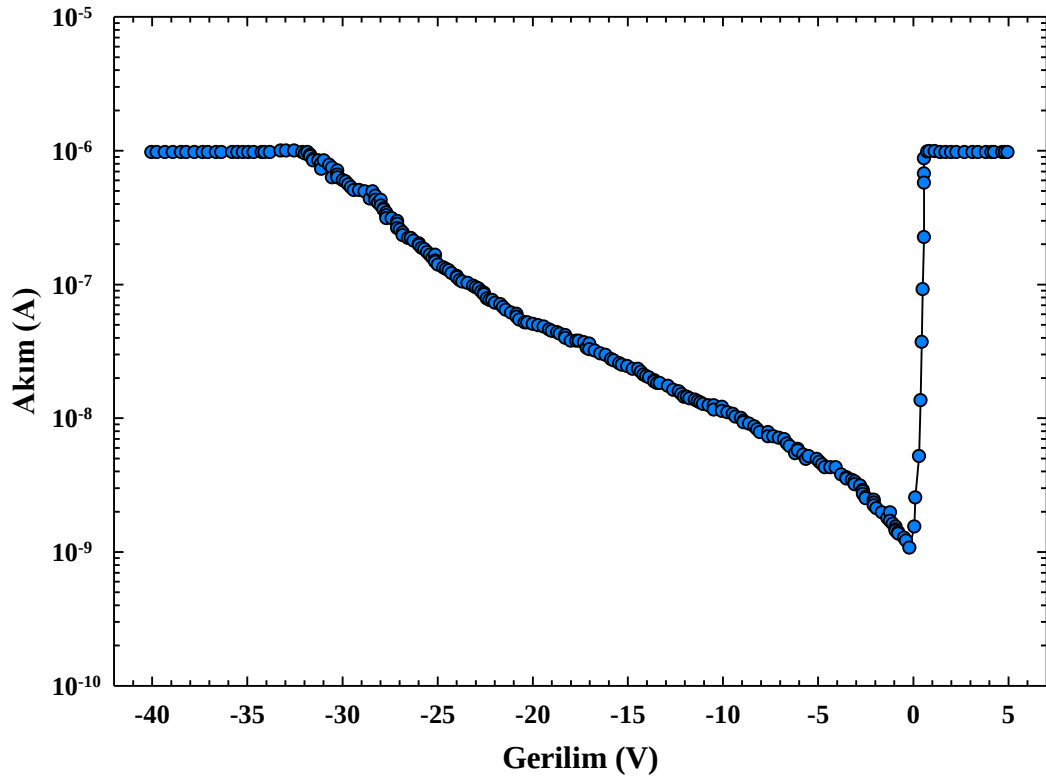
Üretilen bağımsız InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün elektriksel ve optik karakterizasyonu, 3. Bölümde detaylıca anlatılan, gerekli deneysel düzenekler kurularak yapıldı.

5.8.1. Akım-Voltaj karakteristiği ölçümü

Akım-Gerilim (I-V) ölçümleri ile InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün karanlık akımı ve aşağı kırılma voltajı belirlendi. Bu ölçümde, sonda istasyonu (probe station), ayarlanabilir lazer kaynak (tunable laser source), parametre analizörü (parameter analyser) kullanıldı.

Ölçümler sırasında ayarlanabilir lazer kaynaktan çıkan 1540 nm dalgaboyundaki ışık, fiber kablo yardımıyla, sonda istasyonu üzerinde bulunan fotodedektör üzerine düşürüldü. Bu işlemle beraber, parametre analizör fotodedektörün n^+ ve diğer p^+ uçlarına bağlandı.

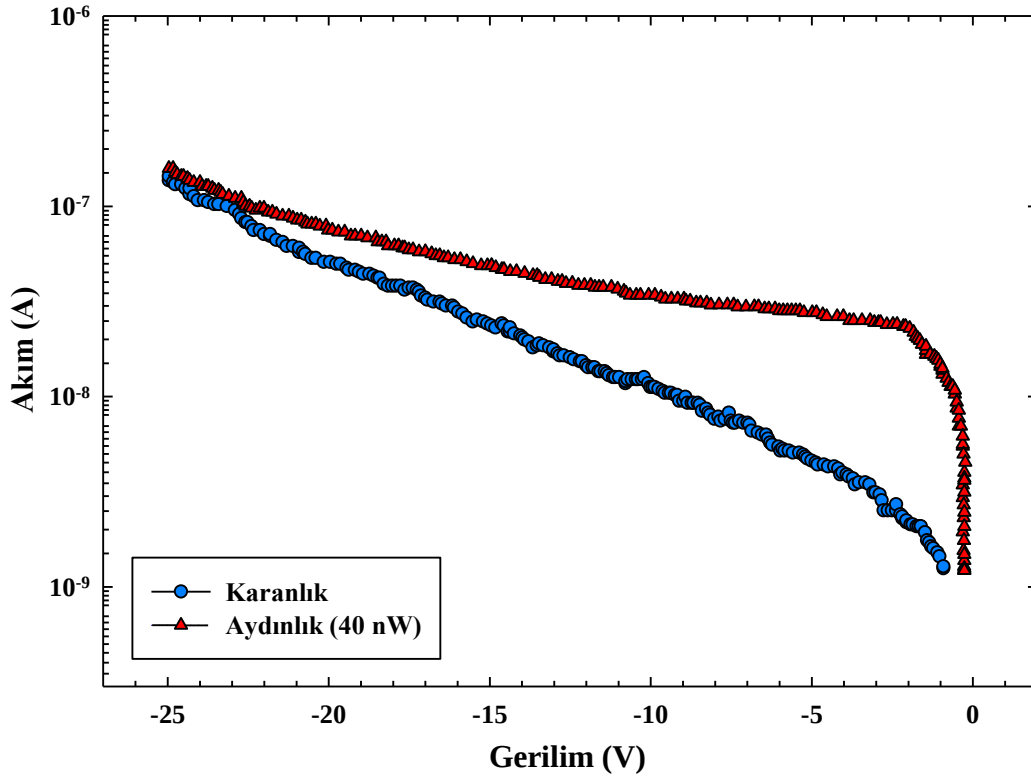
InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün karanlıktaki I-V davranışı incelendi ve grafiği çizilerek, Şekil 5.21’de verildi.



Şekil 5.21. InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün karanlıktaki I-V grafiği

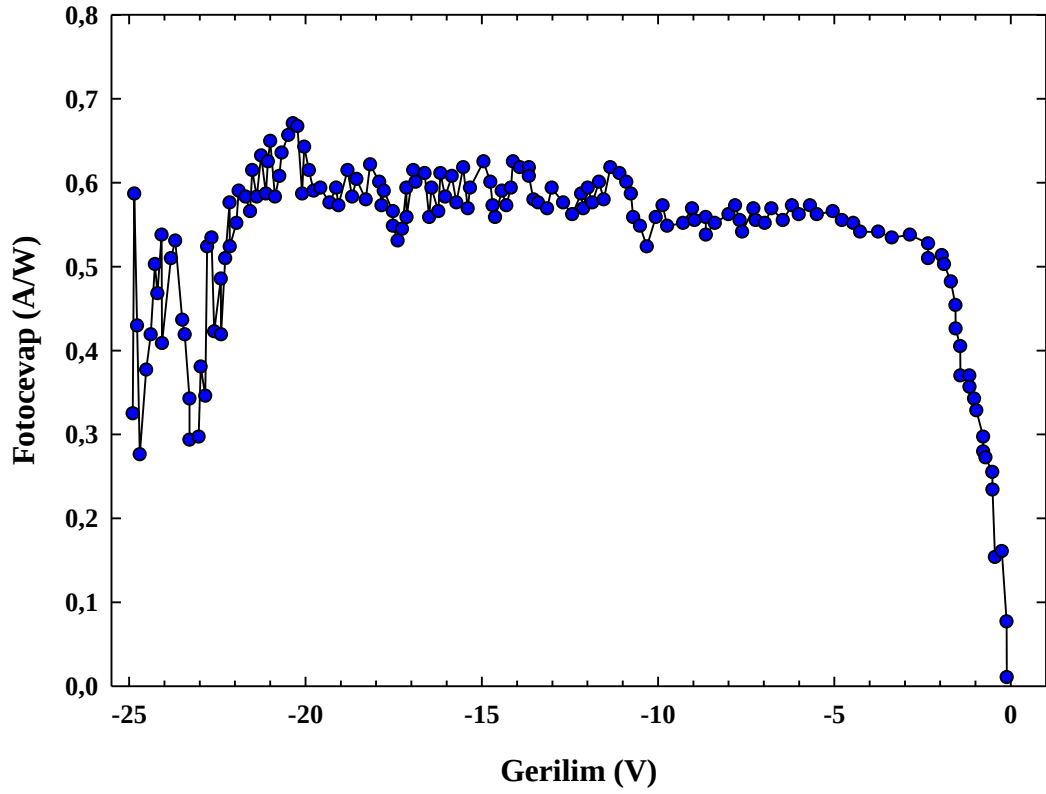
Fotodedektörün karanlık akımı ve aşağı kırılma voltajı çizilen I-V grafiğinden belirlendi. (Karanlık akım değeri kırılma voltajının % 90 olduğu değerdeki akım miktarıdır.) Üretilen fotodedektörün karanlık akımı 100 nA, aşağı kırılma voltajı ise -30 V olarak ölçüldü.

InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün 40 nW ışık altındaki I-V davranışı incelendi ve hem karanlık, hem de ışık altındaki I-V grafiği çizilerek, Şekil 5.22’de verildi.



Şekil 5.22. InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün karanlıktaki ve ışık altındaki I-V grafiği

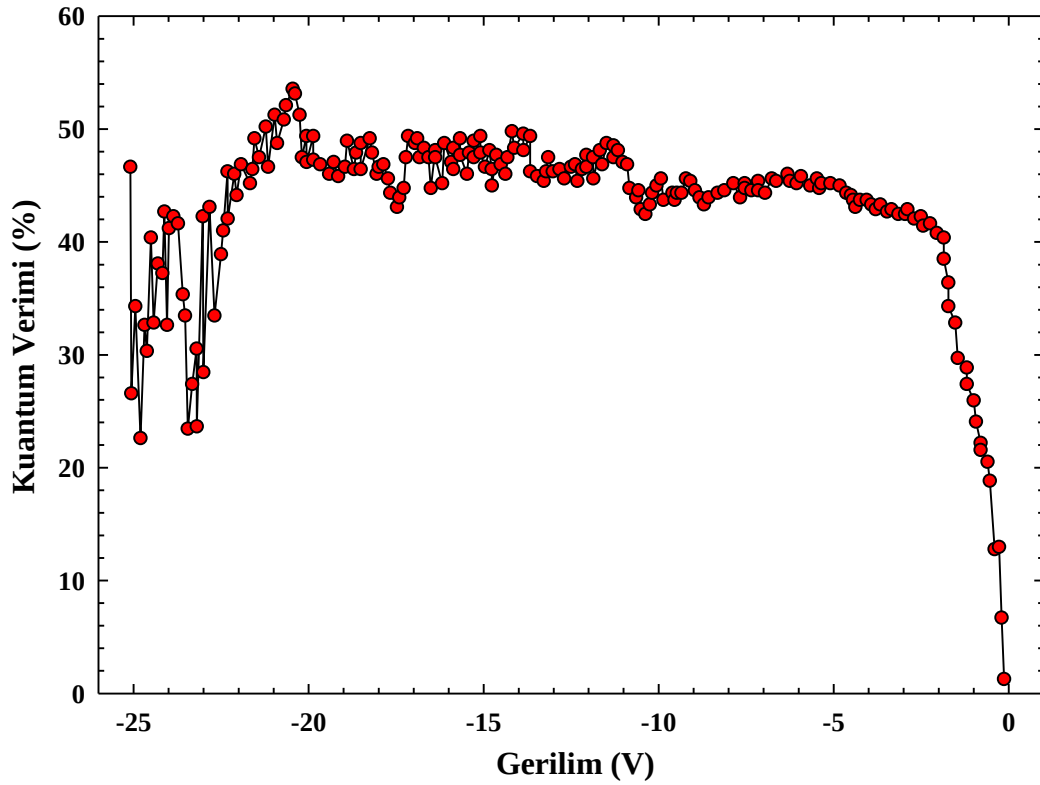
Fotoakımın, karanlık akımdan farkı alınarak, fotodedektöre ait çıkış sinyali hesaplandı. Eş. 2.5’te verilen fotocevap (R) formülü kullanılarak, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün fotocevap değerleri hesaplandı ve Şekil 5.23’de verilen fotocevap - gerilim (R-V) grafiği çizildi.



Şekil 5.23. InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün R-V grafiği

R-V grafiğinden de anlaşılacağı üzere, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün fotocevap değerleri, -20 V değerine kadar yaklaşık 0,6 A/W civarındadır.

Eş. 2.7’de verilen kuantum verimi (η) formülü kullanılarak, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün kuantum verimi (η) değerleri hesaplandı ve kuantum verimi - gerilim (η -V) grafiği çizildi. Şekil 5.24’de η -V grafiği verildi.



Şekil 5.24. InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün η -V grafiği

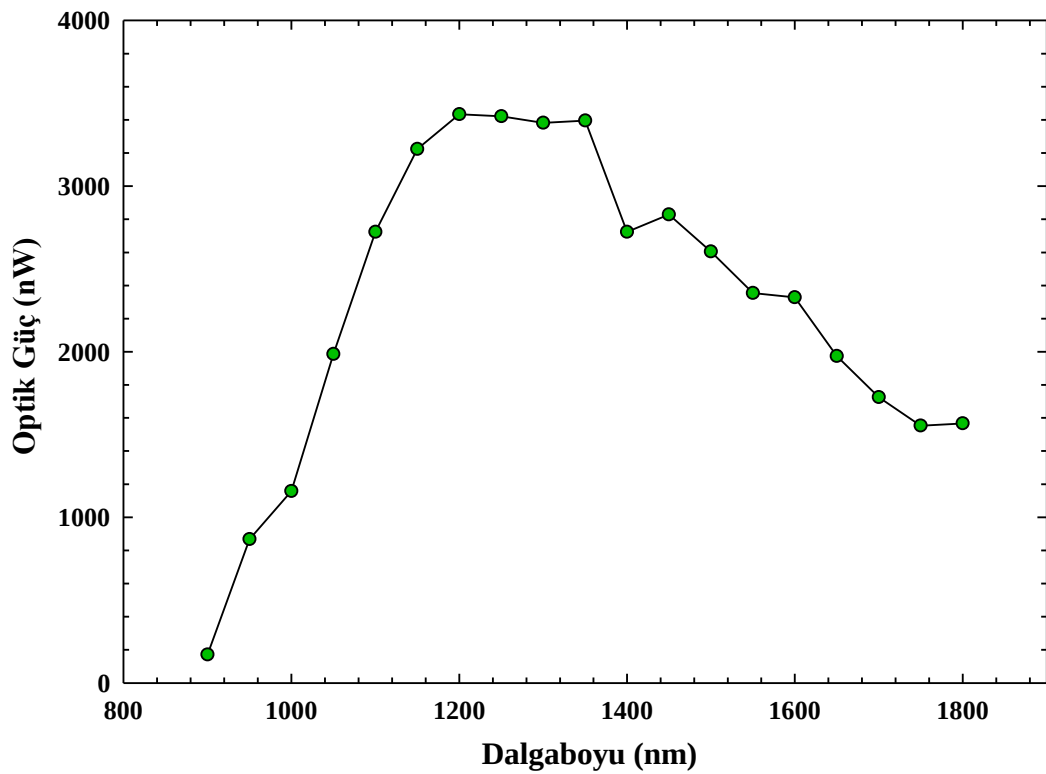
Şekil 5.24'den de anlaşılacağı üzere, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün kuantum verimliliği -20V değerine kadar % 45-50 değerleri arasındadır. -20V 'dan sonra karanlık akım değerleri fazla arttığı için fotodedektörün ışığa tepkisi ayırt edilemez olmaktadır.

5.8.2. Spektral fotoakım ölçümü

InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün; çalışma dalga boyu, spektral kuantum verimi ve kızılötesi/uzak kızılötesi kontrastı spektral fotoakım ölçümü ile belirlendi. Bu ölçümde, ışık kaynağı, tekrenklendirici, optik güç dedektörü, parametre analizörü (HP 4145 Parameter Analyzer) ve GaAs filtre kullanıldı.

InGaAs/InP Tekli Kızılötesi Fotodedektörün Çalışma Dalgaboyu

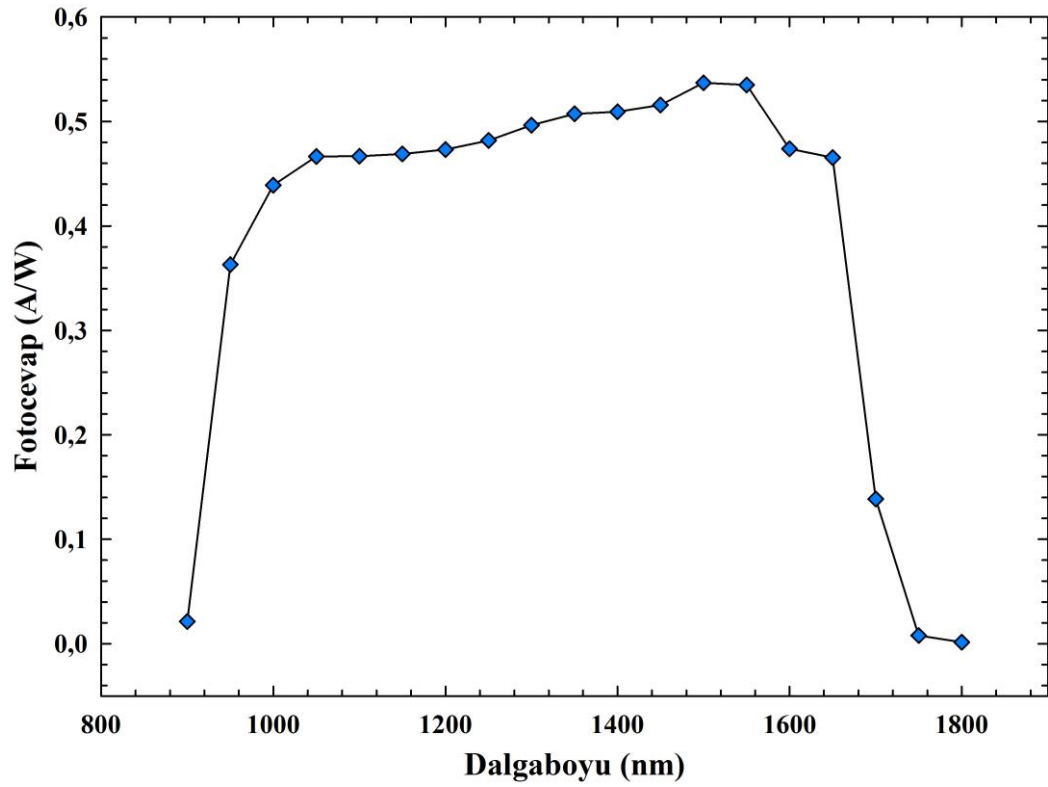
Işık kaynağından, tekrenklendiriciye giren ışık farklı dalgaboylarına ayrılır. Optik güç dedektörü ile tekrenklendiriciden çıkan optik güç ölçüldü. Bu ölçümde harmonik dalgaboylarının etkisini en aza indirmek için tekrenklendirici ile optik güç dedektörü arasına 900 nm'nin altındaki ışımları engelleyen GaAs filtre koyuldu. Dalgaboyuna bağlı olarak ölçülen optik güç değerleri Şekil 5.25'de verildi.



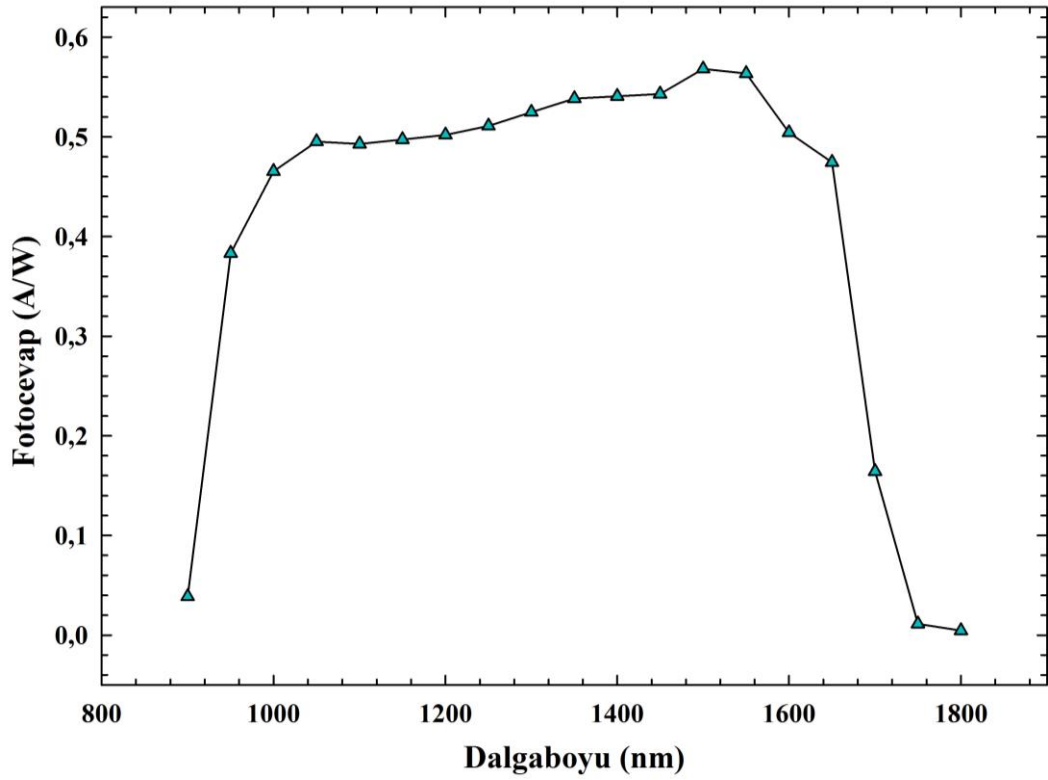
Şekil 5.25. Optik güç-Dalgaboyu grafiği

Optik güç ölçümünden sonra, optik güç dedektörü değiştirilerek yerine InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektör koyuldu. Böylece, değişen ışıma dalgaboyuna ve uygulanan gerilime bağlı olarak fotodedektörün fotoakım değerleri parametre analizörü ile ölçüldü.

Eş. 2.5'te verilen fotocevap (R) formülü kullanılarak, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün fotocevap değerleri hesaplandı. InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün, farklı gerilimler altında davranışını incelemek amacıyla, -3V ve -8V gerilim değerlerinde, dalgaboyuna bağlı fotocevap grafikleri çizildi ve Şekil 5.26-5.27'de verildi.



Şekil 5.26. Fotodedektörün -3V gerilim altında Fotocevap-Dalgaboyu grafiği

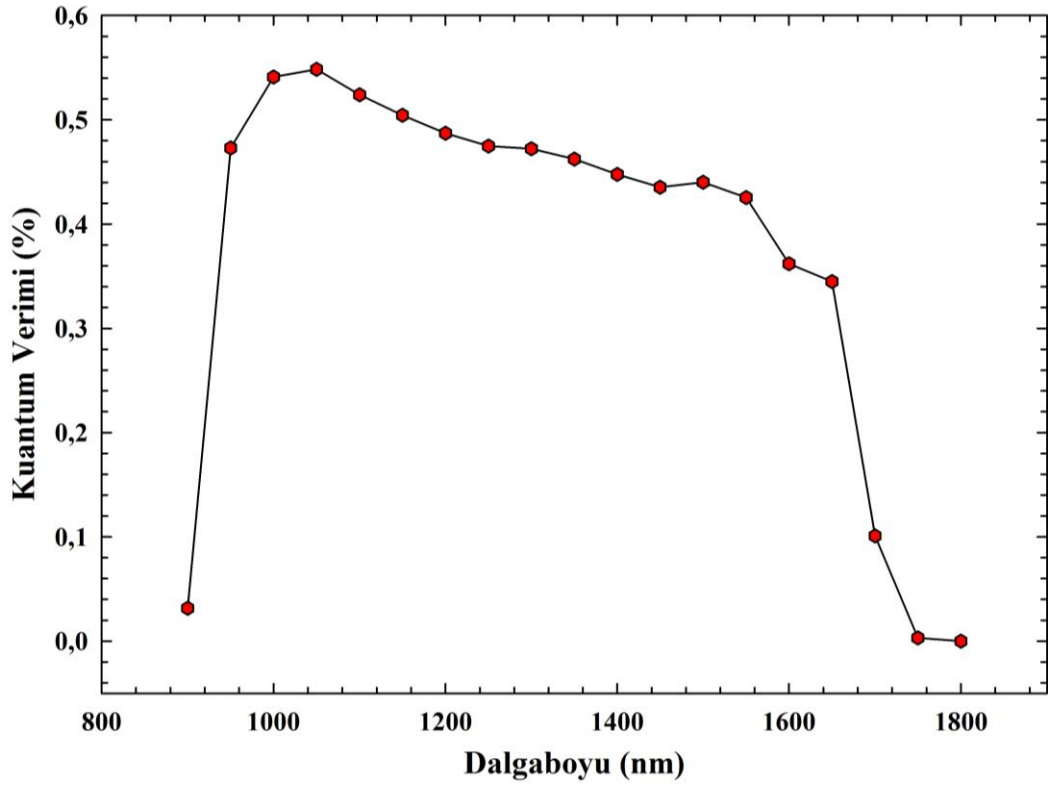


Şekil 5.27. Fotodedektörün –8V gerilim altında Fotocevap-Dalgaboyu grafiği

Şekil 5.26 ve Şekil 5.27’den da anlaşılacağı üzere, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün maksimum fotocevap değeri, 1500 nm dalgaboyunda ölçülmüştür. Bu nedenle, 1500 nm fotodedektörün çalışma dalgaboyudur.

InGaAs/InP Tekli Kızılötesi Fotodedektörün Spektral Kuantum Verimi

Eş. 2.7’de verilen kuantum verimi (η) formülü kullanılarak, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün kuantum verimi (η) değerleri hesaplandı ve Kuantum Verimi-Dalgaboyu grafiği çizildi. Şekil 5.28’de InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün Kuantum Verimi-Dalgaboyu grafiği verildi.



Şekil 5.28. Fotodedektörün Kuantum Verimi-Dalgaboyu grafiği

InGaAs/InP Tekli Kızılötesi Fotodedektörün Kızılötesi / Uzak Kızılötesi Kontrastı

Kızılötesi / uzak kızılötesi kontrast; maksimum fotocevabın, minimum fotocevaba oranı olarak verilebilir. Şekil 5.27’de bulunan, fotodedektörün Fotocevap - Dalgaboyu grafiği incelendiğinde; maksimum fotocevabın 0.56 A/W, minimum fotocevabın ise 0.005 A/W olduğu görüldü. Bu veriler ışığında, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün kızılötesi/uzak kızılötesi kontrastı, 112 olarak hesaplandı.

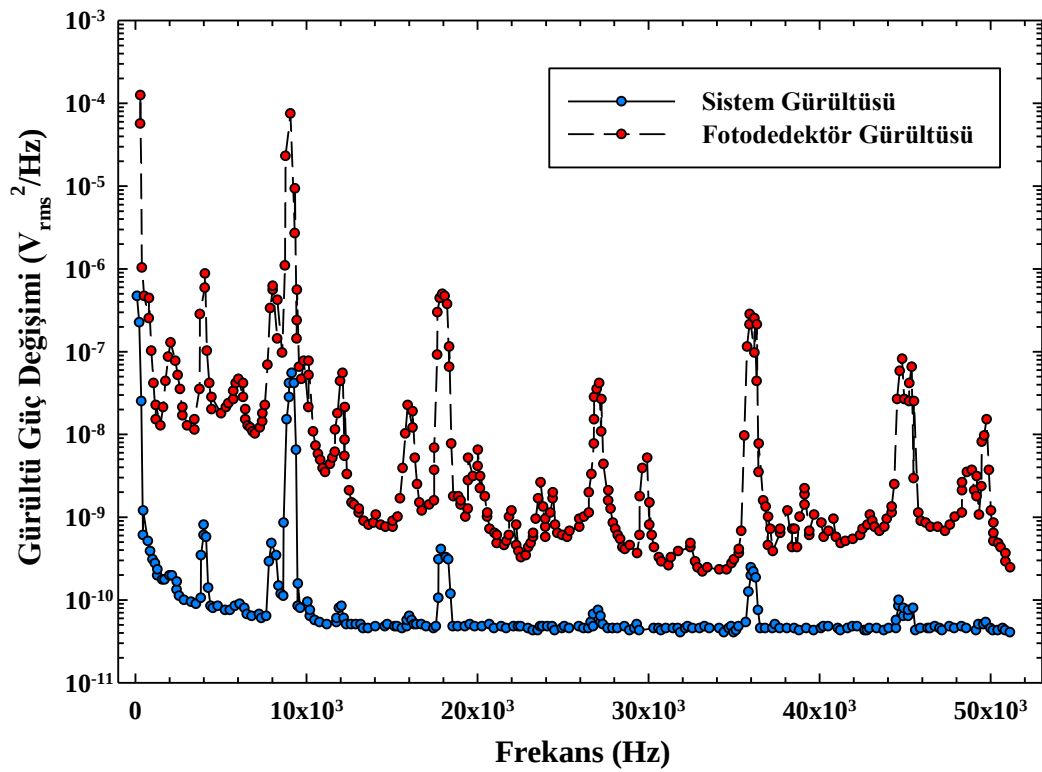
5.8.3. Düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümü

InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün spektral gürültüsü, dedektivitesi ve gürültü eşiti güç değeri belirlendi.

InGaAs/InP Tekli Kızılötesi Fotodedektörün Spektral Gürültüsü

Spektral gürültü ölçümü için kullanılan cihazlar; sinyal analizörü (signal analyzer) ve düşük gürültü yükseltici (low-noise current amplifier)'dir.

Öncelikle sistemin gürültüsü ölçüldü ve ardından InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektör düşük gürültü yükselticiye bağlandı. Sinyal analizöründe frekans değiştirilerek, fotodedektörün gürültü güç değişimi, V_{rms}^2/Hz cinsinden tespit edildi. Bu veriler kullanılarak, fotodedektörün gürültü gücü-frekans grafiği çizildi ve Şekil 5.29'te verildi.



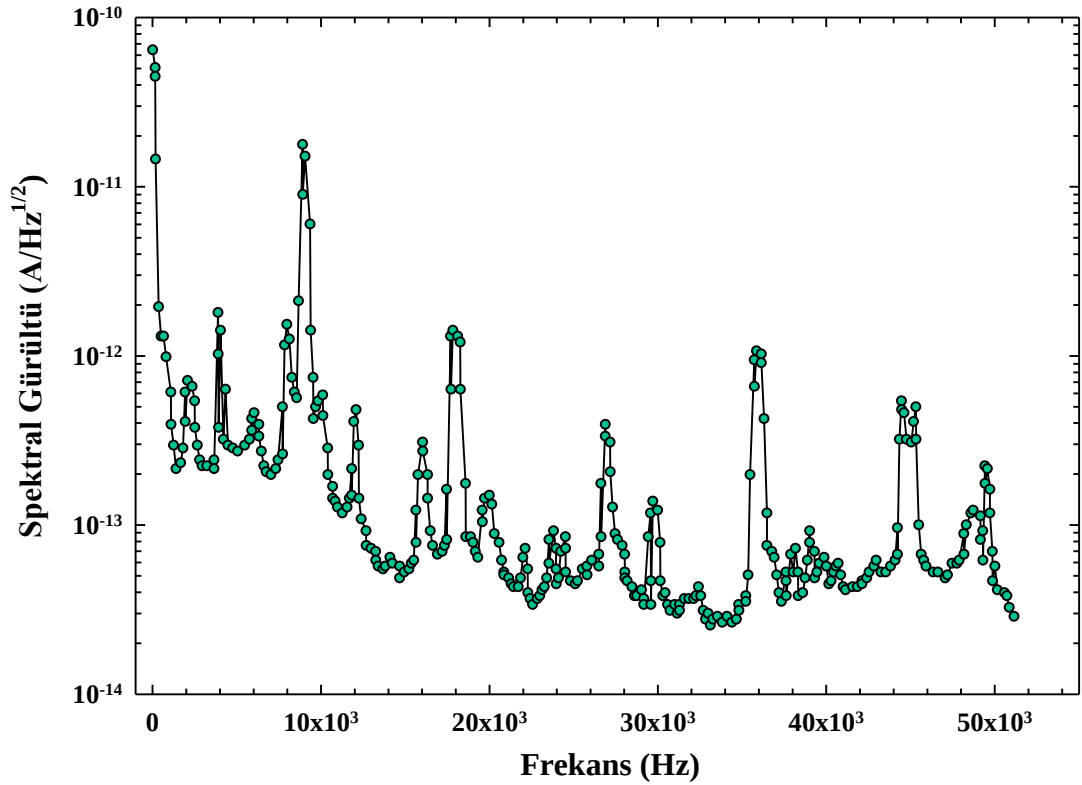
Şekil 5.29. Fotodedektörün gürültü gücü-frekans grafiği

Şekil 5.29'da verilen, fotodedektörün gürültü gücü-frekans grafiğinde mavi renkle çizilen eğri (alttaki), ölçüm sisteminin kendi gürültüsü; kırmızı renkle çizilen eğri (üstteki) ise dedektörün gürültüsüdür.

Fotodedektörün gürültüsünü sistemin gürültüsünden çıkartarak elde ettiğimiz gürültü ise, fotodedektörün gerçek spektral gürültüsüdür.

Sinyal analizöründe, V_{rms}^2/Hz cinsinden tespit edilen fotodedektörün gürültü gücü değişimi, düşük gürültü yükseltecinin hassasiyetinin karesi ile çarpılarak $A/Hz^{1/2}$ cinsine dönüştürüldü.

$A/Hz^{1/2}$ cinsinden elde edilen fotodedektörün gerçek spektral gürültüsünün, frekansa göre değişim grafiği çizilerek, Şekil 5.30’da verildi.



Şekil 5.30. Fotodedektörün spektral gürültü - frekans grafiği

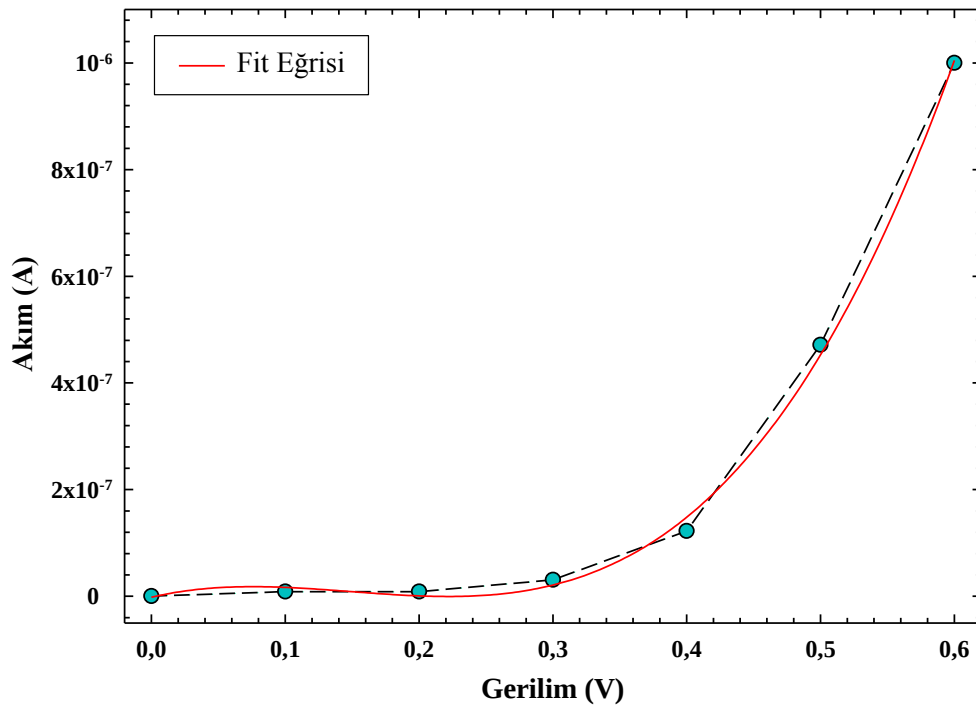
InGaAs/InP Tekli Kızılötesi Fotodedektörün Dedektivitesi

Fotodedektörler için dedektivite (D^*) değeri Eş. 2.12’de verildiği üzere;

$$D^* = (R_{\lambda})_{\max} \sqrt{\frac{R_0 A_d}{4kT}} \quad (2.12)$$

denklemleri ile hesaplanabilir. Bu ifadedeki R_0 fotodetektörün karanlık empedansı, $(R_{\lambda})_{\max}$ fotodetektörün $\lambda_{\max}$ dalga boyundaki fotocevabı yani maksimum fotocevabı, A_d fotodetektörün cm^2 cinsinden alanı, k Boltzmann sabiti ($k = 1,38 \times 10^{-23} J / K$), T ise Kelvin cinsinden sıcaklıktır.

Fotodetektörün karanlık empedansının bulunması amacıyla, I-V ölçümünün pozitif gerilim bölgesindeki, akım ve gerilim değerleri data analiz programına aktarıldı ve I-V grafiği çizildi. Çizilen I-V grafiği, Şekil 5.31’de verildi.



Şekil 5.31. Data analiz programında çizilen I-V grafiği

Grafik fit edilerek, en uygun üstel fonksiyon denklemi bulundu ve Eş. 5.1’de verildi.

$$y = 7,13.10^{-9} . e^{\frac{x}{0,12}} - 2,77.10^{-8} \quad (5.1)$$

Bulunan denklemin türevi alındı ve x (voltaj) yerine 0 (sıfır) konulup; fotodedektörün karanlık empedansı (R_0) bulundu.

$$R_0 = 1,6835 \times 10^7 \Omega \quad (5.2)$$

Ayrıca; Şekil 5.28’de bulunan, fotodedektörün Kuantum Verimi-Dalgaboyu grafiği incelendiğinde; maksimum fotocevabın yani, $(R_\lambda)_{\max}$ ’ın, $0,56 \text{ A/W}$ olduğu gösterilmişti.

$(R_\lambda)_{\max} = 0,56 \text{ A/W}$, $R_0 = 1,6835 \times 10^7 \Omega$, $A_d = 3,14 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$, $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, $T = 300 \text{ K}$ verileri dedektivite (D^*) formülünde yerlerine konulunca,

$$\begin{aligned} D^* &= 0,56 \cdot \sqrt{\frac{1,6835 \cdot 10^7 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}}{4,1 \cdot 38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}} \frac{\text{A}}{\text{W}} \cdot \sqrt{\frac{\Omega \cdot \text{cm}^2}{\frac{\text{J}}{\text{K}} \cdot \text{K}}} \\ &= 3,1 \cdot 10^{11} \frac{\text{A}}{\text{W}} \cdot \sqrt{\frac{\Omega \cdot \text{cm}^2}{\text{J}}} \\ &= 3,1 \cdot 10^{11} \frac{\text{A}}{\text{W}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{A}^2} \cdot \text{cm}^2}{\text{J}}} \\ &= 3,1 \cdot 10^{11} \frac{\text{A}}{\text{W}} \cdot \sqrt{\frac{\text{cm}^2}{\text{s} \cdot \text{A}^2}} \\ &= 3,1 \cdot 10^{11} \frac{\text{A}}{\text{W}} \cdot \frac{\text{cm}}{\text{A}} \sqrt{\frac{1}{\text{s}}} \\ &= 3,1 \cdot 10^{11} \frac{\text{cm}}{\text{W}} \sqrt{\text{Hz}} \end{aligned} \quad (5.3)$$

$$D^* = 3,1 \cdot 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1} \quad (5.4)$$

olarak bulundu.

InGaAs/InP Tekli Kızılötesi Fotodedektörün Gürültü Eşiti Gücü

Gürültü Eşiti Güç (NEP), dedektivite (D^*) değeri kullanılarak bulundu. Eş. 2.11’de, D^* ,

$$D^* = D\sqrt{A_d} = \frac{\sqrt{A_d}}{NEP} \quad (2.11)$$

olarak verilmişti. Öyleyse NEP, fotodedektör alanı (A_d)’na ve dedektivite (D^*)’ye bağlı olarak;

$$NEP = \frac{\sqrt{A_d}}{D^*} \quad (5.5)$$

olarak verilebilir.

$$NEP = \frac{\sqrt{3,14 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2}}{3,1 \cdot 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}} \quad (5.6)$$

$$NEP = 5,716 \cdot 10^{-14} \text{ W} / \text{Hz}^{1/2} \quad (5.7)$$

olarak bulundu.

5.9. InGaAs/InP Tekli Kızılötesi Prototip Fotodedektör Parametreleri

Bu bölümde InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısının ve fotomaskelerin tasarlanması, yapının büyütülmesi, büyütülen yapının fabrikasyonu ve üretilen fotodedektörün karakterizasyonu anlatıldı.

Aşağıda verilen çıktı parametrelerinin elde edilmesi amacıyla, üretilen InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün, elektriksel ve optik karakterizasyonları, gerekli deneysel düzenekler kurularak yapıldı.

- a) Fotodedektörün karanlık akımı ve aşağı kırılma voltajı çizilen I-V grafiğinden belirlendi. (Karanlık akım değeri kırılma voltajının % 90 olduğu değerdeki akım miktarıdır.) Akım-Voltaj karakteristiği ölçümü sonucunda; InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün;

✚ Karanlık akımı 100 nA ,

✚ Aşağı kırılma voltajı ise -30 V

olarak ölçüldü.

- b) Spektral fotoakım ölçümü sonucunda, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün;

✚ Şekil 5.26 ve Şekil 5.27'den da anlaşılacağı üzere, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün maksimum fotocevap değeri, 1500 nm dalgaboyunda ölçülmüştür. Bu nedenle, 1500 nm fotodedektörün çalışma dalgaboyudur.

✚ Şekil 5.24'den de anlaşılacağı üzere, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün kuantum verimliliği -20V değerine kadar %45-50 değerleri arasındadır.

✚ Şekil 5.27'de bulunan, fotodedektörün Fotocevap-Dalgaboyu grafiği incelendiğinde; maksimum fotocevabın 0.56 A/W , minimum fotocevabın ise

0.005 A/W olduğu görüldü. Bu veriler ışığında, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün kızılötesi/uzak kızılötesi kontrastı, 112 olarak hesaplandı.

- c) Düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümü sonucunda, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün;

✚ Spektral gürültüsü Şekil 5.30'da verilen grafikteki gibi,

✚ Dedektivitesi $3,1 \cdot 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$

✚ Gürültü eşiti gücü ise $5,716 \cdot 10^{-14} \text{ W / Hz}^{1/2}$

olarak belirlendi.

6. InGaAs/InP p-i-n KIZILÖTESİ FOTODEDEKTÖR DİZİNLERİNİN (InGaAs/InP IP FPA) ÜRETİMİ ve KARAKTERİZASYONU

6.1. Giriş

1.55 μm etrafındaki kızılötesi dalgalıboylarına duyarlı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ p-i-n kızılötesi fotodedektör dizinleri (InGaAs/InP IP FPA) gece görüş sistemleri, iletişim, termal ölçümler ve spektroskopı gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu bölümde; 64×64 , 128×128 ve 320×256 formatlı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ kızılötesi fotodedektör InGaAs/InP IP FPA'nın gerçekleştirilen üretim ve karakterizasyon faaliyetleri anlatıldı. Bu amaca uygun olarak, kızılötesi fotodedektör dizinlerinin tasarımları yapıldı. Üretilcek dedektörlerin 1.55 μm kızılötesi dalgalıboyu etrafında çalışması istendiğinden bu dalgalıboylarında ışığı soğurabilecek epitaksiyel yarıiletken yapı, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi (Gazi FOTONİK)'nde kurulu bulunan Moleküler Demet Epitaksi (MBE) yöntemi kullanılarak, yarıyalıtkan (SI) InP yarıiletken alttaş üzerine büyütüldü. Büyütölen bu epitaksiyel yapılar kullanılarak üretilen 64×64 , 128×128 ve 320×256 formatlı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ kızılötesi fotodedektör dizinlerinin üretim ve karakterizasyon faaliyetleri Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (NANOTAM)'nde yapıldı. Üretilen $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ kızılötesi fotodedektör dizinlerinin; Akım-Voltaj ($I-V$) Karakteristiğı Ölçümleri, Spektral Fotoakım Ölçümleri, Düşük Frekanslarda Güröltü Karakteristiğı Ölçümleri ve Dizin Verim Ölçümleri tamamlandı.

Bu bölümde, 64×64 , 128×128 ve 320×256 formatlı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ kızılötesi fotodedektör dizinlerinin yarıiletken yapılarının büyütölmesi ve üretimleri benzer olduğı için birlikte anlatıldı. Ancak, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ farklı formatlardaki kızılötesi fotodedektör dizinlerinin karakterizasyonları farklı olacağı için; 64×64 , 128×128 ve 320×256 formatlı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ kızılötesi fotodedektör dizinlerinin karakterizasyonları farklı başlıklar altında incelendi.

6.2. InGaAs/InP p-i-n Kızılötesi Fotodedektör Dizinlerinin Tasarımı

Bu çalışmada aşağıda listelenen adımlar uygulandı.

- a. Odak düzlem matris (FPA) tasarımı yapıldı.
- b. FPA piksel boyutu 24 μm olarak uygulandı.
- c. FPA piksel periyodu 30 μm olarak uygulandı.
- d. Tasarlanan fotomaske üzerinde detaylı karakterizasyonlar için kullanılmak üzere 310 μm aktif alanlı fotodedektörler bulunmaktadır.
- e. Tasarlanan fotomaske üzerinde ohmik kontakların karakterizasyonuna yönelik iletim hattı modeli (transmission line model - TLM) desenleri vardır.
- f. İşlem sırasında kullanılacak fotodedektör dizini fotomaskelerin tasarımları bilgisayar yardımlı tasarım (Computer aided design - CAD) yöntemi ile yapıldı.

6.2.1. Epitaksiyel yapı tasarımı

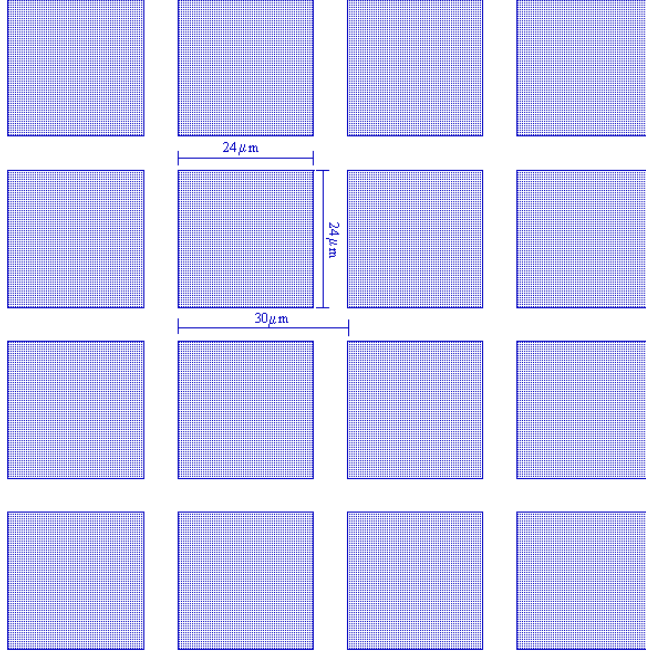
Üretilcek dedektörlerin 1.55 μm kızılötesi dalga boyu etrafında çalışması istendiğinden bu dalga boylarında ışığı soğurabilecek epitaksiyel bir yapı tasarımı düşünüldü. InGaAs/InP IP FPA üretiminde kullanılacak olan bu yapının katmanları, Çizelge 6.1’de verildi.

Çizelge 6.1. InGaAs/InP IP FPA üretiminde kullanılacak yapı

Katman	Malzeme	Katkılama [cm^{-3}]	Kalınlık [nm]
p-Kontak	$\text{p}^{++}\text{-InGaAs}$	1.4×10^{19} (Zn)	100
	$\text{p}^{+}\text{-InGaAs}$	0.9×10^{19} (Zn)	100
i-Emilim	i-InGaAs	-	1.800
n-Kontak	$\text{n}^{+}\text{-InP}$	1.0×10^{19} (Si)	400
Aşındırma-Durdurma	i-InGaAs	-	100
Tampon	i-InP	-	50
Alttaş	SI-InP	Fe	380000

6.2.2. Fotomaske tasarımı

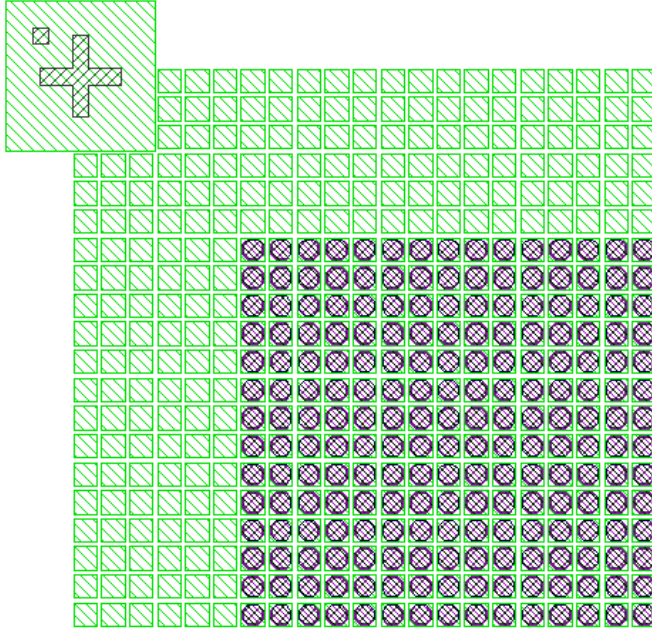
Odak düzlem matrislerinin üretiminde kullanılacak olan fotomaske tasarımında bir kenarı 24 μm olan kare şeklinde pikseller kullanıldı. Piksel periyodu küçük formatlı odak düzlem matrisleri için tipik olarak kullanılan 30 μm olarak seçildi. Şekil 6.1’de fotomaskenin piksellerin aktif alanını tanımlayan aygıt adacığı aşındırması (mesa yapı) adından bir görüntü üzerinde ebatlar gösterildi.



Şekil 6.1. Piksel boyutları ve periyodu

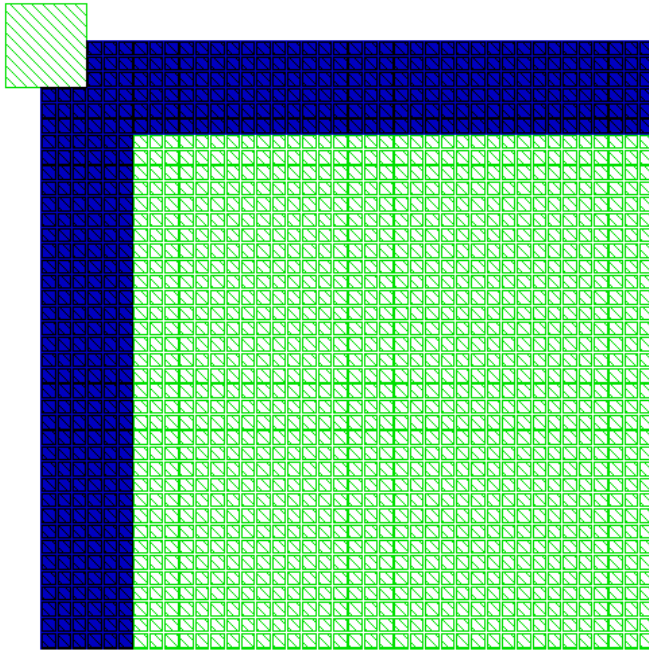
Çekirdek matrisler (64×64 , 128×128 ve 320×256 formatlı)'ın dışına, n tipi kontak yapmak üzere, 6 piksel genişliğinde aygıt adacıkları da eklendi. Aygıtın köşelerindeki 3 piksel $\times$ 3 piksel büyüklüğündeki bir bölgede n kontak kaldırılarak hibritleştirme esnasında kullanılacak olan hizalama işaretleri eklendi.

p kontak için piksellerin adacık deseni merkezinde $20 \mu\text{m}$ çaplı daire şeklinde desenler çizildi. Bu aşamada fotomaske çiziminden bir görüntü Şekil 6.2'de gösterildi. Şekilde yeşil ile taralı alanlar aygıt adacıkları ve siyah taralı alanlar ise p kontak desenleridir. Sol üst köşede hibritleştirme için hizalama işareti görülmektedir.



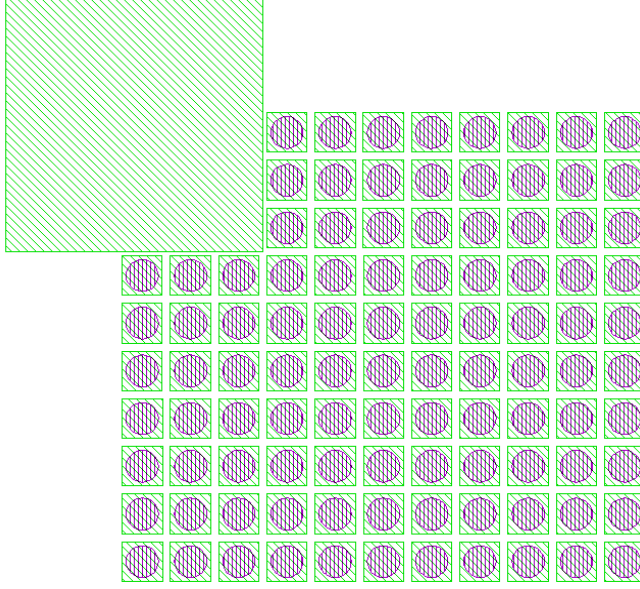
Şekil 6.2. Piksel aygıt adacığı ve p kontak adımı deseninin fotomaske çizimi

n kontak için ise çekirdek matrisin kenarlarındaki 6 piksel genişliğindeki alana oturan bir metal kontak deseni çizildi. Şekil 6.3’de n kontak deseni mtrislerin dışında kalan, mavi taralı alan ile gösterilmektedir.



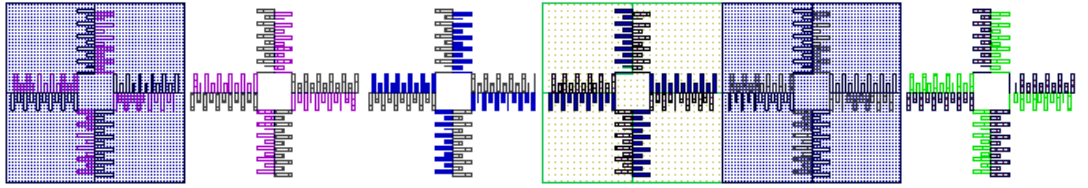
Şekil 6. 3. n kontak desenini gösteren fotomaske çizimi.

Son olarak tüm aygıt adacıklarının üzerine 18 μm çaplı daire şeklinde In bağlantı metali deseni çizildi. Şekil 6.4’de bu desen lacivert taralı alanlarda gösterilmektedir.



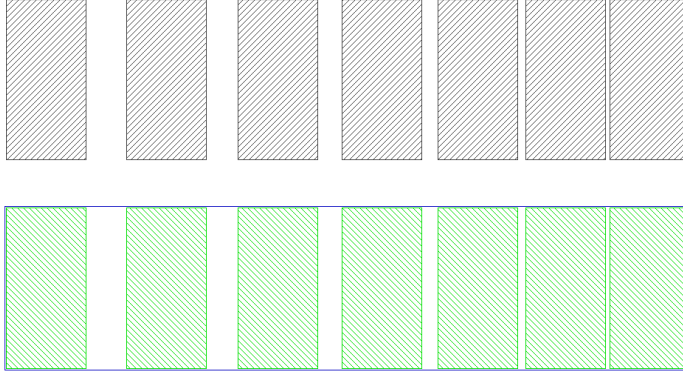
Şekil 6.4. In bağlantı metali deseni

Tasarlanan fotomaskede Şekil 6.5’de gösterilen hizalama işaretleri de yer almaktadır.



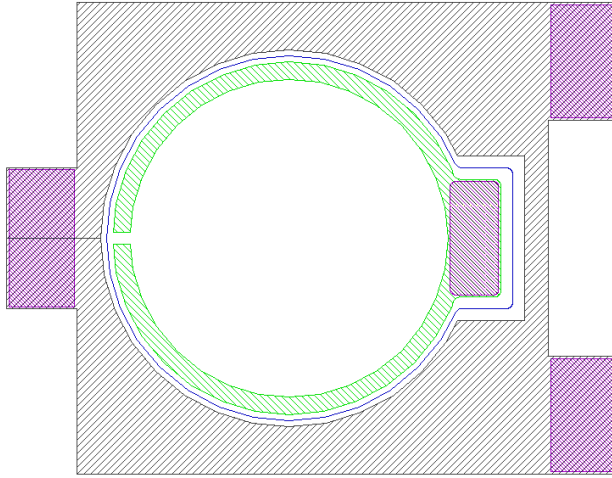
Şekil 6.5. Fotomaskede kullanılan hizlama işaretleri

Hem n-kontak adımında, hem de p-kontak adımında kullanılacak fotomaskede, Şekil 6.6’da verilen ohmik kontakların karakterizasyonuna yönelik, 50 μm , 40 μm , 30 μm , 20 μm , 10 μm ve 5 μm aralıklı, 200 μm x 100 μm ebatlarındaki TLM desenleri de yer aldı.



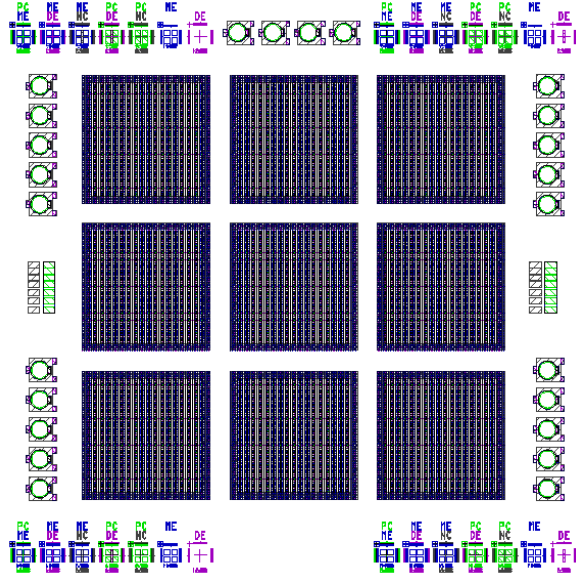
Şekil 6.6. TLM desenleri

Fotomaskeye, üretimi odak düzlem matrisi ile paralel olacak şekilde aktif alanı 310 μm olan test fotodedektörleri de çizildi. Şekil 6.7’de bu fotodedektörlerin fotomaske çizimi gösterilmektedir.



Şekil 6.7. Test fotodedektörleri fotomaske çizimi

Bu desenlerin bir araya getirilmesi ile bir yonga için fotomaske çizimi elde edilmiş oldu. Bu yonga üzerinde 9 adet odak düzlem matrisi, TLM desenleri test fotodedektörleri ve hizalama işaretleri bulunmaktadır. Şekil 6.8’de yonganın fotomaske çizimi verilmektedir.



Şekil 6.8. Yonganın fotomaske çizimi

6.3. InGaAs/InP p-i-n Kızılötesi Fotodedektör Yapısının Büyütülmesi

InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısı, Çizelge 6.1’de verilen tasarı kullanılarak, yarıyalıtkan (SI) tipi InP alttaş üzerine, Gazi FOTONİK’te kurulu bulunan, VG–Semicon V80H katı kaynaklı MBE sistemi ile büyütüldü.

InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısının büyütülmesindeki şartlar ve adımlar şu şekilde anlatılabilir:

- SI-InP alttaş MBE sistemine alınmadan önce kimyasal çözeltiler kullanılarak ilk yüzey temizleme işlemi yapıldı.
- Temizlik işleminden sonra SI-InP alttaş MBE sistemindeki büyütme odasına transfer edilmeden önce hazırlık odasında 350 °C’ de 1 saat ısıtılarak üzerindeki su buharı ve bu sıcaklıkta alttaştan buharlaşabilen diğer kirliliklerden temizlenmesi sağlandı.
- Alttaş büyütme odasına transfer edilerek, manipülatöre yüklendi. Alttaş manipülatöre yüklendikten sonra MIG (hassas iyon ölçer), alttaş tutucusunun

önüne getirildi. Böylece hem kaynak hücrelerden elde edilen moleküllerin alttaşı ısıtıcısı üzerine birikme yapması önlenmiş, hem de akı kalibrasyonunun doğru yapılması için MIG konumlandırılmış oldu.

- Sıvı azot akışı büyütme süresince sabit kalacak şekilde ayarlandıktan sonra, kaynak hücreler çok düşük sıcaklık artışlarıyla (6 °C/dak.) ısıtılmaya başlandı.
- InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısını büyütme için; İndiyum (In), Galyum (Ga), Arsenik (As), Galyum Fosfat (GaP), Berilyum (Be) ve Silikon (Si) kaynak hücreleri kullanılacağı için, bu hücrelerin sıcaklıkları Çizelge 6.2 ile verilen büyütme sıcaklık değerlerinin 15–20 °C üzerine kadar ısıtıldı ve o sıcaklıklarda 10 dakika bekletildi. Bu bekletme sırasında birkaç defa kaynak kesicileri açılarak hücrenin içinde ısıtılma sonucu ortaya çıkan gazların ve oksijenin dışarı atılması sağlandı.
- Kaynakların sıcaklıkları, büyütme sıcaklıklarına indirildi.
- InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısının bu ilk hazırlıkları tamamlandıktan sonra büyütme işlemine başlayabilmek için V80H MBE sisteminde Crystal programı ile büyütme işleminde takip edilecek adımlar belirlendi.
- Yüklenen alttaşı üzerinde bulunan oksit tabakasının kaldırılması için alttaş 10% rpm ile döndürülerek, 520 °C 'ye kadar ısıtılmaya başlandı. Alttaş sıcaklığı 520 °C 'ye (termoçift sıcaklığı) ulaştığı zaman RHEED voltajı 15 keV civarına kadar çıkarılıp, RHEED akımı yavaşça maksimum 2 A oluncaya kadar artırıldı. 520 °C 'den sonra alttaş yüzeyden ayrılan P atomlarını telafi etmek için P akısı altında 580 °C 'ye kadar tam oksit kaldırma işlemi için ısıtılmaya başlandı.
- Alttaş sıcaklığı 590 °C 'ye ulaşınca, 15 dakika tam oksit kaldırma işlemi için beklenildi ve bu süre zarfında alttaş yüzeyinin RHEED deseni incelendi.
- Tam oksit kaldırma işlemi tamamlanınca alttaş sıcaklığı 560 °C' ye düşürüldü.
- Katkısız (i-tipi) InP tampon tabakası için In kaynak sıcaklığı 738 °C, GaP kaynak sıcaklığı 1040 °C olarak yazılan Crystal programına büyütme işleminin devam etmesi için komut verildi. Bu komuttan sonra In ve GaP akı kesicisi açılarak, 50 nm kalınlıklı i-tipi InP tampon tabakası büyütüldü.
- i-tipi InP tabakası büyütüldükten sonra aynı alttaş sıcaklığında, 100 nm kalınlıklı, i tipi InGaAs aşındırma-durdurma tabakası büyütüldü.

- i-InGaAs tabakası büyütüldükten sonra, aynı alttaş ve kaynak sıcaklıklarında, yüksek Si katkılı 400 nm kalınlıklı n tipi InP (n kontak) tabakası büyütüldü.
- InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısının büyütme işlemi, aynı alttaş ve kaynak sıcaklıklarında, 2000 nm kalınlıklı, i tipi InGaAs (i-emilim) tabakasının büyütülmesi ile tamamlandı.
- Büyütmesi tamamlanan numune difüzyon fırınına transfer edildi.
- Numuneye, vakum altındaki difüzyon fırınında, Çizelge 6.2’de verilen katkı yoğunluğuna ve tabaka kalınlığına sahip olacak şekilde çinko (Zn) difüz edildi.

Çizelge 6.2. InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısı için sıcaklık ve akı değerleri

	Sıcaklık (°C)	Akı (mbar)	Katmanlar	Türü	Katkılama	Kalınlık (nm)
Oksit uzaklaştırma	590					(10 dakika)
Alttaş	560		i-InP	Tampon	---	50
Alttaş	560		i-InGaAs	Aşındırma- Durdurma	---	100
Alttaş	560		n ⁺ -InP	n-Kontak	Si	400
Alttaş	560		i-InGaAs	i-Emilim	---	1800
Alttaş			p ⁺ -InGaAs	p-Kontak	Zn	100
Alttaş			p ⁺⁺ -InGaAs	p-Kontak	Zn	100
Ga	823	1.8 x 10 ⁻⁷				
In	738	3.7 x 10 ⁻⁷				
As	960	2.5 x 10 ⁻⁶				
GaP	1040					
Si	1150					

6.4. InGaAs/InP p-i-n Kızılötesi Fotodedektör Dizinlerinin (FPA) Üretimi

InGaAs/InP IP FPA üretimi BİLKENT-NANOTAM bünyesindeki DPT-HAMİT laboratuvarı temiz odalarında fotolitografik yöntemlerle gerçekleştirildi.

InGaAs/InP IP FPA üretiminde aşağıda listelenen adımlar uygulandı.

Adım 1: Numune kesimi ve temizliği

Adım 2: p^+ kontak yapılması

Adım 3: Aygıt adacığı aşındırması

Adım 4: n^+ kontak yapılması

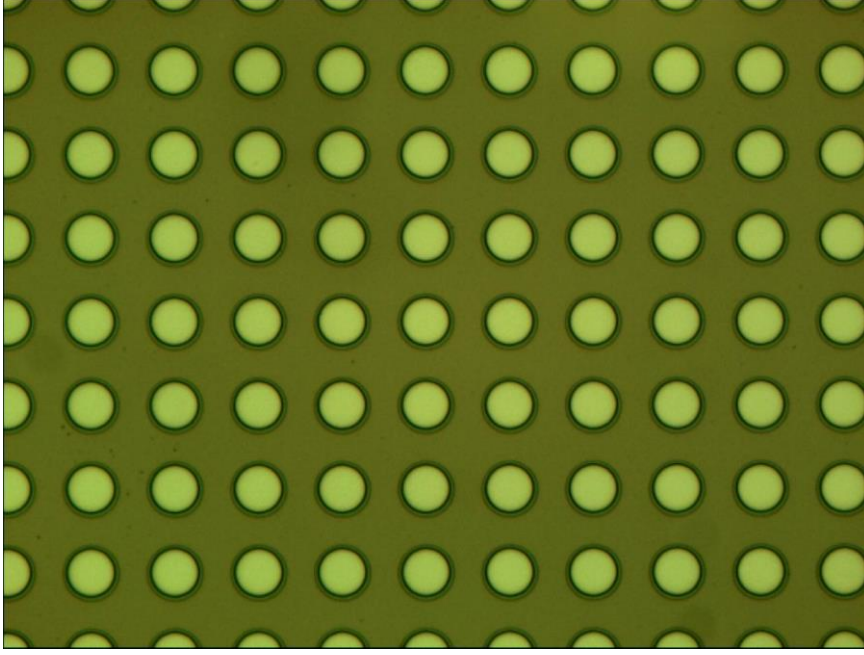
Adım 5: FPA'nın tavllanması

Adım 1 : Numune Kesimi ve Temizliği

Gazi FOTONİK'te 2" çaplı SI-InP alttaş üzerine büyütülen InGaAs/InP kızılötesi fotodedektör yapısı, dilimleme - kesim cihazında maske boyutuna uygun ebatlarda kesildi. Bu kesim sırasında büyütülen yüzey fotodirenç (fotoresist) ile korundu. Kesim işleminden sonra numune, fabrikasyona hazır hale gelebilmesi için, aseton, propanol alkol ve de-iyonize (DI) su ile temizlenerek, azot gazı ile kurutuldu. Bu temizlik işleminden sonra numune, fotodirenç kaplanarak p kontak adımına hazır hale getirildi.

Adım 2 : p^+ Kontak Yapılması

p^+ kontak yapımı aşamasında sırasıyla *Titanyum*, *Platin* ve *Altın* metalleri kullanıldı. p^+ kontak metali kaplanacak bölgelerin belirlenmesi amacıyla FPA yüzeyine fotodirenç kaplanarak, fotolitografi işlemi uygulandı. Fotolitografi işleminde Microchemicals firmasının AZ5214 fotodirenç polimeri kullanıldı. Fotodirenç polimeri, bir çevirici (spinner) yardımı ile yüzeye homojen olarak kaplandı. Suss MA6 marka maske hizalama cihazı kullanılarak, fotomaskenin p^+ kontak figürü Resim 6.1'de görüldüğü üzere FPA üzerine işlendi.

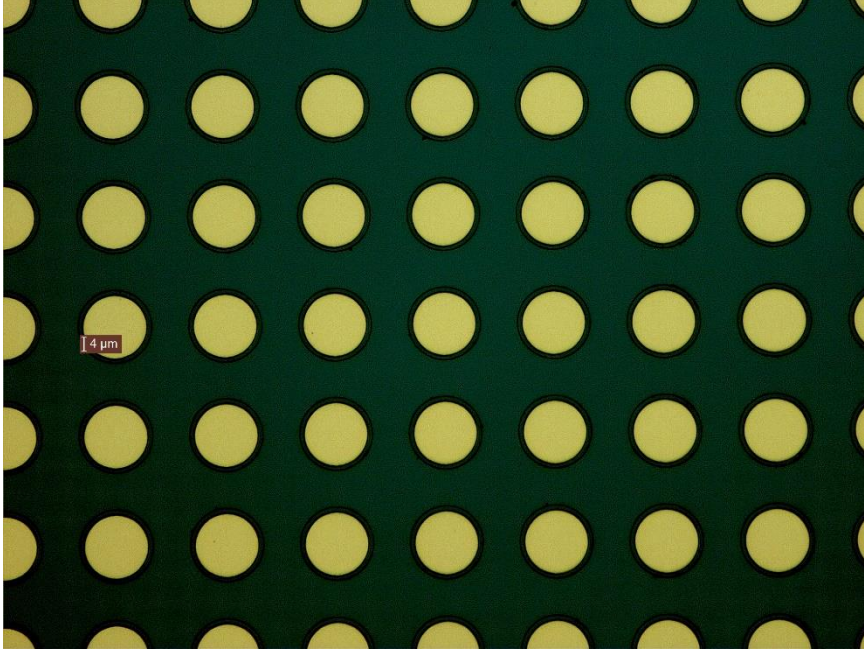


Resim 6.1. p^+ kontak litografisi yapılmış InGaAs/InP IP FPA

Fotolitografi işleminden sonra kontak bölgelerinin temizliği için FPA, plazma temizleme cihazında 50 W RF gücünde 0,5 dakika süre ile O_2 plazma ortamında bekletildi. Daha sonra elektron demeti ile metal buharlaştırma yöntemiyle FPA üzerine *Titanyum*, *Platin* ve son olarak da *Altın* metali buharlaştırıldı.

Titanyum 3 Å/s kaplama hızı ile 30 nm kalınlıkta, Platin 3 Å/s kaplama hızı ile 40 nm kalınlıkta ve son olarak Altın 5 Å/s kaplama hızı ile 150 nm kalınlıkta kaplandı.

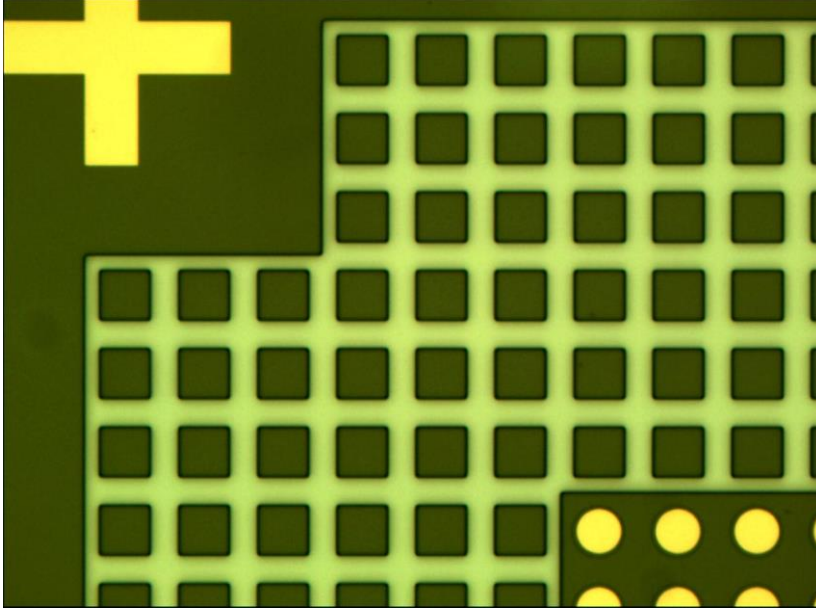
Resim 6.2’de p^+ kontak metalizasyonu tamamlanmış FPA’nın optik mikroskop görüntüsü verildi.



Resim 6.2. p^+ kontak metali yapılmış InGaAs/InP IP FPA

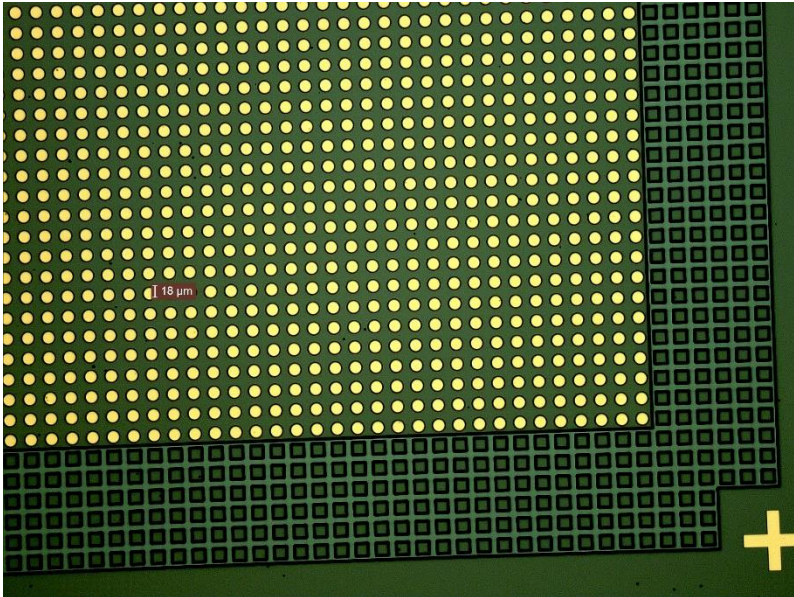
Adım 3 : Aygıt Adacığı Aşındırması

InGaAs/InP IP FPA yüzeyinde bulunan p^+ kontak bölgelerinin birbirinden izole edilerek, korunması amacıyla fotolitografi işlemi uygulandı. Fotolitografi işleminde Microchemicals firmasının AZ9260 fotodirenç polimeri kullanıldı. Fotodirenç polimeri, bir çevirici (spinner) yardımı ile yüzeye homojen olarak kaplandı. Suss MA6 marka maske hizalama cihazı kullanılarak, fotomaskenin ada açma adımı Resim 6.3’de görüldüğü gibi numune üzerine işlendi.



Resim 6.3. Aygıt adacığı litografisi yapılmış InGaAs/InP IP FPA

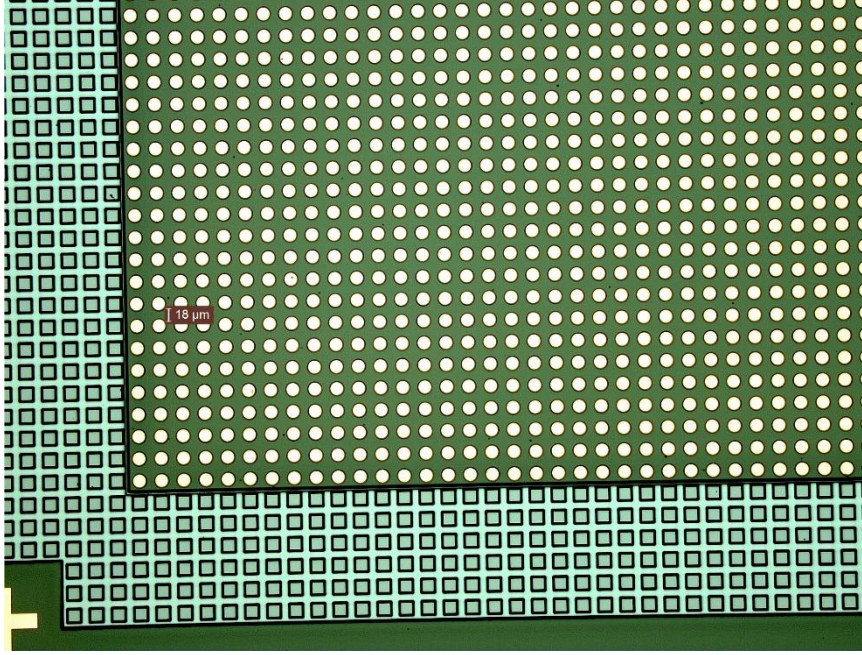
Daha sonra, ICP- RIE cihazında BCl_3 , Cl_2 ve Ar gaz karışımları kullanılarak işlenen bölgeler, kuru aşındırma yöntemiyle $4,0\ \mu\text{m}$ derinliğinde aşındırılarak, aygıt adacıkları oluşturuldu. Numune işlem bittikten sonra aseton, propanol ve DI su ile temizlendi. Resim 6.4’de aygıt adacığı aşındırması sonrası optik mikroskop görüntüsü verildi.



Resim 6.4. Aygıt adacığı adımı tamamlanmış InGaAs/InP IP FPA

Adım 4 : n^+ Kontak Yapılması

Fabrikasyonun bu aşamasında, InGaAs/InP IP FPA'nın n^+ kontak metalizasyonu tamamlandı. Öncelikle numune aseton, propanol ve de-iyonize (DI) su ile temizlenip, azot ile kurutuldu. Daha sonra numunenin ön yüzeyine fotolitografi işlemi uygulanarak, n^+ kontak bölgeler numune üzerine işlendi. Fotolitografi işleminde Microchemicals firmasının TI35ES fotodirenç polimeri kullanıldı. Fotodirenç polimeri, bir çevirici (spinner) yardımı ile yüzeye homojen olarak kaplandı. Suss MA6 marka maske hizalama cihazı kullanılarak, fotomaskenin n^+ kontak adımı Resim 6.5'de görüldüğü gibi numune üzerine işlendi.

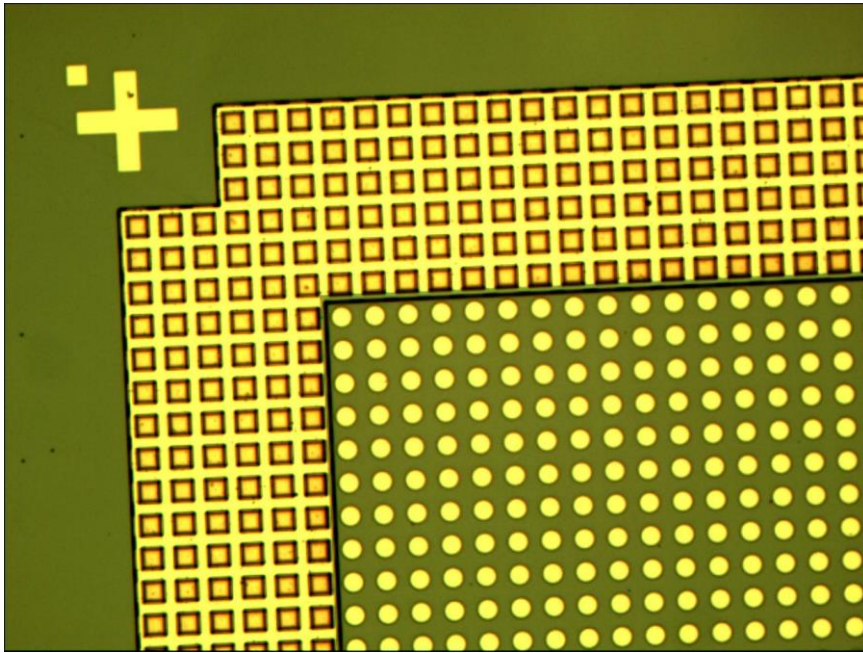


Resim 6.5. n^+ kontak litografisi yapılmış InGaAs/InP IP FPA

Fotolitografi işleminden sonra kontak bölgelerinin temizliği için numune, plazma temizleme cihazında 50 W RF gücünde 1 dakika süre ile O_2 plazma ortamında bekletildi. Daha sonra elektron demeti ile metal buharlaştırma yöntemiyle numune yüzeyine *Titanyum*, *Platin* ve son olarak da *Altın* metali kaplandı.

Titanyum 3 Å/s kaplama hızı ile 30 nm kalınlıkta, Platin 3 Å/s kaplama hızı ile 40 nm kalınlıkta ve Altın 5 Å/s kaplama hızı ile 150 nm kalınlıkta kaplandı.

Resim 6.6'da n^+ kontak metalizasyonu sonrası numunenin optik mikroskop görüntüsü verildi.

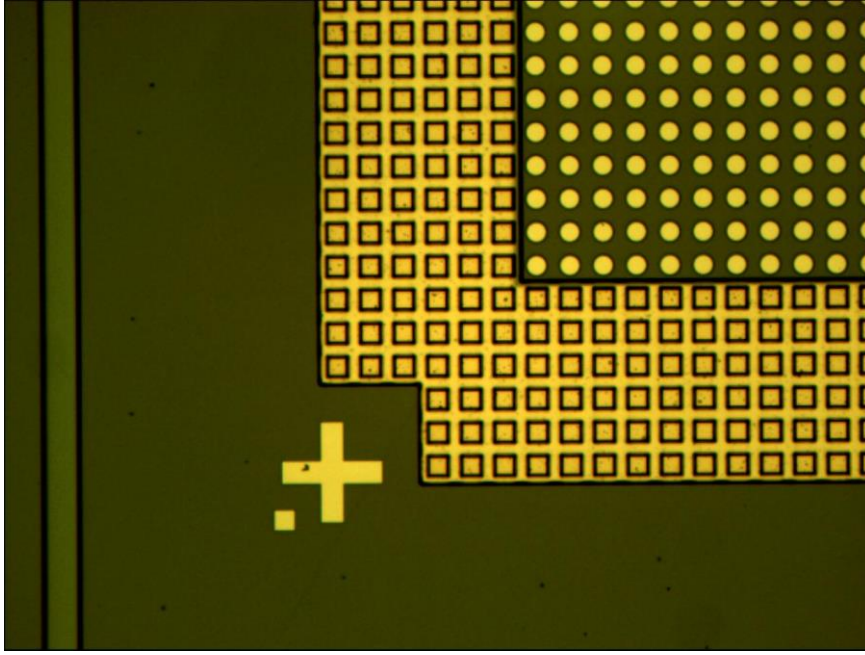


Resim 6.6. n^+ kontak metali yapılmış InGaAs/InP IP FPA

Metalizasyon işleminden sonra numune, tavlama işlemine hazır hale gelebilmesi için, aseton, propanol alkol ve de-iyonize (DI) su ile temizlenerek, azot gazı ile kurutuldu.

Adım 5 : InGaAs/InP IP FPA Tavlama

Fabrikasyonun bu aşamasında, kaplanan metallerin ohmik özellik kazanmalarını sağlamak için numune, hızlı termal tavlama (RTA) cihazında *forming gaz* (%5 H_2 + %95 N_2) atmosferinde 350 °C' de 30 s tavlandı. Resim 6.7'de n^+ kontak metalizasyonu sonrası numunenin optik mikroskop görüntüsü verildi.



Resim 6.7. Tavlama işlemi yapılmış InGaAs/InP IP FPA

6.5. 64 x 64 Formatlı InGaAs/InP p-i-n Kızılötesi Fotodedektör Dizininin (FPA) Karakterizasyonu

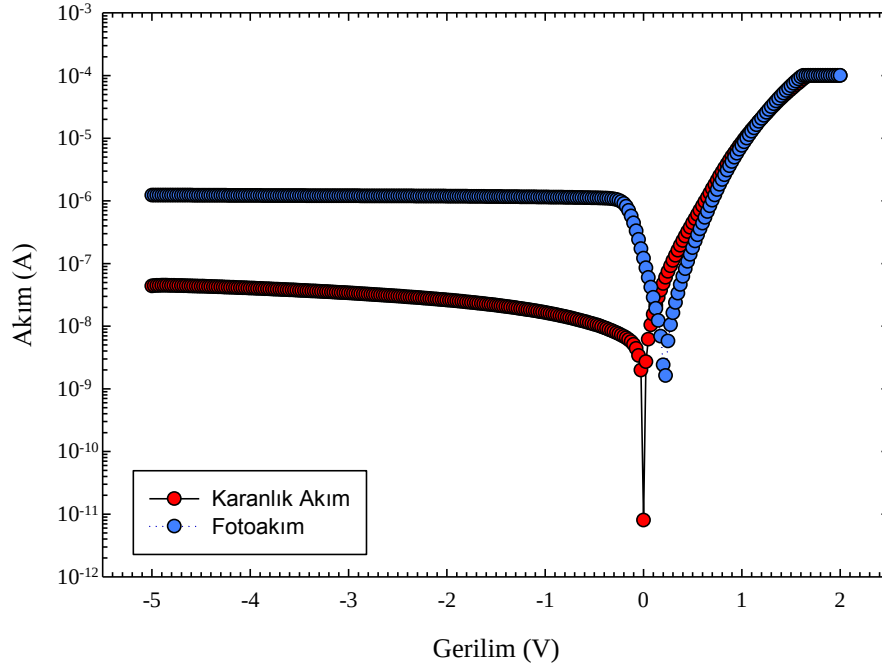
Üretilen 64 x 64 formatlı InGaAs/InP p-i-n kızılötesi fotodedektör dizininin (64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA) elektriksel ve optik karakterizasyonu, 3. Bölümde detaylıca anlatılan, BİLKENT-NANOTAM bünyesindeki DPT-HAMİT laboratuvarı temiz odalarında, gerekli deneysel düzenekler kurularak gerçekleştirildi.

6.5.1. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA Akım-Voltaj karakteristiği ölçümü

Akım-Gerilim (I-V) ölçümleri ile 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın karanlık akımı ve aşağı kırılma voltajı belirlendi. Bu ölçümde, sonda istasyonu (probe station), ayarlanabilir lazer kaynak (tunable laser source), parametre analizörü (parameter analyser) kullanıldı.

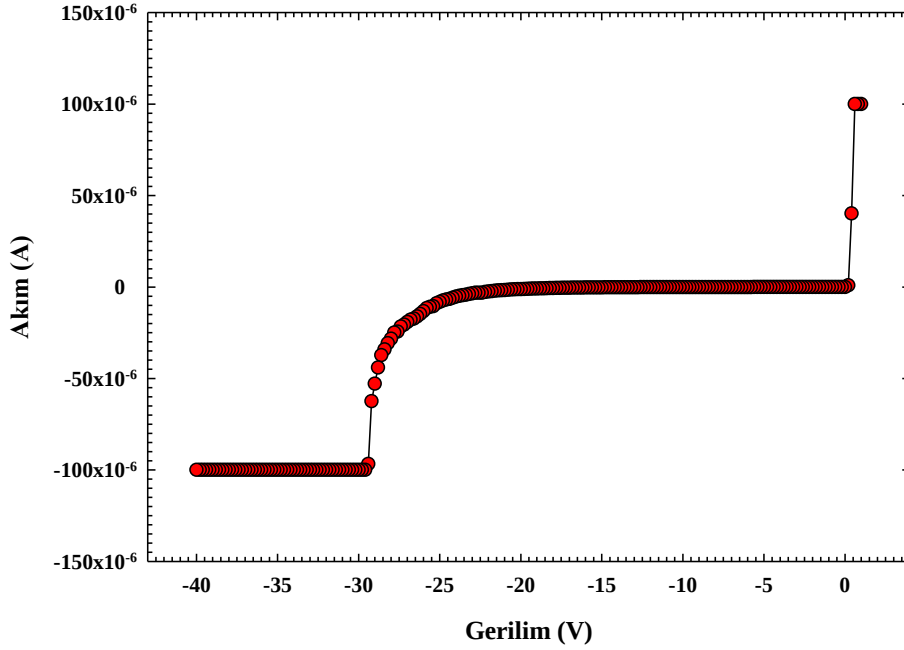
Ölçümler sırasında ayarlanabilir lazer kaynaktan çıkan 1540 nm dalgaboyundaki ışık, fiber kablo yardımıyla, sonda istasyonu üzerinde bulunan fotodedektör üzerine düşürüldü.

Üretimi yapılan 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA’de pikseller için elde edilen tipik karanlık ve 1540 nm aydınlanma değerinde I-V karakteristiği, Şekil 6.9’da görülmektedir. Piksellerin ortalama karanlık akımları 30 nA olarak ölçüldü.



Şekil 6.9. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik karanlık ve 1540 nm aydınlanma değerinde I-V karakteristiği.

Pikseller için elde edilen tipik aşağı kırılma gerilimi, Şekil 6.10’da görüldüğü gibi, -29,3 olarak belirlendi.



Şekil 6.10. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik kırılma gerilimi grafiği.

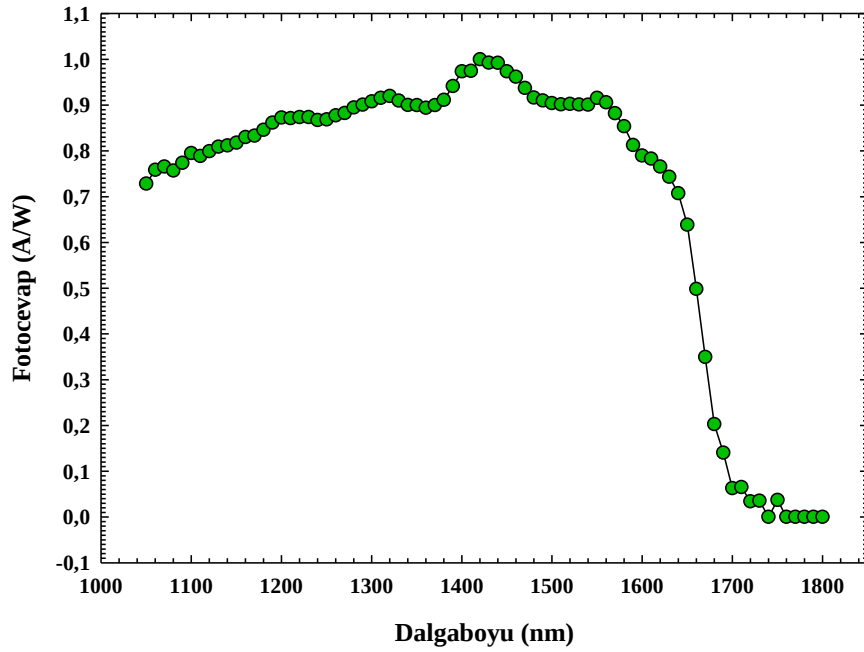
6.5.2. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA spektral fotoakım ölçümü

64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'in; çalışma dalgaboyu, spektral kuantum verimi ve kızılötesi/uzak kızılötesi kontrastı spektral fotoakım ölçümü ile belirlendi. Bu ölçümde, ışık kaynağı, tekrenklendirici, optik güç dedektörü ve parametre analizörü (HP 4145 Parameter Analyzer) kullanıldı.

Tekrenklendirici içerisinde bulunan kırınım ağı istenilen dalgaboyu dışında, bu dalgaboyunun harmonikleri olan dalga boylarına sahip ışıklar da üretir. Bu harmonikleri süzmek ve istenilen dalgaboyu aralığında ışık üretmek için silikon filtre kullanıldı. Kızılötesi ışık kaynağının spektral aydınlatma gücü, 1050 nm ile 1800 nm aralığında optik güç ölçer ile ölçüldü.

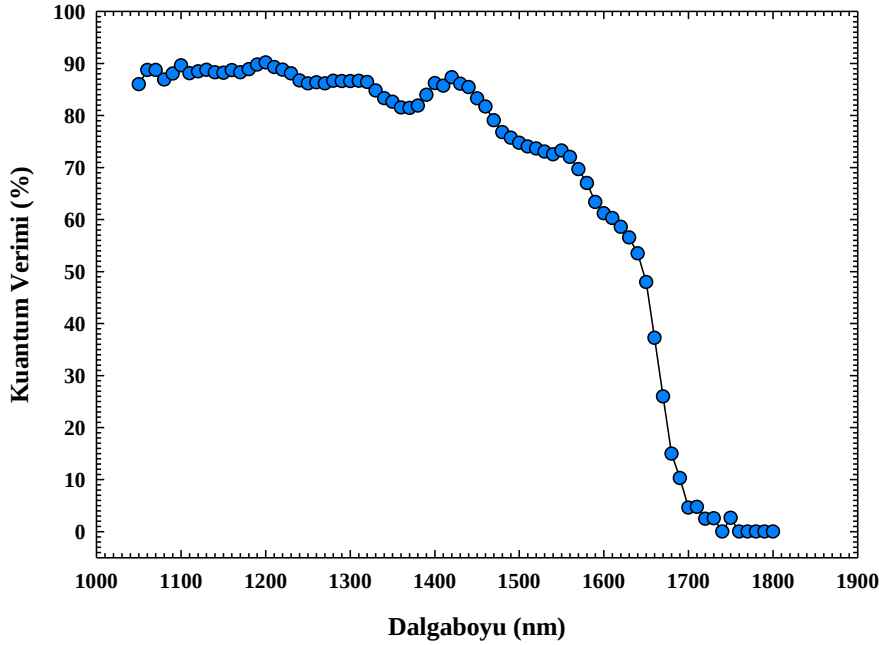
Tekrenklendirici kaynaktan çıkan ışık sonda istasyonu üzerinde bulunan fotodedektörler üzerine fiber kablolar ile düşürüldü. Dedektörlerin karanlık akımları ve 1050 nm - 1800 nm dalgaboylu aydınlatmalardaki fotoakımları ölçüldü.

1050nm - 1800nm dalgaboyları aralığında 500 mV polarlama geriliminde ışık düşürüldü ve fotodedektöre ait akım dğerleri ölçüldü. Ölçülen bu akımlardan da karanlık akımlar çıkarılarak, fotoakımlar hesaplandı. Bu değerlerin kaynağın spektral optik gücüne bölünmesi ile de fotocevaplar hesaplandı. Şekil 6.11’de fotocevapların dalgaboyuna göre değişimi görülmektedir.



Şekil 6.11. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik fotocevap-dalgaboyu grafiği

Fotocevap - dalgaboyu grafiğinden elde edilen veriler ve Eş.2.7 kullanılarak, spektral kuantum verimleri hesaplandı. Bu değişim kuantum verimi - dalgaboyu grafiği olarak, Şekil 6.12’de verildi.

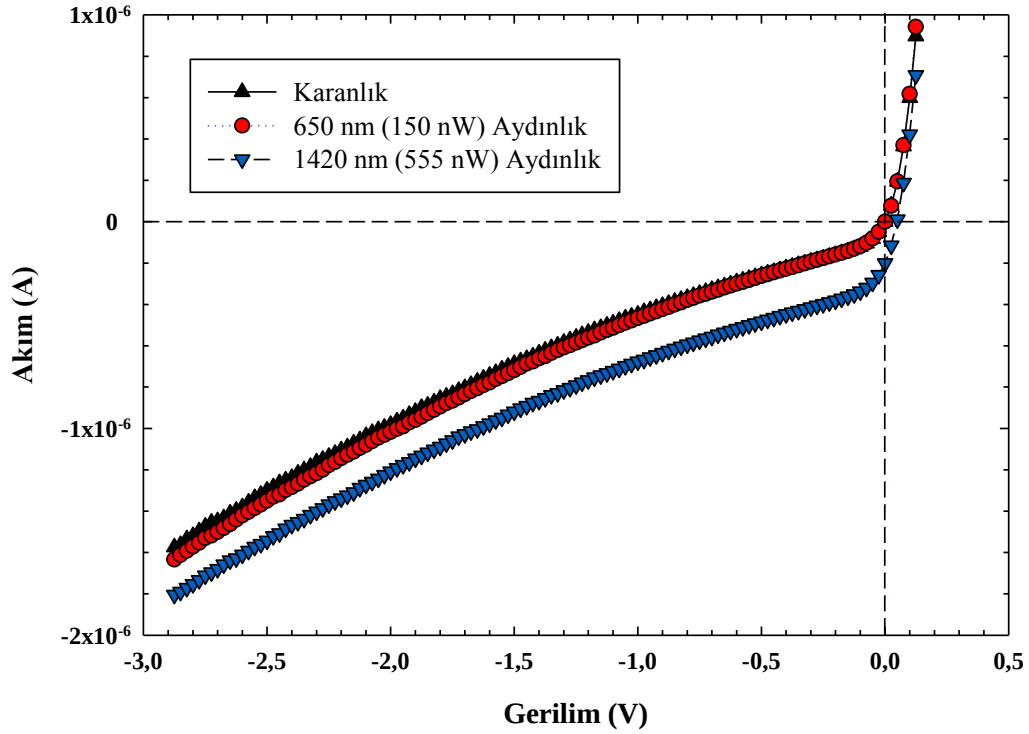


Şekil 6.12. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için kuantum verimi-dalgaboyu grafiği

FPA üzerindeki test dedektörleri kızılötesi / görünür kontrastının belirlemesi amacı ile 650 nm ve 1420 nm dalgaboyunda aydınlatılırken, fotoakımlar ölçüldü. Şekil 6.13'te her iki aydınlatma altında elde edilen fotoakımın voltaja göre değişimi verildi.

500 mV ters polarlama gerilimi altında elde edilen fotoakımlar optik güce bölünerek fotocevaplar hesaplandı. Bu iki fotocevabın oranı ile kızılötesi / görünür kontrast; $0,495$ olarak belirlendi. Bu ölçümlerde FPA üstten aydınlatıldığı dikkate alınmalıdır. Normal operasyonda odak düzlem matrisi (FPA) arkadan aydınlatılacağı ve alttaş olarak InP malzemesi kullanıldığı için bu oranın 1-2 merteye yüksek olacağı öngörülmektedir.

Kızılötesi / uzak kızılötesi kontrast ise; maksimum fotocevabın, minimum fotocevaba oranı olarak verilebilir. Şekil 6.12'de bulunan, fotodedektörün Fotocevap - Dalgaboyu grafiği incelendiğinde; maksimum fotocevabın $1,0000\text{ A/W}$, minimum fotocevabın ise 0.0082 A/W olduğu görüldü. Bu veriler ışığında, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün kızılötesi / uzak kızılötesi kontrastı, $121,9$ olarak hesaplandı.



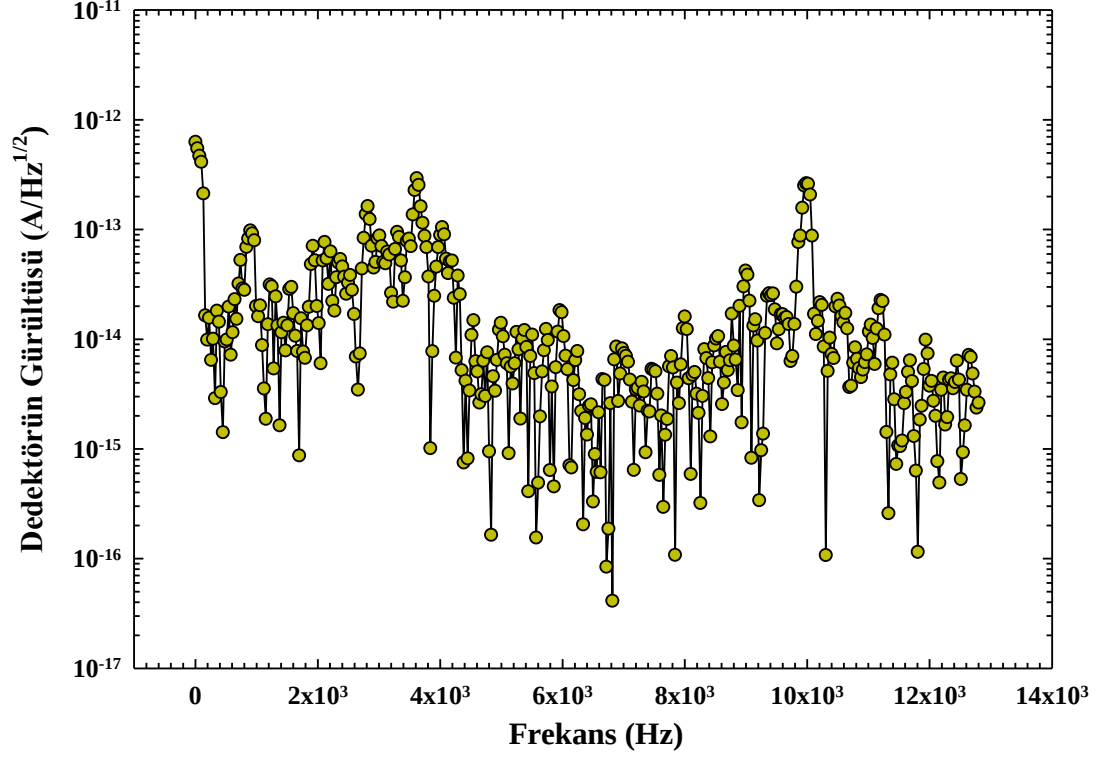
Şekil 6.13. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için fotoakım-gerilim grafiği

6.5.3. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümü

64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümlerinde; sonda istasyonu (probe station), güç kaynağı (power supply), akım yükselteci (current amplifier), sinyal analizörü (signal analyser) kullanıldı.

64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA ölçümünden önce sinyal analizörü ile $0 - 12,5$ kHz frekans aralığında sistem gürültüsü ölçüldü. Daha sonra fotodedektörün aynı frekanslarda gürültü ölçümü yapıldı.

Şekil 6.14'de piksellerin yaklaşık 13 kHz'e kadar ölçülen tipik gürültü karakteristiği görülmektedir.



Şekil 6.14. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik gürültü karakteristiği

Şekil 6.14’de de görüleceği üzere, bir pikselin gürültüsü $0,1 \text{ pA/Hz}^{1/2}$ ’den daha düşüktür. Yani bir başka deyişle; pikselin gürültüsü, sisteminin gürültüsü ile sınırlıdır.

Daha önce, gürültü eşiti güç (NEP) formülü, spektral gürültü gücü cinsinden, Eş. 2.8’de verildi.

$$NEP = \frac{\text{gürültü}}{\text{fotocevap}} = \frac{S_n}{R} \quad (2.8)$$

1KHz frekansta gürültü (S_n), $1,81 \times 10^{-14} \text{ A/Hz}^{1/2}$ olarak ölçüldü. Bu değer maksimum fotocevap, $(R_i)_{max}$, olan $1,00 \text{ A/W}$ değerine bölündüğünde 1KHz frekansta gürültü eşiti güç (NEP);

$$NEP = \frac{\text{gürültü}}{\text{fotocevap}} = \frac{S_n}{R} = \frac{1,81 \times 10^{-14} \text{ A} / \text{Hz}^{1/2}}{1,00 \text{ A} / \text{W}}$$

$$NEP = 1,81 \times 10^{-14} \text{ W} / \text{Hz}^{1/2}$$

olarak bulundu.

Bir fotodedektörün dedektivite (D^*) değeri ise daha önce, Eş. 2.11’de verildi.

$$D^* = D \sqrt{A_d} = \frac{\sqrt{A_d}}{NEP} \quad (2.11)$$

Bu formülde kullanılan dedektörün alanı (A_d) ve gürütü eşiti güç (NEP) değerleri yerlerine konularak, dedektivite (D^*) değeri;

$$A_d = \pi r^2 = 3,14 \times (18 \mu m)^2 = 3,14 \times (18 \times 10^{-4} \text{ cm})^2 = 10,173 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$$

$$D^* = D \sqrt{A_d} = \frac{\sqrt{A_d}}{NEP} = \frac{\sqrt{10,173 \times 10^{-6} \text{ cm}^2}}{1,81 \times 10^{-14} \text{ W} / \text{Hz}^{1/2}}$$

$$D^* = 1,762 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$$

olarak elde edildi.

6.5.4. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA dizin verim ölçümü

Dizindeki bütün elemanları test etmek çok zaman alacağından, dizin başarı oranını hesaplamak için; 3. Bölüm, 3.4.4’de açıklanan istatistiksel örnekleme metodu kullanıldı. Bu şekilde, dizindeki elemanlardan bazılarını rastgele örnekleyip, örnek başarı ortalamasından ve standart sapmasından, dizindeki çalışan eleman oranının hedeflenen orana eşit veya daha büyük olma olasılığı hesaplandı.

Dizin verim ölçümlerinde I-V ölçüm düzeneği kullanıldı. Dizinde bulunan pikseller için $-500mV$ gerilimde, fotocevap akım ortalaması ($\bar{I}$) ve fotocevap akımları için standart sapma (σ) değerleri hesaplandı. Fotocevap akım değeri $\bar{I} \pm \sigma$ aralığının içinde bulunan pikseller çalışan, bu aralığın dışında bulunan pikseller ise ölü piksel olarak kabul edildi. Çizelge 6.3 oluşturularak, çalışan pikseller “1” ile, çalışmayan pikseller ise “0” ile gösterildi.

Çizelge 6.3. -500 mV polarlama geriliminde 64 x 64 formatlı kızılötesi fotodedektör piksellerinin fotocevap akım ölçümleri

Piksel No	Fotocevap Akımı (μA)	Çalışırlık	Piksel No	Fotocevap Akımı (μA)	Çalışırlık	Piksel No	Fotocevap Akımı (μA)	Çalışırlık
1	-1,17	1	12	-1,03	1	23	-0,18	0
2	-0,50	0	13	-0,36	0	24	-1,18	1
3	-1,09	1	14	-1,01	1	25	-1,19	1
4	-1,70	1	15	-1,17	1	26	-1,23	1
5	-1,21	1	16	-1,21	1	27	-1,18	1
6	-1,21	1	17	-1,16	1	28	-1,21	1
7	-1,22	1	18	-1,21	1	29	-1,12	1
8	-0,88	1	19	-1,19	1	30	-1,21	1
9	-1,12	1	20	-1,20	1	31	-1,14	1
10	-1,05	1	21	-1,22	1	32	-1,21	1
11	-1,09	1	22	-1,18	1	33	-1,03	1

Yukarıda anlatılan hesaplamalar sonucunda ortalama fotocevap akımı $1.06\mu A$ ve standart sapma akımı $0.31\mu A$ olarak bulundu. Çizelge 6.3'den de anlaşılacağı üzere, ölçülen 33 piksel için çalışırlık kriterini sağlamayan sadece "3" piksel bulunmaktadır. Bu veriler, 3. Bölüm, 3.4.4'de anlatılan istatistiksel metod ile incelendiğinde, dizinde bulunan piksellerin %80'inin çalışma olasılığının %98,5 olduğu görülmektedir.

6.5.5. 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA Parametreleri

Üretilen 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın elektriksel ve optik karakterizasyonları, gerekli deneysel düzenekler kurularak yapıldı.

- ✚ Akım-Voltaj karakteristiği ölçümü sonucunda, 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın, karanlık akımı 30 nA , tipik aşağı kırılma voltajı ise $-29,3\text{ V}$ olarak ölçüldü.
- ✚ Spektral fotoakım ölçümü sonucunda, 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın, çalışma dalga boyu 1420 nm , spektral kuantum verimi değişimi Şekil 6.12'de verilen grafikte görüldüğü gibi, kızılötesi / görünür kontrastı $0,495$ ve kızılötesi / uzak kızılötesi kontrastı ise $121,9$ olarak belirlendi.
- ✚ Düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümü sonucunda, 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın, 1 KHz 'de spektral gürültüsü (S_n) $1,81 \times 10^{-14}\text{ A/Hz}^{1/2}$, gürültü eşiti gücü (NEP), $1,81 \times 10^{-14}\text{ W/Hz}^{1/2}$ ve dedektivitesi (D^*) $1,762 \times 10^{11}\text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ olarak belirlendi.
- ✚ Dizin verim ölçümü sonucunda, 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için rastgele piksel örnekleme sonucunda, dizindeki piksellerin (toplam 4096 piksel) %80'inin çalışma olasılığı %98,5 olarak hesaplandı.

6.6. 128 x 128 Formatlı InGaAs/InP p-i-n Kızılötesi Fotodedektör Dizininin (FPA) Karakterizasyonu

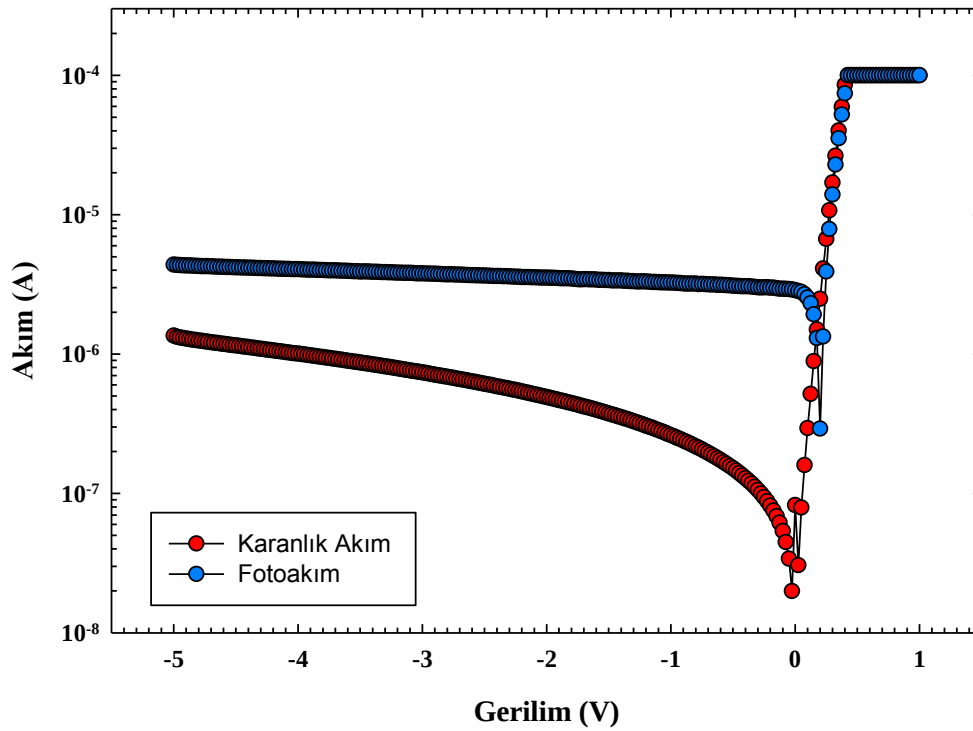
Üretilen 128 x 128 formatlı InGaAs/InP p-i-n kızılötesi fotodedektör dizininin (128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA) elektriksel ve optik karakterizasyonu, 3. Bölümde detaylıca anlatılan, BİLKENT-NANOTAM bünyesindeki DPT-HAMİT laboratuvarı temiz odalarında, gerekli deneysel düzenekler kurularak gerçekleştirildi.

6.6.1. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA Akım-Voltaj karakteristiği ölçümü

Akım-Gerilim (I-V) ölçümleri ile 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın karanlık akımı ve aşağı kırılma voltajı belirlendi. Bu ölçümde, sonda istasyonu (probe station), ayarlanabilir lazer kaynak (tunable laser source), parametre analizörü (parameter analyser) kullanıldı.

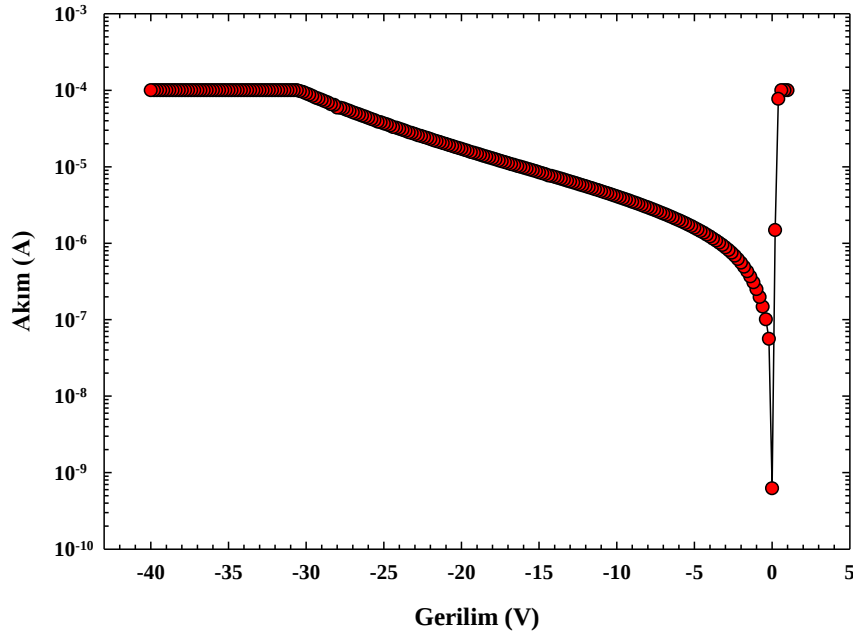
Ölçümler sırasında ayarlanabilir lazer kaynaktan çıkan 1540 nm dalgaboyundaki ışık, fiber kablo yardımıyla, sonda istasyonu üzerinde bulunan fotodedektör üzerine düşürüldü.

Farklı gerilimler altında fotodedektörün oluşturduğu akım cihaz tarafından kaydedildi. Üretimi yapılan 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'de pikseller için elde edilen tipik karanlık ve 1540 nm aydınlanma değerinde I-V karakteristiği, Şekil 6.15'de görülmektedir. Piksellerin ortalama karanlık akımları 140 nA olarak ölçüldü.



Şekil 6.15. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik karanlık ve 1540 nm aydınlanma değerinde I-V karakteristiği.

Pikseller için elde edilen tipik aşağı kırılma gerilimi, Şekil 6.16’da görüldüğü gibi, $-30,3$ olarak ölçüldü.



Şekil 6.16. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik kırılma gerilimi grafiği

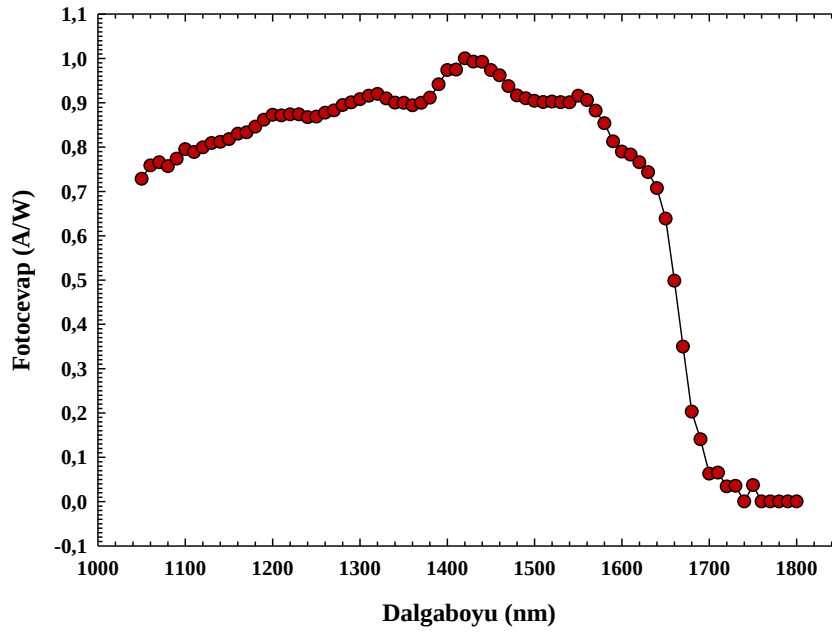
6.6.2. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA spektral fotoakım ölçümü

128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'in; çalışma dalgaboyu, spektral kuantum verimi ve kızılötesi/uzak kızılötesi kontrastı spektral fotoakım ölçümü ile belirlendi. Bu ölçümde, ışık kaynağı, tekrenklendirici, optik güç dedektörü ve parametre analizörü (HP 4145 Parameter Analyzer) kullanıldı.

Tekrenklendirici içerisinde bulunan kırınım ağı istenilen dalgaboyu dışında, bu dalgaboyunun harmonikleri olan dalgaboylarına sahip ışıklarda üretilir. Bu harmonikleri süzmek ve istenilen dalgaboyu aralığında ışık üretmek için silikon filtre kullanıldı. Kızılötesi ışık kaynağının spektral aydınlatma gücü, 1050 nm ile 1800 nm aralığında optik güç ölçer ile ölçüldü.

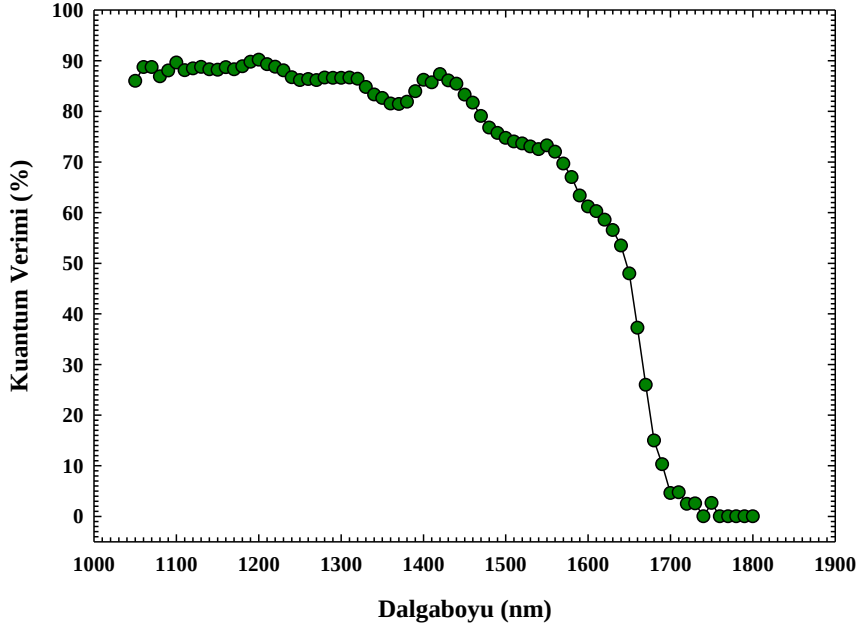
Tekrenklendirici kaynaktan çıkan ışık sonda istasyonu üzerinde bulunan test dedektörleri üzerine fiber kablolar ile düşürüldü. Dedektörlerin karanlık akımları ve $1050\text{ nm} - 1800\text{ nm}$ dalgaboylu aydınlatmalardaki fotoakımları ölçüldü.

$1050\text{nm} - 1800\text{nm}$ dalgaboyları aralığında 500 mV polarlama geriliminde ışık düşürülerek, ölçülen akımlardan karanlık akımların çıkarılması ile fotoakımlar hesaplandı. Fotoakımların kaynağın spektral optik gücüne bölünmesi ile de fotocevaplar hesaplandı. Şekil 6.17’de de fotocevapların dalgaboyuna göre değişimi verildi.



Şekil 6.17. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik fotocevap-dalgaboyu grafiği

Fotocevap-dalgaboyu grafiğindeki veriler ve Eş.2.7 kullanılarak, spektral kuantum verimleri hesaplandı. Bu değişim kuantum verimi-dalgaboyu grafiği olarak, Şekil 6.18’de verildi.



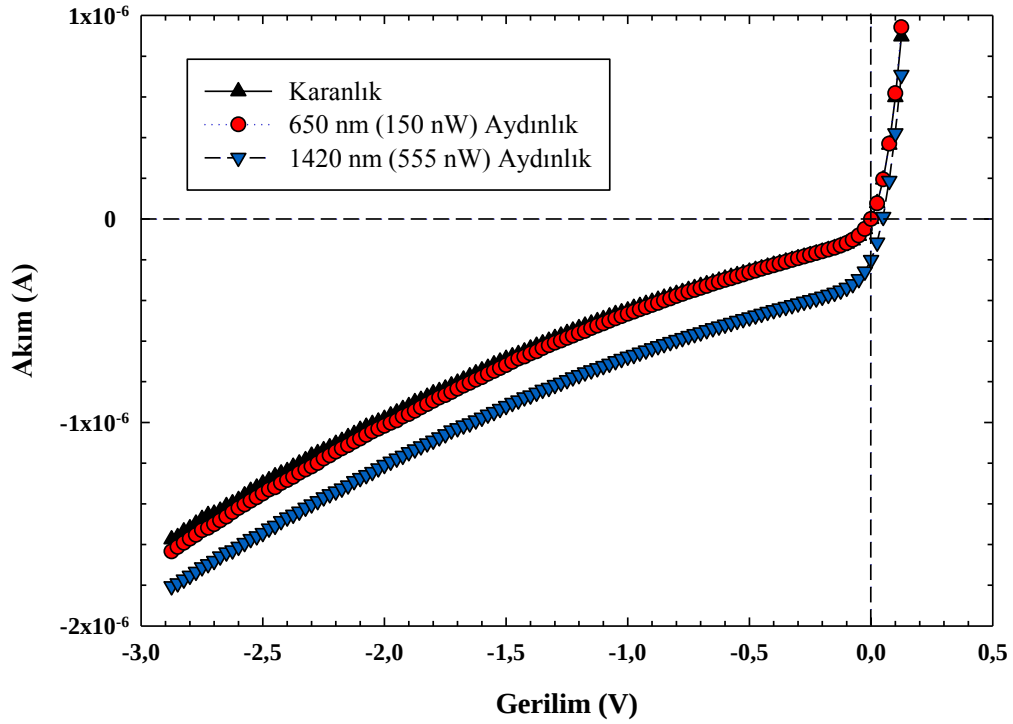
Şekil 6.18. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için kuantum verimi-dalgaboyu grafiği

FPA üzerindeki test dedektörlerinde kızılötesi / görünür kontrastını belirlemek amacı ile dedektör 650 nm ve 1420 nm dalgaboyunda aydınlatılırken fotoakımlar ölçüldü. Şekil 6.19'da her iki aydınlatma altında elde edilen fotoakımın voltaja göre değişimi verildi. Bu fotoakımlar optik güce bölünerek fotocevaplar hesaplandı. Bu iki fotocevabın oranı ile kızılötesi / görünür kontrastı belirlendi.

500 mV ters polarlama gerilimi altında elde edilen fotoakımlar optik güce bölünerek fotocevaplar hesaplandı. Bu iki fotocevabın oranı ile kızılötesi / görünür kontrast; $0,495$ olarak belirlendi. Bu ölçümlerde FPA'nın üstten aydınlatıldığı dikkate alınmalıdır. Normal operasyonda odak düzlem matrisi (FPA) arkadan aydınlatılacağı ve alttaş olarak InP malzemesi kullanıldığı için bu oranın 1-2 merteye yüksek olacağı öngörülmektedir.

Kızılötesi / uzak kızılötesi kontrast ise; maksimum fotocevabın, minimum fotocevaba oranı olarak verilebilir. Şekil 6.12'de bulunan, fotodedektörün Fotocevap - Dalgaboyu grafiği incelendiğinde; maksimum fotocevabın $1,0000\text{ A/W}$, minimum fotocevabın ise

0.0083 A/W olduğu görüldü. Bu veriler ışığında, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün kızılötesi/uzak kızılötesi kontrastı, 120,5 olarak hesaplandı.



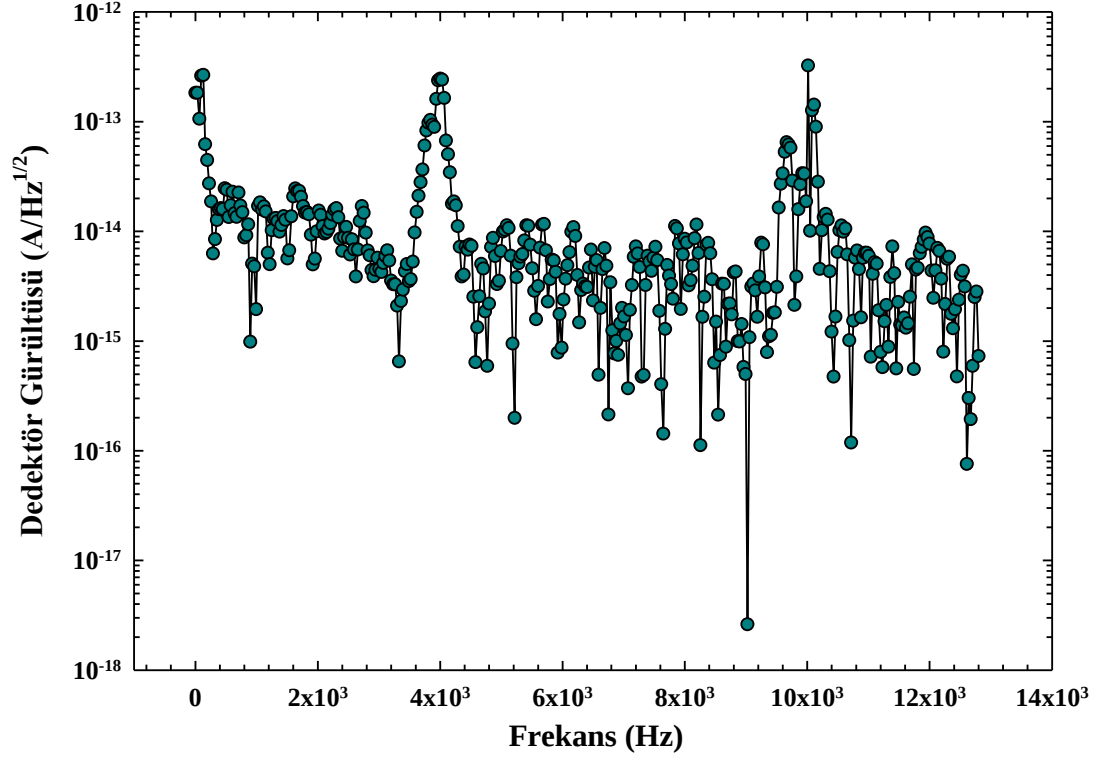
Şekil 6.19. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için fotoakım-gerilim grafiği

6.6.3. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümü

128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümlerinde; sonda istasyonu (probe station), güç kaynağı (power supply), akım yükselteci (current amplifier), sinyal analizörü (signal analyser) kullanıldı.

128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA ölçümünden önce sinyal analizörü ile 0 – 12,5 kHz frekans aralığında sistem gürültüsü ölçüldü. Daha sonra fotodedektörün aynı frekanslarda gürültü ölçümü yapıldı.

Şekil 6.20'de piksellerin ölçülen tipik düşük frekanslarda gürültü karakteristiği görülmektedir.



Şekil 6.20. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik gürültü karakteristiği

Şekil 6.20’de de görüleceği üzere, bir pikselin gürültüsü $0,18 \text{ pA} / \text{Hz}^{1/2}$ ’den daha düşüktür.

Daha önce, gürültü eşiti güç (NEP) formülü, spektral gürültü gücü cinsinden, Eş. 2.8’de verildi.

$$NEP = \frac{\text{gürültü}}{\text{fotocevap}} = \frac{S_n}{R} \quad (2.8)$$

1KHz frekansta gürültü (S_n), $9,488 \times 10^{-15} \text{ A} / \text{Hz}^{1/2}$ olarak ölçüldü. Bu değer maksimum fotocevap, $(R_i)_{max}$, olan $1,00 \text{ A/W}$ değerine bölündüğünde 1KHz frekansta gürültü eşiti güç (NEP);

$$NEP = \frac{\text{gürültü}}{\text{fotocevap}} = \frac{S_n}{R} = \frac{9,488 \times 10^{-15} \text{ A} / \text{Hz}^{1/2}}{1,00 \text{ A} / \text{W}}$$

$$NEP = 9,488 \times 10^{-15} \text{ W} / \text{Hz}^{1/2}$$

olarak bulundu.

Bir fotodedetörün dedektivite (D^*) değeri ise daha önce, Eş. 2.11’de verildi.

$$D^* = D \sqrt{A_d} = \frac{\sqrt{A_d}}{NEP} \quad (2.11)$$

Bu formülde kullanılan A_d dedektörün alanı ve NEP ise gürütü eşiti güç değeri yerlerine konulup; dedektivite (D^*) değeri;

$$A_d = \pi r^2 = 3,14 \times (18 \mu m)^2 = 3,14 \times (18 \times 10^{-4} \text{ cm})^2 = 10,173 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$$

$$D^* = D \sqrt{A_d} = \frac{\sqrt{A_d}}{NEP} = \frac{\sqrt{10,173 \times 10^{-6} \text{ cm}^2}}{9,488 \times 10^{-15} \text{ W} / \text{Hz}^{1/2}}$$

$$D^* = 3,361 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$$

olarak elde edildi.

6.6.4. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA dizin verim ölçümü

Dizindeki bütün elemanları test etmek çok zaman alacağından, dizin başarı oranını hesaplamak için; 3. Bölüm, 3.4.4’de açıklanan istatistiksel örnekleme metodu kullanıldı. Bu şekilde, dizindeki elemanlardan bazılarını rastgele örnekleyip, örnek başarı ortalamasından ve standart sapmasından, dizindeki çalışan eleman oranının hedeflenen orana eşit veya daha büyük olma olasılığı hesaplandı.

Dizin verim ölçümlerinde I-V ölçüm düzeneği kullanıldı. Dizinde bulunan pikseller için -500mV gerilimde fotocevap akım ortalaması ($\bar{I}$) ve fotocevap akımlar için standart sapma (σ) hesaplandı. Fotocevap akım değeri $\bar{I} \pm \sigma$ aralığında kalan pikseller çalışan, bu aralığın dışında kalan pikseller ise ölü piksel olarak kabul edildi. Çizelge 6.4 oluşturularak, çalışan pikseller “1” ile, çalışmayan pikseller ise “0” ile gösterildi.

Çizelge 6.4. -500 mV polarlama geriliminde 128×128 formatlı kızılötesi fotodedektör piksellerinin fotocevap akım ölçümleri

Piksel No	Fotocevap Akımı (μA)	Çalışırlık	Piksel No	Fotocevap Akımı (μA)	Çalışırlık	Piksel No	Fotocevap Akımı (μA)	Çalışırlık
1	-5.363	1	12	-3.064	1	23	-2.817	1
2	-2.98	1	13	-2.785	1	24	-5.613	1
3	-4.755	1	14	-5.16	1	25	-5.383	1
4	-3.259	1	15	-6.738	0	26	-4.224	1
5	-5.1	1	16	-9.159	0	27	-4.168	1
6	-2.807	1	17	-3.922	1	28	-4.01	1
7	-3.962	1	18	-5.646	1	29	-3.831	1
8	-3.956	1	19	-3.819	1	30	-3.737	1
9	-5.96	1	20	-11.26	0	31	-5.46	1
10	-3.561	1	21	-4.011	1	32	-3.101	1
11	-3.162	1	22	-1.4	0	33	-3.018	1

Yukarıda anlatılan hesaplamalar sonucunda ortalama fotocevap akımı $4.46 \mu A$ ve standart sapma akımı $1.89 \mu A$ olarak bulundu. Ölçülen 33 piksel için çalışırılık kriterini sağlamayan sadece “4” piksel bulunduğu Çizelge 6.4’den de anlaşılmaktadır. Bu ölçüm sonuçları 3. Bölüm, 3.4.4’de anlatılan istatistiksel metod ile incelendiğinde, dizinde bulunan piksellerin %80’inin çalışma olasılığının %91,7 olduğu görülmektedir.

6.6.5. 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA Parametreleri

Üretilen 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA’nın elektriksel ve optik karakterizasyonları, gerekli deneysel düzenekler kurularak yapıldı.

- ✚ Akım-Voltaj karakteristiği ölçümü sonucunda, 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA’nın, karanlık akımı $140 nA$, tipik aşağı kırılma voltajı ise $-30,3 V$ olarak ölçüldü.
- ✚ Spektral fotoakım ölçümü sonucunda, 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA’nın, çalışma dalga boyu $1420 nm$, spektral kuantum verimi değişimi Şekil 6.18’de verilen grafikte görüldüğü gibi, kızılötesi / görünür kontrastı $0,495$ ve kızılötesi / uzak kızılötesi kontrastı ise $120,5$ olarak belirlendi.
- ✚ Düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümü sonucunda, 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA’nın, $1 KHz$ ’de spektral gürültüsü (S_n) $9,488 \times 10^{-15} A / Hz^{1/2}$, gürültü eşiti gücü (NEP), $9,488 \times 10^{-15} W / Hz^{1/2}$ ve dedektivitesi (D^*) $3,361 \times 10^{11} cmHz^{1/2}W^{-1}$ olarak belirlendi.
- ✚ Dizin verim ölçümü sonucunda, 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için rastgele piksel örnekleme sonucunda, dizindeki piksellerin (toplam 16384 piksel) %80’inin çalışma olasılığı %91,7 olarak hesaplandı.

6.7. 320 x 256 Formatlı InGaAs/InP p-i-n Kızılötesi Fotodedektör Dizininin (FPA) Karakterizasyonu

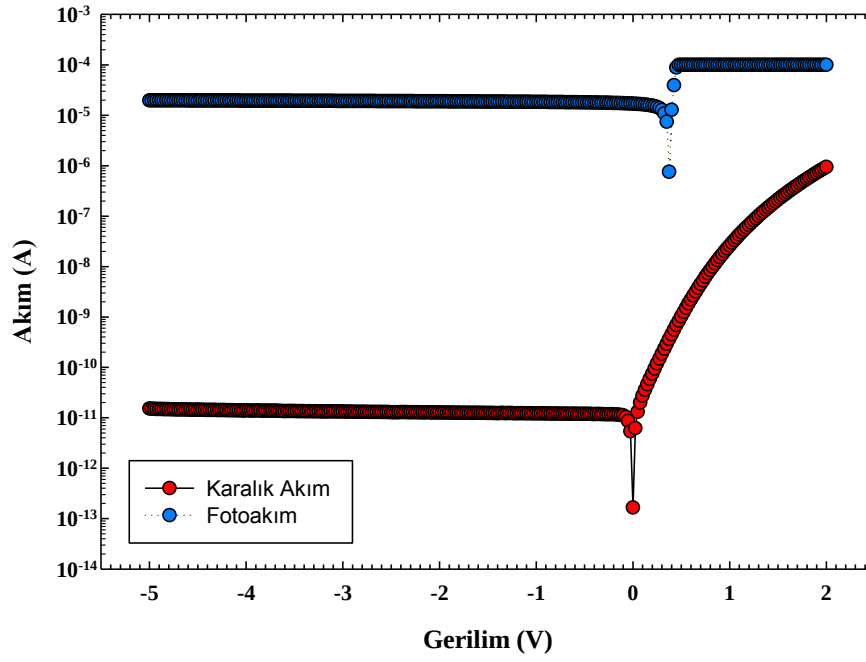
Üretilen 320 x 256 formatlı InGaAs/InP p-i-n kızılötesi fotodedektör dizininin (320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA) elektriksel ve optik karakterizasyonu, 3. Bölümde detaylıca anlatılan, BİLKENT-NANOTAM bünyesindeki DPT-HAMİT laboratuvarı temiz odalarında, gerekli deneysel düzenekler kurularak gerçekleştirildi.

6.7.1. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA Akım-Voltaj karakteristiği ölçümü

Akım-Gerilim (I-V) ölçümleri ile 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın karanlık akımı ve aşağı kırılma voltajı belirlendi. Bu ölçümde, sonda istasyonu (probe station), ayarlanabilir lazer kaynak (tunable laser source), parametre analizörü (parameter analyser) kullanıldı.

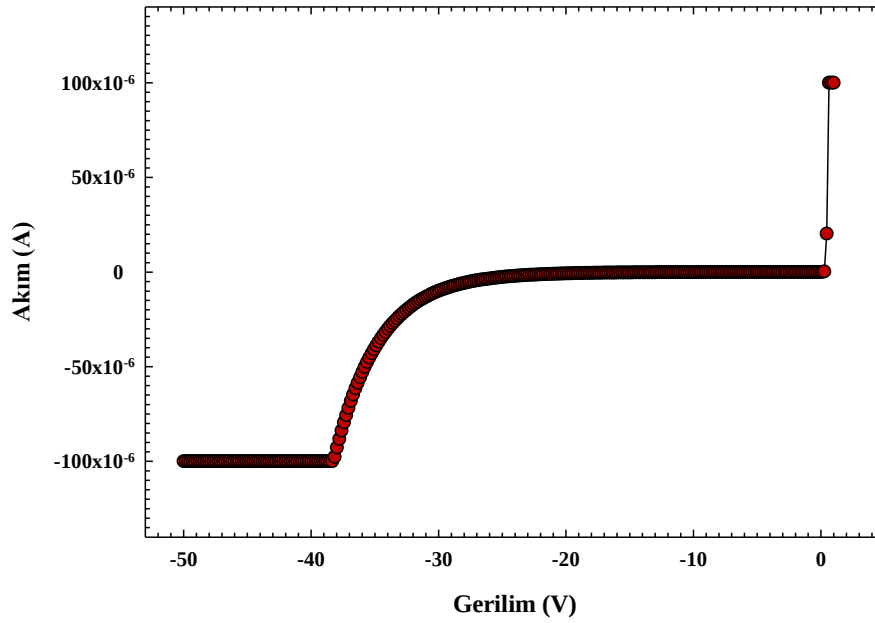
Ölçümler sırasında ayarlanabilir lazer kaynaktan çıkan 1550 nm dalgaboyundaki ışık, fiber kablo yardımıyla, sonda istasyonu üzerinde bulunan fotodedektör üzerine düşürüldü.

Farklı gerilimler altında fotodedektörün oluşturduğu akım cihaz tarafından kaydedildi. Üretimi yapılan 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'de pikseller için elde edilen tipik karanlık ve 1550 nm aydınlanma değerinde I-V karakteristiği, Şekil 6.21'de görülmektedir. Piksellerin ortalama karanlık akımları 16,14 pA olarak ölçüldü.



Şekil 6.21. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik karanlık ve 1540 nm aydınlanma değerinde I-V karakteristiği.

Pikseller için elde edilen tipik aşağı kırılma gerilimi, Şekil 6.22’de görüldüğü gibi, -38 V olarak ölçüldü.



Şekil 6.22. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik kırılma gerilimi grafiği

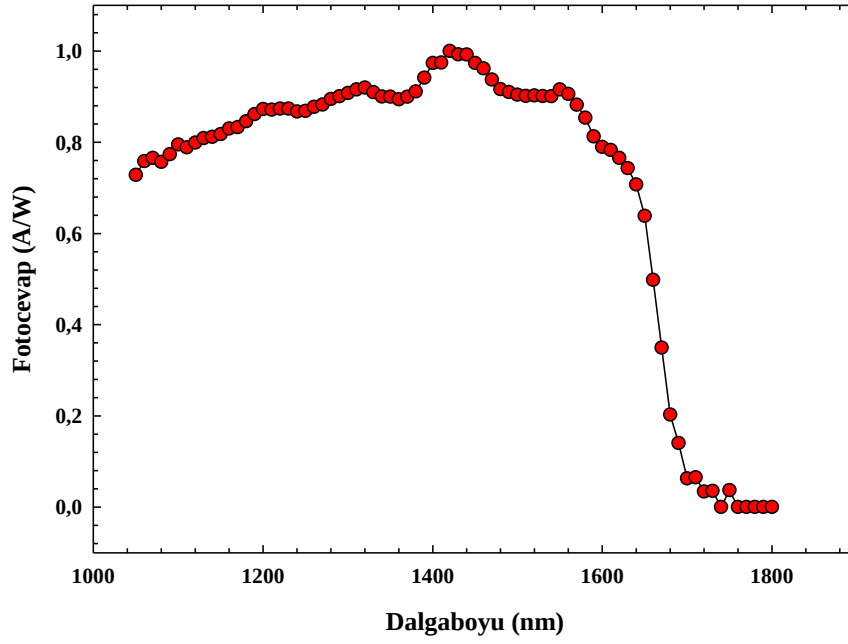
6.7.2. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA spektral fotoakım ölçümü

128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'in; çalışma dalgaboyu, spektral kuantum verimi ve kızılötesi/uzak kızılötesi kontrastı spektral fotoakım ölçümü ile belirlendi. Bu ölçümde, ışık kaynağı, tekrenklendirici, optik güç dedektörü ve parametre analizörü (HP 4145 Parameter Analyzer) kullanıldı.

Tekrenklendirici içerisinde bulunan kırınım ağı istenilen dalgaboyu dışında, bu dalgaboyunun harmonikleri olan dalgaboylarına sahip ışıklar da üretir. Bu harmonikleri süzmek ve istenilen dalgaboyu aralığında ışık üretmek için silikon filtre kullanıldı. Kızılötesi ışık kaynağının spektral aydınlatma gücü, *1050 nm* ile *1800 nm* aralığında optik güç ölçer ile ölçüldü.

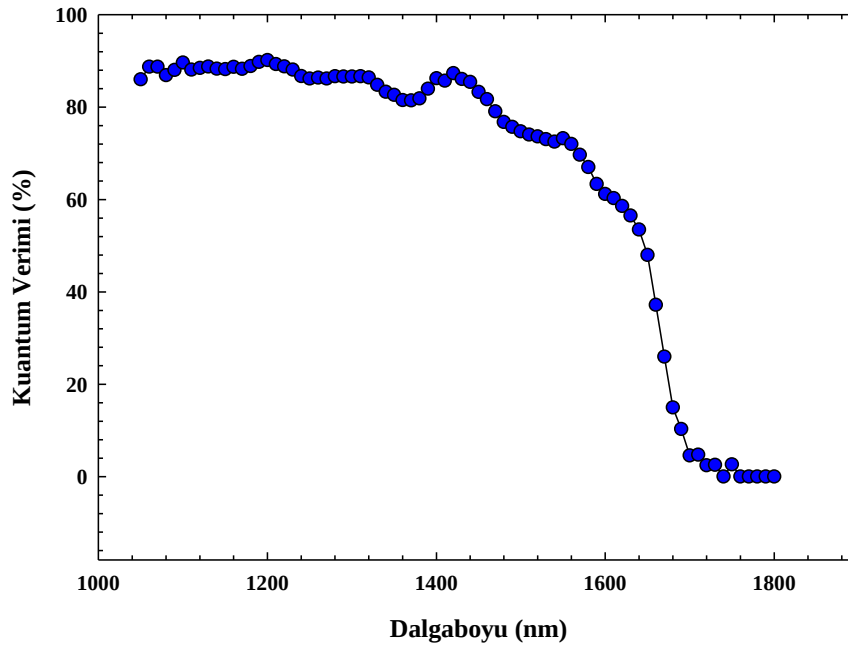
Tekrenklendirici kaynaktan çıkan ışık sonda istasyonu üzerinde bulunan test dedektörleri üzerine fiber kablolar ile düşürüldü. Dedektörlerin karanlık akımları ve *1050 nm - 1800 nm* dalgaboylu aydınlatmalardaki fotoakımları ölçüldü.

1050nm - 1800nm dalgaboyları aralığında *500 mV* polarlama geriliminde ışık düşürülerek ölçülen akımlardan karanlık akımların çıkarılması ile fotoakımlar hesaplandı. Fotoakımların, kaynağın spektral optik gücüne bölünmesi ile de fotocevaplar hesaplandı. Şekil 6.23'de de fotocevapların dalgaboyuna göre değişimi verildi.



Şekil 6.23. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik fotocevap-dalgaboyu grafiği

Fotocevap-dalgaboyu grafiğindeki veriler ve Eş.2.7 kullanılarak, spektral kuantum verimleri hesaplandı. Bu değişim kuantum verimi-dalgaboyu grafiği olarak, Şekil 6.24'de verildi.

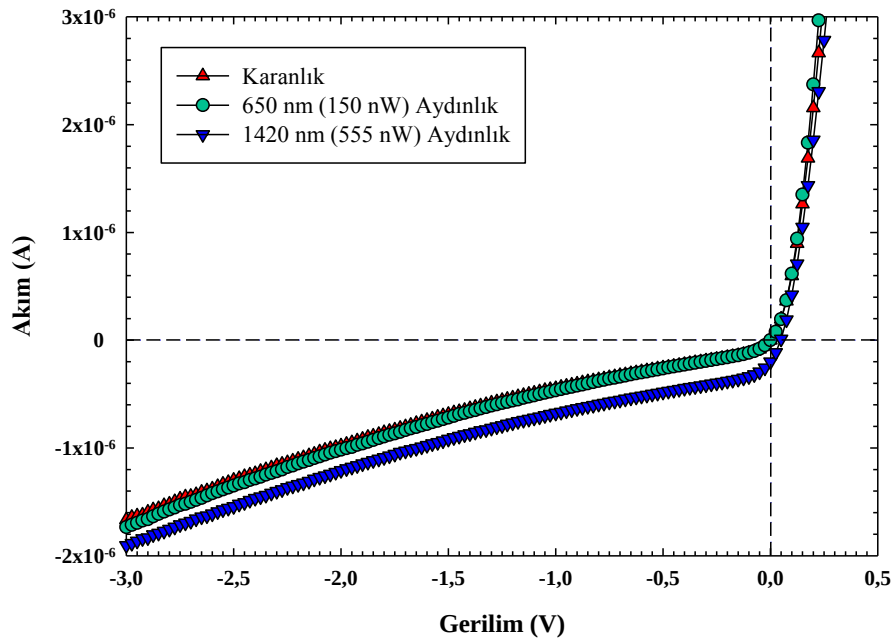


Şekil 6.24. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için kuantum verimi-dalgaboyu grafiği

FPA üzerindeki test dedektörlerinde kızılötesi / görünür kontrastını belirlemek amacı ile dedektör 650 nm ve 1420 nm dalgaboyunda aydınlatılırken fotoakımlar ölçüldü. Şekil 6.25’de her iki aydınlatma altında elde edilen fotoakımın voltaja göre değişimi verildi. Bu fotoakımlar optik güce bölünerek fotocevaplar hesaplandı. Bu iki fotocevabın oranı ile kızılötesi / görünür kontrastı belirlendi.

500 mV ters polarlama gerilimi altında elde edilen fotoakımlar optik güce bölünerek fotocevaplar hesaplandı. Bu iki fotocevabın oranı ile kızılötesi / görünür kontrast; $0,495$ olarak belirlendi. Bu ölçümlerde FPA’nın üstten aydınlatıldığı dikkate alınmalıdır. Normal operasyonda odak düzlem matrisi (FPA) arkadan aydınlatılacağı ve alttaş olarak InP malzemesi kullanıldığı için bu oranın 1-2 merteye yüksek olacağı öngörülmektedir.

Kızılötesi / uzak kızılötesi kontrast ise; maksimum fotocevabın, minimum fotocevaba oranı olarak verilebilir. Şekil 6.12’de bulunan, fotodedektörün Fotocevap - Dalgaboyu grafiği incelendiğinde; maksimum fotocevabın $1,0000\text{ A/W}$, minimum fotocevabın ise 0.0081 A/W olduğu görüldü. Bu veriler ışığında, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün kızılötesi/uzak kızılötesi kontrastı, $123,4$ olarak hesaplandı.



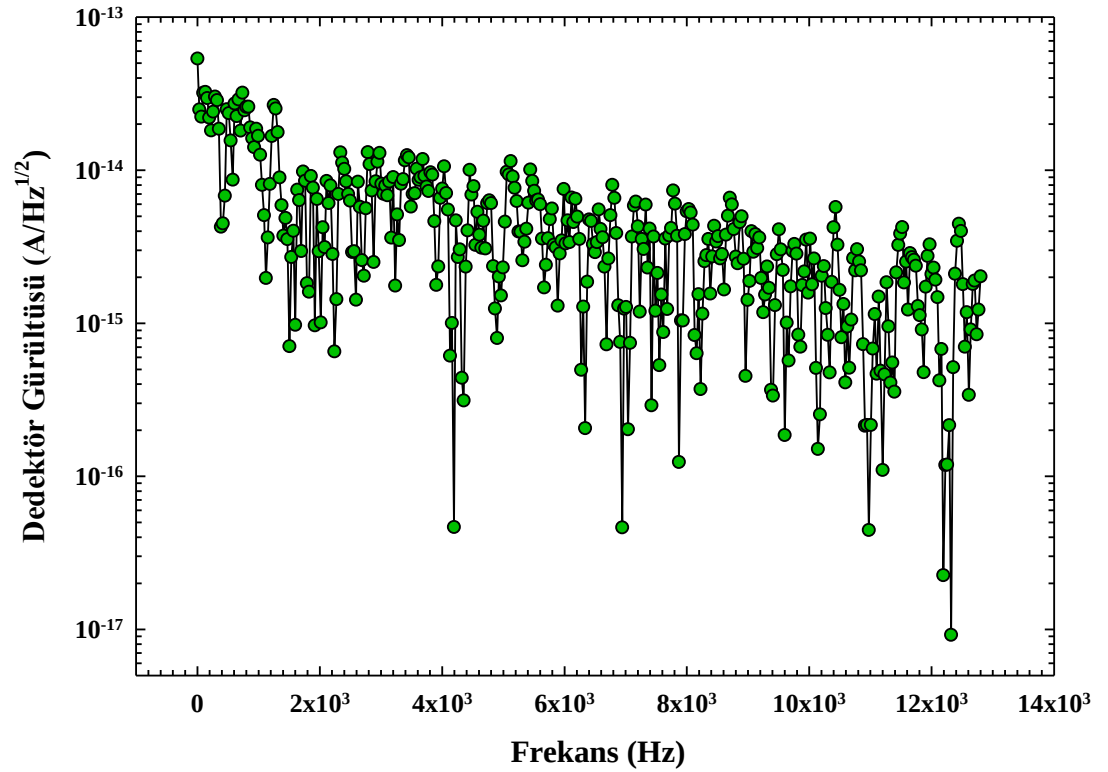
Şekil 6.25. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için fotoakım-gerilim grafiği

6.7.3. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümü

320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümlerinde; sonda istasyonu (probe station), güç kaynağı (power supply), akım yükselteci (current amplifier), sinyal analizörü (signal analyser) kullanıldı.

320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA ölçümünden önce sinyal analizörü ile $0 - 12,5 \text{ kHz}$ frekans aralığında sistem gürültüsü ölçüldü. Daha sonra fotodedektörün aynı frekanslarda gürültü ölçümü yapıldı.

Şekil 6.26'da piksellerin ölçülen tipik düşük frekanslarda gürültü karakteristiği görülmektedir.



Şekil 6.26. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için tipik gürültü karakteristiği

Şekil 6.26'da da görüleceği üzere, bir pikselin gürültüsü $0,05 \text{ pA} / \text{Hz}^{1/2}$ 'den daha düşüktür.

Daha önce, gürültü eşiti güç (NEP) formülü, spektral gürültü gücü cinsinden, Eş. 2.8'de verildi.

$$NEP = \frac{\text{gürültü}}{\text{fotocevap}} = \frac{S_n}{R} \quad (2.8)$$

1KHz frekansta gürültü (S_n), $1,4665 \times 10^{-14} \text{ A} / \text{Hz}^{1/2}$ olarak ölçüldü. Bu değer maksimum fotocevap, $(R_\lambda)_{max}$, olan $1,00 \text{ A/W}$ değerine bölündüğünde 1KHz frekansta gürültü eşiti güç (NEP);

$$NEP = \frac{\text{gürültü}}{\text{fotocevap}} = \frac{S_n}{R} = \frac{1,4665 \times 10^{-14} \text{ A} / \text{Hz}^{1/2}}{1,00 \text{ A/W}}$$

$$NEP = 1,4665 \times 10^{-14} \text{ W} / \text{Hz}^{1/2}$$

olarak bulundu.

Bir fotodedetörün dedektivite (D^*) değeri ise daha önce, Eş. 2.11'de verildi.

$$D^* = D \sqrt{A_d} = \frac{\sqrt{A_d}}{NEP} \quad (2.11)$$

Bu formülde kullanılan A_d dedektörün alanı ve NEP ise gürültü eşiti güç değeri yerlerine konulup; dedektivite (D^*) değeri;

$$A_d = \pi r^2 = 3,14 \times (18 \mu\text{m})^2 = 3,14 \times (18 \times 10^{-4} \text{ cm})^2 = 10,173 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$$

$$D^* = D\sqrt{A_d} = \frac{\sqrt{A_d}}{NEP} = \frac{\sqrt{10,173 \times 10^{-6} \text{ cm}^2}}{1,4665 \times 10^{-14} \text{ W / Hz}^{1/2}}$$

$$D^* = 2,1751 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$$

olarak elde edildi.

6.7.4. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA dizin verim ölçümü

Dizindeki bütün elemanları test etmek çok zaman alacağından, dizin başarı oranını hesaplamak için; 3. Bölüm, 3.4.4’de açıklanan istatistiksel örnekleme metodu kullanıldı. Bu şekilde, dizindeki elemanlardan bazılarını rastgele örnekleyip, örnek başarı ortalamasından ve standart sapmasından, dizindeki çalışan eleman oranının hedeflenen orana eşit veya daha büyük olma olasılığı hesaplandı.

Dizin verim ölçümlerinde I-V ölçüm düzeneği kullanıldı. Dizde bulunan pikseller için -500 mV gerilimde fotocevap akım ortalaması ($\bar{I}$) ve fotocevap akımlar için standart sapma (σ) hesaplandı. Fotocevap akım değeri $\bar{I} \pm \sigma$ aralığında kalan pikseller çalışan, bu aralığın dışında kalan pikseller ise ölü piksel olarak kabul edildi. Çizelge 6.5 oluşturularak, çalışan pikseller “1” ile, çalışmayan pikseller ise “0” ile gösterildi.

Çizelge 6.5. -500 mV polarlama geriliminde 320 x 256 formatlı kızılötesi fotodedektör piksellerinin fotocevap akım ölçümleri

Piksel No	Fotocevap Akımı (μA)	Çalışırlık	Piksel No	Fotocevap Akımı (μA)	Çalışırlık	Piksel No	Fotocevap Akımı (μA)	Çalışırlık
1	18,23	1	12	16,88	1	23	18,1	1
2	19,8	0	13	14,45	0	24	17,8	1
3	18,0	1	14	18,12	1	25	17,3	1
4	17,7	1	15	17,75	1	26	16,67	1
5	16,65	1	16	17,76	1	27	16,78	1
6	17,98	1	17	17,3	1	28	17,38	1
7	19,31	0	18	17,54	1	29	17,7	1
8	17,89	1	19	17,49	1	30	18	1
9	14,45	0	20	17,9	1	31	17,7	1
10	17,13	1	21	16,78	1	32	16,65	1
11	17,8	1	22	16,66	1	33	17,98	1

Yukarıda anlatılan hesaplamalar sonucunda ortalama fotocevap akımı $17,4 \mu A$ ve standart sapma akımı $1,04 \mu A$ olarak bulundu. Ölçülen 33 piksel için çalışırlık kriterini sağlamayan sadece “4” piksel bulunduğu Çizelge 6.5’den anlaşılmaktadır. Bu ölçüm sonuçları 3. Bölüm, 3.4.4’de anlatılan istatistiksel metod ile incelendiğinde, dizinde bulunan piksellerin %80’inin çalışma olasılığının %91,72 olduğu görülmektedir.

6.7.5. 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA Parametreleri

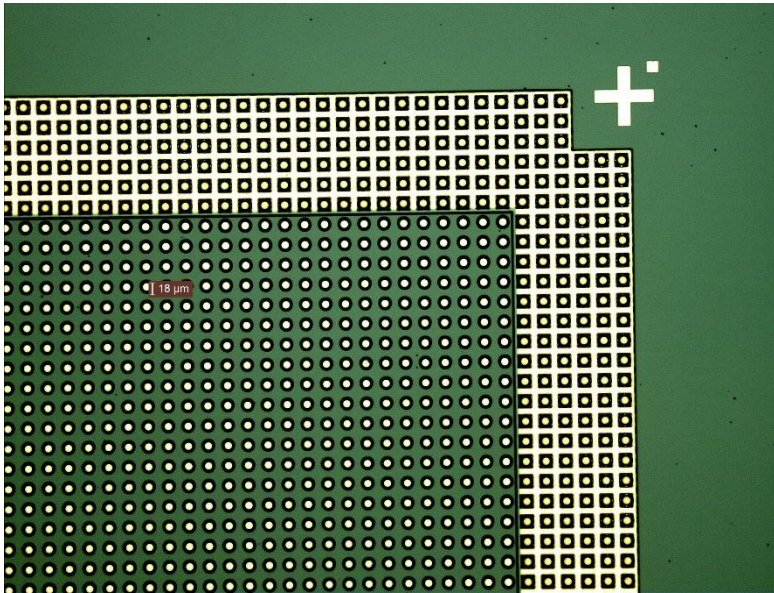
Üretilen 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın elektriksel ve optik karakterizasyonları, gerekli deneysel düzenekler kurularak yapıldı.

- ✚ Akım-Voltaj karakteristiği ölçümü sonucunda, 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın, karanlık akımı $16,14 \text{ pA}$, tipik aşağı kırılma voltajı ise -38 V olarak ölçüldü.
- ✚ Spektral fotoakım ölçümü sonucunda, 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın, çalışma dalga boyu 1420 nm , spektral kuantum verimi değişimi Şekil 6.24'de verilen grafikte görüldüğü gibi, kızılötesi / görünür kontrastı $0,495$ ve kızılötesi / uzak kızılötesi kontrastı ise $123,4$ olarak belirlendi.
- ✚ Düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümü sonucunda, 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın, 1 KHz 'de spektral gürültüsü (S_n) $1,4665 \times 10^{-14} \text{ A} / \text{Hz}^{1/2}$, gürültü eşiti gücü (NEP), $1,4665 \times 10^{-14} \text{ W} / \text{Hz}^{1/2}$ ve dedektivitesi (D^*) $2,175 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ olarak belirlendi.
- ✚ Dizin verim ölçümü sonucunda, 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için rastgele piksel örnekleme sonucunda, dizindeki piksellerin (toplam 81920 piksel) $\%80$ 'inin çalışma olasılığı $\%91,72$ olarak hesaplandı.

7. 320x256 FORMATLI InGaAs/InP p-i-n KIZILÖTESİ KAMERA

7.1. InGaAs p-i-n IP FPA İndiyum Bağlantı Metalizasyonu

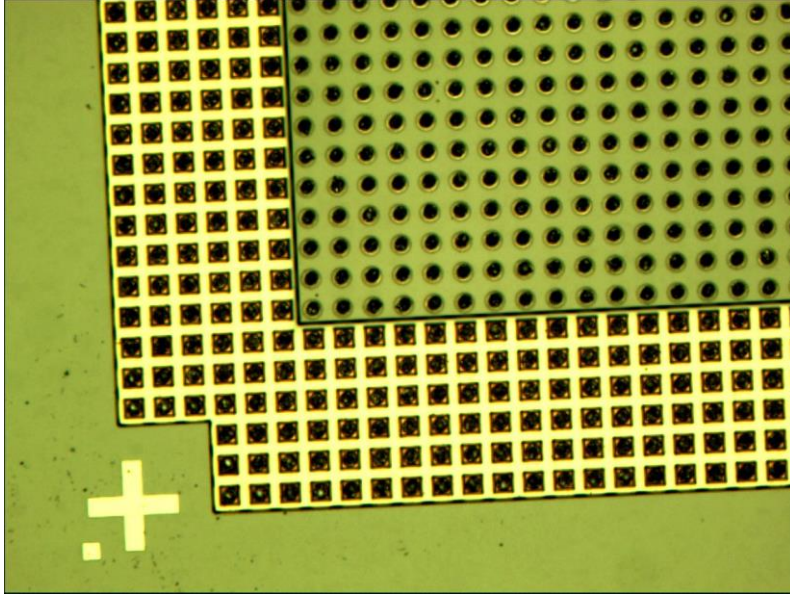
Fabrikasyonun bu aşamasında, 320x256 formatlı InGaAs/InP p-i-n kızılötesi fotodetektör (InGaAs p-i-n IP FPA) ile okuma devresinin birleştirilmesi için indiyum bağlantı metali kaplaması yapıldı. Öncelikle InGaAs p-i-n IP FPA aseton, izopropil alkol ve DI su ile temizlendi, azot gazı ile kurutuldu. Daha sonra InGaAs p-i-n IP FPA'nın ön yüzeyine fotolitografi işlemi uygulanarak, indiyum kaplanacak bölgeler numune üzerine işlendi. Fotolitografi işleminde Microchemicals firmasının AZ nLof 2070 fotodirenç polimeri kullanıldı. Fotodirenç polimeri, bir çevirici (spinner) yardımı ile yüzeye homojen olarak kaplandı. Maske hizalama cihazı (Suss MA6) kullanılarak, fotomaskenin indiyum adımı, Resim 7.1'de görüldüğü üzere, InGaAs p-i-n IP FPA üzerine işlendi.



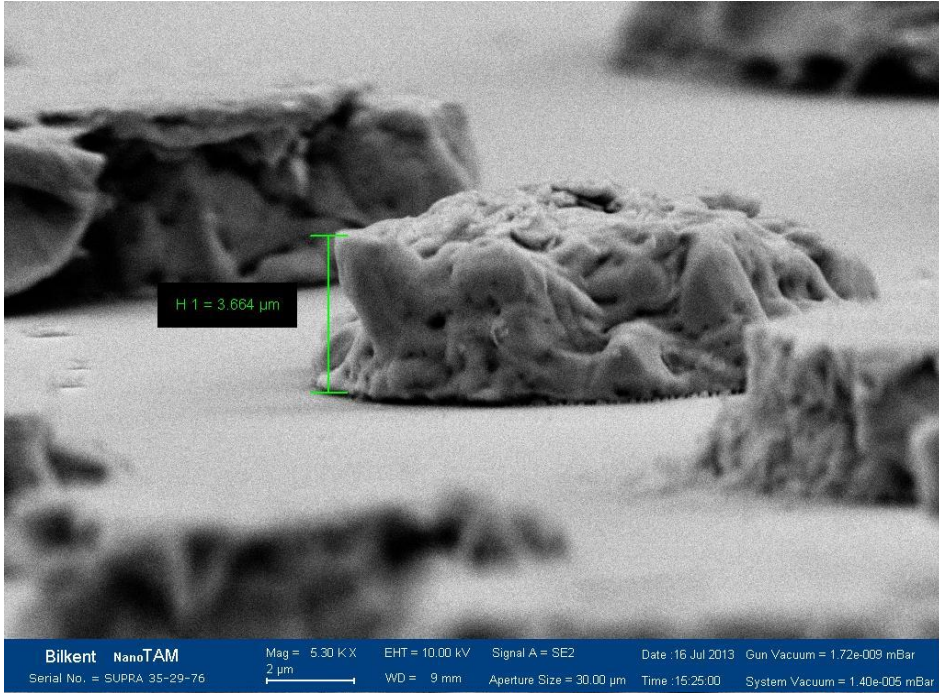
Resim 7.1. İndiyum bağlantı litografisi yapılmış InGaAs p-i-n IP FPA

Daha sonra FPA üzerine, termal buharlaştırma yöntemiyle, İndiyum (In) metali 3,3 Å/s kaplama hızı ile 3700 nm kalınlıkta kaplandı. İndiyum metalizasyonu

tamamlanmış InGaAs p-i-n IP FPA'nın optik mikroskop görüntüsü, Resim 7.2'de, Taramalı Elektron Mikroskopi (SEM) görüntüsü de Resim 7.3'de verildi.



Resim 7.2. İndiyum metalizasyonu tamamlanmış InGaAs p-i-n IP FPA'nın optik mikroskop görüntüsü



Resim 7.3. İndiyum metalizasyonu tamamlanmış InGaAs p-i-n IP FPA'nın SEM görüntüsü

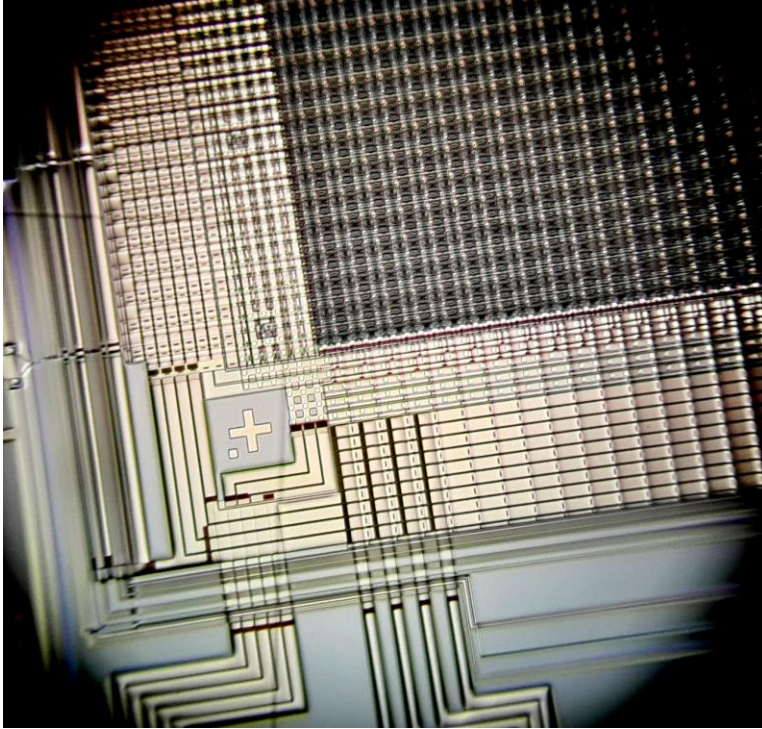
7.2. InGaAs p-i-n IP FPA Kesimi

Son olarak ise p^+ ve n^+ kontaklarından oluşan FPA aktif alanı kesildi. Kesim sonrası fabrikasyonu tamamlanan FPA numunesinin ebatları yaklaşık olarak 8,5 mm x 10,5 mm olarak ölçüldü.

InGaAs IP FPA kesim adımının da tamamlanmasıyla beraber, 320x256 formatlı InGaAs/InP p-i-n kızılötesi fotodedektöre ait fabrikasyon işlemleri bitmiş oldu. Ardından, fotodedektör dizininden veri aktarımı yapılabilmesi için gerekli olan okuma devresi fabrikasyon işlemlerine geçildi.

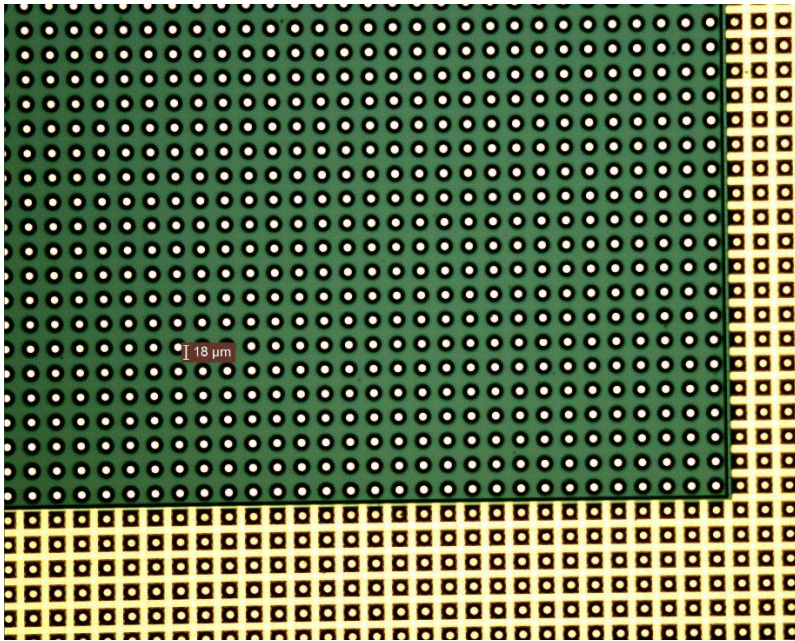
7.3. Okuma Devresi (ROIC) İndiyum Bağlantı Metalizasyonu

Bu aşamada, Resim 7.4'te gösterilen okuma devresinin (readout integrated circuit – ROIC), FPA ile birleştirilmesi için *Titanyum*, *Altın* ve *İndiyum* bağlantı metali kaplaması yapıldı.



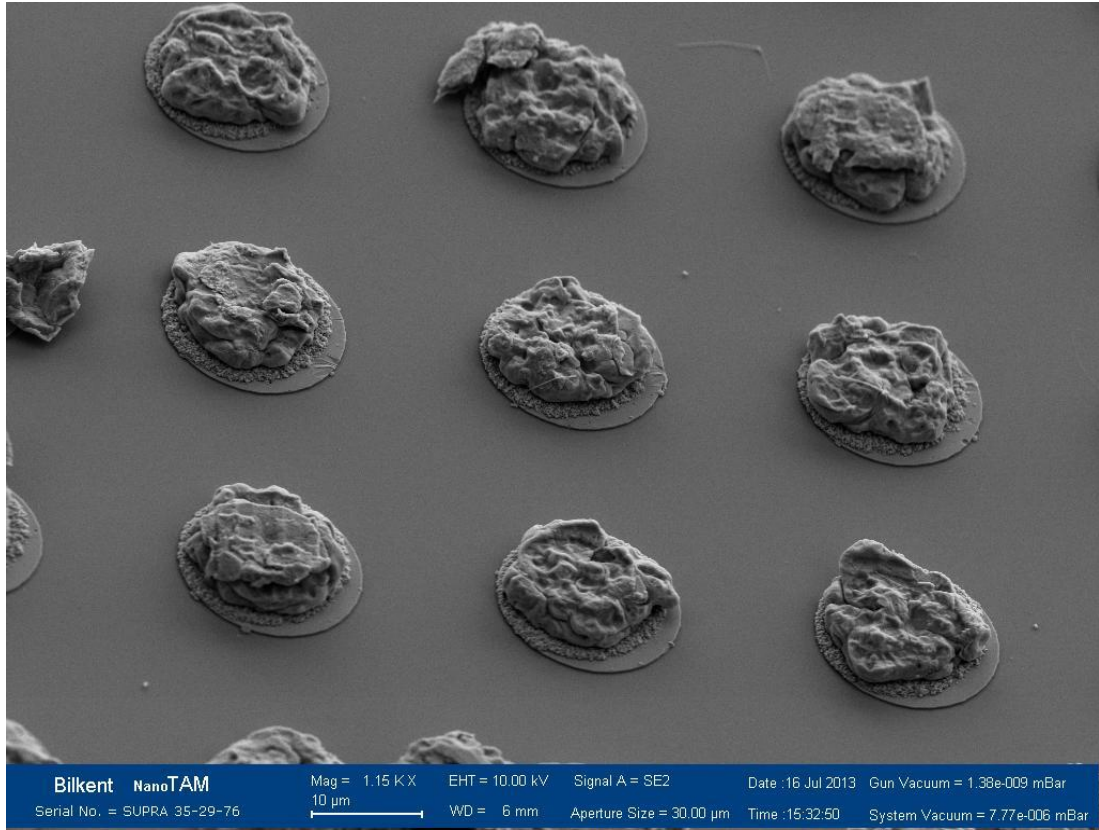
Resim 7.4. Okuma devresi

Öncelikle okuma devresi aseton, izopropil alkol ve DI su ile temizlendi, azot ile kurutuldu. Daha sonra devrenin ön yüzeyine fotolitografi işlemi uygulanarak, metallerin kaplanacağı bölgeler devre üzerine işlendi. Fotolitografi işleminde Microchemicals firmasının Ti 35ES fotodirenç polimeri kullanıldı. Fotodirenç polimeri, bir çevirici (spinner) yardımı ile yüzeye homojen olarak kaplandı. Maske hizalama cihazı (Suss MA6) kullanılarak, InGaAs FPA için kullanılan fotomaskenin indiyum adımı, Resim 7.5’de görüldüğü üzere, okuma devresinin üzerine işlendi.



Resim 7.5. İndiyum bağlantı litografisi yapılmış okuma devresi

Litografi işlemi ile belirlenen bölgelere, okuma devresinin indiyum metalizasyonu yapılmadan önce, termal buharlaştırma yöntemiyle, *Titanyum* (Ti) metali 3,0 Å/s kaplama hızı ile 30 nm kalınlıkta ve *Altın* (Au) metali 3,1 Å/s kaplama hızı ile 150 nm kalınlıkta kaplandı. Hemen ardından, *İndiyum* metali 3,1 Å/s kaplama hızı ile 2000 nm kalınlıkta kaplandı. İndiyum metalizasyonu tamamlanmış okuma devresine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü, Resim 7.6’da verildi.

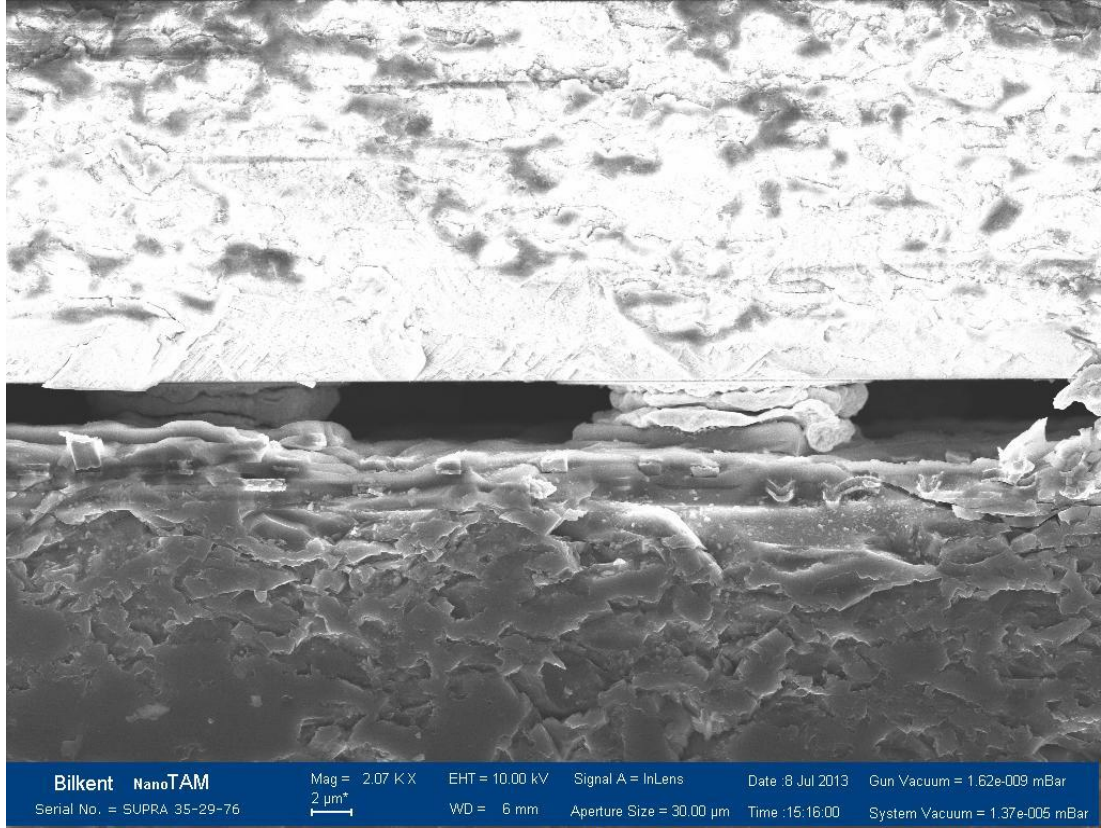


Resim 7.6. İndiyum metalizasyonu tamamlanmış okuma devresinin SEM görüntüsü

Metalizasyon işleminden sonra okuma devresi, tavlama işlemine hazır hale gelebilmesi için, aseton, propanol alkol ve de-iyonize (DI) su ile temizlenerek, azot gazı ile kurutuldu.

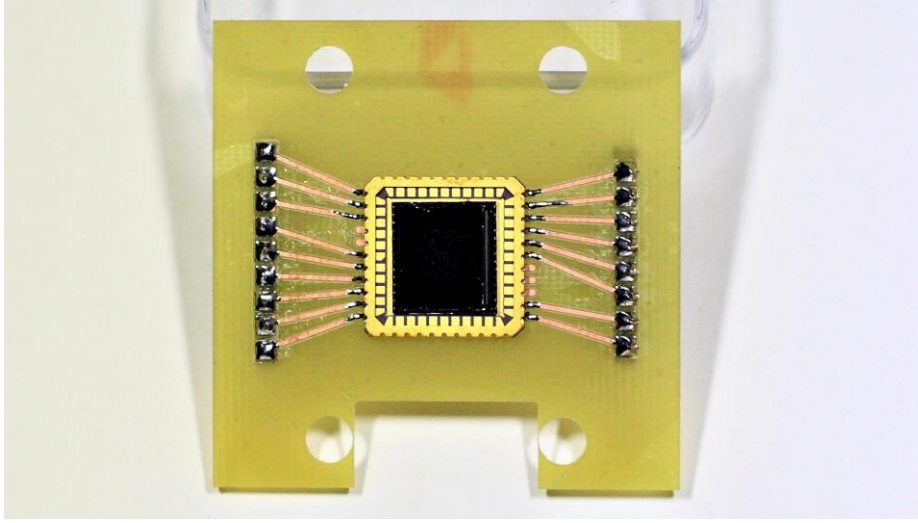
7.4. InGaAs Kızılötesi Kamera Bağlantıları

Öncelikle, fabrikasyonları tamamlanan InGaAs p-i-n IP FPA ve okuma devresi flip-çip bağlantı (flip-chip bonding) sistemi ile birbirine bağlandı. Şekil 7.7’de okuma devresine bağlantısı tamamlanmış InGaAs p-i-n IP FPA’nın taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü verildi.



Resim 7.7. InGaAs p-i-n IP FPA ve okuma devresinin bağlantılarını gösteren SEM görüntüsü

Daha sonra ise bu birleşim, Resim 7.8’de görüldüğü üzere, fotodedektör kamera sistemleri için uygun olan baskılı devre kartı (printed circuit board – PCB)’na bağlandı. PCB ve okuma devresi üzerinde bulunan kontak pedlerinin birbirleriyle bağlantıları tel bağlama (wire bounnder) sistemi ile 25 μ m’lik altın teller kullanılarak yapıldı. Bağlantıları tamamlanan FPA, okuma devresi ve PCB bir bütün olarak kamera devresine monte edildi.



Resim 7.8. PCB'ye monte edilmiş InGaAs p-i-n IP FPA

7.5. InGaAs Kızılötesi Kamera Görüntüleri

Kamera devresine monte edilen InGaAs p-i-n IP FPA, Resim 7.9'da gösterilen görüntüleme sisteminde kullanılarak kızılötesi kamera görüntüleri elde edildi.



Resim 7.9. Kızılötesi görüntüleme sistemi

Kızılötesi görüntüleme sisteminde; üzerinde InGaAs FPA ve okuma devresi bulunan PCB'nin ve lens sisteminin bulunduğu kamera devresi, güç kaynağı (Agilent U8001A), elektronik destek üniteleri, görüntü işleme yazılımı (ThermaCAM RDac)

bulunmaktadır. Kızılötesi görüntüleme sistemi, InGaAs fotodedektör dizini ile çalıştığından, “kızılötesi foton kamerası” olarak da adlandırılabilir.

Kızılötesi foton kamerası kullanılarak elde edilen görüntülerden bazıları Resim 7.10, 7.11, 7.12 ve 7.13’de verildi.



Resim 7.10. InGaAs kızılötesi kamera görüntüsü – 1



Resim 7.11. InGaAs kızılötesi kamera görüntüsü - 2



Resim 7.12. InGaAs kızılötesi kamera görüntüsü - 3

Resim 7.13’de, InGaAs kızılötesi kameradan beklendiği üzere cam şeffaf, su ise siyah olarak görünmektedir.



Resim 7.13. Camın ve suyun InGaAs kızılötesi kamera görüntüsü

8. SONUÇLAR

InGaAs/InP MSM kızılötesi fotodedektör çalışmasında, InGaAs/InP MSM fotodedektörün Schottky bariyer yüksekliğinin, oda sıcaklığında yapılan metalizasyon işlemi ile arttırılabileceğini deneysel ve teorik olarak sunmaya çalışıldı. Bu amaçla, MBE yöntemi ile büyütülmüş InGaAs/InP numunelerinin yapısal ve elektriksel özelliklerinin, indiyum alaşım oranı (x) ve oda sıcaklığı metalizasyon işlemi ile nasıl etkilendiği incelendi. InGaAs/InP numunelerinin alaşım oranı, örgü sabiti, tanecik boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve zorlanma gibi yapısal parametreleri HRXRD ölçümleri sonucunda elde edildi. İndiyum homojenliği ve InGaAs tabakası ile InP alttaş arasındaki keskin arayüzey durumu, SIMS derinlik profili ölçümleri ile belirlendi. HRXRD ve SIMS analiz sonuçlarının uyum içerisinde olduğu gözlemlendi. SIMS ölçümlerinde, tüm numunelerin InGaAs ile InP arayüzeyindeki, As ve P değişiminin keskin olduğu belirlendi. InGaAs/InP MSM aygıtlarının idealite faktörü (n), bariyer yüksekliği (Φ_B) ve doyum akımı (I_0) gibi önemli elektriksel özellikleri akım-gerilim ölçümleri sonucunda elde edildi. InGaAs/InP MSM aygıtlarının rekombinasyon ömrü (τ) ve difüzyon uzunluğu (L), Hall etkisi ölçümleri sonucu elde edilen mobilite (μ) ve taşıyıcı yoğunluğu (N) verileri kullanılarak hesaplandı ve Çizelge 4.4'te verildi. MSM1, MSM2 ve MSM3 aygıtlarının Φ_B değerleri, oda sıcaklığında yapılan akım-gerilim ölçümleri sonucunda elde edilen veriler kullanılarak, sırasıyla, 0.642 eV, 0.582 eV ve 0.382 eV olarak hesaplandı. Schottky bariyer yüksekliği 0.2 eV (geleneksel Φ_B)'dan 0.642 eV'a arttırıldığı görüldü.

Üretilen InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün elektriksel ve optik karakterizasyonları, gerekli deneysel düzenekler kurularak yapıldı. Akım-Voltaj karakteristiği ölçümü sonucunda, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün, karanlık akımı 100 nA , aşağı kırılma voltajı ise -30 V olarak ölçüldü. Spektral fotoakım ölçümü sonucunda, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün, çalışma dalga boyu 1500 nm , spektral kuantum verim değişimi Şekil 5.24'de verilen grafikte görüldüğü gibi ve kızılötesi / uzak kızılötesi kontrastı ise 112 olarak belirlendi. Düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümü sonucunda, InGaAs/InP tekli kızılötesi fotodedektörün,

spektral gürültüsü Şekil 5.30'da verilen grafikteki gibi, dedektivitesi $3,1 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ ve gürültü eşiti gücü ise $5,716 \times 10^{-14} \text{ W / Hz}^{1/2}$ olarak belirlendi.

Üretilen 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın elektriksel ve optik karakterizasyonları, gerekli deneysel düzenekler kurularak yapıldı. Akım-Voltaj karakteristiği ölçümü sonucunda, 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın, karanlık akımı 30 nA , tipik aşağı kırılma voltajı ise $-29,3 \text{ V}$ olarak ölçüldü. Spektral fotoakım ölçümü sonucunda, 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın, çalışma dalga boyu 1420 nm , spektral kuantum verimi değişimi Şekil 6.12'de verilen grafikte görüldüğü gibi, kızılötesi / görünür kontrastı $0,495$ ve kızılötesi / uzak kızılötesi kontrastı ise $121,9$ olarak belirlendi. Düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümü sonucunda, 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın, 1 KHz 'de spektral gürültüsü (S_n) $1,81 \times 10^{-14} \text{ A / Hz}^{1/2}$, gürültü eşiti gücü (NEP), $1,81 \times 10^{-14} \text{ W / Hz}^{1/2}$ ve dedektivitesi (D^*) $1,762 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ olarak belirlendi. Dizin verim ölçümü sonucunda, 64x64 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için rastgele piksel örnekleme sonucunda, 3. Bölüm, 3.4.4'de anlatılan istatistiksel metod ile dizindeki piksellerin (toplam 4096 piksel) %80'inin çalışma olasılığı %98,5 olarak hesaplandı.

Üretilen 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın elektriksel ve optik karakterizasyonları, gerekli deneysel düzenekler kurularak yapıldı. Akım-Voltaj karakteristiği ölçümü sonucunda, 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın, karanlık akımı 140 nA , tipik aşağı kırılma voltajı ise $-30,3 \text{ V}$ olarak ölçüldü. Spektral fotoakım ölçümü sonucunda, 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın, çalışma dalga boyu 1420 nm , spektral kuantum verimi değişimi Şekil 6.18'de verilen grafikte görüldüğü gibi, kızılötesi / görünür kontrastı $0,495$ ve kızılötesi / uzak kızılötesi kontrastı ise $120,5$ olarak belirlendi. Düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümü sonucunda, 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın, 1 KHz 'de spektral gürültüsü (S_n) $9,488 \times 10^{-15} \text{ A / Hz}^{1/2}$, gürültü eşiti gücü (NEP), $9,488 \times 10^{-15} \text{ W / Hz}^{1/2}$ ve dedektivitesi (D^*) $3,361 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ olarak belirlendi. Dizin verim ölçümü sonucunda, 128x128 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için rastgele piksel örnekleme sonucunda, 3. Bölüm, 3.4.4'de anlatılan istatistiksel metod ile dizindeki piksellerin (toplam 16384 piksel) %80'inin çalışma olasılığı %91,7 olarak hesaplandı.

Üretilen 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın elektriksel ve optik karakterizasyonları, gerekli deneysel düzenekler kurularak yapıldı. Akım-Voltaj karakteristiği ölçümü sonucunda, 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın, karanlık akımı $16,14 \text{ pA}$, tipik aşağı kırılma voltajı ise -38 V olarak ölçüldü. Spektral fotoakım ölçümü sonucunda, 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın, çalışma dalga boyu 1420 nm , spektral kuantum verimi değişimi Şekil 6.24'de verilen grafikte görüldüğü gibi, kızılötesi / görünür kontrastı $0,495$ ve kızılötesi / uzak kızılötesi kontrastı ise $123,4$ olarak belirlendi. Düşük frekanslarda gürültü karakteristiği ölçümü sonucunda, 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA'nın, 1 KHz 'de spektral gürültüsü (S_n) $1,4665 \times 10^{-14} \text{ A/Hz}^{1/2}$, gürültü eşiti gücü (NEP), $1,4665 \times 10^{-14} \text{ W/Hz}^{1/2}$ ve dedektivitesi (D^*) $2,175 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ olarak belirlendi. Dizin verim ölçümü sonucunda, 320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA için rastgele piksel örnekleme sonucunda, 3. Bölüm, 3.4.4'de anlatılan istatistiksel metod ile dizindeki piksellerin (toplam 81920 piksel) %80'inin çalışma olasılığı %91,72 olarak hesaplandı.

320x256 InGaAs/InP p-i-n IP FPA, okuma devresi ve PCB ile birleştirildi. Kızılötesi görüntüleme sistemi kurularak, InGaAs kızılötesi kamera görüntüleri elde edildi.

Bu tez çalışması kapsamında, prototip üretimleri tamamlanan kızılötesi fotodedektörler ile yurtdışında üretilerek, satışa sunulan kızılötesi fotodedektörler karşılaştırıldığında, üretimini yaptığımız prototip fotodedektörlerin çıktı parametrelerinin oldukça iyi olduğu görülmektedir. Kaliteli ve milli kızılötesi fotodedektör üretiminin, ülkemiz teknolojisinin geliştirilmesi, milli bilgi, beceri ve tecrübenin artırılması açısından oldukça önemli olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Asar, T., Sarıkavak, B., Öztürk, M. K., Mammadov, T., Özçelik, S., “Effects of annealing on the structural properties of GaAs-based quantum well solar cells”, ***Journal of Optoelectronics and Advanced Materials***, 11 (11): 1627–1631 (2009).
2. Tzeng, T.E., K.Y. Chuang, Lay, T.S., Chang, C.H., “Broadband InGaAs Quantum Dot-in-a-Well Solar Cells of p-Type Wells”, ***J. Crystal Growth***, 378: 583-586 (2013).
3. Turner, S., Mokkapati, S., Jolley, G., Fu, L., Tan, H.H., C. Jagadish, “Periodic Dielectric Structures for Light-Trapping in InGaAs/GaAs Quantum Well Solar Cells”, ***Optic Express***, 21 (S3): A324-A335 (2013).
4. Heshmat, B., Pahlevaninezhad, H., Darcie, T.E., “Optical Efficiency Enhancement Methods for Terahertz Receiving Photoconductive Switches”, ***Optic&Laser Tech.***, 54: 297-302 (2013).
5. Parveen, Gupta, M., Gupta, R.S., Jogi, J., “RF Characterization of 100-nm Separate Gate InALAs/InGaAs DG-HEMT”, ***Microwave and Optical Tech. Letters***, 55 (11): 2796-2803 (2013).
6. Hung, S., Luan, Q., Lin, H., Li, S., Chang, S., “Embedded-Ge Source and Drain in InGaAs/GaAs Dual Channel MESFET”, ***Current Appl. Phys.***, 13: 1577-1580 (2013).
7. Teng, T., Xu, A., Ai, L., Sun, H., Qi, M., “InP/InGaAs/InP DHBT Structures With High Carbon-Doped Base Grown by Gas Source Molecular Beam Epitaxy”, ***Journal of Crystal Growth***, 378: 618-621 (2013).
8. Kaniewski, J., Piotrowski, J., “InGaAs for Infrared Photodetectors. Physics and Technology”, ***Opto-electronics Review***, 12(1): 139-148 (2004).
9. Tsai, C. L., Cheng, K. Y., Chou, S. T., S. Y. Lin, “InGaAs Quantum Wire Infrared Photodetector”, ***Appl. Phys. Lett.***, 91: 181105 (2007).
10. Ozer, S., Tumkaya, U., Besikci, C., “Large Format AllInAs–InGaAs Quantum-Well Infrared Photodetector Focal Plane Array For Midwavelength Infrared Thermal Imaging”, ***IEEE Photonics Technology Letters***, 19 (18): 1371-1373 (2007).
11. Piotrowski, J., Kaniewski, J., “Optimisation of InGaAs Infrared Photovoltaic Detectors”, ***IEE Proc.-Optoelectron***, 146 (4): 173-176 (1999).

12. Piotrowski, J., Kaniewski, J., Reginski, K., “Modeling and Optimization of InGaAs Infrared Photovoltaic Detectors”, ***Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A***, 439: 647-650 (2000).
13. Yuan, J., Chen, B., Holmes, A.L., “Near-Infrared Quantum Efficiency of Uncooled Photodetectors Based on InGaAs/ GaAsSb Quantum Wells Lattice-Matched to InP”, ***Electronics Letters***, 47 (20): 1-2 (2011).
14. Lee, H. J., Anderson, W. A., Hardtdegen, H., Lüth, H., “Barrier Height Enhancement of Schottky Diodes on n-In_{0.53}Ga_{0.47}As by Cryogenic Processing”, ***Appl. Phys. Lett.***, 63: 1939-1941 (1993).
15. Schlee, J., Rodilla, H., Wadefalk, N., Nilsson, P.Å., Grahn, J., “Cryogenic Noise Performance of InGaAs/InAlAs HEMTs Grown on InP and GaAs Substrate”, ***Solid-State Electronics***, 91: 74-77 (2014).
16. Yasuda, Y., Koh, S., Ikeda, K., Kawaguchi, H., “Crystal Growth of InGaAs/InAlAs Quantum Wells on InP(110) by MBE”, ***Journal of Crystal Growth***, 364: 95-100 (2013).
17. Jasik, A., Wnuk, A., Wojcik-Jedlinska, A., Jakiela, R., Muszalski, J., Strupinski, W., Bugajski, M., “The Influence of the Growth Temperature and Interruption Time on the Crystal Quality of InGaAs/GaAs QW Structures Grown by MBE and MOCVD Methods”, ***Journal of Crystal Growth***, 310: 2785-2792 (2008).
18. LilientalWeber, Z., Chen, Y., Werner, P., Zakharov, N., Swider, W., Washburn, J., Klem, J. F., Tsao, J. Y., “Interfacial Defects and Morphology of InGaAs Epitaxial Layers Grown on Tilted GaAs Substrates”, ***Journal of Vacuum Science & Technology B***, 11: 1379-1383 (1993).
19. Fujiwara, Y., Nonogaki, Y., Oga, R., Koizumi, A., Takeda, Y., “Reactor Structure Dependence of Interface Abruptness in GaInAs/InP and GaInP/GaAs Grown by Organometallic Vapor Phase Epitaxy”, ***Applied Surface Science***, 216: 564-568 (2003).
20. Yu-Peng, A., Hua, Y., Ting, M., Yi-Ding, W., Jing-Hua, T. and Cheng-Dong, X., “Cap Layer Influence on Impurity-Free Vacancy Disorder of InGaAs/InP Quantum Well Structure”, ***Chinese Phys. Lett.***, 27 (1): 017302 (2010).
21. Chakraborty, B.R., “Characterization of Interfaces in Nanoscale Semiconductor Devices by Optimization of Depth Resolution in SIMS Depth Profiling”, ***Applied Surface Science***, 221: 143-154 (2004).
22. Kadoiwa, K., Ono, K., Ohkura, Y., “Zn Diffusion Behavior at the InGaAsP/InP Heterointerface Grown Using MOCVD”, ***J. Crystal Growth***, 297: 44-51 (2006).

23. Stoltz, A. J., Benson, J. D., Jacobs, R., Smith, P., Almeida, L. A., Carmody, M., Farrell, S., Wijewarnasuriya, P. S., Brill, G., and Chen, Y., "Reduction of Dislocation Density by Producing Novel Structures", *J. Electron. Mater.*, 41: 2949 (2012).
24. Baliga, A., Trivedi, D., and Anderson, N., "Tensile-Strain Effects in Quantum-Well and Superlattice Band Structures", *Phys. Rev. B*, 49: 10402-10416 (1994).
25. Wang, X. D., Hu, W. D., Chen, X. S., Lu, W., Tang, H. J., Li, T., Gong, H. M., "Dark Current Simulation of InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP p-i-n Photodiode", *Opt. Quant. Electron*, 40: 1261–1266 (2008).
26. Ji, X., Liu, B., Xu, Y., Tang, H., Li, X., Gong, H. M., Shen, B., Yang, X., Han, P. and Yan, F., "Deep-Level Traps Induced Dark Currents in Extended Wavelength In_xGa_{1-x}As/InP Photodetector", *Journal of Applied Physics*, 114: 224502 (2013).
27. Zhang, X. M., Liang, C., Liu, G., Fan, D. Y., Lang, P., Sun, Z. B., Ma, H.Q., Zhang, R., Lei, M., "Analysis of a InGaAs/InP Single Photon Detector at 1550 nm", *Journal of Modern Optics*, 60 (12): 983-986 (2013).
28. Tosi, A., Scarcella, C., Boso, G., Acerbi, F., "Gate-Free InGaAs/InP Single-Photon Detector Working at Up to 100 Mcount/s", *IEEE Photonics Journal*, 5 (4): 6801308 (2013).
29. McCarthy, A., Ren, X., Frera, A. D., Gemmell, N. R., Krichel, N. J., Scarcella, C., Ruggeri, A., Tosi, A., Buller, G. S., "Kilometer-Range Depth Imaging at 1550 nm Wavelength Using an InGaAs/InP Single-Photon Avalanche Diode Detector", *Optics Express*, 21 (19): 22098-2113 (2013).
30. Umana-Membreno, G. A., Kala, H., Antoszewski, J., Ye, Z.H., Hu, W.D., Ding, R.J., Chen, X.S., Lu, W., He, L., Dell, J.M. and Faraone, L., "Depth Profiling of Electronic Transport Parameters in n-on-p Boron-Ion-Implanted Vacancy-Doped HgCdTe", *Journal of Electronic Materials*, 42 (11): 3108 – 3113 (2013).
31. Zhang, J., Tsen, G.K.O., Antoszewski, J., Dell, J.M., Faraone, L. and Hu, W.D., "A Study of Sidewall Effects in HgCdTe Photoconductors Passivated with MBE-Grown CdTe", *Journal of Electronic Materials*, 39 (7): 1019-1022 (2010).
32. Rogalski, A., Antoszewski, J. and Faraone, L., "Third-Generation Infrared Photodetector Arrays", *Journal of Applied Physics*, 105: 091101 (2009).
33. Chen, R., Fu, J., Miller, D. A. B., Harris, J. S., "Spectral Shaping of Electrically Controlled MSM-Based Tunable Photodetectors", *IEEE Photonics Technology Letters*, 17 (10): 2158-2160 (2005).

34. Song, K. C., Matin, M. A., Robinson, B., Simmons, J. G., Thompson, D. A., Mascher, P., “High performance InP/InGaAs-Based MSM Photodetector Operating at 1.3-1.5 μm ”, ***Solid State Electronics***, 39 (9): 1283-1287 (1996).
35. Debbar, N., Rudra, A., Carlin, J-F., Ilegems, M., “High-speed InP/GaInAs Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors Grown by Chemical Beam Epitaxy”, ***Appl. Phys. Lett.***, 65 (2): 228-230 (1994).
36. Yang, C. D., Ho, C. L., Wu, M. Y., Su, J. Y., Ho, W. J., Wu, M. C., “Investigation of epitaxial lift-off the InGaAs p-i-n photodiodes to the AlAs/GaAs distributed Bragg reflectors”, ***Solid-State Electronics***, 47: 1763–1767 (2003).
37. Rogalski, A., “*Infrared Detectors: Status and Trends*”, ***Progress in Quantum Electronics***, (27): 59–210 (2003).
38. Dhar, N. K., Dat, R. and Sood, A. K., “Advances in Infrared Detector Array Technology- Chapter 7”, ***DOI: 10.5772/51665***.
39. Tran, C. D., “Infrared Multispectral Imaging: Principles and Instrumentation”, ***Applied Spectroscopy Reviews***, 38 (2): 133 - 153 (2003).
40. Rogalski, A., “Infrared Detectors”, ***Second Edition, CRC Press***, 87-641 (2011).
41. Malacky, L., Klockenbrink, R., Darmo, J., Wehmann, H-H, Zwinge, G., Schlachetzki, A., “InGaAs Schottky Contacts With an Iron-Doped InP Enhancement Layer”, ***J. Phys. D: Appl. Phys.***, 27: 2414-2417 (1994).
42. He, L., Costello, M. J., Cheng, K. Y., Wohler, D. E., “Enhanced Schottky Barrier on InGaAs for High Performance Photodetector Application”, ***J. Vac. Sci. Technol. A***, 16 (3): 1646-1649 (1998).
43. Kordoš, P., Marso, M., Meyer, R., Lüth, H., “Schottky Barrier Height Enhancement on n-In_{0.53}Ga_{0.47}As”, ***J. Appl. Phys.***, 72: 2347-2355 (1992).
44. Kajiyama, K., Mizushima, Y., Sakata, S., “Schottky Barrier Height of n-In_xGa_{1-x}As Diodes”, ***Appl. Phys. Lett.***, 23: 458-459 (1973).
45. Tamura, H., Yoshida, Muto, A. S., Muto, S. and Hasuo, S., “Schottky Barrier Height of Al/n-In_{0.53}Ga_{0.47}As Diodes”, ***Jpn. J. Appl. Phys.***, 26: L7 (1987).
46. Kunze, U., Kowalsky, W., “Characterization of Schottky Barrier Diodes by Means of Modulation Technique”, ***J. Appl. Phys.***, 63: 1597-1602 (1988).
47. Kikuchi, T., Ohno, H., and Hasegawa, H., “Ga_{0.47}In_{0.53}As Metal-Semiconductor-Metal Photodiodes Using a Lattice Mismatched Al_{0.4}Ga_{0.6}As Schottky Assist Layer”, ***Electronics Letters***, 24 (19): 1208-1210 (1988).

48. Kim, J. H., Li, S. S., Figueroa, L., Carruthers, T. F., and Wagner, R. S., "A High-Speed InP-Based $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ Schottky Barrier Infrared Photodiode for Fiber-Optic Communications", *J. Appl. Phys.*, 64: 6536-6540 (1988).
49. Hong, W. P., Chang, G. K., and Bhat, R., "High-Performance $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ MSM Photodetectors Grown by OM-CVD", *IEEE Trans. Electron Devices*, 36 (ED): 659-662 (1989).
50. Soole, J. B. D., Schumacher, H., LeBlanc, H. P., Bhat, R., and Koza, M. A., "High-Frequency Performance of InGaAs Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors at 1.55 and 1.3 μm Wavelengths", *Appl. Phys. Lett.*, 55: 729-731 (1989).
51. Hwang, K. C., Li, S. S., Park, C. and Anderson, T. J., "Schottky Barrier Height Enhancement of n- $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ by a Novel Chemical Passivation Technique", *J. Appl. Phys.*, 67: 6571 (1990).
52. Kuhl, D., Hieronymi, F., Böttcher, E. M., Wolf, T., Krost, A. and Bimberg, D., "Very High-Speed Metal-Semiconductor-Metal InGaAs:Fe Photodetectors with InP:Fe Barrier Enhancement Layer grown by Metalorganic Chemical Vapour Deposition", *Electron. Lett.*, 26: 2107-2109 (1990).
53. Rusu, E., Budianu, E., Nan, S., Purica, M., "Schottky Barrier on the InGaAs/InP Heterostructures Grown by the CL-VPE Technique for Photodetectors", *IEEE 19th. International Semiconductor Conference*, 211-214 (1996).
54. Salem, A. F., Smith, A. W., Brennan, K. F., "Heterostructure on Theoretical Study of the Effect of an AlGaAs Double Metal-Semiconductor-Metal Photodetector Performance", *IEEE Transactions on Electron Devices*, 41 (7): 1112-1119 (1994).
55. Kollakowski, St., Schade, U., Böttcher, E. H., Kuhl, D., Bimberg, D., Ambree, P., Wandel, K., "Silicon Dioxide Passivation of InP/InGaAs Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors", *J. Vac. Sci. Technol. B*, 14: 1712-1718 (1996).
56. Li, B., Yang, H. W., Gui, Q., Yang, X. H., Wang, J., Wang, X. P., Liu, S. Q., Han, Q., "Ultra Low Dark Current, High Responsivity and Thin Multiplication Region in InGaAs/InP Avalanche Photodiodes", *Chin. Phys. Lett.*, 29 (11): 118503 (2012).
57. Gu, Y., Zhang, Y. G., Wang, K., Fang, X., Li, C., Zhou, L., Li, A. Z., Li, H., "Effects of Growth Temperature and Buffer Scheme on Characteristics of InP-Based Metamorphic InGaAs Photodetectors", *Journal of Crystal Growth*, 378: 65-68 (2013).

58. Rouvie, A., Huet, O., Hamard, S., Truffer, J. P., Pozzi, M., Docebert, J., Costard, E., Zecri, M., Maillart, P., Reibel, Y., Pecheur, A., “SWIR InGaAs Focal Plane Arrays in France”, ***Proceedings of SPIE 8704, Infrared Technology and Applications XXXIX***, 870403 (2013).
59. Sze, S. M., “Semiconductor Devices: Physics and Technology 2nd ed.”, ***John Wiley and Sons, Inc.***, Newyork, 602-603 (2002).
60. Elachi, C. “Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing”. ***John Wiley & Sons, Inc.***, New York (1987).
61. Loudon, R, “The Quantum Theory of Light”, ***Third Edition, Cambridge University Press***, (2000).
62. Rogalski, A. and Chrzanowski, K., “Infrared devices and techniques”, ***Opto-Electronics Review*** 10(2): 111–136 (2002).
63. Daniels A., “Field Guide to Infrared Systems”, ***SPIE-The International Society for Optical Engineering***, 2007.
64. Goody, R.M., Yung, Y.L., “Atmospheric Radiation. Theoretical Basis”, ***Second Edition, Oxford University Press***, New York, (1989).
65. Tolungüç A., “Molecular Beam Epitaxy Growth and Characterization of Mercury Cadmium Telluride Epilayers for Infrared Detector Applications”, Yüksek Lisans Tezi, ***Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 6-19 (2011).
66. Marquis, M., “Handouts on thermal imaging system theory”, ***Texas Instruments Incorporated Defens System and Electronics***, (1996).
67. Öztürk A., “Kızılötesi Dedektör Teknolojilerinin İncelenmesi Ve Kritik Parametrelerin Dedektör Verimliliği Açısından Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, ***Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Ankara, 4-11 (2011).
68. Kartal D., “Kuantum Kuyulu Kızılötesi Fotodedektörler (QWIP)”, Yüksek Lisans Tezi, ***Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Sivas, 4-11 (2006).
69. P. L. Richards, “Bolometers for Infrared and Millimeter Waves”, ***J. Appl. Phys.***, 76: 1 (1994).
70. Z. Xu, H. Qiang, Y. Chen, C. Nie, “Effects of sintering temperature on the properties of donor-acceptor codoped Ba_{0.67}Sr_{0.33}TiO₃ ceramics for pyroelectric infrared detector applications”, ***Ceramics International***, 40: 4617–4621 (2014).

71. S. P. Langley, "The Bolometer," *Nature*, 25: 14–16 (1881).
72. Lang, S. B., "Pyroelectricity: A 2300-year history," *Ferroelectrics*, 7: 231–34 (1974).
73. Brewster, D., "Observation of Pyroelectricity of Minerals," *Edinburg Journal of Science*, 1: 208–214 (1824).
74. Ta, Y., "Action of Radiations on Pyroelectric Crystals," *Comptes Rendus*, 207: 1042–1044 (1938).
75. Chynoweth, A. G., "Dynamic Method of Measuring the Pyroelectric Effect with Special Reference to Barium Titanate," *Journal of Applied Physics*, 27: 78–84 (1956).
76. Cooper, J., "A Fast-Response Pyroelectric Thermal Detector," *Journal of Scientific Instruments*, 39: 467–472 (1962).
77. Cooper, J., "Minimum Detectable Power of a Pyroelectric Thermal Receiver," *Review of Scientific Instruments*, 33: 92–95 (1962).
78. Putley, E. H., "Semiconductors and Semimetals", *Academic Press*, New York, (1970).
79. Kruse, P. W., "Uncooled Thermal Imaging. Arrays, Systems, and Applications", *SPIE Press, Bellingham*, WA (2001).
80. Lang, S. B., "Pyroelectricity: From Ancient Curiosity to Modern Imaging Tool", *Physics Today* (2005).
81. Whatmore, R. W., Zhang, Q., C. Shaw, P., Dorey, R. A., Alock, J. R., "Pyroelectric Ceramics and Thin Films for Applications in Uncooled Infra-Red Sensor Arrays," *Physica Scripta*, T 129: 6–11 (2007).
82. Hansson, C., "Comparative study of infrared photodetectors based on kuantum wells (QWIPs) and quantum dots (QDIPs)", Doktora tezi, *Halmstad University*, İsviçre, 5-10 (2006).
83. Dereniak, E.L. and Boreman, G.D., "Infrared Detectors and Systems", *A Wiley-Interscience Publication*, 553-580 (1996).
84. Dentai, A. G., Kuchibhotla, R., Campbell, J. C., Tasi, C., Lei, C., "High Quantum Efficiency, Long-Wavelength InP/InGaAs Microcavity Photodiode," *Electronics Letters*, 27: 2125–27 (1991).
85. Ünlü, M. S., Strite, M. S., "Resonant Cavity Enhanced Photonic Devices," *Journal of Applied Physics*, 78: 607–39 (1995).

86. Singh J., “**Semiconductor Optoelectronics Physics and Technology**”, New York: McGraw-Hill (1995).
87. Wang, J. S., Shih, C. G., Chang, W. H., Middleton, J. R., Apostolakis, P. J., Feng, M., “11 GHz Bandwidth Optical Integrated Receivers Using GaAs MESFET and MSM Technology,” **IEEE Photonics Technology Letters**, 5: 316–318 (1993).
88. Dalfors, J., Lundström, T., Holtz, P. O., Radamson, H. H., Monemar, B., Wallin, J. and Landgren, G., “The electronic structure of InGaAs/InP quantum wells measured by Fourier transform photoluminescence excitation spectroscopy”, **J. Appl. Phys.**, 80 (12): 6855-6860 (1996).
89. Skolnick, M. S., Taylor, L. L., Bass, S. J., Pitt, A. D., Mowbray, D. J., Cullis, A. G. and Chew, N. G., “InGaAsInP multiple quantum wells grown by atmospheric pressure metalorganic chemical vapor deposition”, **Appl. Phys. Lett.**, 51: 24-26 (1987).
90. Gershoni, D., Vandenberg, J. M., Hamm, R. A., Temkin, H. and Panish, M. B., “Electronic energy levels in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ strained-layer superlattices”, **Phys. Rev. B**, 36 (2): 1320-1323 (1987).
91. Asar, T., “GaInP ve InGaAs Kuantum Kuyulu Güneş Pillerinin (QWSC) Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 44-80 (2009).
92. Müller, E. K., “Structure of Oriented, Vapor-Deposited GaAs Films, Studied by Electron Diffraction”, **J. Appl. Phys.**, 35: 580-585 (1964).
93. Schoolar, R. B., Zemel, J. N., “Preparation of Single-Crystal Films of PbS”, **J. Appl. Phys.**, 35: 1848-1851 (1964).
94. Hayashi, I., Panish, M. B. and Foy, P.W., “A low-threshold room-temperature injection laser”, **IEEE J. Quantum Electron.**, QE5: 211-212 (1969).
95. Osbourn, C. G., “Strained-layer superlattices from lattice mismatched materials”, **J. Appl. Phys.**, 53: 1586-1589 (1982).
96. Cho, A. Y., “Film Deposition by Molecular-Beam Techniques”, **J. Vac. Sci. Technol.**, 8: S31-S38 (1971).
97. Kaniewski, J. and Piotrowski, J., “InGaAs for infrared photodetectors. Physics and technology”, **Opto-Elec. Review**, 12 (1): 139-148 (2004).
98. Martinelli, R. U., Zamerowski, T.J. and Longeway, P. A., “2.6 μm InGaAs photodiodes”, **Appl. Phys. Lett.**, 53: 989-991 (1988).

99. M.R Ravi, DasGupta, A., DasGupta N., “Silicon nitride and polyimide capping layers on InGaAs/InP PIN photodetector after sulfur treatment”, *J. Cryst. Growth*, 268 (3–4): 359–363 (2004).
100. Dereniak, E.L., and Boreman, G.D., “Infrared Detectors and Systems”, *John Wiley & Sons, Inc.* (1996).
101. Özer, S., “InSb and InAsSb infrared photodiodes on alternative substrates and InP/InGaAs quantum well infrared photodetectors: pixel end focal plane array performance”, Doktora Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 100-213 (2005).
102. Bae, S.H., Lee, S.J., Kim, Y.H., Lee, H.C., Kim, C.K., “Analysis of 1/f Noise in LWIR HgCdTe Photodiodes”, *Journal of Electronic Materials*, 120 (29): 877-882 (2000).
103. Bajaj, J., “Excess 1/f noise in HgCdTe p-n junctions”, *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 3(1): 192-194 (1984).
104. Ozer, S., Besikci, C., “Assesment of InSb photodetectors on Si substrates”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36: 559-563 (2003).
105. Daniels, A., “Field Guide to Infrared Systems”, FG09, SPIE, 121: USA (2006).
106. Jones, R. C., “Performance of Detectors for Visible and Infrared Radiation”, *Advances in Electronics, Academic Press*, New York, 5, Morton, L.: 27–30, (1952).
107. Jones, R. C., “Phenomenological Description of the Response and Detecting Ability of Radiation Detectors,” *Proceedings of IRE* ,47: 1495–1502 (1959).
108. Brasunas, J.C., Lakew, B., Fettig, R., “A comment on the reported detectivity of a new uncooled thermal infrared detector”, *Sensors and Actuators A*, 96: 211–213 (2002).
109. Rogalski A., “Infrared Detectors: An Overview”, *Infrared Physics & Technology*, 43: 187–210 (2002).
110. Rogalski A., “History of Infrared Detectors”, *Opto–Electron. Rev.*, 20 (3): 279-308 (2012).
111. Rogalski A., “Infrared Detectors for The Future”, *Acta Physica Polonica A*, 116 (3): 389-406 (2009).
112. Lu, S., Ji, L., Dai, P., Yang, H., Arimochi, M., Yoshida, H., Uchida, S., and Ikeda, M., “High–efficiency GaAs and GaInP solar cells grown by all solid–state Molecular–Beam–Epitaxy”, *Nanoscale Res. Lett.*, 6: 576 (2011).

113. Frigeri, C., Attolini, G., Bosi, M., Pelosi, C., Germini, F., “Evaluation of the composition of the interlayer at the inverted interface in InGaP/GaAs heterojunctions”, **Superlattice Microst.**, 45: 451-457 (2009).
114. Kınacı, B., Özen, Y., Kızılkaya, K., Asar, T., Çetin, S.Ş., Boyalı, E., Öztürk, M.K., Memmedli, T., Özçelik, S., “Effect of alloy composition on structural, optical and morphological properties and electrical characteristics of $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/\text{GaAs}$ structure”, **J. Matter. Sci: Mater. El.**, 24: 1375–1381 (2013).
115. Frigeri, C., Attolini, G., Bosi, M., Pelosi, C., Germini, F., “Detection of the interlayer at the GaAs–on–InGaP interface in MOVPE InGaP/GaAs by the dark field method ”, **J. Matter. Sci: Mater. El.**, 19: 107–110 (2008).
116. Aydoğan, Ş., “Katıhal Fiziği”, **Nobel Yayınları**, 221–499 (2011).
117. Asar T., “GaInP ve InGaAs Kuantum Kuyulu Güneş Pillerinin (QWSC) Üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 40-44 (2009).
118. Kelekçi, Ö., “GaN Temelli Yüksek Elektron Mobiliteli Transistör (Hemt) Tasarımı, Fabrikasyonu ve Karakterizasyonu”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 42–60 (2011).
119. Lopez-Alonso, J. M., Alda, J., “Bad pixel identification by means of principal components analysis”, **Opt. Eng.** **41**(9): 2152–2157 (2002).
120. Hayat, M. M., Torres, S. N., Armstrong, E., Cain S. C. and Yasuda, B., “Statistical algorithm for nonuniformity correction in focal-plane arrays”, **Applied Optics**, 38 (8): 772-780 (1999).
121. Asar T., Özçelik S., Özbay E., Structural and Electrical Characterizations of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ Structures for Infrared Photodetector Applications, **Journal Applied Physics**, 115 (10): 104502 (2014).
122. Liu, J., Zhao, Y., Dong, Z., Yang, F., Wang, F., Cao, K., Liu, T., Xie, H., Chen, T., “Improvement of the Surface Quality of Semi-Insulating InP Substrates Through a Novel Etching and Cleaning Method”, **Journal of Vacuum Science & Technology A**, 31: 031404 (2013).
123. LEPTOS, *User Manual Version 2*, www.bruker-axs.de (2004).
124. Rhoderick, E.H. and Williams, R.H., “Metal-Semiconductor Contacts”, **Oxford: Clarendon** (1988).

125. Hbib, H., Bonnaud, O. and Fortin, B., “Electrical Characteristics of (n)-InP MIS Diodes With a PO_xN_y Interfacial Layer Deposited at Low Temperature”, ***Semicond. Sci. Technol.***, 12: 609-613 (1997).
126. Metzger, W. K., Wanlass, M. W., Ellingson, R. J., Ahrenkiel, R. K. and Carapella, J. J., “Auger Recombination in Low-Band-Gap”, ***Applied Physics Letters***, 79 (20): 3272-3274 (2001).
127. Ahrenkiel, R. K., Ellingson, R., Johnston, S. and Wanlass, M., “Recombination Lifetime of $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ as a Function of Doping Density”, ***Applied Physics Letters***, 72 (26): 3470-3472 (1998).
128. Lv, Y., Wang, N., Zhuang, C., Li, P., Han, B. and Gong, H., “The Uniformity of InGaAs in InP/InGaAs/InP by Microwave Photoconductivity Decay (μ -PCD) Carrier Lifetime Measurement”, ***Semicond. Sci. Technol.***, 21: 771-774 (2006).
129. Wang X. D., Hu W. D., Chen X. S., Lu W., Tang H. J., Li T., Gong H. M., “Dark Current Simulation of InP/ $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ /InP p-i-n Photodiode”, ***Opt. Quant. Electron***, 40: 1261–1266 (2008).
130. Kuphal, E., Mause, K., Miethe, K., Eisenbach, A., Fielder, F. and Corbet, A., “Electron Diffusion Length in InGaAs:Zn Derived From Heterostructure Bipolar Transistors”, ***Solid-State Electronics***, 38 (4): 795-799 (1995).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : ASAR, Tarık
 Uyruğu : T. C.
 Doğum Tarihi ve Yeri : 25.08.1983, Aydın
 Medeni Hali : Evli
 Telefon : 0 (532) 575 08 40
 e-posta : trkasar@gazi.edu.tr
 Yanancı Dil : İngilizce

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü	2014
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü	2009
Lisans	Gazi Üniversitesi / Fen Fakültesi	2007
Lise	Söke Yavuz Selim Lisesi	2001

Çalışma Alanları

- Kristal Büyütme (MBE, Czochralski yöntemleri)
- Kaplama (Sputtering, Evaporation sistemleri)
- Aygıt Üretimi (Fabrikasyon ve metalizasyon sistemleri)
- Yapısal Analiz (HRXRD, SIMS)
- Elektriksel Karakterizasyon (HMS, I-V)

A. Science Citation Index (SCI) Tarafından Taranan Dergilerde Yayınlanan Makaleler

- A1.** Tarık Asar, Süleyman Özçelik, Ekmel Özbay, “Structural and Electrical Characterizations of $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ Structures for Infrared Photodetector Applications”, *Journal of Applied Physics*, 115 (10), 104502 (2014).
- A2.** B. Kınacı, Y. Özen, T. Asar, S. Ş. Çetin, T. Memmedli, M. Kasap, S. Özçelik, “Study on Growth and Characterizations of $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/\text{GaAs}$ Solar Cell Structure”, *J Mater Sci: Mater Electron*, 24, 3269–3274 (2013).
- A3.** B. Kınacı, Y. Özen, K. Kızılkaya, T. Asar, S. Ş. Çetin, E. Boyalı, M. K. Öztürk, T. Memmedli, S. Özçelik, Effect of Alloy Composition on Structural, Optical and Morphological Properties and Electrical Characteristics of $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/\text{GaAs}$ Structure, *J Mater Sci: Mater Electron*, 24, 1375–1381 (2013).
- A4.** B. Kınacı, T. Asar, S.Ş. Çetin, Y. Özen, K. Kızılkaya, “Electrical Characterization of $\text{Au}/\text{ZnO}/\text{TiO}_2/\text{n-Si}$ and $(\text{Ni}/\text{Au})/\text{ZnO}/\text{TiO}_2/\text{n-Si}$ Schottky Diodes by Using Current Voltage Measurements”, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 14 (11- 12), 959 – 963 (2012).
- A5.** S. Çörekçi, K. Kızılkaya, T. Asar, M.K. Öztürk, M. Çakmak and S. Özçelik, “Effects of Thermal Annealing and Film Thickness on The structural and Morphological Properties of Titanium Dioxide Films”, *Acta Physica Polonica A*, 121, 247-249 (2012).
- A6.** A. Bengi, H. Uslu, T. Asar, S.Ş. Çetin, T.S. Mammadov, S.Özçelik, “Temperature dependent admittance spectroscopy of $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ single-quantum-well laser diodes (SQWLDs)”, *Journal of Alloys and Compounds*, 509, 2897–2902 (2011).
- A7.** B. Kinaci, T. Asar, Y. Ozen, S. Özçelik, “The Analysis of $\text{Au}/\text{TiO}_2/\text{N-Si}$ Schottky Barrier Diode at High Temperatures Using I-V Characteristics”, *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 5 (3-4), 434-437 (2011).
- A8.** M. Bosi, G. Attolini, C. Ferrari, C. Frigeri, M. Calicchio, E. Gombia, T. Asar, E. Boyalı, U. Aydemir, S. Ozcelik, and M. Kasap “Epitaxial Growth and Electrical Characterization of Germanium”, *Cryst. Res. Technol.*, 46 (8), 813-817 (2011).

- A9.** Saime S. Cetin, Baris Kinaci, **Tarık Asar**, Ilknur Kars, Mustafa K. Ozturk, Tofiq S. Mammadov, Suleyman Ozcelik, “Effect of Different P/As Ratio on the Optical and Structural Properties of $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x/\text{GaAs}$ ”, *Surface and Interface Analysis*, 42, 1252-1256 (2010).
- A10.** Altuntas, H., Bengi, A., **Asar, T.**, Aydemir, U., Sarıkavak B., Ozen Y., Altındal, Ş., Ozcelik, S., “Interface State Density Analyzing Of $\text{Au}/\text{TiO}_2(\text{Rutile})/\text{N-Si}$ Schottky Barrier Diode”, *Surface and Interface Analysis*, 42 (6-7), 1257-1260 (2010).
- A11.** **T. Asar**, B. Sarıkavak, M. Kemal Öztürk, T. Mammadov, S. Özçelik, “Effects of Annealing on The Structural Properties of Gaas-Based Quantum Well Solar Cells”, *Journal of Optoelectronics And Advanced Materials*, 11(11), 1627-1631 (2009).
- A12.** H. Altuntas, A. Bengi, U. Aydemir, **T. Asar**, S. S. Cetin, I. Kars, S. Altındal, S. Ozcelik, “Electrical Characterization of Current Conduction in $\text{Au}/\text{TiO}_2/\text{N-Si}$ at Wide Temperature Range”, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 12, 224-232 (2009).
- B. Diğer Index’ler Tarafından Taranan Dergilerde Yayınlanan Makaleler**
- B1.** Şafak Doğan, Nihan Akın, Ceren Başköse, **Tarık Asar**, Tofiq Memmedli and Süleyman Özçelik, “Porous Silicon: Volume-Specific Surface Area Determination from AFM Measurement Data”, *Journal of Materials Science and Engineering B*, 3 (8) 518-523 (2013).
- B2.** **Tarık Asar**, Barış Kınacı, Umut Aydemir, Tofiq Mammadov, Süleyman Özçelik, “Characterization of MBE Grown $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ Quantum Well Solar Cells (QWSCs)”, *Azerbaijan Journal of Physics, Fizika*, XVI(2), 460-462 (2010).
- B3.** Barış Kınacı, **Tarık Asar**, Yunus Özen, Şemsettin Altındal, Tofiq Mammadov, Süleyman Özçelik, “Temperature Dependence Electrical Characteristics of n- GaAs Structure Grown by MBE”, *Azerbaijan Journal of Physics, Fizika*, XVI(2), 335-338 (2010).
- B4.** U. Aydemir, İ. Taşcıoğlu, **T. Asar**, V.J. Mamedova, T.S. Mammadov, “The C-V-f and G/w-V-f Characteristics of $\text{Au}/\text{SrTiO}_3/\text{n-Si}$ Schottky Barrier Diodes (SBDs) With Interfacial Layer”, *Azerbaijan Journal of Physics, Fizika*, XVI(2), 223-226 (2010).

- B5.** Saime Şebnem Çetin, **Tarık Asar**, Süleyman Özçelik, “Effect of thermal annealing on the structural properties of TiO₂ thin film prepared by RF sputtering”, *Azerbaijan Journal of Physics, Fizika*, XVI(2), 250-253 (2010).
- B6.** B. Kınacı, **T. Asar**, S. Ş. Çetin, T. S. Mammadov, S. Özçelik, “Epitaxial Growth and Characterization of GaAs_{1-x}P_x/GaAs Structures”, *Balkan Physics Letters*, 15 (1), 151049, (2009).
- B7.** Korucu D., **Asar T.**, Kınacı B., Aydemir U., Mammadov T. S., Özçelik S., “Series resistance effect on I-V characteristics of Au/n-InP Schottky barrier diodes (SBDs) in the temperature range of 80-400 K”, *Azerbaijan Journal of Physics, Fizika*, XV(2), 195-198 (2009).

C. Uluslararası Kongre Tebliğleri

- C1.** **T. Asar**, E. Özbay, S. Özçelik “The Characterizations of the InGaAs / InP Infrared Photodetector”, 93, Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 2-5 September 2013, İstanbul, Turkey.
- C2.** **T. Asar**, S. Özçelik, G. Attolini, M. Baldini, M. Bosi, E. Buffagni, C. Ferrari, E. Gombia, F. Melino, “Theoretical and Experimental Study of a Thermophotovoltaic System Based on Germanium”, 407, Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 2-5 September 2013, İstanbul, Turkey.
- C3.** H. İ. Efker, K. Kızılkaya, **T. Asar**, Y. Özen, B. Kınacı, T. Karaaslan, S. Ö. Yıldırım, S. ÖZÇELİK, “The Electrical Properties of the TiO₂ AR Coated InGaAs/GaAs SLSCs”, 428, Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 2-5 September 2013, İstanbul, Turkey.
- C4.** S. Ş. Çetin, **T. Asar**, N. Akın, H. İ. Efker, E. Pişkin, Ü. C. Başköse, G. Kurtuluş, S. Sağlam, T. Memedli, S. Özçelik, “Structural and Optical Properties of RF Sputtered AZO Thin Films on Different Substrates”, Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 489, 2-5 September 2013, İstanbul, Turkey.
- C5.** S. Ş. Çetin, K. Kızılkaya, **T. Asar**, S. Özçelik, “Epitaxial Growth and Characterization of GaP on Si Substrate”, 491, Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 2-5 September 2013, İstanbul, Turkey.

- C6.** B. Kınacı, Y. Özen, K. Kızılkaya, N. Akın, **T. Asar**, G. Kurtuluş, S.Ş. Çetin, T. Memmedli, S. Özçelik, “The Structural, Morphological and Electrical Characterizations of $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/\text{GaAs}/\text{Ge}$ Triple Junction Solar Cell Structure”, 524, Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 2-5 September 2013, İstanbul, Turkey.
- C7.** S. Özçelik, S. S. Çetin, B. Kınacı, Y. Özen, M. Bosi, **T. Asar**, M. Kasap, T. Memmedli, “Structural and Optical Properties of Double Junction InGaP/GaAs Solar Cell”, 539, Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 2-5 September 2013, İstanbul, Turkey.
- C8.** Y. Özen, B. Kınacı, **T. Asar**, S. Ş. Çetin, S. Özçelik, “Study on the Designs of Concentrator for CPV Systems”, 542, Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 2-5 September 2013, İstanbul, Turkey.
- C9.** **T. Asar**, K. Kızılkaya, B. Kınacı, Y. Özen, and S. Özçelik, “ Si_3N_4 AR Coating Effect to The $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ QWSC”, 496, Turkish Physical Society 29th International Physics Congress, 5-8 September 2012, Bodrum, Turkey.
- C10.** **T. Asar**, K. Kızılkaya, M. Abdolapour Salari, E. Pişkin, G. Kurtuluş, H.İ. Efkere, T.S. Memmedli and S. Özçelik, “The Fabrication of ZnO Thin Films: Effect of Oxygen Addition”, 664, Turkish Physical Society 28th International Physics Congress, 6-9 September 2011, Bodrum, Turkey.
- C11.** B. Kınacı, **T. Asar**, Y. Özen, S.Ş. Çetin, T. Mammadov and S. Özçelik, “Current-Voltage (I-V) Characteristics of $\text{Au}/\text{ZnO}/\text{TiO}_2/\text{n-Si}$ Structure at Room Temperature”, 759, Turkish Physical Society 28th International Physics Congress, 6-9 September 2011, Bodrum, Turkey.
- C12.** S. Ş. Çetin, S. Özçelik, **T. Asar**, Y. Özen, “Structural and optical properties of the TiO_2 thin film on p-Si”, 614, Turkish Physical Society 27th International Physics Congress, 14-17 September 2010, İstanbul, Turkey.
- C13.** B. Kınacı, **T. Asar**, Y. Özen, S. Ş. Çetin, T. Mammadov, S. Özçelik, “ $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ multi quantum well structure: MBE growth and characterization”, 658, Turkish Physical Society 27th International Physics Congress, 14-17 September 2010, İstanbul, Turkey.
- C14.** **T. Asar**, B. Kınacı, K. Kızılkaya, T. Mammadov, S. Özçelik, “Investigation of the Photovoltaic Properties of p-n Junction Ge Obtained by Arsenic Diffusion”, 515, Turkish Physical Society 27th International Physics Congress, 14-17 September 2010, İstanbul, Turkey.

- C15.** S. Ş. Çetin, B. Kınacı, **T. Asar**, İ. Kars, M. K. Öztürk, T. S. Mammadov, S. Özçelik, “Effect of Different As/P Ratio on the Optical and Structural Properties of $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x/\text{GaAs}$ ”, 13th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis, 320, October 18-23, 2009, Antalya, Turkey.
- C16.** **T. Asar**, A. Bengi, U. Aydemir, T. S. Mammadov, Ş. Altındal, S. Özçelik, “Characterization of MBE Grown InGaAs/GaAs Quantum Well Solar Cells (QWSCs)”, 302, 13th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis, October 18-23, 2009, Antalya, Turkey.
- C17.** **T. Asar**, B. Sarıkavak, M. K. Öztürk, T. Mammadov, S. Özçelik “Annealing influences on the structural properties of InGaAs/GaAs quantum well solar cell (QWSC) samples”, 321, 13th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis, October 18-23, 2009, Antalya, Turkey.
- C18.** H. Altıntaş, A. Bengi, **T. Asar**, U. Aydemir, B. Sarıkavak, Y. Ozen, Ş. Altındal, S. Özçelik, “Interface state density analyzing of Au/TiO₂(rutile)/n-Si Schottky barrier diode”, 322, 13th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis, October 18-23, 2009, Antalya, Turkey.
- C19.** S. Özçelik, **T. Asar**, U. Aydemir, B. Kınacı, A. Bengi, S. Ş. Çetin, M. K. Öztürk, T. S. Mammadov, “GaInP/GaAs ve Si Güneş Pillerinin Üretilmesi”, 162, Nuclear&Renewable Energy Resources Conference with International Participation”, September 28-29, 2009, Ankara, Turkey.
- C20.** S. Ş. Çetin, S. T. Agaliyeva, B. Kınacı, **T. Asar**, H. Altıntaş, T. S. Mammadov, S. Özçelik, “Temperature dependence Photoluminescence Study of $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x/\text{GaAs}$ Structure”, 263-265, Fifth International Scientific-Technical Conference: Topical Problems of Physics, June 25-27 2008, Baku, Azerbaijan.
- C21.** Kınacı, B., **Asar, T.**, Çetin, S. Ş., Mammadov, T. S. and Özçelik, S., “Epitaxial growth and characterization of $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x/\text{GaAs}$ structures”, Turkish Physical Society 25th International Physical Congress Pressed in Book Of Abstracts, Turkey, 2008.

D. Ulusal Kongre Tebliğleri

- D1.** **T. Asar**, Y. Özen ve S. Özçelik, “InGaAs/InP Yapılarının Yapısal ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi”, P69, 19. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 20 Aralık 2013, Ankara, Türkiye.

- D2.** E. Pişkin, G. Kurtuluş, K. Kızılkaya, H. İ. Efker, **T. Asar**, S. Ş. Çetin ve S. Özçelik, “n-GaP/Si Yapılarının Büyütülmesi ve Yapısal Analizleri”, P66, 19. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 20 Aralık 2013, Ankara, Türkiye.
- D3.** G. Kurtuluş, H. İ. Efker, E. Pişkin, **T. Asar**, S. Özçelik, “ZnO/p-Si Filmlerinin Foto-duyarlılıklarının İncelenmesi”, P64, 19. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 20 Aralık 2013, Ankara, Türkiye.
- D4.** H. İ. Efker, G. Kurtuluş, E. Pişkin, S. Ş. Çetin, **T. Asar**, T. Karaaslan ve S. Özçelik, “InGaAs/GaAs Süperörgü Yapılarının Optik Özelliklerinin Belirlenmesi”, P32, 19. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 20 Aralık 2013, Ankara, Türkiye.
- D5.** Y. Çat, V. Baran, **T. Asar**, S. Ş. Çetin, T. Memmedli, S. Özçelik, “Hacimli Tek Kristal Ge Büyütülmesi ve Optik Karakterizasyonu”, P56, 19. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 20 Aralık 2013, Ankara, Türkiye.
- D6.** **T. Asar**, B. Kinaci, Y. Özen, K. Kızılkaya, S.S. Çetin, T. Memmedli and S. Özçelik, “Investigation of the Photovoltaic Properties of InGaP/GaAs/Ge Solar Cells”, Second Turkish Solar Enegy Conference and Exhibition SolarTR-2, 7-9 November 2012, Antalya, Turkey.
- D7.** **T. Asar**, B. Kınacı, K. Kızılkaya, Y. Özen, T. Memmedli ve S. Özçelik, “ZnO/p-Si Güneş Hücrelerinin Fabrikasyonu”, 18. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 25 Kasım 2011, Ankara, Türkiye.
- D8.** **T. Asar**, S.Ş. Çetin, G. Kurtuluş, E. Pişkin, H.İ. Efker, T. Memmedli ve S. Özçelik, “GaAs Güneş Hücrelerin Farklı Fabrikasyonlarının Hücre Verimine Etkisi”, 18. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 25 Kasım 2011, Ankara, Türkiye.
- D9.** S. Ş. Çetin, **T. Asar**, Y. Özen, G. Kurtuluş, T. Memmedli ve S. Özçelik, “Çinko Oksit Yapılarının Optik ve Yapısal Özelliklerine Film Kalınlığının Etkisinin İncelenmesi”, 18. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 25 Kasım 2011, Ankara, Türkiye.
- D10.** **Tarık Asar**, Umut Aydemir, Tofiq Mammadov, Süleyman Özçelik, “GaInP and InGaAs Quantum Well Solar Cells (QWSCs)”, First Turkish Solar Enegy Conference and Exhibition SolarTR-1, 29-30 April 2010, Ankara, Turkey.

- D11.** B. Kınacı, A. Bengi, **T. Asar**, S. Ş. Çetin, T. S. Mammadov, S. Özçelik, “ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /GaAs Çoklu Kuantum Kuyu Yapısının MBE Tekniği ile Büyütülmesi: Yapısal ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi”, 16. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 6 Kasım 2009, Ankara, Türkiye.
- D12.** İ. Kars, **T. Asar**, S. Ş. Çetin, M. K. Öztürk, S. Özçelik, “Tavlama Sıcaklığının TiO_2 Filmleri Üzerindeki Etkisi”, 16. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 6 Kasım 2009, Ankara, Türkiye.
- D13.** U. Aydemir, İ. Taşçıoğlu, **T. Asar**, Y. Şafak, Ş. Altındal. T. S. Mammadov, S. Özçelik, “Au/SrTiO₃/n-Si Yapısındaki Derin Seviyelerin Tavlama Bağılı DLTS Metodu ile Karakterizasyonu” 16. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 6 Kasım 2009, Ankara, Türkiye.
- D14.** **T. Asar**, U. Aydemir, B. Kınacı, T. S. Mammadov, S. Özçelik, “InGaAs/GaAs Çoklu Kuantum Kuyulu Güneş Pili Fabrikasyonu”, 16. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 6 Kasım 2009, Ankara, Türkiye.
- D15.** **Tarık Asar**, Barış Kınacı, İlknur Kars, Tofig Mammadov, Süleyman Özçelik, “InP/InP ve GaAsP Yapılarının MBE ile Büyütülmesi: Kırılma İndisi ve Tabaka Kalınlıklarının Belirlenmesi”, 15. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 7 Kasım 2008, Ankara, Türkiye.
- D16.** Barış Kınacı, **Tarık Asar**, İlknur Kars, Tofig Mammadov, Süleyman Özçelik, “ $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /GaAs Çoklu Kuantum Kuyulu Fotodedektör Yapısının MBE ile Büyütülmesi ve Yapısal Analizi”, 15. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 7 Kasım 2008, Ankara, Türkiye.
- D17.** İlknur Kars, **Tarık Asar**, Barış Kınacı, Tofig Mammadov, Süleyman Özçelik, “InGaAs/GaAs Yapılarının MBE ile Büyütülmesi ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi”, 15. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 7 Kasım 2008, Ankara, Türkiye.

E. GÖREV ALDIĞI PROJELER

- E1.** “Üç eklemlili Güneş Pillerinin Üretim Teknolojisinin Kazanımı ve Model Modül Üretimi”, SANTEZ Projesi, Proje No: 00587.STZ.2010-1, *Yardımcı Personel*.
- E2.** “Üç eklemlili Güneş Pillerinin Üretim Teknolojisinin Kazanımı ve Model Modül Üretimi”, SANTEZ Projesi, Proje No: 00587.STZ.2010-1, *Bursiyer*.

- E3.** “MOVPE growth and characterization of epitaxial Germanium for infrared photovoltaic and sensor applications”, TÜBİTAK Projesi, Proje No: 209T051, *Bursiyer*.
- E4.** “Kızılötesi AlGaAs Lazer Diyot Malzemelerinin Epitaksiyel Üretimi ve Karakterizasyonu”, TÜBİTAK Projesi, Proje No: 108T018, *Bursiyer*.
- E5.** “Ga_xIn_{1-x}P/GaAs Kuantum Kuyulu Güneş Pili (QWSC) Üretimi”, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi, Proje No: FEF.05/2010-34, *Araştırmacı*.
- E6.** “InGaAs/GaAs Yapıların Optiksel ve Yapısal Özelliklerinin Tavlama Sıcaklığına Bağlı İncelenmesi”, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi, Proje No: FEF.05/2009-57, *Araştırmacı*.
- E7.** “Metal/Yarıiletken (MS) Yapıların Hazırlanması ve Elektriksel Karakteristiklerinin Tavlama Sıcaklığına Bağlı İncelenmesi”, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi, Proje No: FEF.05/2008-24, *Araştırmacı*.

F. EĞİTİM VE SERTİFİKALAR

- F1.** “Türk Standartları Enstitüsü İç Kalite Tetkiki Eğitimi” 12-13 Mayıs 2007, Ankara, Türkiye.
- F2.** “Türk Standartları Enstitüsü Proseslerin Yönetimi, Etkileşimi ve İyileştirme Teknikleri Eğitimi” 10-11 Mayıs 2007, Ankara, Türkiye.
- F3.** “LightTools Yazılım” Sertifikası

G. KATILDIĞI YARIŞMA VE YAZ OKULU

- G1.** Balkan Physical Union 1st International Physics Symposium and Festival & Inter-University Physics Projects Competition, 4-6 September 2007, Bodrum, Türkiye.
- G2.** “Fotonik Malzemeler ve Aygıtlar Lisansüstü Yaz Okulu”, 19-23 Mayıs 2008, Sivas, Türkiye.

H. KATILDIĞI TOPLANTILAR, KONFERANSLAR VE KONGRELER

- H1.** Türk Fizik Derneği 30. Uluslararası Fizik Kongresi, 2-5 Eylül 2013, İstanbul, Türkiye.
- H2.** 19. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 20 Aralık 2013, Ankara, Türkiye.
- H3.** Solar Electricity Conference and Exhibition SolarTR-2, 7-9 November 2012, Antalya, Turkey.
- H4.** Türk Fizik Derneği 29. Uluslararası Fizik Kongresi, 5-8 Eylül 2012, Bodrum, Türkiye.
- H5.** 18. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 25 Kasım 2011, Ankara, Türkiye.
- H6.** Türk Fizik Derneği 28. Uluslararası Fizik Kongresi, 6-9 Eylül 2011, Bodrum, Türkiye.
- H7.** 17. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 5 Kasım 2010, Ankara, Türkiye.
- H8.** Türk Fizik Derneği 27. Uluslararası Fizik Kongresi, 14-17 Ağustos 2010, İstanbul, Türkiye.
- H9.** First Turkish Solar Enegy Conference and Exhibition SolarTR-1, 29-30 April 2010, Ankara, Turkey.
- H10.** International Conferance “Physics 2010”, 30 June – 2 July 2010, Baku, Azerbaijan.
- H11.** 16. Yoğun Madde Fiziği Kongresi, 6 Kasım 2009, Ankara, Türkiye.
- H12.** 13th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis, October 18-23, 2009, Antalya, Turkey.
- H13.** 15. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, 7 Kasım 2008, Ankara, Türkiye.
- H14.** Türk Fizik Derneği 25. Uluslararası Fizik Kongresi, 25-29 Ağustos 2008, Bodrum, Türkiye.
- H15.** Türk Fizik Derneği 24. Uluslararası Fizik Kongresi, 28-31 Ağustos 2007, Malatya, Türkiye.

I. BİLİMSEL TOPLANTI DÜZENLEME

- I1.** Türk Fizik Derneği 31. Uluslararası Fizik Kongresi Düzenleme Kurulu Üyeliği, 21-24 Temmuz 2014, Bodrum, Türkiye.
- I2.** Türk-Alman Yılı Çalıştayı Düzenleme ve Bilim Kurulu Üyeliği, 3-5 Temmuz 2014, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- I3.** Türk Fizik Derneği 25. Uluslararası Fizik Kongresi Düzenleme Kurulu Üyeliği, 25-29 Ağustos 2008, Bodrum, Türkiye.

J. ÖDÜLLER

- J1.** Gazi Üniversitesi 2011 Yılı Yayın Teşvik Ödülü
- J2.** Gazi Üniversitesi 2012 Yılı Yayın Teşvik Ödülü
- J3.** Gazi Üniversitesi 2013 Yılı Yayın Teşvik Ödülü