



**N-YAPILI InAs/AlSb/GaSb KIZILÖTESİ
SÜPERÖRGÜ DEDEKTÖRLERİN TEST
PİKSEL VE ODAK DÜZLEM DİZİN
FABRİKASYONU VE KARAKTERİZASYONU**

Doktora Tezi

Seval ŞAHİN

Eskişehir 2023

**N YAPILI INAS/ALSB/GASB KIZILÖTESİ SÜPERÖRGÜ DEDEKTÖRLERİN
TEST PİKSEL VE ODAK DÜZLEM DİZİN FABRİKASYONU VE
KARAKTERİZASYONU**

Seval ŞAHİN

Doktora Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Yüksel ERGÜN

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Haziran 2023

Bu tez çalışması 119F147, 120F311 ve 120F215 numaralı TÜBİTAK-1001 projeleri kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Seval ŞAHİN'nin N YAPILI INAS/ALSB/GASB KIZILÖTESİ SÜPERÖRGÜ DEDEKTÖRLERİN TEST PİKSEL VE ODAK DÜZLEM DİZİN FABRİKASYONU VE KARAKTERİZASYONU başlıklı çalışması 12/06/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Fizik Anabilim dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye

: Prof. Dr. Abidin KILIÇ

Üye

: Prof. Dr. Ebru ŞENADIM TÜZEMEN

Üye

: Prof. Dr. Hüseyin SARI

Üye

: Prof. Dr. Mustafa HOŞTUT

Üye

: Prof. Dr. Tayfun AKIN

Prof. Dr. Semra KURAMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

12/06/2023

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Doktora ęrencisi Seval şAHİN, N YAPILI INAS/ALSB/GASB KIZILÖTESİ SÜPERÖRGÜ DEDEKTÖRLERİN TEST PİKSEL VE ODAK DÜZLEM DİZİN FABRİKASYONU VE KARAKTERİZASYONU başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Daniřmanı

Prof. Dr. Yüksel ERGÜN

ÖZET

N YAPILI INAS/ALSB/GASB KIZILÖTESİ SÜPERÖRGÜ DEDEKTÖRLERİN TEST PİKSEL VE ODAK DÜZLEM DİZİN FABRİKASYONU VE KARAKTERİZASYONU

Seval ŞAHİN

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Bilim Dalı

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Haziran 2023

Danışman: Prof. Dr. Yüksel ERGÜN

Bu tez çalışmasında, kısa ve orta dalgaboylarında algılama yapan N tasarımı InAs/AlSb/GaSb süperörgü yapıların fotodedektör aygıt üretimleri ve karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. N tasarımı süperörgü yapılarına, AlGaSb bariyer katmanı dahil edilerek pBin e-SWIR ve nBn tek ve çift renkli MWIR aralığında çalışan üç ayrı dedektör yapı tasarımı yapılmıştır. Çalışma kapsamında, test piksel ve odak düzlem dizin (FPA) dedektör fabrikasyon basamakları optimize edilmiş, tekrar edilebilir ve homojen aygıt üretim reçeteleri oluşturulmuştur. Test piksel dedektörü, pBin tasarımı e-SWIR dalgaboyunda çalışan yapılardan üretilmiştir. Farklı boyutlardaki test piksellerinin sıcaklığa bağlı elektro-optik karakterizasyonları yapılmıştır. 125 K sıcaklığında ve $-0,1V$ ön gerilim altında, karanlık akım yoğunluğu $3,9 \times 10^{-6} A/cm^2$, %100 kesim dalgaboyu $3,2 \mu m$, tepe noktası kuantum verimliliği %55 civarında ölçülmüştür. Literatürle karşılaştırıldığında, kısa dalgaboyunda geniş algılama aralığı ve oldukça iyi dedektör performans değerleri, N-yapılı süperörgü tasarımlarının potansiyelini net bir şekilde göstermiştir. Çalışmanın devamında, orta dalgaboyunda çalışan tek ve çift renkli dedektör yapılarından FPA'ler üretilmiştir ve soğutulan detektörlerden MWIR bantlarında termal görüntüler alınmıştır. Üretilen ve kızılötesi görüntüleme yapılan her bir dedektörün elektro-optik performans haritaları ve histogramları ayrıntılı olarak incelenmiş ve fabrikasyonun dedektör performansına etkisi değerlendirilmiştir. N yapılı MWIR/MWIR çift renkli dedektörden ilk termal görüntü uzun dalgaboyunda başarıyla alınmıştır.

Anahtar Sözcükler: Süperörgü, InAs/AlSb/GaSb, pBin, nBn, Kızılötesi.

ABSTRACT

TEST PIXEL AND FOCAL PLANE ARRAY FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF N-STRUCTURE INAS/ALSB/GASB INFRARED SUPERLATTICE DETECTORS

Seval ŞAHİN

Department of Physics

Programme in Solid State

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, June 2023

Supervisor: Prof. Dr. Yüksel ERGÜN

In this thesis, photodetector device production and characterization of InAs/AlSb/GaSb superlattice structures that detect at short and medium wavelengths were carried out. In N structure superlattice designs, AlGaSb barrier layer was also included in the design and three different designs were used: pBin e-SWIR and MWIR, and nBn dual color MWIR/MWIR designs. Within the scope of the study, various steps of fabrication were optimized for test detector and focal plane array (FPA) productions and thus repeatable and homogeneous productions could be made. Test detectors were fabricated using pBin e-SWIR structure, and electro-optical performances with respect to temperature were measured. In e-SWIR, dark current density was measured as $3,9 \times 10^{-6}$ A/cm² under -0,1 V bias voltage at 125 K, 100% cutoff wavelength was 3,2 µm, and peak quantum efficiency was around 55%. Compared to the literature, the structure's very wide spectral detection range in the SWIR window and its very high electro-optical performance values show the high potential of N-structure designs in the field. Snapshot thermal images were taken from single and dual color MWIR FPAs developed and produced in this study. Cracks in the detector material that occur during cooling are instantly displayed. The electro-optical performance maps and histograms of the pixels of the produced FPAs were examined in detail. Successful infrared imaging was performed on the long wavelength side of the dual color MWIR/MWIR detector.

Keywords: Superlattice, InAs/AlSb/GaSb, pBin, nBn, Infrared.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamda bilgi ve birikimleri ile bana yol gösteren, zor zamanlarımda anlayışıyla çalışmalarımı kolaylaştıran tez danışmanım değerli hocam Prof. Dr. Yüksel Ergün'e

Teorik hesaplamalarıyla yapı tasarımlarını özgün kılan ve yüksek motivasyonuyla büyük bir itici güç oluşturan Prof. Dr. Mustafa Hoştut'a

Engin bilgileriyle çalışmalarımı destekleyen, imkanlarını sunan ve ODTÜ-MEMS Merkezinin kapısını bana açan Prof. Dr. Tayfun Akın'a

Değerli fikir ve görüşlerini paylaşarak deneysel ve teorik çalışmalarına büyük katkı sağlayan, içten yaklaşımıyla yardımlarını esirgemeyen ve yaşadığım zor zamanlarda desteğini hissettirerek bana güç veren Dr. Selçuk Özer'e

Her zaman çalışmalarımı destekleyen ODTÜ-MEMS ailesine ve kıymetli çalışma arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Senin evladın olmak Dünya'nın en büyük ayrıcalığı ve hayatımın en büyük şansı, canımın içi babam Mustafa Şahin'e sonsuz şükran ve minnetle, senin için...

Seval ŞAHİN

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Seval ŞAHİN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER.....	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
GÖRSELLER DİZİNİ	XV
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XX
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kızılötesi Radyasyon ve Uygulamaları	4
1.1.1. Elektromanyetik spektrum.....	4
1.1.2. Termal ışıma ve yasaları.....	5
1.1.3. Atmosferik pencere	7
1.1.4. Kızılötesi uygulama alanları.....	8
1.2. Kızılötesi Görüntüleme Teknolojileri.....	12
1.2.1. Termal dedektörler	12
1.2.2. Foton dedektörleri.....	13
1.2.2.1. Fotoiletken dedektörler.....	14
1.2.2.2. Fotovoltaik dedektörler.....	16
1.2.3. Dedektör teknolojilerinin karşılaştırması	17
1.3. Dedektör Performans Parametreleri.....	20
1.3.1. Tepkisellik	20
1.3.2. Gürültü eşlenik gücü-NEP.....	21

1.3.3. Detektivite	22
1.3.4. Gürültü eşdeğer sıcaklık farkı-NETD	23
1.3.5. Karanlık akım.....	23
2. TİP-II SÜPERÖRGÜ KIZILÖTESİ DEDEKTÖRLER	26
2.1. Süperörgü	27
2.2. Bariyer Yapısı.....	32
2.2.1. pBn dedektörler	34
2.2.2. nBn dedektörler	37
2.3. Tip-II Süperörgü Dedektör Yapıları.....	40
2.4. SWIR ve MWIR Aralıklarında Çalışan Fotodedektörler	43
3. SÜPERÖRGÜ YAPI TASARIMI VE ANALİZİ	56
3.1. Bant Aralığının Teorik Hesaplaması.....	56
3.2. e-SWIR Epikatman Tasarımı	59
4. TEST PİKSEL ÜRETİMİ, OPTİMİZASYONU VE KARAKTERİZASYONU	65
4.1. Test Dedektör Üretim Optimizasyonları	65
4.1.1. Piksel aşındırma optimizasyonu.....	66
4.1.2. Pasivasyon üretim optimizasyonu.....	79
4.2. Test Dedektör Üretimi	83
4.3. Test Dedektör Karakterizasyonu.....	96
5. ODAK DÜZLEM DİZİN DEDEKTÖRÜ ÜRETİMİ, OPTİMİZASYONU VE KARAKTERİZASYONU	103
5.1. FPA Proses Optimizasyonları	104
5.1.1. Omik kontak optimizasyonu	106
5.1.2. Pasivasyon litografi optimizasyonu	110
5.1.3. İndiyum topçuk optimizasyonu.....	115
5.2. Odak Düzlem Dizin-FPA Üretimi	119
5.3. FPA Test ve Karakterizasyonu	125
5.3.1. N-pBin yapılı MWIR dalgaboyunda FPA görüntüleme	128
5.3.2. N-nBn yapılı MWIR/MWIR çift dalgaboylu FPA görüntüleme.....	134

6. SONUÇ 138

KAYNAKÇA..... 141

ÖZGEÇMİŞ



TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1.1.	Kızılötesi fiziği ve teknolojisinin gelişimindeki kilometre taşları [1]	2
Tablo 1.2.	Kızılötesi spektrumun sınıflandırılması ve bant aralıkları	8
Tablo 1.3.	Termal dedektör çeşitleri ve algılama yöntemleri [6]	13
Tablo 1.4.	MWIR dalgaboyunda çalışan Kızılötesi dedektör performans değerleri [9]	19
Tablo 2.1.	nbn ve pin fotodedektörün karanlık akım mekanizmalarının karşılaştırması [19]	39
Tablo 2.2.	SWIR aralığında çalışan dedektör teknolojilerinin performans karşılaştırılması [42]	44
Tablo 2.3.	Son yıllar da InAsSb bariyer MWIR dedektörlerin oda sıcaklığındaki performansları [55]	51
Tablo 2.4.	T2SL FPA dedektör çalışan enstitü ve firmaların performans karşılaştırması [60]	55
Tablo 4.1.	Süperörgü yapılarında bugüne kadar kullanılmış ıslak kimyasal aşındırıcılar	67
Tablo 4.2.	HCl tabanlı aşındırıcıya ait özet aşındırma tablosu	69
Tablo 4.3.	C ₆ H ₈ O ₇ ve HCl tabanlı aşındırıcılara ait aşındırma tablosu	70
Tablo 4.4.	Standart çözelti karışım oranlarına göre aşındırma tablosu	72
Tablo 4.5.	Farklı karışım oranlarındaki standart aşındırıcının aşındırma hızı tablosu	77
Tablo 4.6.	Tek piksel örneklerinin aşındırma uygulama tablosu	78
Tablo 4.7.	Pasivasyon kaplama sıcaklıkları	79

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1.	Elektromanyetik Spektrum (http-1)	4
Şekil 1.2.	Farklı sıcaklıklardaki kara cisim spektrumu	6
Şekil 1.3.	Atmosferik Pencere (http-2).....	7
Şekil 1.4.	Foto iletkenlerin a) Katkısız, b) n-tipi katkı ve c) p-tipi katkı bant diyagramları	15
Şekil 1.5.	Harici gerilim altındaki tip-I (GaAs/AlGaAs) süperörgü yapılı bir fotoiletken detektör şeması	15
Şekil 1.6.	p-n eklemli foton detektörünün çalışması	16
Şekil 1.7.	p-i-n yapıdaki InAs/GaSb tip-II SL PV dedektör yapısı ve PV dedektörlerin çalışma mekanizmasının şematik çizimi [7]	17
Şekil 1.8.	Dar bant aralıklı pin diyotunda meydana gelen SRH, G-R, BTB ve TAT akım mekanizmalarının çizimi	24
Şekil 2.1.	Tip-II süperörgü yapısının oluşumu.....	27
Şekil 2.2.	Tip-II Süperörgü bant yapısı oluşumu	28
Şekil 2.3.	(a) Yarıiletken malzemelerin örgü sabiti ve enerji bant aralık grafiği (http-13) (b) 6,1 Å Ailesi'nin birbirlerine göre bant durumları ve enerji aralıkları.....	29
Şekil 2.4.	Süperörgü ve çoklu kuantum kuyularının (a) Tip-I, (b) Tip-II (Basamak), (c) Tip-II (Kırık) ve (d) Tip-III bant dizilim diyagramları	31
Şekil 2.5.	Elektron ve Deşik bariyerlerinin temsili gösterimi	33
Şekil 2.6.	Yarıiletken tipine göre bariyer yapılarının temsili çizimi	33
Şekil 2.7.	Tek kutuplu bariyer yapı tasarımlarının temsili çizimi	34
Şekil 2.8.	pBn yapısına ait akım mekanizmaları	35
Şekil 2.9.	Standart bir InAs ve n-kutuplu bariyer fotodiyotlarının sıcaklığa bağlı R_0A grafiği [15].....	36
Şekil 2.10.	Farklı bariyer katkılama oranlarındaki ve 77 K de pBn yapının bant ve karanlık akım yoğunluğunun teorik hesaplamaları [16].....	36
Şekil 2.11.	pBn dedektörleri için (a) düşük, (b) ideal ve (c) yüksek bariyer katkı oranlarına göre bant diyagramları ve akım mekanizmaları [16]	37

Şekil 2.12.	nbn yapısına ait akım mekanizmaları.....	38
Şekil 2.13.	Standart pin fotodiyotun ve nBn yapısının karanlık akım şematik Arrhenius grafiği [17]	39
Şekil 2.14.	Farklı bariyer katkılama oranlarındaki ve 77 K de nBn yapının bant ve karanlık akım yoğunluğunun teorik hesaplamaları akım [16].....	40
Şekil 2.15.	nBn dedektörleri için (a) düşük, (b) ideal ve (c) yüksek bariyer katkı oranlarına göre bant diyagramları ve akım mekanizmaları [16]	40
Şekil 2.16.	Süperörgü bant dizilim modelleri.....	41
Şekil 2.17.	0,001 meV altında AlSb bariyerli (Kırmızı) ve bariyersiz (siyah) integrali [30]	42
Şekil 3.1.	Gerçek uzayda Pseudo-potansiyelin şematik çizimi	57
Şekil 3.2.	(a) SWIR bölgede çalışılması tasarlanan InAs/AlSb/GaSb süperörgü sistemi, turuncu elektron ve yeşil ise hh dalga fonksiyonlarını göstermektedir. (b) Pseudo potansiyel yaklaşımı ile elde edilen $k=0$ da electron ve (c) hh dalga fonksiyonları	60
Şekil 3.3.	2ML AlSb/5ML InAs/5ML GaSb tip-II SL enerji bant diyagramı.....	60
Şekil 3.4.	3,45 μm de %100 kesim dalga boylu süperörgüye ait enerji bant diyagramı.....	61
Şekil 3.5.	InAs/AlSb/GaSb 8,5/2/8,5 ML süperörgü yapısının (a) periyodik ve (b) Drichlet sınır koşulları kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucundaki gerçek uzay enerji bant diyagramı	62
Şekil 3.6.	e-SWIR da algılama yapan N-pBin yapılı InAs/AlSb/GaSb süperörgü nihai tasarımı	63
Şekil 3.7.	N-pBin InAs/AlSb/GaSb dedektörünün potansiyel enerji ve taşıyıcı dalga fonksiyonları için 8 bantlı k.p hesaplama grafikleri	63
Şekil 4.1.	(a) Büyütülen yapı, (b) bariyer katmanına kadar aşındırma, (c) kontak katmanına kadar aşındırmanın temsili çizimleri	68
Şekil 4.2.	Farklı Alan/çevre oranına sahip piksellerin pasivasyona bağlı IV grafikleri	82
Şekil 4.3.	Test dedektör üretiminde proses akış şeması	84
Şekil 4.4.	Piksel tanımlama proses aşamalarının temsili çizimleri	87
Şekil 4.5.	Aygıt pasivasyon prosesinin temsili çizimi.....	90

Şekil 4.6.	Omik kontak metalizasyon litografisinin temsili çizimi	93
Şekil 4.7.	Farklı alan/çevre oranına sahip piksellerin sıcaklığa bağlı IV grafikleri	97
Şekil 4.8.	Test dedektörü karanlık akım yoğunluğu.....	98
Şekil 4.9.	Test dedektörlerinin (a) sıcaklığa bağlı J-V karakteristikleri, (b) sabit bir gerilim altında (-0.1V) karanlık akım yoğunluğunun sıcaklığın tersine ($1000/T$) olan bağımlılığı.....	99
Şekil 4.10.	Sıfır öngerilim ve 80 K'de diferansiyel direnç alanın, çevre-alan oranına bağımlılığı	99
Şekil 4.11.	(a) $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ve (b) $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ büyüklüğündeki dedektörlerin gerilime bağlı karanlık akım ve farklı karacisim sıcaklıklarına vermiş oldukları fotoakım tepkileri	100
Şekil 4.12.	Test dedektörünün spektral tepkiselliği	101
Şekil 4.13.	Test dedektörünün spektral dedektivite grafiği	101
Şekil 4.14.	Test dedektörünün spektral kuantum verimliliği	102
Şekil 5.1.	Odak düzlem dizin dedektör üretim tasarım boyutları.....	119
Şekil 5.2.	(a) N yapılı pBin MWIR ve (b) N yapılı nBn MWIR/MWIR çift dalgaboyunda algılama yapan yapı tasarımları	126
Şekil 5.3.	İlk FPA'ya ait görüntü performans harita ve histogramları	129
Şekil 5.4.	Dört ayrı alana bölünen 2. FPA'in temsili çizimi ve örnek termal görüntü	130
Şekil 5.5.	2. FPA e ait performans harita ve histogramları	132
Şekil 5.6.	Dört ayrı bölge FPA'nın NETD harita ve histogramı.....	133
Şekil 5.7.	Dört ayrı bölgenin NETD histogramı	133
Şekil 5.8.	Çift dalgaboyunda algılama yapan N-pBin yapısının görüntü karakterizasyon sonuçları.....	136

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 1.1.	Görünür, SWIR, MWIR ve LWIR dalga boylarında kızılötesi görüntülemesi (http-3).....	8
Görsel 1.2.	Sağlık alanında kızılötesi dedektör uygulamaları [4], (http-4-5)	10
Görsel 1.3.	Sivil ve Askeri alanlarda kızılötesi dedektör kullanımları [5], (http-6-7)	10
Görsel 1.4.	Kızılötesi termal dedektörleri çevresel ve endüstriyel uygulamaları (http-8-10)	11
Görsel 1.5.	Samanyolu galaksisi [16] ve uzak kızılötesinde görüntülenen Andromeda galaksisi (http-12).....	11
Görsel 1.6.	(a) MCT ve süperörgü, (b) InSb ve süperörgü kamera görüntülerinin karşılaştırması [8]	19
Görsel 2.1.	Süperörgü yapısının atomik çözünürlükte TEM görüntüsü [14]	30
Görsel 2.2.	Farklı sıcaklıklarda e-SWIR da çalışan 1280x1024 FPA görüntüsü [43]	45
Görsel 2.3.	Farklı sıcaklıklarda e-SWIR daki termal görüntüleri [45]	46
Görsel 2.4.	256x256 MWIR FPA kamera sistemi ile çekilmiş termal görüntü [47]	47
Görsel 2.5.	Piksellerin ICP aşındırması sonrası SEM görüntüsü [48]	47
Görsel 2.6.	128x128 dizinli FPA MWIR termal görüntüsü [48]	47
Görsel 2.7.	77 K de 320x256 InAs/GaSb T2SL nBn termal görüntü [49]	48
Görsel 2.8.	MWIR aralığında JAXA'nın elde ettiği kızılötesi termal görüntüler [50]	48
Görsel 2.9.	JAXA'nın MWIR dalgaboyundaki düzeltilmiş dedektör görüntüsü [51]	49
Görsel 2.10.	IRnova firmasının HOT T2SL farklı sıcaklıklardaki termal görüntülemeleri [53].....	50
Görsel 2.11.	320x256 FPA dedektörüyle metan gazı tespiti anı [53]	50
Görsel 2.12.	640x512 dizinli pBin T2SL FPA'nın MWIR dalgaboyu görüntüleri [54]	51
Görsel 2.13.	İki spektral aralıkta plastik kapağın termal görüntüsü [56]	52

Görsel 2.14.	Soldaki 3-4 μm mavi ve sağdaki 4-5 μm kırmızı kanal da termal görüntü [57].....	52
Görsel 2.15.	Bir sanayi sitesinin 384×288 çift renkli InAs/GaSb SL kamerayla çekilmiş bispektral kızılötesi görüntüsü [58]	53
Görsel 2.16.	80 K de F/4 optikli MWIR/LWIR çift bantlı dedektörden elde edilen termal görüntü [59].....	54
Görsel 3.1.	Büyütme sonrası N-pBin süperörgü yapısının yanal SEM görüntüsü	64
Görsel 4.1.	(a) Plazma destekli kuru aşındırma, (b) optimize edilmiş kimyasal aşındırma ve (c) plazma destekli kuru ve kimyasal aşındırma kombinasyonun yan duvar profilleri [66].....	69
Görsel 4.2.	HCl tabanlı aşındırıcıya ait aşındırma sonrası örnek yüzey görüntüsü.....	70
Görsel 4.3.	C ₆ H ₈ O ₇ tabanlı piramit aşınmaya ait (a) optik mikroskop, (b) optik profilometre ve (c) SEM görüntüleri.....	71
Görsel 4.4.	C ₆ H ₈ O ₇ : HCl:H ₂ O ₂ : H ₂ O (10 gr:10 ml:10 ml:80 ml) oranındaki aşındırma sonrası piksel SEM görüntüleri	71
Görsel 4.5.	Aşındırma işlemleri sonrası elde edilen Mesa yapılarının optik mikroskop görüntüleri	73
Görsel 4.6.	Aşındırma işlemleri sonrası elde edilen Mesa yapılarının SEM görüntüleri	74
Görsel 4.7.	Aşındırma derinliğine bağlı olarak az ve çok aşındırılmış örneklerin yüzey davranışlarının incelendiği SEM görüntüleri	75
Görsel 4.8.	Fosforik ve sitrik asitlerle yapılan aşındırma denemeleri sonucunda elde edilen yüzeyler.....	76
Görsel 4.9.	(a)Bariyere kadar aşındırılma (b) aşındırma sonrası kimyasal temizleme ait SEM görüntüleri	77
Görsel 4.10.	(a)1B, (b) 2B, (c) 1C ve (d) 2C örneklerinin yanal yüze SEM görüntüleri	78
Görsel 4.11.	Si taban üzerine kaplanan SiO ₂ kaplamasının refraktometri yöntemiyle kalınlık ölçümü.....	80
Görsel 4.12.	Pasivasyon kaplama (a) öncesi ve (b) sonrasına ait yüzey görüntüleri	81

Görsel 4.13.	Test dedektörlerin LCC paketindeki konumları ve IV ölçümü için kryostata yerleştirme resimleri	82
Görsel 4.14.	Test dedektör maske tasarımı	85
Görsel 4.15.	Test dedektörü piksel litografisi sonrası örnek yüzeyinin optik mikroskop görüntüleri	88
Görsel 4.16.	Test piksellerin aşındırma sonrası örnek yüzeyinin mikroskop görüntüleri	89
Görsel 4.17.	Pasivasyon kaplama sonrası örnek yüzeyinin görüntüleri	91
Görsel 4.18.	Pasivasyon litografisi sonrası örnek yüzeyinin mikroskop görüntüleri	91
Görsel 4.19.	Pasivasyon aşındırması sonrası açılmış Pasivasyon pencerelerinin mikroskop görüntüleri	92
Görsel 4.20.	Omik kontak metalizasyon desenlemesi sonrası piksellerin görüntüleri	94
Görsel 4.21.	Metal Lift-off sonrası mikroskop görüntüleri	95
Görsel 4.22.	Prosesi tamamlanan test dedektörünün birleştirilmiş optik mikroskop görüntüsü.....	95
Görsel 4.23.	Elektro-optik ölçüm düzeneği	96
Görsel 5.1.	18x18 μm^2 piksellerin aşındırma sonrası yeni boyutlarının SEM görüntüsü.....	104
Görsel 5.2.	Dizin dedektör prosesi sırasıyla kesit şematığı, maske tasarımı ve proses sonrası optik mikroskop görüntüsü olmak üzere (a) piksel aşındırma, (b) omik kontak metalizasyonu, (c) pasivasyon ve (d) UBM-İndiyum metalizasyon ana adımlarına ait görseller	105
Görsel 5.3.	Omik kontak Lift-off'u sonrası kontakların optik mikroskop görüntüsü.....	107
Görsel 5.4.	Pasivasyon pencere aşındırması sonrası piksellerin görüntüsü.....	107
Görsel 5.5.	AZ5214 fotorezistine ait farklı UV ve tap etme sürelerindeki rezist profilleri.....	108
Görsel 5.6.	Nlof 2020 rezistinin 7, 6 ve 5 sn UV sürelerindeki rezist profillerinin SEM görüntüleri	109
Görsel 5.7.	Nlof 2035 rezistinin 9 sn UV maruz bırakılan ve sırasıyla 60, 90 ve 120 sn tapedilen rezistlerin SEM görüntüleri.....	109

Görsel 5.8.	Omik kontak Lift-off sonrası kontakların genel mikroskop görüntüsü.....	110
Görsel 5.9.	Pasivasyon aşındırmasın (a) piksel pasivasyon incelmesi, (b) alt kontak pasivasyon kaybı, (c) rastgele kayıp ve (d) piksel pasivasyon kaybı olmak üzere karşılaşılan pasivasyon aşındırma problemlerinin mikroskop görüntüleri	111
Görsel 5.10.	SiO ₂ film kalınlığının refraktometre ölçümü	112
Görsel 5.11.	Pasivasyon kaplamasına uygun olmayan duvar profil örnekler.....	112
Görsel 5.12.	FPA üretiminde pasivasyon kaplı piksellin yanal SEM görüntüsü.....	113
Görsel 5.13.	(a) Litografi sonrası beklenen piksel görünümünün temsili çizimi, BHF de SiO ₂ pasivasyonun (b) 60 sn, (c) 45 sn ve (d) 30 sn deki optik mikroskop görüntüleri.....	114
Görsel 5.14.	Optimizasyon sonrası açılan pasivasyon pencerelerinin mikroskop görüntüsü.....	115
Görsel 5.15.	İndiyumların optik mikroskop ve SEM görüntüsü.....	116
Görsel 5.16.	İndiyumların yeniden şekillendirme sonrası SEM görüntüleri	117
Görsel 5.17.	İndiyumların HCl ile aşındırılma sonrası SEM görüntüsü.....	117
Görsel 5.18.	Nlof 2070 fotorezistinin (a)36 sn, (b)24 sn ve (c)18 sn deki UV sürelerine bağlı duvar profillerinin SEM görüntüleri.....	118
Görsel 5.19.	Nlof 2070 fotorezistinin (a)90 sn, (b) 130 sn ve (c) 150 sn deki tabetme sürelerine bağlı rezist profilleri	118
Görsel 5.20.	(a) Piksel litografisi sonrası fotorezistli, ve (b) piksellerin aşındırma sonrası fotorezistsiz mikroskop görüntüsü.....	120
Görsel 5.21.	(a) Omik kontak litografisi sonrası fotorezistli, ve (b) Omik kontak Lift-off'u sonrası mikroskop görüntüsü	121
Görsel 5.22.	Pasivasyon kaplama sonrası parça pulun yüzeyinden görüntüleri	122
Görsel 5.23.	(a) Pasivasyon litografisi sonrası fotorezistli, ve (b) Pasivasyon pencere aşındırma sonrası fotorezistsiz mikroskop görüntüsü.....	122
Görsel 5.24.	(a) UBM litografi sonrası ve (b) İn buharlaştırma sonrası FPA yüzeyinin mikroskop görüntüleri	123
Görsel 5.25.	İndiyumun yeniden şekillendirme sonrasına ait SEM görüntüleri.....	123
Görsel 5.26.	ROIC ve FPA dedektörün birleştirme sonrası fotoğrafı	124
Görsel 5.27.	Dedektörün taban inceletme sonrası yüzeyin fotoğrafı.....	125

Görsel 5.28.	Görüntüleme soğutucu kabına FPA in yerleştirilmesi	125
Görsel 5.29.	FPA görüntüleme ölçüm düzeneği.....	126
Görsel 5.30.	Soğutma anında dedektör de meydana gelen çatlamların oluşumu	127
Görsel 5.31.	N-pBin yapılı MWIR dalgaboyunda görüntüleme.....	128
Görsel 5.32.	Gürültü haritasında kaybedilen kolonun haritaya yansması	128
Görsel 5.33.	2. FPA den MWIR dalgaboyunda alınan görüntüler	131
Görsel 5.34.	2. FPA in ölü piksel haritası	134
Görsel 5.35.	Çift dalgaboyunda çalışan dedektörün uzun dalgaboyunda elde edilen görüntüsü	135
Görsel 5.36.	Çift dalgaboyunda algılama yapan N-pBin yapısına ait FPA ölü piksel haritası	137

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Ag	: Gümüş
AlAsSb	: Alüminyum Arsenik Antimon
ALD	: Atomik Katman Biriktirme
AlGaInSb	: Alüminyum Galyum İndiyum Antimon
AlGaSb	: Alüminyum Galyum Antimon
AlSb	: Alüminyum Antimon
Au	: Altın
Bi	: Bizmut
BTB	: Banttan Banda
CLT	: Kritik Katman Kalınlığı
D*	: Spesifik Dedektivite
e	: Elektron
E _c	: İletim Bandı
E _f	: Fermi Enerjisi
EFA	: Zarf Fonksiyonu Yaklaşımı
E _g	: Bant Aralığı
EPM	: Yapay Pseudo Potansiyel Metodu
e-SWIR	: Uzun Kısa Dalgaboylu Kızılötesi Radyasyon
E _v	: Değerlik Bandı
eV	: Elektronvolt
FPA	: Odak Düzlem Dizin
GaInSb	: Galyum İndiyum Antimon
GaSb	: Galyum Antimon
Ge	: Germanyum
G-R	: Üretim-Yeniden Birleşme
h	: Deşik
HCl	: Hidroklorür
HH	: Ağır Deşik
HgCdTe	: Cıva Kadmiyum Tellür-MCT
Hz	: Hertz
ICP	: İndüktif Eşleşmiş Plazma

InAs	: İndiyum Arsenik
InAsSb	: İndiyum Arsenik Antimon
InSb	: İndiyum Antimon
IR	: Kızılötesi
IV	: Akım Voltaj
K	: Kelvin
LCC	: Leadless Chip Carrier
LH	: Hafif Deşik
LWIR	: Uzun Dalgaboylu Kızılötesi Radyasyon
MBE	: Moleküler Demet Epitaksi
MCT	: Civa Kadmiyum Tellür
ML	: Tek-atom Katman
mK	: Mili Kelvin
MWIR	: Orta Dalgaboylu Kızılötesi Radyasyon
NEP	: Gürültü Eşlenik Gücü
NETD	: Gürültü Eşdeğer Sıcaklık Farkı
PbS	: Kurşun Sülfat
PbTe	: Kurşun Tellür
PC	: Fotoiletken
PECVD	: Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme
Pt	: Platin
PV	: Fotovoltaik
QDIP	: Kuantum Nokta Kızılötesi Dedektör
QE	: Kuantum Verimlilik
QWIP	: Kuantum Kuyu Kızılötesi Dedektör
RIE	: Reaktif İyon Aşındırma
ROIC	: Okuma Entegre Devresi
Sb	: Antimoni
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	: Silisyum
SL	: Süperörgü
SNR	: Sinyal Gürültü Oranı
SRH	: Shockley Read Hall

SWIR	:	Kısa Dalgaboylu Kızılötesi Radyasyon
TAT	:	Tuzak Destekli Tünelleme
TEM	:	Geçirimli Elektron Mikroskobu
Ti	:	Titanyum
TiW	:	Titanyum Tungsten
T2SL	:	Tip-II Süperörgü
UBM	:	Topçuk Alt Metalizasyonu
UV	:	Morötesi
VBO	:	Değerlik Bant Kayması
VLWIR	:	Uzak Dalgaboylu Kızılötesi Radyasyon
Å	:	Angström
Ω	:	Ohm
C°	:	Santigrat derece
µm	:	Mikrometre

1. GİRİŞ

Tarihte, bir ışık kaynağının gücü kaynak parlaklığının gözlenebilmesiyle ilişkilendirilmiş ve bu ilişki doğrudan insan gözüyle kurulmuştur. Göz, insanın sahip olduğu duyular içerisinde en dikkate değer olanlardan biridir. Canlılarda görme olayı, nesnelerden yansıyan ışığın kornea ve göz merceğinden geçmesiyle başlar. Ardından ışığa duyarlı mikron boyutundaki fotoreseptörlerin bulunduğu retinaya ulaşana kadar yoluna devam eder. Gelen ışık, retinadaki fotoreseptör sinirlerini uyarır ve uyarılan fotoreseptörler ışığı elektrik sinyallerine dönüştürür. Bu sinyallerde optik sinirler aracılığıyla sinyal paketleri halinde beyne iletilir. Beyin, gelen sinyal paketlerini işleyerek birleştirir ve sonuçta görme olayı gerçekleşir. Günümüzde kullanılan pek çok görüntüleme teknolojisinin çalışma prensibi de temelde canlıların görme yeteneğiyle büyük benzerlikler taşır.

İnsan gözünün görme yetisi, karanlık ortam koşullarına iyi adaptasyon sağladığında neredeyse ışığın tek bir taşıyıcı parçacığını yani tek bir fotonu görebilecek kadar hassas ve çok düşük ışık seviyelerini algılayabilecek kadar duyarlı olabilir. Bununla birlikte, görme gücümüz var olan tüm ışık kaynaklarının ölçeklendirildiği elektromanyetik spektrumda 400 ila 700 nm’lik Görünür Bölge aralığıyla da sınırlıdır. Çünkü, insan gözündeki fotoreseptör hücreleri bu dalgaboyu aralığına duyarlıdır. Tüm ışık kaynaklarının ölçeği düşünüldüğünde, görme aralığımızın çok dar olması sebebiyle evrende var olan pek çok ışık kaynağının insan gözüyle gözlemi mümkün değildir. Ancak doğada, pek çok canlı elektromanyetik spektrumun farklı aralıklarındaki görüş yetenekleriyle yaşamını sürdürür ve doğal düzenin devamlılığı sağlanır. Örneğin, bitki örtüsünün çeşitliliğinde büyük rol oynayan arılar morötesi (UV)’ne duyarlı görüşleriyle polenli çiçeği tanıyarak beslenir veya sağlıklı tür devamlılığı için uygun eş seçimini yapar. İnsanın ise yaşadığı doğayı, gezegeni ve evreni anlayabilmesi için görünür bölge dışında kalan bölgeleri de algılayabilmesi gerekmektedir.

Görünmez ışık, ilk 1800 yılında astronom William Herschel tarafından keşfedilmiştir. Güneş ışınlarıyla çalıştığı esnada optik filtrelerin ısınma miktarlarının birbirinden farklı olması dikkatini çekmiştir. Isı miktarlarındaki bu farkı filtre rengiyle ilişkilendirmiştir. Bunun üzerine renklerin sıcaklığını ölçmek için prizma ve termometreden oluşan bir deney tasarlamıştır. Deneyde, ilk olarak güneş ışığını prizmadan geçirerek bileşen ışık renklerine ayırmıştır. Herschel, ışığın ısıtma kabiliyetinin bir maksimum değeri olabileceğini varsayarak termometre yardımıyla tüm

renklerin sıcaklığını ölçmüştür. Görünür ışıktan kırmızıya doğru gidildikçe sıcaklığın arttığını ve spektrumun sonunda da artışın hala devam ettiğini gözlemlemiştir. Ölçümlerine kırmızı renk tayfını geçmesine, görünür spektrumun dışına çıkmasına rağmen devam etmiştir. Sıcaklığın görünür spektrumun çok ötesinde maksimum olduğunu gözlemlemiş ve böylece kızılötesi radyasyonu keşfetmiştir. 1820’li yıllara gelindiğindeyse, Thomas Johann Seebeck termoelektrik etkiyi keşfetmiş ve sıcaklık ölçümü için ilk ısıl çifti (Thermocouple) yapmıştır. 1829’ da bir dizi ısıl çifti paralel bağlayan İtalyan Fizikçi Leopoldo Nobili de ilk termopili geliştirmiştir. 1833’te ise Macedonia Melloni Bizmut (Bi) ve Antimoni (Sb)’yi kullanarak ısıl çifti yeniden tasarlamıştır. Böylelikle, 1800’lü yıllarda başlayan bu çalışmalarla görünmez ışığın görünür kılınmasının temelleri atılmıştır. Bu yıllardan başlayarak 21. yüzyıla kadar geçen süre içerisinde kızılötesi teknolojilerin gelişiminde kilometre taşı olarak kabul edilen keşifler ve gelişmeler kronolojik sıralamayla Tablo 1.1’de sunulmuştur.

Tablo 1.1. Kızılötesi fiziği ve teknolojisinin gelişimindeki kilometre taşları [1]

YIL	
1800	W. HERSCHEL tarafından termal radyasyonun keşfi
1821	T.J. SEEBECK tarafından antimon-bakır çifti kullanılarak termoelektrik etkilerin keşfi
1830	L. NOBILI tarafından termal radyasyonun ölçümü için termal elemanın geliştirilmesi
1833	L. NOBILI ve M. MELLONI’nin 10 sıralı Sb-Bi dan oluşan termo-çiftlerden termopil icadı
1834	J.C. PELTIER tarafından akımla beslenen iki farklı iletken çift üzerindeki PELTIER etkisinin keşfi
1835	Işık ve elektromanyetik radyasyonun aynı nitelikte olduğu hipotezinin A.M. AMPERE tarafından formüle edilmesi
1839	M.MELLONI tarafından atmosferin güneş absorpsiyon spektrumu ve su buharının rolü
1840	J. HERSCHEL (W. HERSCHEL’in oğlu) tarafından üç atmosferik pencerenin keşfi
1857	W. THOMSON (Lord KELVIN) tarafından Seebeck, Peltier ve Thomson termoelektrik etkilerinin uyumlaştırılması
1859	G. KIRCHHOFF tarafından absorpsiyon ve emisyon arasındaki ilişki
1864	J.C. MAXWELL tarafından elektromanyetik radyasyon teorisi
1873	W. SMITH tarafından Selenyumdaki fotoiletken etkinin keşfi
1876	W.G. ADAMS ve A.E. DAY tarafından Selenyumda fotovoltaiik etkinin keşfi
1879	J. STEFAN tarafından bir kara cismin radyasyon yoğunluğu ile sıcaklığı arasındaki ampirik ilişkinin kurulması
1880	S.P. LANGLEY tarafından Pt bolometre direnci aracılığıyla atmosferin absorpsiyon özelliklerinin incelenmesi
1883	M. MELONI tarafından IR-geçirgen malzemelerinin iletim özelliklerinin incelenmesi
1884	L. BOLTZMANN tarafından Stefan yasasının termodinamik türeві
1887	H. HERTZ tarafından Mor ötesinde fotoelektrik etkinin gözlemlenmesi
1890	J. ELSTER ve H. GEITEL, bir alkali-metal katottan foto-yayıcı dedektör üretmesi
1894	J.W. RAYLEIGH ve W. WIEN tarafından kara cisim ışımasının dalgaboyu ilişkisinin türetilmesi
1900	M. PLANCK tarafından ışığın kuantum özelliklerinin keşfedilmesi

Tablo 1.1. (Devam) Kızılötesi fiziği ve teknolojisinin gelişimindeki kilometre taşları [1]

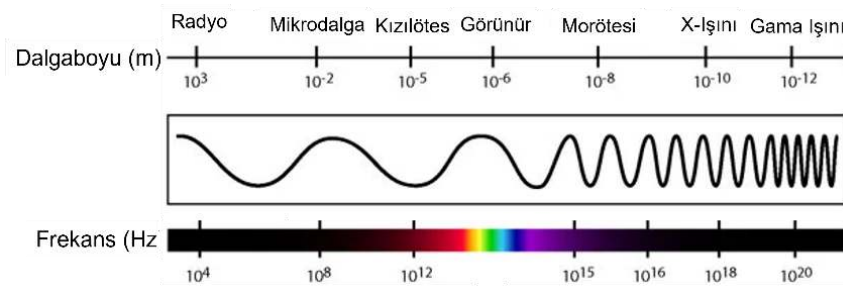
YIL	
1903	W.W. COBLENTZ tarafından IR radyometri ve spektrometri kullanılarak gezegenlerin ve yıldızların sıcaklığının ölçülmesi
1905	A. EINSTEIN tarafından fotoelektriğin teorisi
1911	R. ROSLING, 1897 de F. Braun tarafından inşa edilen katot ışın tüpleri prensibine göre ilk televizyon görüntü tüpünü yaptı.
1914	İnsanların ve uçakların uzaktan algılanması için bolometre uygulaması
1917	T.W. CASE, Talyum ve Kükürtten oluşan ilk kızılötesi foto iletkeni geliştirdi
1923	W. SCHOTTKY tarafından kuru redresörlerin (doğrultucu) teorisini oluşturdu
1925	V.K. ZWORYKIN tarafından ilk elektronik kamera yardımıyla dönüştürücü televizyon tüpü yaptı
1928	G. HOLST, J.H.DE BOER, M.C. TEVES, ve C.F. VEENEMAS tarafından elektro-optik dönüştürücü fikrinin önerilmesi
1929	L. R. KOHLER, yakın kızılötesine duyarlı Ag/O/Cs den oluşan bir foto katot dönüştürücü tüp yaptı.
1930	Askeri uygulamalar için 1,5–3,0 μm dalgaboyu aralığındaki PbS kuantum dedektörlerine dayalı IR yön bulucuları (GUDDEN, GÖRLICH ve KUTSCHER), II. Dünya Savaşı'nda menzili gemiler için 30 km'ye ve tanklar için 7 km'ye (3–5 μm) yükseltti.
1934	İlk IR görüntü dönüştürücü
1939	Amerika Birleşik Devletleri'ndeki ilk IR görüntüleme biriminin geliştirilmesi (Sniperscope, Snooperscope).
1941	RS OHL, silikonda bir p-n bağlantısının gösterdiği fotovoltajik etkiyi gözlemledi
1942	G. EASTMAN (Kodak), kızılötesine duyarlı ilk filmi sundu
1947	M.J.E. GOLAY tarafından üretilen pinomatik etkili, yüksek algılamalı radyasyon dedektörü
1954	Termofillere (görüntü başına 20 dakikalık pozlama süresi) ve bolometrelere (4 dakika) dayalı ilk görüntüleme kameraları
1955	ABD'de IR güdümlü roketler için IR arayıcı kafalarının seri üretimine başlandı (PbS ve PbTe dedektörleri, daha sonra Sidewinder roketleri için InSb dedektörleri)
1957	W.D. LAWSON, S. NELSON ve A.S. YOUNG tarafından HgCdTe üçlü alaşımının kızılötesi dedektör malzemesi keşfi
1961	Ge:Hg katkılamanın keşfi ve ilk LWIR FLIR sistemlerinde çizgisel dizin uygulamaları
1965	İsveç'te sivil uygulamalar için IR kameraların seri üretimine başlandı (opto mekanik tarayıcı tek elemanlı sensörler: AGA Thermografie System 660)
1970	W.S. BOYLE ve G.E. SMITH tarafından yük bağlaşımlı cihaz (CCD-Charge Coupled Device) keşfi
1970	IR sensör dizinlerinin üretim başlangıcı
1975	Amerika, Britanya ve Fransa tarafından bir mini soğutucuya entegre edilmiş çok elemanlı kızılötesi dedektörlerden uzamsal olarak yüksek çözünürlüklü gözlem sistemlerinin geliştirilmesi
1975	İlk In topçukla hibritlenen kızılötesi odak düzlemi dizini
1977	G.A. SAI-HALASZ, R. TSU ve L. ESAKI tarafından kırık ban aralıklı Tip-II InAs/GaSb süperörgülerin keşfi
1980	J.C. CAMPBELL, A.G. DENTAI, T.P. LEE ve C.A. BURRUS. tarafından HgCdTe(InSb)/Si ikincil nesil sistemlerin geliştirilmesi ve üretilmesi
1985	Schottky diyot FPA'ları ile donatılmış kameraların geliştirilmesi ve seri üretimi.
1990	Kuantum kuyulu kızılötesi foto iletkenlerin geliştirilmesi ve üretimi
1995	Soğutmasız FPA'le kızılötesi kameraların üretim başlangıcı
2000	Üçüncü nesil kızılötesi sistemlerin geliştirilmesi ve üretimi

Zaman içinde gelişen teknolojilerin devreye girmesiyle, insanın görme yeteneğinin sınırları katbekat aşılmıştır. Görünür bölge dışına düşen radyasyon termal görüntülemeyle görünür bölgeye doğru çekilebilmiş ve görüntülenmiştir. Kızılötesi dedektör teknolojileri gelişimiye son 20 yılda da büyük bir hızla devam etmiştir.

1.1. Kızılötesi Radyasyon ve Uygulamaları

1.1.1. Elektromanyetik spektrum

Klasik bir ifadeyle maddenin en küçük yapı taşı olarak tanımlanan atomlar, maddenin temel özelliklerini belirler. Atomun temel özellikleri de yörünge sayısı ve elektron dizilimi tarafından belirlenir. Bir diğer klasik tanımlamayla evrende her atom, elektronlarının düzenli bir dizilime sahip olduğu kararlılık durumu eğilimindedir. Atomda düzensizlik sebebi olan fazla enerji, elektronların yörüngeler arası geçiş yapmasıyla elektromanyetik ışıma şeklinde serbest kalır ve elektronlar düzenli dizilimine geçerek atomda kararlılık sağlanır. İşte bu elektromanyetik ışımlar, yayılmak için ortama ihtiyaç duymayan, birbirine dik bir manyetik alan ve bir elektrik alanın kendi aralarındaki titreşimiyle oluşur. Elektromanyetik spektrumsa, elektromanyetik ışımların frekans ve karşılık gelen dalgaboyu değerlerine göre ölçeklendirilip sınıflandırıldığı tüm elektromanyetik ışımları barındıran genel bir ölçektir (Şekil 1.1). Spektrum, frekans veya dalgaboyu değerlerine göre bölgelere ayrılır ve adlandırılır. Küçük dalgaboyundan büyük dalgaboyuna doğru sırasıyla Gama ışınları, X-ışınları, UV ışınım, görünür ışık, kızılötesi ışınım, mikrodalga, radyo dalgaları şeklindedir.



Şekil 1.1. Elektromanyetik Spektrum (<http-1>)

Elektromanyetik ışımanın temel parçacığı ışığın temel birimi olan Foton'dur. Sıcaklığı, mutlak sıfırın üzerinde olan her cisim sahip olduğu sıcaklıkla orantılı bir şekilde foton yayarak elektromanyetik ışıma yapar. Bu ışıma aynı zamanda termal radyasyon

denir. Her sıcaklıkta yayılan termal radyasyonu gözle görebilmemiz mümkün değildir. Ancak belirli bir sıcaklığa ulaştığında dokunsal duyumuzla ısı şeklinde hissedilebilir ya da yayılan radyasyonun dalgaboyu görünür bölge aralığına düşmesi şartıyla gözle görülebilir hale gelir.

Kızılötesi ışımlar, elektromanyetik spektrumda, görünür ışık ile mikrodalga arasında ve dalgaboyu görünür ışıktan daha büyük olan 0,77 µm ile 100 µm dalgaboyu aralığında yer alan enerjik ışınlardır. Bu kızılötesi ışımlarda kendi içinde dalgaboyu aralıklarına göre 0,78-1 µm aralığı yakın, 1-3 µm aralığı kısa, 3-6 µm aralığı orta, 6-15 µm aralığı uzun, 15-30 µm aralığı çok uzun ve 30-100 µm aralığına da uzak kızılötesi şeklinde adlandırılır.

Kızılötesi ışımların yüksek dalgaboylu ve düşük enerjili olması gaz ve toz bulutu gibi yapay veya doğal atmosferik koşullarda görünür ışımalara göre çok daha az saçılmasına ve çok daha iyi geçmesine neden olur. Ayrıca, oda sıcaklığındaki nesnelerin ve normal vücut sıcaklığındaki insanların yaydığı ışımlar da kızılötesi bölgeye düşer. Bu gibi özellikleri nedeniyle kızılötesi dalgaboyu aralığı teknolojik çalışmalarda ve uygulamalarda büyük bir yer sahibidir.

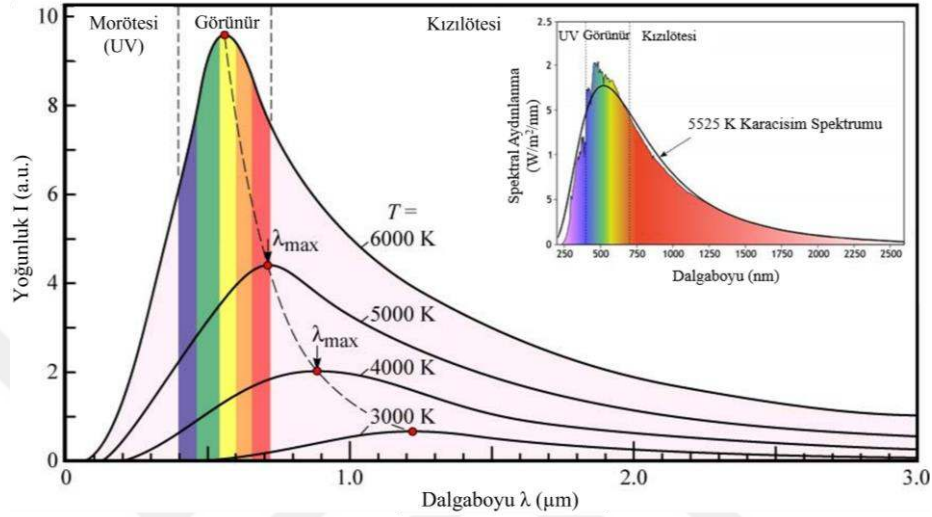
1.1.2. Termal ısıma ve yasaları

Bir nesnenin termal ışıma yayma özelliği nesnenin sıcaklığına, malzemesine ve yüzey şartlarına bağlıdır. Termal ışımanın anlaşılabilmesi için varsayımsal bir olgu olan üzerine düşen elektromanyetik radyasyonu tümüyle soğurabilen, hiçbir biçimde yansıtmayan ve kusursuz verimlilikte enerji yayan kara cisimden bahsedilmelidir. Termal radyasyon sadece kara cisim sıcaklığına bağlı olduğu için, belirli sıcaklıktaki bir nesnenin yaydığı radyasyonun incelenmesi içinde uygun bir kavramdır. Kara cisim ışımasının doğası Planck, Wien ve Stefan-Boltzmann yasalarıyla açıklanabilir.

1900 yıllarında Max Planck, ışığın fotonlar şeklinde kuantize-kesikli enerji paketlerinden oluştuğunu varsayarak kara cisim ışımasının klasik fizik ifadesini termodinamiğe dayandırmıştır. Planck yasası, termal denge durumunda bulunan belirli sıcaklıktaki bir kara cisim ışımasının yaydığı elektromanyetik radyasyonu ifade eder. Cisimlerin sıcaklığına bağlı olarak hangi dalgaboyunda ısıma yaptığı,

$$B(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1}$$

denklemleriyle elde edilir. Burada yer alan h Planck sabiti, k_B Boltzmann sabiti, c ışık hızıdır ve spektral parlaklığı $B(\lambda, T)$ ile ifade edilmiş, birimi ($W/m^2 \mu m$) dir. Farklı sıcaklıklardaki kara cisim ışımlarının dalga boylarına göre spektrumu Şekil 1.2’de verilmiştir.



Şekil 1.2. Farklı sıcaklıklardaki kara cisim spektrumu

Düşük sıcaklıklarda ışımanın en yüksek dalgaboyu, uzun dalgaboylarına karşı gelirken cismin sıcaklığı artırıldığında ışımanın en yüksek dalgaboyu daha kısa dalgaboylarına ve yüksek enerjilere doğru kayar. Dolayısıyla, sıcaklığı artan cismin bütün dalgaboylarında ışıma yapabilme kapasitesinin arttığı sonucu çıkar. Kara cismin belirli bir T sıcaklığında dalgaboyu ile arasındaki ilişkiyi veren de Wien Yasasıdır ve bir T sıcaklığı anında ışıma yoğunluğunun en fazla olduğu tepe noktasını verir.

$$\lambda_{max} (\mu m) T(K) = 2897,756$$

Sıcaklık artıkcaya yayınlanan enerjinin tepe noktası kısa dalga boylarına doğru kayar, bu kaymaya da Wien kayması denir. Belirli bir sıcaklıktaki kara cismin yaydığı ışımanın toplam gücünün sıcaklıkla olan ilişkisi Stefan-Boltzmann yasasıyla kurulmuştur.

$$P = \sigma T^4$$

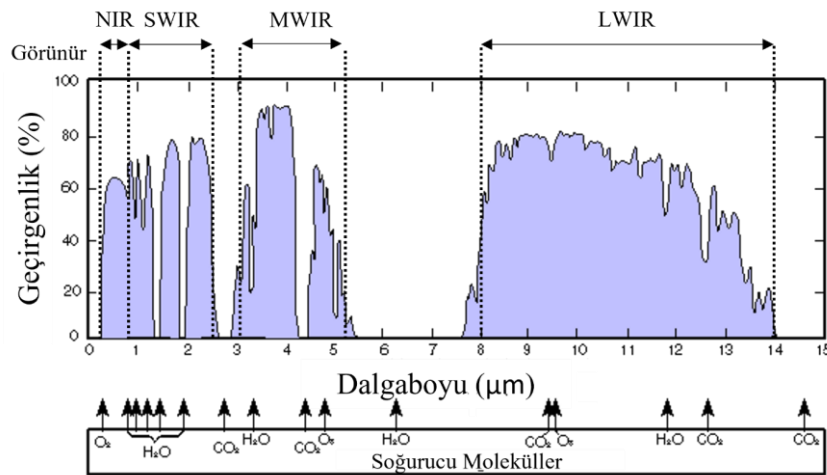
Denklemdede yer alan σ , Stefan-Boltzmann sabitidir ($\sigma = 5,67051 \times 10^{-12} [W \text{ cm}^{-2} K^{-4}]$) ve ışıma gücünün birimi $W \text{ cm}^{-2}$ dir.

1.1.3. Atmosferik pencere

Radyasyon kaynağından gelen ışımanın spektrumdaki tanımının tamamlanması için, radyasyonun yayıldığı ortamın absorpsiyon özellikleri bilinmelidir. Gezegenimize ulaşan veya yeryüzündeki radyasyonun yayılımında atmosfer büyük öneme sahiptir. Atmosfer bir tarafta arka plan radyasyon kaynağı gibi davranırken bir taraftan da radyasyonu soğurur. Yeryüzü uygulamalarında uzak mesafedeki cisimden gelen radyasyon, atmosferi oluşturan gaz molekülleri ve parçacıkları tarafından soğurulur veya saçılıma neden olur. Bu sebeple, atmosferik ortamda yayılan radyasyonda enerji kaybı yaşanır.

Düşük enerjiye sahip olan kızılötesi ışımlar, enerji bant aralığı büyük olan pek çok ortamda kayba uğramadan yoluna devam eder. Görünür bölgedeki birçok malzeme ve ortamda, kızılötesi ışımlar için geçirgendir. Ancak, atmosferdeki gaz molekülleri için aynı şeyi söylemek mümkün değildir. Çünkü atmosferi oluşturan gaz bileşenleri kızılötesi radyasyonu seçici soğurur, soğurmanın olmadığı aralıklar da atmosferik pencere veya açıklık olarak tanımlanır.

İklim, bağıl nem, rüzgâr gibi koşullar atmosferi oluşturan gaz moleküllerinin dağılımını etkilerken molekül çeşitliliğini etkilemediğinden sadece soğurulan dalgaboyunun oranı değişkenlik gösterir (Şekil 1.3). Kızılötesi radyasyon atmosferde büyük oranlarda bulunan karbondioksit, su buharı ve ozon gibi moleküller tarafından daha çok soğurulurken azot, oksit, metan gibi daha küçük bileşenlerden oluşan gaz molekülleri tarafından bir hayli az soğurulur.



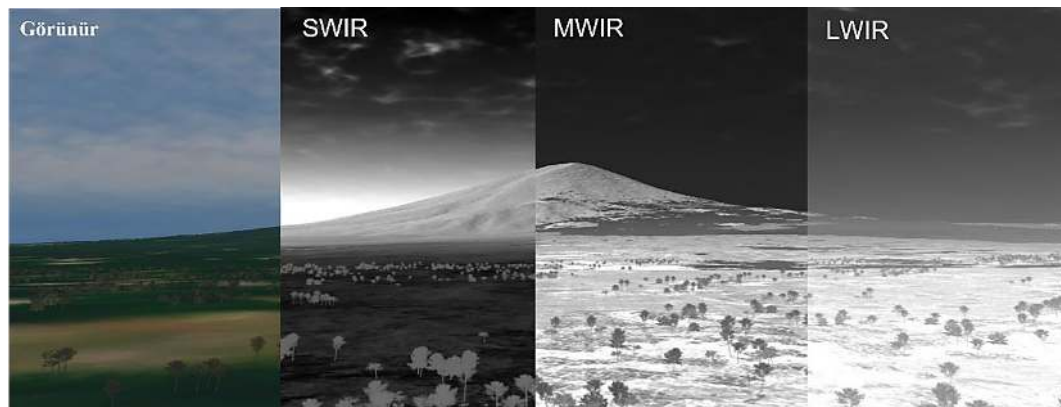
Şekil 1.3. Atmosferik Pencere (<http-2>)

Atmosferde en çok bulunan su buharı en çok soğurma etkisinin görüldüğü moleküler bileşiktir ve 5,5-8 μm dalgaboyu aralığını ciddi oranda soğurur. Ek olarak, 3 ve 12 μm yakınlıklarında yine su buharı kaynaklı soğurma etkisi mevcuttur. Karbondioksit soğurması 2,7 μm , 4,3 μm ve 13 μm bölgelerinde söz konusudur. Ozon ise 9,3 μm bölgesinde soğurma bandına sahiptir [2]. Atmosferin etkisiyle algılanabilen kızılötesi dalgaboyu aralıkları kızılötesi dalgaboyu sınıflamalarına göre Tablo 1.2’de verilmiştir.

Tablo 1.2. Kızılötesi spektrumun sınıflandırılması ve bant aralıkları

	<u>Bant Aralığı</u> (μm)	<u>Algılanabilen Bant Aralığı</u> (μm)
<i>Yakın Kızılötesi (NIR)</i>	0,78-1,4	0,78-1,4
<i>Kısa Dalga boylu Kızılötesi (SWIR)</i>	1-3	1,4-3
<i>Orta Dalga boylu Kızılötesi (MWIR)</i>	3-6	3-5
<i>Uzun Dalga boylu Kızılötesi (LWIR)</i>	6-15	8-12

Farklı kızılötesi spektrumlarda görüntüme detayları farklılık gösterir. Görüntü detaylarına göre kızılötesi dedektörlerin kullanım alanları şekillenir. Aynı ortam koşulunda farklı kızılötesi spektrumlarında alınan görüntüler spektrum etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için Görsel 1.1’de verilmiştir.



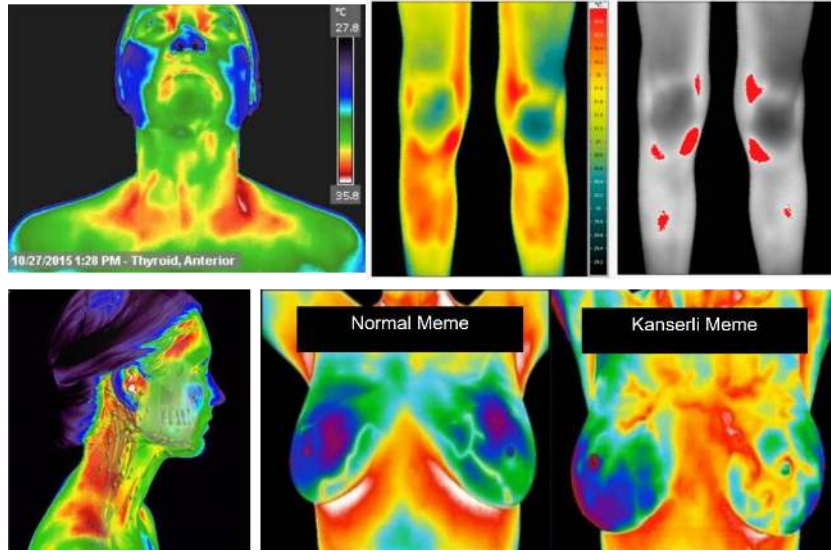
Görsel 1.1. Görünür, SWIR, MWIR ve LWIR dalga boylarında kızılötesi görüntülemesi (<http-3>)

1.1.4. Kızılötesi uygulama alanları

Günümüze kadar bilimde kaydedilen ilerlemelerle, kızılötesi görüntüleme teknolojileri pek çok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Başta sağlık olmak üzere

savunma, güvenlik, uzay, enerji ve endüstri alanlarında yaygın bir şekilde yer almaktadır. Geniş kullanım sahası modern kızılötesi araştırmaları için hala itici bir güç oluşturmaya devam etmektedir. Bu alandaki çalışmalar yeni yapı tasarımları, alternatif uygulama alanları, üretim ve tasarım iyileştirmesi gibi farklı araştırma alanlarındaki ilerleyişini büyük bir hızla sürdürmektedir.

Bir kişinin vücut sıcaklığı sağlığının fonksiyonel bir göstergesi olduğu bilindiğinden beri sıcaklık ölçerler geçmişten günümüze tıbbi uygulamalardaki yerini korumaktadır. İkinci dünya savaşından itibaren kızılötesi termal görüntüleme teknolojilerinin hızla yol katetmesi 1950'li yıllarda sağlıkta termal görüntülemenin kullanılmasını sağlamıştır [3]. Cilt kanseri, meme kanseri, enfeksiyon, kan dolaşım sorunları, kas ve iskelet sorunları, diş incelemeleri ve vücut sıcaklık ölçümleri gibi sağlık alanında pek çok hastalığın teşhis edilmesinde kızılötesi görüntüleme cihazları birincil sıradadır. Kızılötesi algılayıcılar ile vücudun normal sıcaklığı yüksek çözünürlükte ve kolaylıkla görüntülenebilir. Vücutta gerçekleşen artan azalan vasküler aktivite, iltihaplanma ve çeşitli metabolik değişiklikler vücudun ısını değiştirirken, ısıya karşı nasıl çalıştığına dairde güncel ve doğru risk değerlendirmesi sağlar. Dünya ortalamasında kanser hastalarının oranının giderek atması tanı, teşhis ve tedavi süreçlerinin hızlandırılmasının önemini gözler önüne sermektedir. Örneğin; meme kanserinde, kanser hücresi barındıran memede kan dolaşımında aktif ve alternatif yeni yollar açılmasından dolayı metabolik aktivite daha fazla olur ve memenin sıcaklığı artar. İki memeden birinin veya ikisinin de olması gereken sıcaklıktan yüksek bir sıcaklığının olması olası risk değerlendirilmesinin ve erken teşhisin yolunu açar. Görsel 1.2'de tiroit iltihaplanması, hemofili hastalığının gelişim çağındaki çocukların bacaklarındaki etkisi, boyun arter iltihabı ve kanserli olan ve olmayan iki kadının kızılötesi görüntüleri de verilmiştir.



Görsel 1.2. Sağlık alanında kızılötesi dedektör uygulamaları [4], (<http-4-5>)

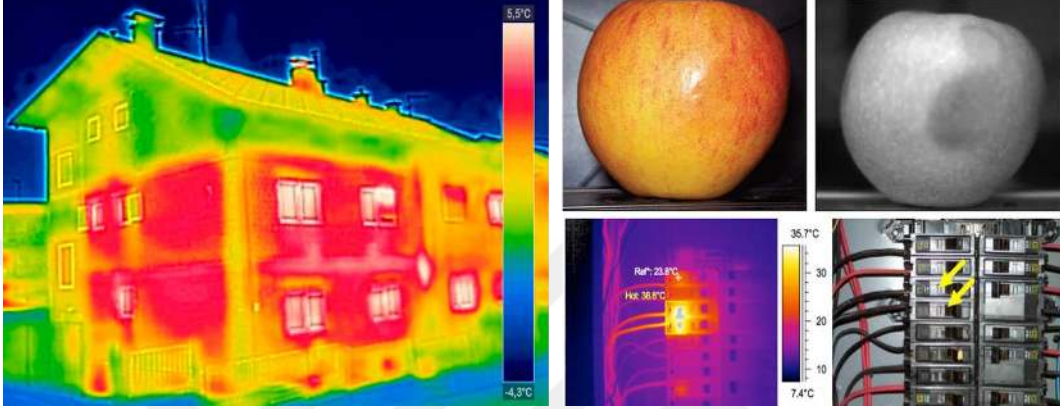
Kızılötesi termal görüntüleme doğrudan nesnelerin sıcaklığına dayalı bir algılama olduğu için düşük ortam ışığından etkilenmeden rahat bir gece görüş imkânı sunar. Çevre ve insan güvenliği başta olmak üzere sivil ve askeri pek çok alanda görüş kolaylığı sağlar. Hava muhalefeti sebebiyle oluşan sis anında, görüş zorluğu yaratmak için kullanılan sis bombalarında veya yoğun duman altında geniş ve net bir görüş kazandırır. Bunlara ek olarak, kılık değiştirmiş suç içeriği bulunan kişilerin teşhis edilmesini gibi güvenlik alanlarında da kullanılabilir (Görsel 1.3).



Görsel 1.3. Sivil ve Askeri alanlarda kızılötesi dedektör kullanımları [5], (<http-6-7>)

Bu alanlar dışında endüstride sanat eserlerinin incelenmesinde, gıda kalite analizlerinde, doğru olmayan elektriksel bağlantıların teşhis edilmesi gibi alanlarda kullanımları da mevcuttur. Görsel 1.4'te bu kullanımlara örnek teşkil edebilecek kızılötesi

görüntüleri verilmiştir. Elektriksel bağlantıları yapılmış sigortalar arasında sadece birkaç derece olan ısı farkının kolaylıkla görülmesi elektriksel ısınmalardan kaynaklı pek çok kazanın yaşanmasını engeller. İlerleyen yıllarda insanlığın en temel sorunu olabilecek enerjinin korunumu için bina yalıtımlarının izlemesi kızılötesi kameraların bir diğer kullanım alanıdır.



Görsel 1.4. Kızılötesi termal dedektörleri çevresel ve endüstriyel uygulamaları (<http-8-10>)

Tüm bu kullanım alanları haricinde, uzay çalışmalarında gelişmiş teleskop teknolojilerine entegre edilerek evrenin detaylı görüntüleri elde edilebilmekte, galaksi ve yıldızların evrimsel dönüşümleri sırasında meydana gelen kızılötesi ışımlar da gözlenebilmektedir (Görsel 1.5). Engelleyici toz ve gaz bulutları tarafından optik teleskopların kabiliyetlerinin dışında kalan Samanyolu galaksi merkezi Spitzer Uzay Teleskobu'nun kızılötesi kamerasıyla gözlenmiştir (<http-11>).



Görsel 1.5. Samanyolu galaksisi [16] ve uzak kızılötesinde görüntülenen Andromeda galaksisi (<http-12>)

1.2. Kızılötesi Görüntüleme Teknolojileri

Kızılötesi görüntüleme sistemleri çoğunlukla karanlık ve belirsiz atmosfer koşulları altında nesnelerin veya hedeflerin sahip olduğu radyasyonu görüntülemek için kullanılır. Bu radyasyon veya ışımlar görünür dalgaboyuna sahip olmadığından nesnelerin yaydığı kızılötesi ışıma, kızılötesi algılayıcılar tarafından görünür ışımalara dönüştürülür. Bu kızılötesi algılayıcıların radyasyonu görünür kılabilmesi birkaç alt sistemin bir araya gelmesiyle gerçekleşir. Bu görüntüleme sistemlerinin hassasiyet ve kabiliyetleri, elektriksel ve optiksel bileşenleriyle beraber algılamayı yapan dedektör kısmıyla da birebir ilişkilidir. Kızılötesi dedektörlerin üretiminde kullanılan çeşitli malzeme sistemleri ve yapıları vardır. Fakat kızılötesi dedektörleri kategorize ederken malzeme ve yapıya göre değil, elektromanyetik radyasyonu veya ışımayı görünebilir ışımaya dönüştürme yöntemine göre termal ve foton dedektör olmak üzere iki farklı kategoriye ayrılır.

1.2.1. Termal dedektörler

Termal dedektörler, soğurulan radyasyon enerjisi tarafından üretilen ısıya tepki vererek çalışır. Bu tür algılamalar iki aşamalı süreçlerdir, önce dedektörde emilen radyasyon dedektörün aktif katmanının sıcaklığını değiştirir, ardından sıcaklık değişimi dedektörün iletkenlik, polarizasyon, voltaj, direnç, boyut gibi fiziksel veya elektriksel özelliklerinde bir değişikliğe sebep olur. Meydana gelen bu değişiklikte ilgili cihaz ve ekipmanlarla ölçülerek algılama gerçekleşir.

Termal dedektörler doğaları gereği soğurulan ışımın gücüne karşı yanıt verir, ışımın dalgaboyundan bağımsızdır ve spektral tepkileri doğrudan dedektörün soğurabilme kapasitesiyle ilişkilidir. Bu sebeple algılama aralıkları görünür bölgeden uzak kızılötesi bölgeyi kapsayacak kadar geniştir. Tek bir dedektörün kızılötesinin tüm aralığına hâkim olması termal dedektörleri diğer dedektörlerden ayıran ve büyük bir avantaj sağlayan özelliklerinden biridir. Ayrıca, termal dedektörler diğer pek çok dedektörlerin aksine oda sıcaklığında çalışabilmeleri harici soğutuculara ihtiyaç duymamaları da bir diğer avantajı olarak bahsedilebilir. Böylece daha küçük, daha ucuz, daha az güç tüketimi ve kullanım kolaylığı gibi ek avantajları da paralelinde sunar.

Termal dedektörler arasında en yaygınları bolometre, termo-çiftler ve piroelektriktir. Tablo 1.3'te termal dedektör çeşitleri ve algılama yöntemleri kısaca özetlenerek verilmiştir [6].

Tablo 1.3. Termal dedektör çeşitleri ve algılama yöntemleri [6]

<u>Dedektör</u>	<u>Algılama Yöntemi</u>
<i>Bolometre</i>	
• Metal • Yarıiletken • Süperiletken • Ferroelektrik • Sıcak elektron	Elektriksel iletkenlikte değişim
<i>Termo-çift/Termofil</i>	Farklı iki malzemenin eklemesinde sıcaklık değişimden kaynaklı voltaj üretimi
<i>Piroelektrik (Pyroelectric)</i>	Elektriksel polarizasyonda anlık değişim
<i>Golay hücresi/Gaz mikrofon</i>	Gazın termal genleşmesi
<i>Soğurma kenarı (Absorption edge)</i>	Yarıiletkenin optik geçirgenliği
<i>Piromanyetik</i>	Manyetik özelliklerinde değişim
<i>Sıvı Kristal</i>	Optik özelliklerinde değişim

Bu dedektörlerde, soğurulan radyasyonun dedektör malzemesinde sıcaklık değişikliği yaratması gerekliliği, algılamadaki tepki sürelerini birkaç mili saniye seviyelerine çıkarır. Bu sebeple tepkisellik için uzun sürelere ihtiyaç duyduklarından yüksek hız gerektiren uygulamalarda büyük bir dezavantaj oluşturur.

1.2.2. Foton dedektörleri

Kızılötesi foton dedektörlerinde, gelen foton dedektör malzemesinin atomik örgüsüyle doğrudan etkileşime geçer ve ana çalışma mekanizması enerji bant aralığı teorisine dayanır. Gelen fotonlar tespit edilmeden önce dedektörü oluşturan malzemenin bant aralığına karşılık gelebilecek bir minimum enerjiye sahip olması gerekir. Soğurulabilen fotonlar malzemeyi uyarak elektron ve deşik çiftleri üretir. Bu üretilen enerji taşıyıcıları dışarıdan veya dahili bir elektrik alan yardımıyla dedektör çıkışından toplanır. Işık ve maddenin bu etkileşimi, ilişkili devreler tarafından algılanan direnç, voltaj, akım ve endüktans gibi elektriksel parametrelerindeki değişikliklerin algılanmasıyla meydana gelir.

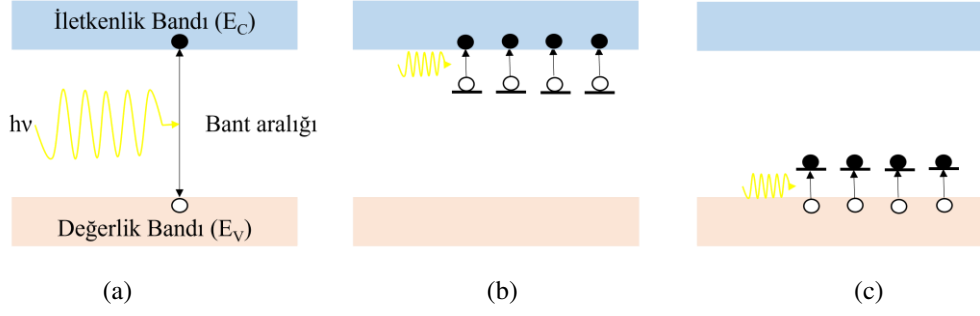
Elektron ve deşik çiftlerinin yaratılması, dedektör malzemesinin bant aralığı ve soğurulan fotonun enerjisine dayalı olması bu dedektörlerin dalgaboyuna bağlı olduğunu gösterir. Ancak, uyarma mekanizmasının doğası gereği anında elektriksel değişim meydana gelir ve ardından hemen sinyal üretildiği için tepki süreleri çok kısa ve yanıtı da bir hayli hızlıdır.

Foton dedektörlerinde, özellikle düşük enerji seviyelerinde çalışan, elektronların termal uyarımını bastırmak için soğutma gerektirir. Soğutma sistemleriyle birlikte kullanılması yüksek maliyetlerini daha da artırdığı gibi dedektör boyutunu da büyütür. Bu durum foton dedektörlerin en büyük dezavantajı olarak kabul edilir.

Foton dedektörleri elektrik alanın oluşturulmasına ve sinyal çıkışına göre farklı modlarla çalışacak şekilde tasarlanabilir. Bu tasarımlara göre foton dedektörleri fotoiletken (photoconductive, PC) ve fotovoltaiik (photovoltaic, PV) olmak üzere iki grupta sınıflandırılabilir. Ayrıca, elektron-foton etkileşimleri dikkate alındığında bu iki gruba Katkılı (Extrinsic), katkısız (Intrinsic), Schottky diyot, kuantum kuyu ve süperörgü dedektörler gibi alt gruplarda eklenebilir. Ancak bu alt gruplar çalışma prensiplerine göre bu iki sınıfa dahil edilmiştir.

1.2.2.1. Fotoiletken dedektörler

Fotoiletken dedektörler, radyasyona duyarlı bir dirençtir ve gelen radyasyona dedektör malzemesinin elektriksel iletkenliğinin değişmesiyle yanıt verirler. Dedektör üzerine düşen foton sayısı malzeme içerisindeki serbest taşıyıcılarının sayısını, serbest taşıyıcı sayısı da elektriksel iletkenliği belirler. Bu nedenle, elektriksel iletkenlikteki değişim düşen foton sayısı ile doğru orantılı olup dedektör direnciyle ters orantılıdır. Bu tip dedektörler katkılı veya katkısız yarıiletken malzemelerden yapılır. Katkısız fotoiletken dedektörlerde, yarıiletken malzemenin enerji bant aralığından büyük enerjiye sahip fotonu soğurur. Katkılı fotoiletken dedektörler için iletkenlik değişimi çoğunluk taşıyıcılar yani yarıiletkenin katkı tipine göre, n-tipi katkılamada elektronlar ve p-tipi katkılamada deşikler, tarafından sağlanır. Şekil 1.4'te fotoiletkenlerin bant yapısının temsili çizimi verilmiştir.

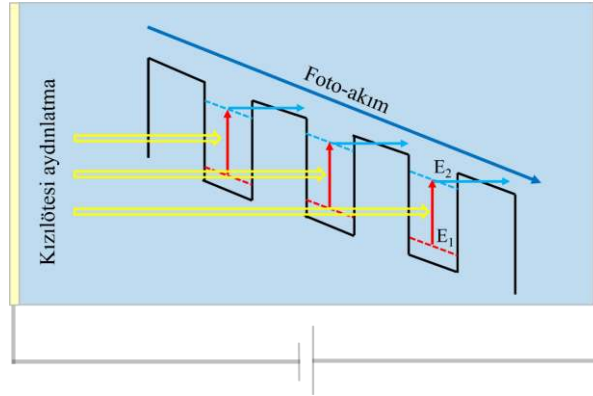


Şekil 1.4. Foto iletkenlerin a) Katkısız, b) n-tipi katkı ve c) p-tipi katkı bant diyagramları

Gelen radyasyon altında, yüklü taşıyıcı sayısına göre dedektörün elektriksel iletkenliğindeki değişim denklemi verilmiştir.

$$\Delta\sigma_c = q\mu_e\Delta n + q\mu_h\Delta p$$

Dedektör enerji bant aralığına denk veya daha yüksek enerjilere sahip fotonlar dedektöre geldiğinde e-h çiftine enerjilerini aktarır elektronların iletim bandına çıkmasına sebep olurlar. Böylece, üretilen taşıyıcılar, PC dedektörüne uygulanan harici bir yönlendirme voltajı sonucu oluşan elektrik alanla dedektörün zıt kutuplu kontak bölgelerine doğru taşınır. Böylece algılama için gerekli olan elektrik sinyali toplanmış olur. Şekil 1.5'te AlGaAs kuantum kuyulu kızılötesi fotodedektörün yeterli enerjiye sahip fotonlarla üretilen taşıyıcıların iletim bandına tünellemesi ve uygulanan harici elektrik alanla iletme katılarak iletkenliğinde değişim meydana gelerek gerçekleşir.

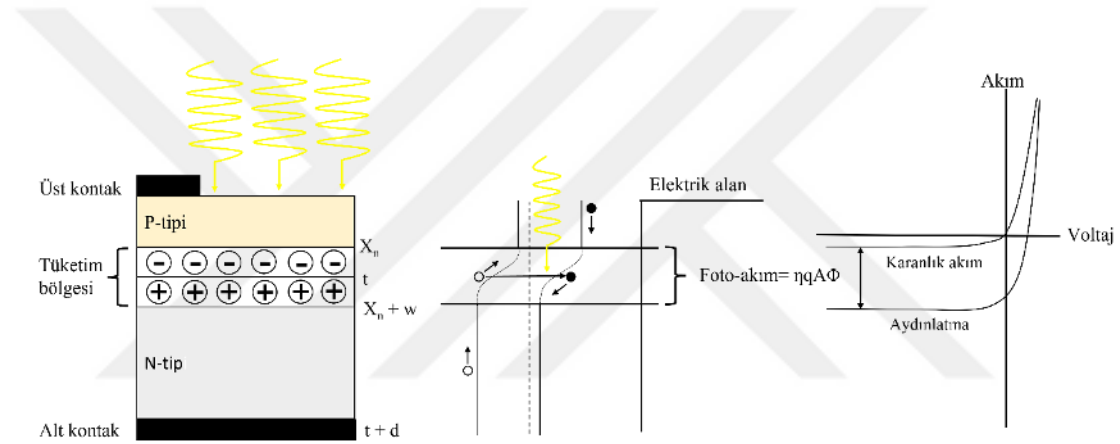


Şekil 1.5. Harici gerilim altındaki tip-I (GaAs/AlGaAs) süperörgü yapılı bir fotoiletken detektör şeması

Dedektörlerin çalışma prensiplerine göre farklı gürültü kaynakları vardır. Bu dedektörlerde oluşabilecek dört ana gürültü mekanizması 1/F gürültüsü, üretim-yeniden birleşme (G-R), Johnson ve ön-yükseltici gürültüleridir.

1.2.2.2. Fotovoltaik dedektörler

Basitçe, fotovoltaik etki, uyarılmış pozitif ve negatif taşıyıcıların bir potansiyel bariyer yardımıyla birbirinden ayrılmasıyla gerilim veya akım üretildiği algılayıcılardır. Bu tür dedektörlere en iyi örnek bir p-n eklemidir. Gelen optik radyasyon bu iki malzemenin eklem noktasında soğurular ve elektron-deşik çiftleri oluşur. Bu e-h çiftleri çok küçük bir yönlendirme voltajı uygulanarak dedektörün elektrotlarında toplanır. Bu sayede birbirinden ayrılan e-h çifti malzeme içerisinde ölçülebilen akım veya voltaj değişikliği meydana getirerek elektriksel sinyal oluşur. Bu dedektörler, ışığa duyarlı bir yarıiletken yapısı (p-n eklemi ya da p-i-n) olması sebebiyle fotodiyot olarak da adlandırılabilir (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. p-n eklemli foton dedektörünün çalışması

P-i-n yapısındaki PV dedektörlerde, üç ana bölge bulunur. Fotoakım oluşturmak için gerekli elektrik alanı oluşturan p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler ve safsızlık atomlarıyla katkılanmayan yapının i-katkısız bölgesidir. Katkısız i bölgesinin varlığı, tüketim bölgesinin genişliğini artırır ve aygıt foton soğurma için daha uygun hale gelir. P-i-n yapısındaki InAs/GaSb Tip-II süperörgü (SL) PV dedektör yapısı ve PV dedektörlerin çalışma mekanizmasının şematik çizimi Şekil 1.7’de görülmektedir.

göre bazı dezavantajlar avantaj konumuna da geçebilmektedir. Örneğin, teknolojilerin üretim maliyetleri algılama sisteminin tercih edilip edilmemesinden liste başında yer alabilmektedir. Termal ve foton dedektörlerin üretim maliyetleri karşılaştırıldığı termal dedektörler büyük bir avantaj sahibidir. Bunun dışında dalgaboyundan bağımsız ve oda sıcaklığında da çalışabilmesi teknolojinin ana önemli artılarıdır [8]. Fakat algılama kabiliyetleri ve tepki süreleri için içine girdiğinde foton dedektörleri büyük bir farkla öne geçmektedir [8].

Kızılötesi foton dedektör teknolojileri Cıva Kadmiyum Tellür (Mercury Cadmium Telluride, MCT), külçe (Bulk) InSb küçük bant aralıklı foton dedektörleri, kuantum kuyu (QWIP'ler), kuantum nokta (QDIP'ler) ve süperörgü olmak üzere alt bantlar arası geçişe dayanan hetero yapıli foton dedektörlerinden oluşmaktadır. Kızılötesi dedektörlerin hızlı Auger yeniden-birleşme oranı, yüksek termal ısı oluşturma oranı (thermal generation rate) gibi etkileri yüksek sıcaklık uygulamalarında performanslarını düşürür. Yüksek sıcaklıkta görüntülemeye MCT dedektörleri yeterli performans değerlerine sahip olsa da üretim maliyeti ve büyütme zorlukları açısından dezavantajlıdır. Zaman içinde MCT dedektörlerinin büyütme zorluklarına alternatif olarak farklı bant aralıklı malzemelerin örgü uyumlu üst üste büyütülebilmesi ve taşıyıcılar üzerinde kuantum sınırlama esnekliğı, kuantum yapıli aygıt tasarımına olanak sağlamıştır. Bahsi geçen dedektör yapılarından olan QWIP'ler kuyu içerisinde izinli seviyelerde bulunan taşıyıcıların gelen kızılötesi ışımayla uyarılarak, kuyuyu oluşturan potansiyel engeli aşmasıyla foto-akım oluşturur. MCT ve QWIP'ler karşılaştırıldığında QWIP dedektör performansları düşük olsa da üretim homojenliğı ve malzeme verimi MCT ye göre oldukça yüksektir. QWIP dedektörlerin normal doğrultuda soğurma yapamaması performansını olumsuz yönde etkilediğı için normal doğruda soğurma yapabilen QDIP dedektör tasarımlarını gün yüzüne çıkmıştır. Kuantum noktalar, malzemelerin örgü uyumsuzluğundan yararlanılarak üretilir. QDIP'larda taşıyıcılarının ömrü uzun ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilme kabiliyetine sahiptir. Ancak, kuantum noktaların büyütülmesinde kontrolün zor olması ve nokta dağılımının homojen olmaması negatif yönleridir. Tüm bu teknolojilere ek olarak, performans açısından MCT'lere rakip olabilecek son 20 yılda üzerinde yoğun çalışmalar yapılan süperörgü yapılarıdır. Malzeme verimliliğı, büyütmedeki zorlukların ortadan kalkması ve yüksek yapısal homojenlik, kontrol edilebilir geniş dalgaboyu aralığı gibi önemli avantajlar, bu tasarımları araştırma alanlarında zirveye taşımıştır. Tüm bu farklı

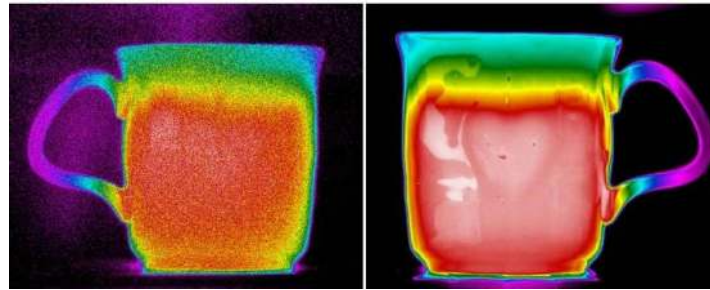
foton dedektörü teknolojilerin MWIR dalgaboyundaki performanslarının sayısal karşılaştırması Tablo 1.4'te özetlenmiştir.

Tablo 1.4. MWIR dalgaboyunda çalışan Kızılötesi dedektör performans değerleri [9]

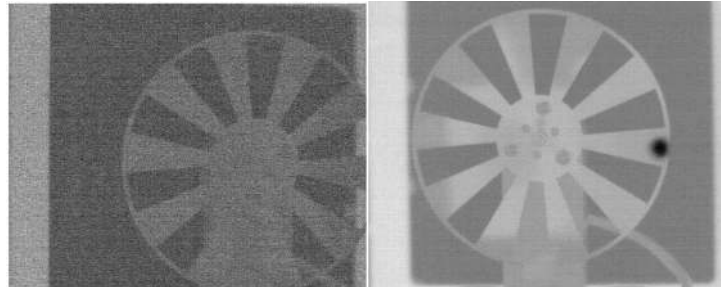
	MCT	QWIP	QDIP	T2SL
Kuantum verimi (%)	≥ 70	≤ 10	48	~ 70
R_0A (Ωcm^2)	10^8	Md	Md	10^6
Duyarlılık (Jones)	4×10^{15}	5×10^{11}	2×10^{11}	5×10^{12}

Md: Mevcut değil

Tip-II süperörgü dedektörler son yıllarda ticari uygulamalar için kızılötesi görüntüleme sistemlerine dahil edilmektedir. Bu tip dedektörlerin yüksek hızlı görüntüleme kabiliyetleriyle endüstriyel amaçlı kullanımlarını artırmış ve askeri uygulamalarda InSb ve MCT dedektörlerine göre önemli avantajlar sunar. Süperörgü kameraların, Görsel 1.6 da gösterildiği gibi, uzun dalga MCT'ye göre, özellikle önemli ölçüde daha düşük maliyet, genellikle daha geniş bant aralığı ve çok daha iyi görüntü tekdüzeliği gibi bazı belirgin avantajları vardır [8].



(a)



(b)

Görsel 1.6. (a) MCT ve süperörgü, (b) InSb ve süperörgü kamera görüntülerinin karşılaştırması [8]

1.3. Dedektör Performans Parametreleri

Geçmişleri boyunca bir kızılötesi dedektörün performansını belirlemek için çeşitli karakteristik tanımlamalar yapılmıştır. Dedektör değerlendirmesi ve farklı tipteki dedektörlerin karşılaştırılması için performanslarını gösteren başarı ölçütleri ve kriterleri geliştirilmiştir. Bu kriterlerin bazıları sadece deneysel sonuçları kullanırken bazıları da deneysel değişkenlerin normalize edilmesiyle oluşur. Tarihsel gelişim sürecinde termal dedektörün performans parametrelerinin birimleri çoğunlukla enerji tabanlı olacak şekilde tanımlanmıştır.

Kızılötesi dedektörler için çoğunlukla kullanılan performans parametreleri duyarlılık, sinyal gürültü oranı, gürültü eşlenik gücü, dedektivite ve gürültü eşdeğer sıcaklık farkı gibi alt başlıklardır.

1.3.1. Tepkisellik

Dedektörlerde tepkisellik, çıkış sinyalinin giriş sinyaline oranı şeklinde tanımlanır. Giriş sinyalinin foton gücü veya akısıyla dedektörün elektriksel sinyal çıkışı arasındaki geçişin bir ölçüdür. Işımanın giriş sinyali normalde Watt cinsinden ifade edilirken çıkış sinyali voltaj duyarlılığı adı verilen Volt veya akım duyarlılığı adı verilen Amper ile ifade edilir. Foton dedektörleri için yaygın olarak kullanılan birim Watt başına düşen Amper (A/W) dir.

Dedektör tepkiselliğinin yanı sıra spektral tepkisellik ve kara cisim tepkiselliği de bu parametrenin içerisinde yer alır. Spektral tepkisellik, gelen radyasyonun dalgaboyuna bağlı olduğu için dalgaboyunun bir fonksiyonu olarak belirtilir. Foton dedektörlerinde tepkisellik parametresi, gelen foton başına üretilen e-h çifti sayısı ile ilişkilendirilir ve kuantum verimliliği olarak adlandırılır.

Kuantum verimliliği η ,

$$\eta = R \frac{hc}{e\lambda}$$

Foton dedektörlerinin tepkiselliği

$$R = \frac{q}{h\nu} ng$$

şeklinde olup q elektron yükü, h Planck sabiti, ν foton frekansı, n soğurma kuantum verimliliği ve g foto iletkenlik kazancıdır.

Tepkisellik dedektörün tepki büyüklüğünü verir. Kazanç, doğrusallık, dinamik aralık ve doyumluk seviyesi gibi parametreler hakkında bilgi sağlar. Ancak, dedektörün sinyal/gürültü oranını vermediği için dedektör hassasiyetini ve performansını tanımlamada tek başına yetersiz kalır. Bu yüzden, bir dedektörün tepkiselliği büyük olsa bile eğer dedektörün gürültüsü de büyükse dedektörün performansı zayıf olacaktır.

1.3.2. Gürültü eşlenik gücü-NEP

Gürültü, dedektörün çıkış sinyalinde meydana gelen ve istenmeyen sinyal dalgalanmadır. Bir kızılötesi dedektör sisteminde gürültü tamamen engellenemeyeceği gibi dedektör hassasiyetini artırmak için en aza indirgenmelidir. Bu dedektörler için gürültü kaynakları harici ve dahili olmak üzere iki grupta sınıflandırılır. Ancak, buradaki esas odak noktası dedektör yüzey alanı, bant genişliği ve sıcaklığın bir fonksiyonu olan atış, üretim-yeniden birleşme (G-R), yüksek frekans ($1/f$), sıcaklık dalgalanması (Johnson gürültüsü) içeren dedektörün iç yani dahili gürültü kaynaklarıdır. G-R gürültüsü, potansiyel engeli olmayan yarıiletken aygıtlarda serbest taşıyıcıların ısı ile üretim ve yeniden birleşme oranlarındaki dalgalanmalardan kaynaklanır ve serbest taşıyıcıların yoğunluğundaki değişimle sonuçlanır. Böylece dedektör malzemesinin elektriksel direnci değişir ve voltajın dalgalanması şeklinde dedektör performansına yansır. $1/F$ gürültü sinyali frekansla spektral güç yoğunluğunun ters orantılı olduğu bir spektrumla karakterize edilen gürültü çeşididir. Bu gürültü kaynağının sebebi tam olarak anlaşılmamasına rağmen omik olmayan kontakta ve yarıiletken yüzeyinde meydana gelen potansiyel bariyerin varlığıyla ilişkilendirilmiştir. Eğer dedektörün arka plan akısı yeterince azaltılırsa, gürültü kaynağı termal gürültü olarak bilinen Johnson gürültüsü tarafından belirlenir. Sıcaklık 0 K'den yüksek olduğunda, yarıiletken malzemelerde dahil olmak üzere malzemedeki termal hareketlerden kaynaklı taşıyıcı dalgalanmasının bir sonucudur. Atış (Shot) gürültüsü, fotovoltaj dedektörlerde fotoakım esnasında potansiyel enerji bariyerinde meydana gelen dengesizliklerle ilişkilidir ve akım taşıyıcılarının kesikli doğasının bir sonucudur. Yani atış gürültüsü, fotonların dedektöre varış zamanının rastgele olmasından kaynaklanır ve bir dedektörün ulaşabileceği en küçük gürültü seviyesi olarak tanımlanır.

Dedektörün küçük miktardaki enerjiyi algılayabilmesi için dedektör yanıtının en üst seviyeye çıkarılması gerekir. Küçük enerjilerin algılanması, gürültü varlığı tarafından engellenebilir ve zayıf enerjinin ürettiği çıkışı maskeleyebilir. Bu nedenle gürültü küçük

enerji miktarlarının belirlenmesinde sınır koşulu oluşturur. Dedektör duyarlılığı belirli seviyedeki ışınlamaları tespit etmek için yeterli olsa bile gürültüyü dikkate almadığı için minimum enerji akısı için yetersiz kalır. Bu sebeple, dedektörün minimum enerjiye yanıtının bir ölçüsü olarak sinyal/gürültü oranı dikkate alınır, ancak bu oran dedektör performansının belirlenmesinde tek başına yeterli bir ölçüt olmayacaktır. Çünkü giriş gücü artırılarak Sinyal Gürültü (SNR) oranı artırılabilir. Fakat bu noktada, minimum saptanabilir sinyalin uygun bir ölçütü dedektör gürültüsüne eş çıkış sinyali veren veya SNR oranının 1 'e eşitleyen ışıma giriş gücü olarak tanımlanan gürültü eş değer gücü (NEP)dir.

$$SNR = \frac{R_i \Phi_e}{I_{Gürültü}}$$

$$NEP = \frac{I_{Gürültü}}{R_i} = \frac{\Phi_e}{\frac{I_{Sinyal}}{I_{Gürültü}}}$$

Burada, R_i dedektörün duyarlılığı, Φ_e de ışıma gücünü vermektedir. NEP dedektörün hassasiyetinin bir ölçüsüdür ve birimi Watt'tır. NEP değeri ne kadar küçükse dedektör o kadar hassas anlamına gelir ve mümkün olan en küçük NEP değeri istenir.

1.3.3. Detektivite

Gürültü eşdeğer gücü, özgün dedektör tasarımlar için tanımlayıcı bir performans parametresi olarak kabul edilse de farklı malzemelerden üretilmiş dedektörlerin karşılaştırılması için yeterli bir parametre değildir. Bunun için NEP'in tersi olan detektivite tanımı devreye girer. Dedektör hassasiyeti olarak da tanımlanan detektivite D ile sembolize edilir. Dedektör hassasiyeti ne kadar büyükse, gürültüyle mücadele eden algılanabilen minimum enerji değeri de o kadar küçük olacaktır.

$$D = \frac{1}{NEP}$$

Spesifik detektivite ise foton dedektörleri için evrensel hassasiyet ölçüsü olup, normalize edilmiş dedektör alanının ve bant genişliğinin, NEP'e oranı şeklinde elde edilir. D^* şeklinde sembolize edilen bu parametre R. C. Jones tarafından bulunduğu için birimi $\text{cm Hz}^{1/2}/\text{watt}$ veya Jones olarak kullanılmaktadır.

$$D^* = \frac{\sqrt{A_d \Delta f}}{NEP} = \frac{R_i \sqrt{A_d}}{\frac{I_{Gürültü}}{\sqrt{\Delta f}}}$$

1.3.4. Gürültü eşdeğer sıcaklık farkı-NETD

Bu parametre çoğunlukla odak düzlem dizinin performansını belirlemek için kullanılan karakteristik bir değerdir. Gürültü eşdeğer sıcaklık farkı (NETD), görüntülenen nesnenin veya cismin dedektör gürültü seviyesine denk sıcaklık değişimidir. Bu nedenle NETD, belirli bir kızılötesi kameranın algılayabileceği minimum sıcaklık farkının bir göstergesidir. Bu parametre, dedektörü oluşturan tüm sistem bileşenlerinden gelen katkıların dahil edildiği bir kamera sistemi ölçeğindeki performans parametresidir.

1.3.5. Karanlık akım

Karanlık akım, herhangi bir optik sinyalin yani soğurulan bir fotonun olmadığı durumlarda farklı yollarla ortaya çıkan ve dedektör üzerinden geçen elektrik akımına denir. Dedektörün mevcut gürültü miktarıyla güçlü bir şekilde ilgilidir ve bu sebeple dedektörün çalışma sıcaklığı hakkında da bilgi sağlayabilen bir parametredir. Dedektör karanlık akımı dedektör çalışma sıcaklığı dışında dış etkenlere bağlı olmayıp doğrudan dedektör malzeme yapısıyla ilişkilidir. Karanlık akım yoğunluğu difüzyon, üretim-yeniden birleşme, banttan banda geçiş, tünelleme ve yüzey sızıntı akımı gibi farklı mekanizmaların birleşiminden oluşur (Şekil 1.8).

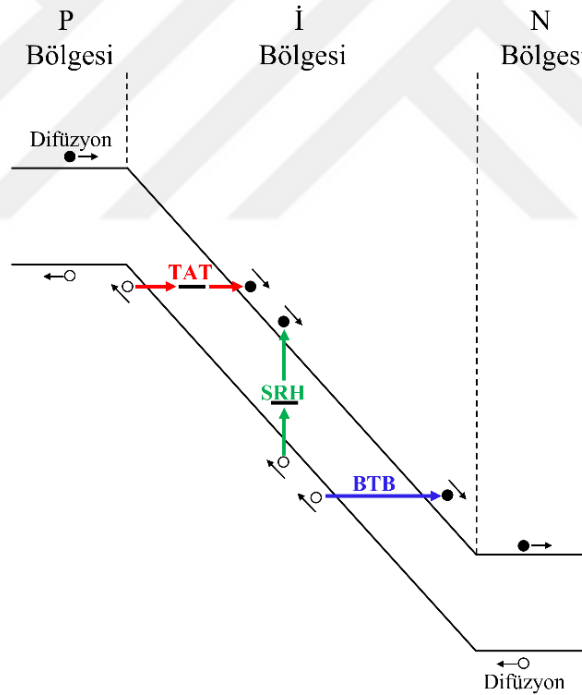
$$J_{Karanlık} = J_{Difüzyon} + J_{G-R} + J_{BTB} + J_{TAT} + J_{Yüzey\ Sızıntı}$$

Yüzey sızıntı akımı hariç diğer karanlık mekanizmalarının baskınlığı sıcaklığa bağlı değişir. Difüzyon akımı, azınlık taşıyıcıların eklem bir tarafında termal olarak üretilip eklem diğer tarafına doğru hareketinden kaynaklanır. Difüzyon akımı dedektör yapıları için temel bir mekanizmadır ve ortadan kaldırılamaz veya azaltılamaz.

Üretim -yeniden birleşme, yüzey veya tüketim bölgesinde gerçekleşebilen birkaç tane alt mekanizmadan oluşur. Shockley Read Hall (SRH) üretim-yeniden birleşme mekanizması, termal etki yoluyla yasak enerji bant aralığı içindeki dislokasyonlar, kusurlar, safsızlıklar ve deşikler sebebiyle elektron ve deşiklerin ayrılması veya yeniden birleşmesidir. Işımalı yeniden birleşme, doğrudan bant aralığına sahip yarıiletkenlerde gerçekleşen içsel bir akım mekanizmasıdır. İletim ve değerlik bantlarındaki serbest elektronlar ve deşikler yeniden birleşir ve foton yayılımı meydana gelir. Auger yeniden birleşmesi, enerji transferinin gerçekleştiği ve üç taşıyıcının dahil olduğu akımdır. İletim bandındaki bir elektron, değerlik bandındaki bir deşik ile yeniden birleşir ve ortaya çıkan fazla enerji üçüncü bir taşıyıcıya aktarılır. Bu parçacık, iletim veya değerlik bandındaki

bir elektron veya deşik olup, fazla enerjiyi bir fonon veya ısı olarak örgüye verir. Bu mekanizma genellikle düşük sıcaklıklarda, doğrudan bant aralıklı yarıiletken malzemelerde meydana gelen içsel bir akımdır. Bu akım mekanizmaları tamamen yok edilemese de yapısal optimizasyonlarla azaltılabilir.

Tünelleme, taşıyıcının enerji bariyerine takılmadan bir taraftan diğer tarafına geçebilmesine denir. Bir fotodiyottaki tünelleme mekanizmaları ikiye ayrılabilir: banttandır bant tünelleme (BTB) ve tuzak destekli tünelleme (TAT). BTB tünelleme, elektronların p-tipi bölgesinin değerlik bandından n-tipinin iletim bandına tünellemesi olarak tanımlanır. Daha çok dar bant aralıklı yarıiletkenlerde veya yüksek ters gerilim altında gerçekleşir. TAT'sa, elektron veya deşiklerine termal uyarımla tüketim bölgesinden tuzak seviyelerine uyarılıp daha sonra buradan tünelleyerek iletim veya değerlik bandına geçen karanlık akım mekanizmasıdır.



Şekil 1.8. Dar bant aralıklı pin diyotunda meydana gelen SRH, G-R, BTB ve TAT akım mekanizmalarının çizimi

Karanlık akım yoğunluğuyla ilişkili ve fotodedektörlere atfedilen bir başarı rakamı olarak kabul gören bir diğer parametrede R_0A veya dinamik dirençtir. Sıfır voltajda altında J-V eğrisinin eğiminin tersi olarak tanımlanır. Sıfır ön gerilimdeki diferansiyel direnç, foton dedektörlerin gürültü davranışını ölçmek için yaygın bir değerdir. Kısacası,

R_0A değeri ne kadar yüksekse dedektör performansı o kadar iyi demektir. Düşük R_0A değerlerine sahip aygıtlar, zaman içinde yüksek gürültü üretme eğilimindedir.

$$\frac{1}{R_0A} = \left. \frac{dJ}{dV} \right|_{V=0} = \frac{1}{A} \left. \frac{dI}{dV} \right|_{V=0} = \frac{e I_0}{k_B T}$$

R_0A denkleminde J akım yoğunluğu, V uygulama voltajı, A diyot alanı, I akım, I_0 ideal bir fotodiyotun geri besleme akımı, k_B Boltzmann sabiti, T sıcaklıktır ve birimi $\Omega \text{ cm}^2$ dir.



2. TİP-II SÜPERÖRGÜ KIZILÖTESİ DEDEKTÖRLER

Kızılötesi algılama teknolojisinde yüksek performans denilince akla düşük kusur yoğunluğu, yüksek kristal kalitesi ve kuantum verimliliği gelir. 1960'ların sonlarına doğru geliştirilen ilk büyütme sistemleri bu özellikleri sunmasa da zamanla geliştirilen ultra yüksek vakum pompalarının sisteme dahil edilmesiyle kusur yoğunluğunda azalmalar görülmüştür. Bununla birlikte, yapılan çalışmalarla atomik boyuttaki büyüme dinamikleri anlaşılmış ve kusur yoğunluğu düşük seviyelere taşınmıştır. Süreç içerisinde gelişen büyütme teknolojileri de katman kalınlıklarının hassas bir şekilde kontrol edilmesine olanak sağlamıştır. Böylece, yeni teknolojik gelişmelerinin temelleri atılmıştır.

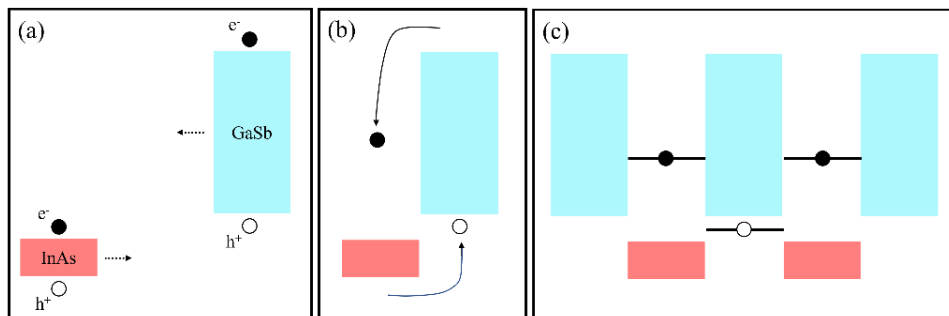
1980'li yılların ortalarına kadar kızılötesi dedektör teknolojilerinde ağırlıklı MCT, InSb ve InGaAs çalışmalarıydı. Ancak, 1977 yılında Leo Esaki ve arkadaşlarının InAs ve GaSb den oluşan süperörgü yapısına ait ilk teorik çalışmayı yapması ve aynı yıl içerisinde Harrison InAs ve GaSb arasındaki kırık bant dizilim teorisini hesaplaması yeni teknolojilerin kapısını aralamıştır [10,11]. Ancak, bu kırık bant dizilimindeki bantlar arası tünelleme olasılığını fark edenler Frensley ve Kroemer olmuş ve farklı bir noktaya dikkat çekmişlerdir. Bir sonraki yıl, Sai, Esaki ve Harrison, ince InAs ve GaSb katmanlarından oluşan süperörgünün, belirli bir enerji bant aralığına sahip bir yarıiletken gibi davranabileceğini öne sürmüşlerdir. Bu InAs/GaSb süperörgüsünün bant aralığının, InAs veya GaSb'nin bant aralıklarından küçük olduğuna ve daha da küçük ayarlanabileceği sonucuna varmışlardır [12]. 1987 yılında bu yapıların kızılötesi algılayıcı olarak kullanımına ilişkin ise ilk öneri ve uygulamalar ise Smith ve Mailhot tarafından gerçekleştirilmiştir [13].

1977'den 1990'ların sonlarına kadar, InAs/GaSb Tip-II SL (T2SL)'nin kızılötesi uygulamaları konusunda teorik ve deneysel olarak fikir birliği sağlanmıştır. Moleküler demet epitaksi (MBE) sisteminin gelişmesiyle beraber büyütmedeki teknolojik zorluklar aşmaya devam etmiştir. Böylelikle, T2SL malzemelerinin MBE yöntemi kullanılarak büyütülmeye başlanması 2000'li yıllardan itibaren ilgiyi toplamıştır ve bu yıllardan itibaren T2SL ile ilgili araştırmalar ortaya çıkmaya başlamıştır. Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik (IAF), Northwestern Üniversitesi Kuantum Cihazları Merkezi (CQD), Jet Tahrik Laboratuvarı (JPL) ve diğer araştırma kurumları, yüksek kaliteli T2SL malzemelerinin tasarımı, büyütülmesi, aygıt işleme teknolojisi ve üretim süreçleriyle ilgili kapsamlı araştırmalar yürütmüş ve büyük atılımlar yapmıştır.

Tüm bu ilerlemeler ve gelişmelerin bir araya gelmesiyle yeni fiziksel kavramlar, fenomenler, eşsiz elektronik ve optik özelliklere sahip yeni malzeme sınıfları, hetero eklem yapıları ve yeni umut verici uygulamaları gündeme taşımıştır. Bu yeni ve güncel kavramlar sınıfını oluşturan süperörgüler periyodik cetvelin III-V grubu malzeme bileşiklerinden oluşan ince yarıiletken katmanların çoklu tekrarından oluşur. Elektronik yapısı, süperörgüyü oluşturan bu tekrarlı malzemenin katman kalınlığına ve periyodikliğine bağlı olarak değişir. Bu bölümde süperörgü yapısının nasıl oluştuğunu anlamak üzerine durulmuş, kızılötesi algılayıcılarda yapı tasarımları, bariyerli yapılar ve farklı bariyer tasarımlarına yer verilmiştir.

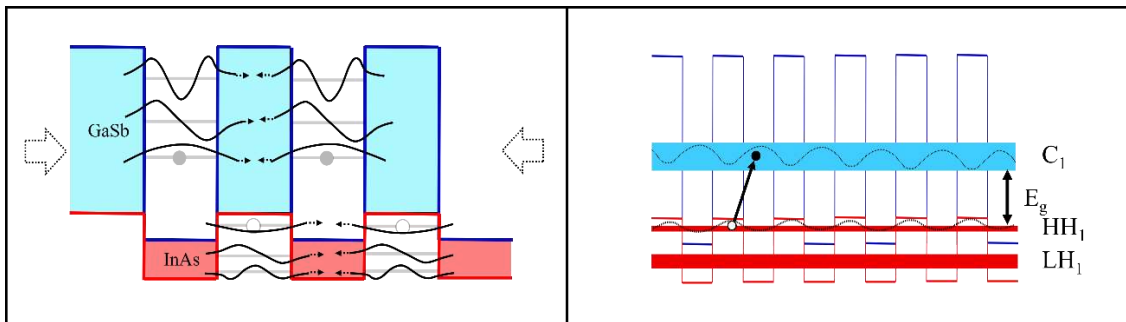
2.1. Süperörgü

Süperörgü kavramı basit bir dille kuantum kuyularının ardışık ve çok tekrarlı büyütülmesi şeklinde tanımlanabilir. Kuantum kuyusu, geniş ve dar bant aralıklarına sahip iki yarıiletkenin mikrometre kalınlığında ve birkaç tekrar büyütülmesiyle elde edilir. Süperörgülerde, kuantum kuyularının kalınlıkları atomik boyutlara kadar düşer ve her bir yarıiletkenin katman kalınlığı birkaç nm olacak kadar incedir. Tip-II süperörgülerin fiziğini anlamak için, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi adım adım bir oluşturma süreci hayal edilebilir. InAs ve GaSb yarıiletkenleri birbirinden izoleyken her bir yarıiletkende elektronlar ve deşikler bir arada bulunur (Şekil 2.1 (a)). Fakat bu iki yarıiletken birbirine yakın konumlandığında, iletim ve değerlik bant ofseti sebebiyle bir yük transferi meydana gelir. Sonuçta toplam enerjiyi en aza indirmek için elektronlar InAs iletim bandına ve deşiklerse GaSb değerlik bandına geçer (Şekil 2.1 (b)). InAs yarıiletkenin diğer tarafına bir tane daha GaSb yarıiletkeni yerleştirildiğinde, InAs yarıiletkeni elektronlar için kuantum kuyusuna dönüştür ve kuantize enerji seviyesi InAs katmanının iletim bandının üzerine çıkar (Şekil 2.1 (c)).



Şekil 2.1. Tip-II süperörgü yapısının oluşumu

Bu kuantum kuyu yapısı, nm kalınlıklarında tekrar tekrar sıralandığında, InAs yarıiletkenindeki elektronlar sonraki InAs'da bulunan elektronlarla etkileşime girer ve genel enerji düzeyini düşürür (Şekil 2.2). Bu resmin daha iyi oturması için kuantum kuyusunda geniş bant aralığına sahip yarıiletken elektron ve deşikler için potansiyel engel görevi görür ve dalga fonksiyonu potansiyel engel dışında sönümlenir. Yani elektron ve deşikler sadece kuyu içerisinde dalga fonksiyonun belirlediği izinli bölgelerde bulunabilir. Süperörgü yapısındaysa kuantum kuyularının katman kalınlıkları bir hayli ince olduğu için geniş bant aralığı potansiyel engel görevi gösteremez. Çünkü, ardışık büyütülen kuantum kuyularının dalga fonksiyonları sönümlenmeden diğer kuantum kuyusunun dalga fonksiyonu ile üst üste biner veya çakışır. Kuantum kuyusunda kuantize olan dalga fonksiyonları süperörgülerde çakışarak mini bant denilen hayali ama sürekli bir bant yapısı oluşturur. Bu değerlik ve iletim mini bantları arasındaki farkla yapıya yeni bant aralığı tanımlanır. Süperörgü yapılarının gerçek bir bant aralığının olmaması bu hayali mini bantlara dayanmaktadır. Bu sebeple süperörgü yapılarının bant aralığı dalga fonksiyonlarının örtüşmesiyle ilişki olduğu için bileşik malzemelerinin bant aralığından daha küçük olabilir. Bu enerjinin düşmesi, InAs/GaSb süperörgüsü ile diğer çoklu kuantum kuyusu sistemleri arasındaki temel farktır. InAs/GaSb sistemindeki tip-II bant hizalaması, verimli tünel akımına ve bitişik kuantum kuyular arasında etkileşime izin verirken, diğer bant hizalanmaları bariyer boyunca elektron tünellemesine izin vermez. Sonuç olarak, tip-II InAs/GaSb süperörgüsünün elektronik yapısı yalnızca bireysel kuantum kuyularının kesikli enerji seviyeleri ile ilgili değil, aynı zamanda kuyular arasındaki etkileşim ile de ilişkilidir.

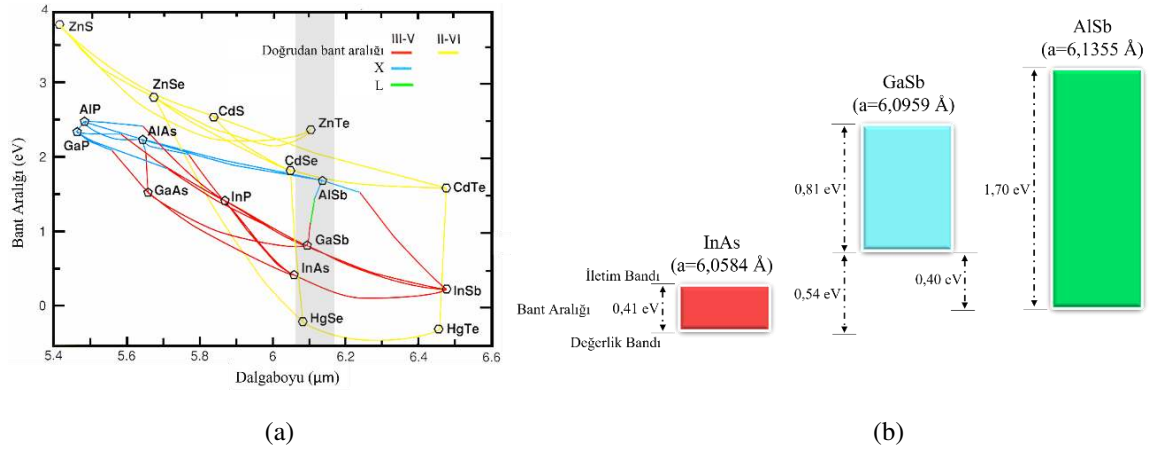


Şekil 2.2. Tip-II Süperörgü bant yapısı oluşumu

InAs ve GaSb katmanları kalın olduğunda, kuantize olmuş enerji seviyeleri InAs'ın iletim ve GaSb'nin değerlik bant kenarlarına yakındır. Bu durum, iletim bandının değerlik

bandının altında yer almasına yapının bir yarı-metal gibi davranmasına sebep olur. Ancak InAs ve GaSb katmanları incelidikçe iletim bandı yukarı doğru hareket ederken değerlik bandı aşağı doğru hareket eder ve iletim bandı değerlik bandının üzerinde kaldığında yapıyı yarıiletken hale getirir. Bir değişimin etkin kütlesi bir elektronunkinden çok daha büyük olduğu için, kuyu genişliğine elektronun kuantize enerji seviyesi değişimin kuantize enerji seviyesinden çok daha duyarlıdır. Bu, süperörgünün enerji bant aralığının katman kalınlıklarına bağlılığını iki unsurla açıklar. (1) Enerji aralığı InAs kalınlığı ile azalır, çünkü daha kalın bir InAs kuyusu iletim bandındaki elektronun kuantize edilmiş enerji seviyesini düşürür ve (2) daha kalın bir GaSb katmanı elektron etkileşimini azalttığı için enerji aralığı GaSb kalınlığı ile artar.

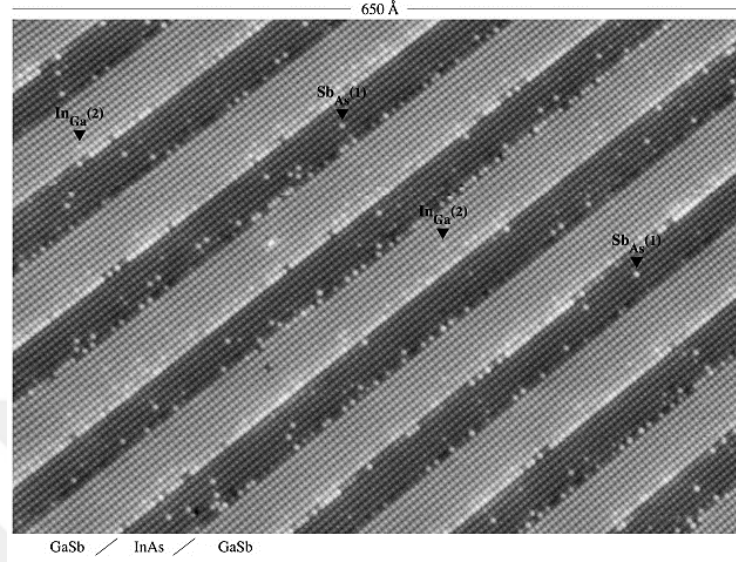
Süperörgü yapılar periyodik cetvelin III. ve V. malzeme grubuna ait çinko-sülfür kristal yapılı InAs, GaSb ve AlSb den oluşan ikili bileşiklerdir. Bu sözü edilen kristal birleşiklerin örgü sabitleri InAs için $a = 6,0584 \text{ \AA}$, GaSb için $a = 6,0959 \text{ \AA}$ ve AlSb için $a = 6,1355 \text{ \AA}$ şeklindedir (Şekil 2.3). Kristal örgü değerleri birbirine çok yakın olan bu kristal yapıları $6,1 \text{ \AA}$ örgü ailesi olarak da bilinir. Bu tasarımlara süperörgü denilmesinin nedeni malzemeler arasındaki atomik örgü uyumunun çok yüksek olması ve çok tekrarlı mini kuantum kuyuları içermesiyle bağdaştırılır.



Şekil 2.3. (a) Yarıiletken malzemelerin örgü sabiti ve enerji bant aralık grafiği (http-13) (b) $6,1 \text{ \AA}$ Ailesi'nin birbirlerine göre bant durumları ve enerji aralıkları

Çoklu tekrarlardan oluşan InAs/GaSb süperörgü yapısının Geçirimli Elektron Mikroskopuyla (TEM) atomik ölçekteki görüntüsü Görsel 2.1'de verilmiştir. TEM görüntü ölçeğine dikkat edilirse InAs/GaSb yapısı $\text{\AA}$ boyutlarında ve her bir katmanın kalınlığı $\sim 70 \text{ \AA}$ civarındadır. Süperörgüyü oluşturan InAs ve GaSb katmanların atomik

ölçekte analizi tekrar eden katmanlar arası ara yüz oluşumlarını ve yapısal kusurları ortaya koymakta etkili olmuştur.

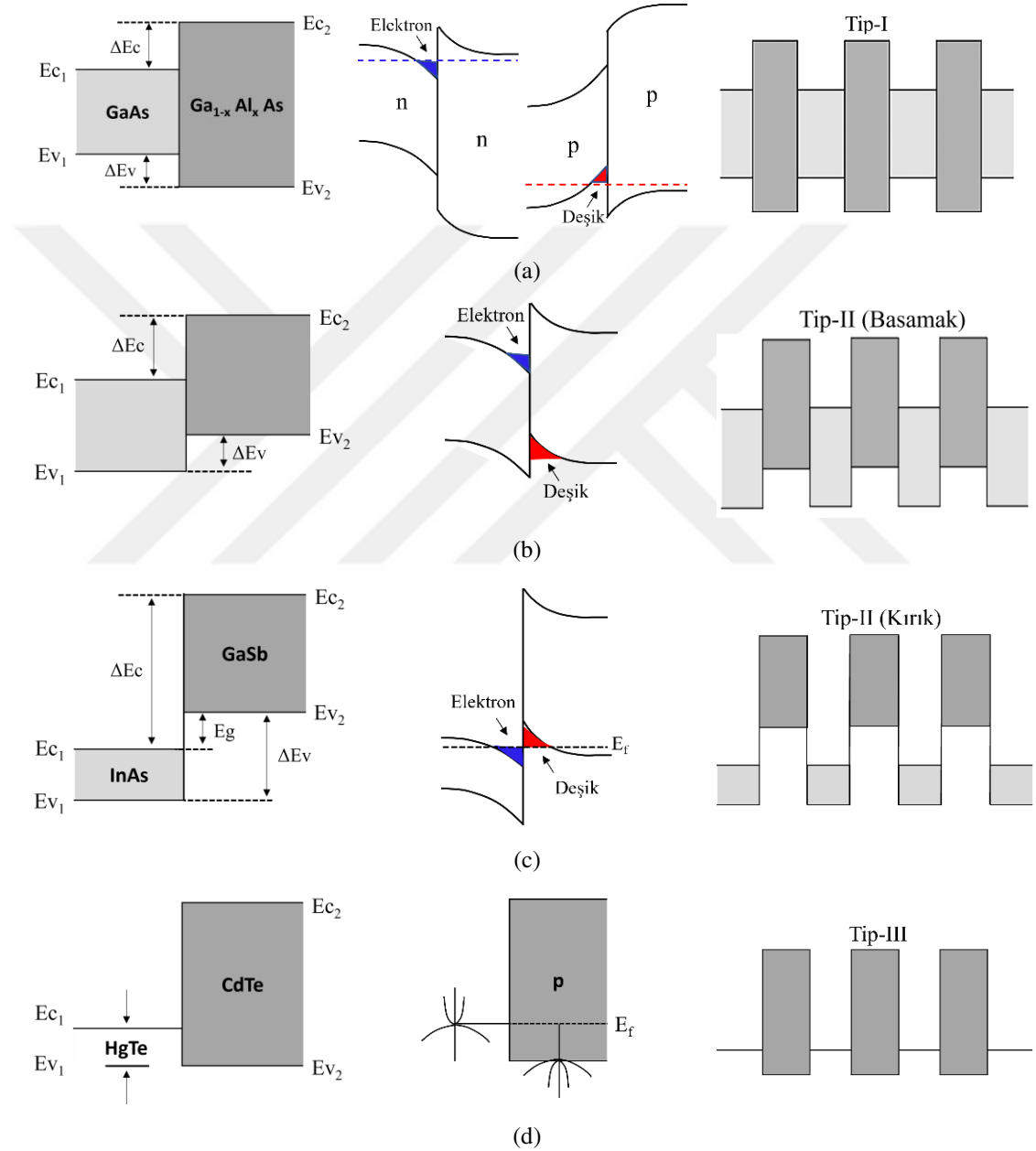


Görsel 2.1. Süperörgü yapısının atomik çözünürlükte TEM görüntüsü [14]

Farklı bant aralıklarına sahip bu ikili bileşiklerinin örgü parametrelerinin yakın olması sebebiyle birçok farklı aygıt tasarımına imkân sunar. Üst üste kristal yapılarının büyütülmesinde, örgü uyumu/uyumsuzluğu önemli bir yere sahiptir ve kristalin büyüme kararlılığı bu uyuma veya uyumsuzluğa bağlıdır. Fakat, malzemelerin kristal örgü uyumu yüksek olsa bile epitaksiyel büyütme dinamiklerinden biri olan kritik katman kalınlığının belirlenmesinde ayrıca önemli bir role sahiptir. Büyütülen yapıda alt ve üst katmanların örgü uyumsuzluk oranına göre büyüebilecekleri maksimum bir kalınlık değeri vardır ve buna kritik kalınlık (Critical Layer Thickness, CLT) değeri denir. Bu kalınlık değerine kadar kristal örgüsü belirli bir zor ve stres altında büyür. Eğer kritik kalınlık aşılsa örgü, zoru yönetemeyeceği için kristal örgüsünde kopmalar, yanlış veya eksik yerleşmeler meydana gelir. Yüksek örgü uyumu olsa da kusurlu katmanlar büyüyeceğinden yapının kristal kalitesi kötüleşecek ve bu durum doğrudan aygıt performansını etkileyecektir. Dolayısıyla örgü uyumlu bu malzeme grubu için bile bir sınırlama söz konudur.

Kuantum kuyu yapılarının fiziksel özellikleri, arayüzdeki bant süreksizliğiyle bant hizalanması tarafından belirlenir. Bant yapısındaki ani bir süreksizlik, uzay-yük etkilerini yansıtan, genellikle kademeli bir bant bükülmesiyle ilişkilendirilir. İletim ve değerlik

bantlarındaki süreksizlikler, yapı arayüzleri boyunca taşıyıcı aktarımının karakterini belirler. Bu nedenle, süperörgülerin veya kuantum kuyuların kızılötesi detektör amaçlı kullanımlarının uygunluğunu belirleyen en önemli özelliktir. Bant süreksizliklerinin değerlerine bağlı olarak, hetero eklem yapıları dört gruba ayrılabilir: Şekil 2.4'te gösterildiği gibi tip-I, tip-II "staggered-basamak", tip-II "misaligned-kırık" ve tip-III'dür.



Şekil 2.4. Süperörgü ve çoklu kuantum kuyularının (a) Tip-I, (b) Tip-II (Basamak), (c) Tip-II (Kırık) ve (d) Tip-III bant dizilim diyagramları

Tip-I bant hizalamasında, iki yarıiletkenin iletim ΔE_c ve değerlik ΔE_v bantları arasında farkın toplamı, iki yarıiletkenin bant aralığı farkına eşittir. Bu yapı tasarımında,

bir malzemenin iletim ve değerlik bantları, diğer malzemenin iletim ve değerlik bantlarının arasında yer alır. Bu durumda, elektron ve deşikler yarıiletken eklem yapısının aynı tabakası içerisinde lokalize edilir. Bu hizalanma şeklinde, yarıiletken tabakaların ardışık ve tekrarlı büyütülmesiyle taşıyıcılar tek boyutta sınırlandırılır.

Tip-II yapıları Tip-II “basamak” ve tip-II “kırık” hizalaması olarak iki grupta sınıflandırılır. Tip-II "basamak" hizalanmasında, bir malzemenin iletim ve değerlik bandı sırasıyla diğer malzemenin iletim ve değerlik bandının aşağısında yer almaktadır. Bu sayede, elektron ve deşikler farklı yarıiletken tabakalar içerisinde sınırlandırılır. Tip-III bant hizalanmasında pozitif bant aralıklı bir yarıiletkenle negatif bant aralıklı bir yarıiletkenin bir araya gelmesiyle oluşur. HgTe/CdTe yarıiletkenler bu bant hizalanmasına iyi bir örnektir. Hafif ve ağır deşik durumları arasında aktivasyon enerjisi olmadığı için bu yarıiletkenler tüm sıcaklıklarda yarı-metal gibi davranır.

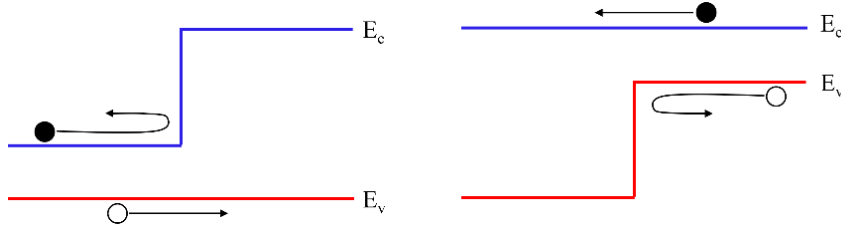
Tip-II "kırık" bant yapısındaysa bir malzemenin hem iletim hem de değerlik bandı, diğer malzemenin değerlik bandının aşağısında kalır. Böylece, değerlik bantları arasındaki bazı ışımasız (non-radiative) yollar ortadan kaldırılır ve taşıyıcı ömrü artarken karanlık akım azalır ve yüksek sıcaklıklarda cihaz performansında artış sağlanır. Bu bant hizalanmasından elektronlar InAs, deşikler GaSb katmanlarına geçerek birbirinden ayrılır ve farklı yarıiletkenlerde bulunurlar. Elektron ve deşik seviyeleri gerçek uzayda ayrıdır ve geçişler sadece taşıyıcıların dalga fonksiyonlarının örtüştüğü uzaysal bölgelerde meydana gelir. InAs/GaSb tip-II süperörgü yapılarının yüksek tekdüzeliği, ayarlanabilir bant aralığı ve düşük tünelleme akımı gibi özellikleri diğer bant hizalanmalarına göre avantaj sağlar.

2.2. Bariyer Yapısı

Bariyer kavramı, fotoiletkende yalnızca azınlık taşıyıcıların akışına izin verildiği ve hetero yapı boyunca sıfır tek bant ofset yaklaşımını içerir. İlk bariyerli dedektör yapısını, 1983 yılında yüksek empedanslı bir fotoiletken önerisiyle A. M. White tarafından yapılmıştır. Bu dedektör tasarımı, dar bant aralıklı n-tipi bir hetero aktif katman yapısını ince ama geniş bant aralıklı bir katman takip eder ve kontak bölgesi yine dar bant aralıklı katmanla sonlanır.

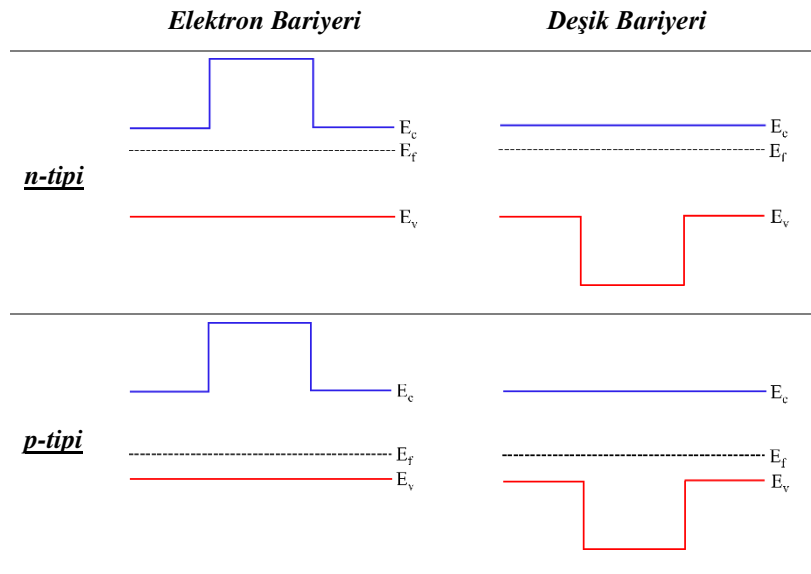
"Tek kutuplu bariyer" terimi, bir taşıyıcı tipini (elektron veya deşik) engellemeden akışına izin verirken diğer türdeki taşıyıcıların akışını engelleyen hetero yapıdır (Şekil 2.5). Genel olarak bariyer yapısı, dedektör malzemesinin epitaksiyel büyütmesine

eklenen daha geniş bant aralığına sahip malzemedir. Tek kutuplu bariyer ya çoğunluk taşıyıcıları ya da azınlık taşıyıcılar için engel oluşturabilir ve bu bariyerlere elektron veya deşik bariyeri denir (Şekil 2.5). Bu yapıların kullanılması, foto-akım akışını engellemeden karanlık akım oluşumunu azaltarak taşıyıcıların toplam verimliliğini artırır ve böylece dedektör performansının iyileşmesine katkı sağlar.



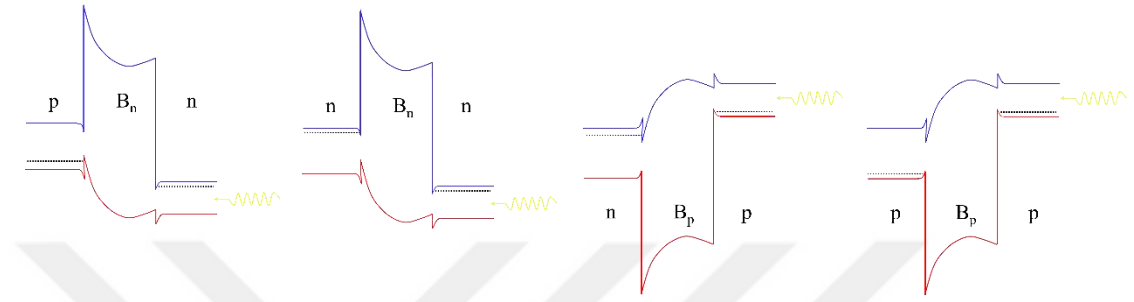
Şekil 2.5. Elektron ve Deşik bariyerlerinin temsili gösterimi

Yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcılar yarıiletkenin katkı tipine göre değişir. P-tipi bir yarıiletkende çoğunluk taşıyıcılar deşiklerken, n-tipi bir yarıiletkende ise elektronlardır. Bariyerin yarıiletkendeki konumuna ve yarıiletkenin tipine göre hangi taşıyıcıları engel oluşturacağı belirlenir. N-tipi bir yarıiletkende, elektron bariyeri çoğunluk, deşik bariyeriyse azınlık taşıyıcıları engellerken, p-tipi bir yarıiletkendeysen, elektron bariyeri azınlık, deşik bariyeriyse çoğunluk taşıyıcıları engeller. Şekil 2.6'da bariyerin bulunduğu konuma ve yarıiletkenin tipine göre temsili çizimleri verilmiştir.



Şekil 2.6. Yarıiletken tipine göre bariyer yapılarının temsili çizimi

Elektronları engelleyen tek kutuplu bir bariyer söz konusu olduğunda,deşikleri engellemeden akmasına izin verir. Değerlik bant ofseti sıfıra yakın bir şekilde korunurken, elektronların akışını engel olabilecek kadar geniş bir iletim bant ofsetine sahip olacak şekilde dikkatlice tasarlanır. Tek kutup bariyer yapı tasarımlarına ait çizimler Şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2.7. Tek kutuplu bariyer yapı tasarımlarının temsili çizimi

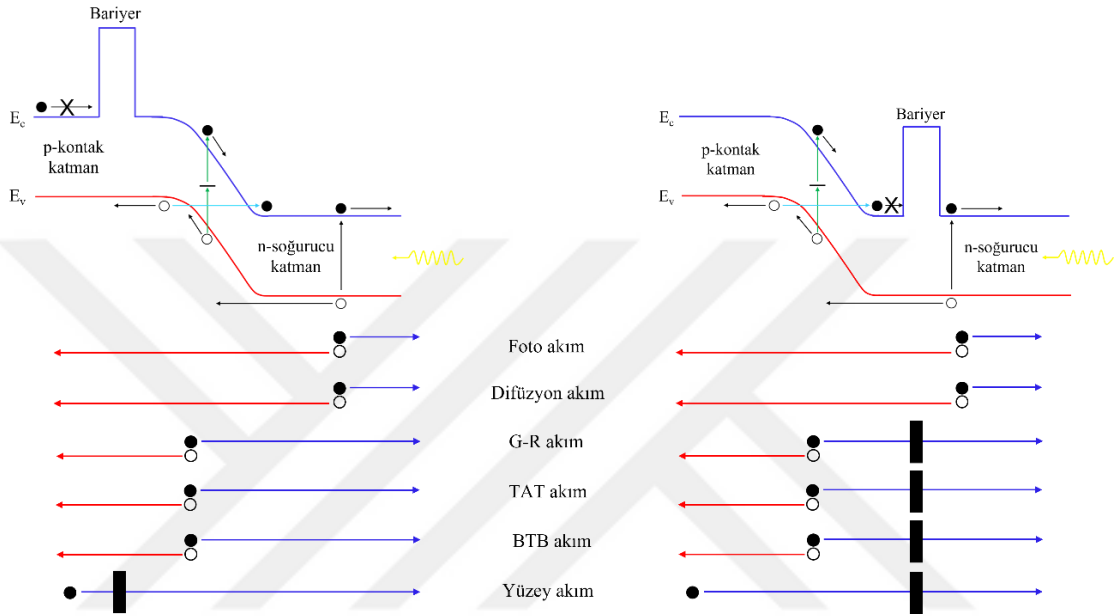
Tek kutuplu bir bariyerin epitaksiyel büyütmesi ve tasarımı ya sıfıra yakın değerlik bandı ya da iletim bandı ofseti gerekliliği sebebiyle oldukça zordur. Ayrıca, tünelleme akımlarını azaltmak için yeterli bariyer kalınlığının, kristal örgüsüyle uyumlu büyüebilmesi için, bariyer ve dedektör malzemelerinin örgü sabitleri de uyumlu olmak zorundadır. Tek kutuplu bariyer konsepti herhangi bir dedektör malzeme sistemine uygulanabilirken tüm bu zorluklar tasarımının uygulama yelpazesini daraltmıştır. Örneğin, InSb ve HgCdTe gibi standart kızılötesi dedektör malzemeleri kullanılarak değerlik bandı kaymasının (VBO) çok az veya sıfır olarak gerçekleştirilmesi bir hayli zordur. Bu nedenle, yapı tasarımında avantaj sağlanabilecek bariyer katmanının bulunması her yapı için mümkün olmayabilir.

Bu tez kapsamında pBn ve nBn tasarımlı süperörgü yapılarının kullanılması sebebiyle bu yapı tasarımları alt başlıklar halinde ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2.2.1. pBn dedektörler

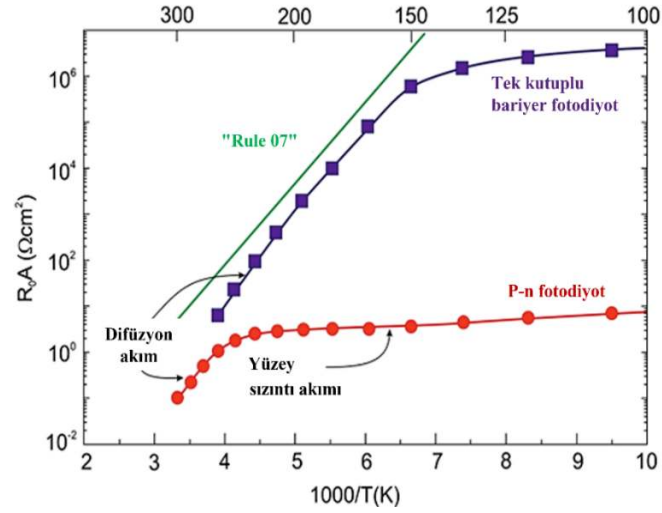
Bariyer tasarımı klasik bir p-n fotodiyotuna eklendiğinde pBn bariyerli dedektör yapısı elde edilir. Bu mimaride, bariyerin konumuna göre iki farklı konfigürasyon mevcuttur. Bariyer katmanı ya tüketim bölgesinin dışında ya da n-tipi yarıiletken veya p-tipi yarıiletken katmanının yakınında olacak şekilde konumlanır. Her iki durumda da iletim bandında olan bariyer elektron akışını engeller ancak bariyerin konumuna göre

filtrelediği karanlık akım bileşenleri farklılık gösterir (Şekil. 2.8). Tek bant diyagramında bariyerin n-tipi yarıiletkende konumlandığı durumda G-R, TAT, BTB ve yüzey sızıntı akımları p-tipi yarıiletkende konumlandığı durumda ise yüzey sızıntı akımı engellenir. Her iki duruma göre engellediği karanlık akım bileşenlerinin temsili çizimleri Şekil 2.8’de verilmiştir.



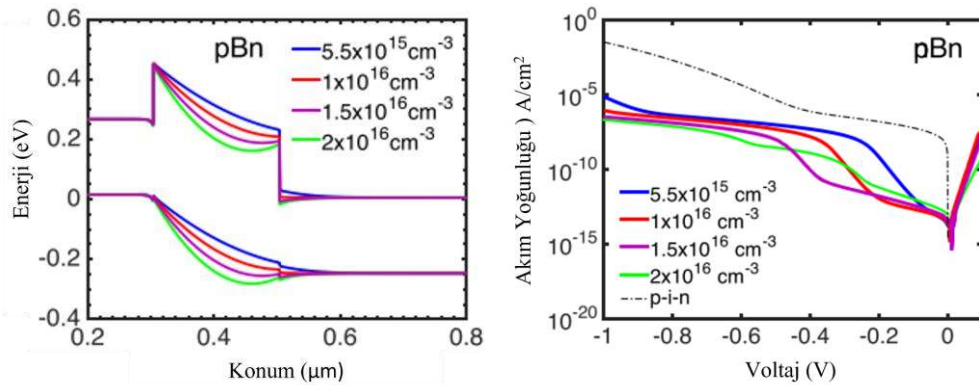
Şekil 2.8. pBn yapısına ait akım mekanizmaları

Şekil 2.9’da InAs yapısında AlAsSb tek kutup bariyerli fotodiyot için sıcaklığa bağlı R_0A değerlerinin geleneksel bir p-n fotodiyot ve "Rule-07" ile karşılaştırıldığı grafik verilmiştir. "Rule-07", en son teknolojiye sahip dedektörlere dayalı olarak bir kızılötesi dedektörün kalitesini değerlendirmek için oluşturulmuş bir ölçüttür. "Rule-07" seviyesindeki veya üzerindeki performans, Auger sınırlı performansı gösterir. Şekil 2.9 da verilen grafikte "Rule-07", 10^{15} cm^{-3} Auger difüzyon akımı ile sınırlanan ve performans karşılaştırmak için popüler bir referans yapısı olan bir p-on-n HgCdTe fotodiyot yapısının performansını gösterir[15]. Tek kutuplu bariyer fotodiyodu, "Rule-07" ye yakın performans gösterir. Difüzyonla sınırlı performans ve geleneksel bir p-n bağlantısına kıyasla düşük sıcaklık aralığında yaklaşık altı kat daha yüksek R_0A 'ya işaret eder.



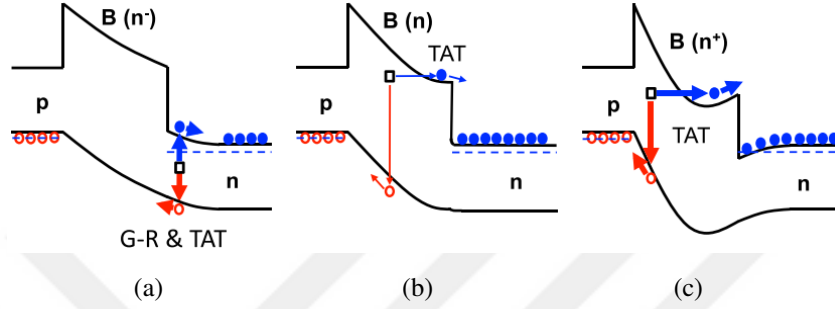
Şekil 2.9. Standart bir InAs ve n-kutuplu bariyer fotodiyotlarının sıcaklığa bağlı R_0A grafiği [15]

Tip-II süperörgü yapıları için karanlık akım mekanizmalarının teorik hesaplamaları konusunda hala pek çok araştırma grubu çalışmalarını sürdürmektedir. 2020 yılında Thi ve ark. tarafından yapılan teorik çalışmalarında InAs/GaSb süperörgü standart pin ve CBin tasarımları üzerinde durmuş. Çalışma da dikkat çeken kısım tip-II süperörgü pBn tasarımı için bariyerin farklı katkılama oranlarının karanlık akım yoğunluğu üzerindeki etkisi olmuştur. Bariyer katmanını olarak araştırmada kompozisyon oranı farklı InAs/GaSb süperörgü yapısı kullanılmıştır. Yapılan teorik çalışmalarda katkı ve karanlık akım arasındaki ilişki ve katkılı bariyerin enerji-bant diyagramı paylaşılmıştır (Şekil 2.10). Bariyer katkılama miktarına bağlı olarak karanlık akımda gözlenen değişimler bariyer için ideal katkılama seviyesinin belirlenmesi gerektiğini göstermiştir.



Şekil 2.10. Farklı bariyer katkılama oranlarındaki ve 77 K de pBn yapının bant ve karanlık akım yoğunluğunun teorik hesaplamaları [16]

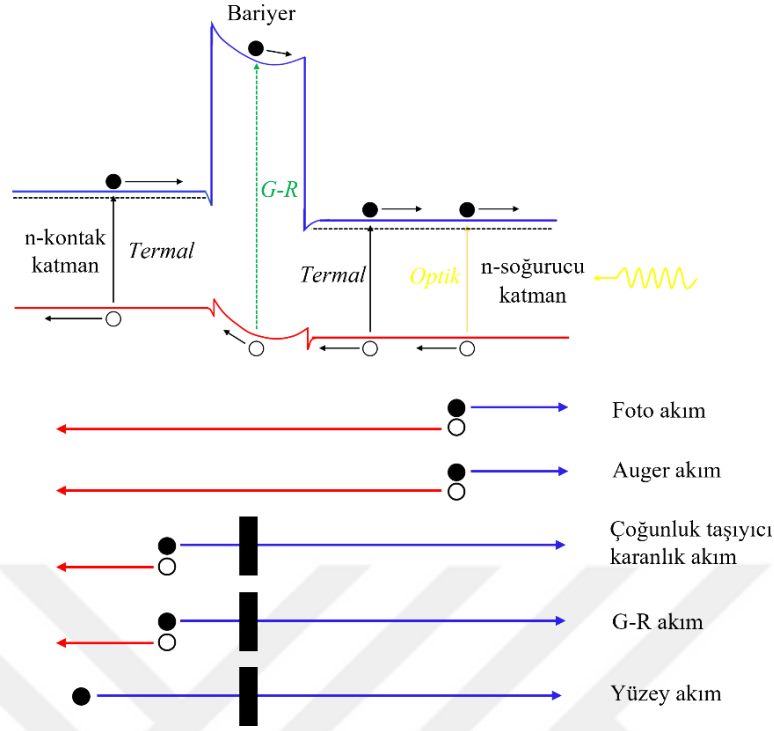
Karanlık akım yoğunluğundaki değişimlerden yola çıkarak katkılama oranına bağlı bant diyagramların da yaşanan değişimler ve akım mekanizmaları Şekil 2.11’de verilmiştir. Bariyer katkılama oranı az olduğu zaman bariyerde G-R ve TAT akımları, çok katkılandığında ise yüksek oranda TAT akımı baskın olmaktadır. Eğer ideal katkılama oranı yakalanırsa düşük oran da TAT karanlık akımı meydana gelir.



Şekil 2.11. *pBn dedektörleri için (a) düşük, (b) ideal ve (c) yüksek bariyer katkı oranlarına göre bant diyagramları ve akım mekanizmaları [16]*

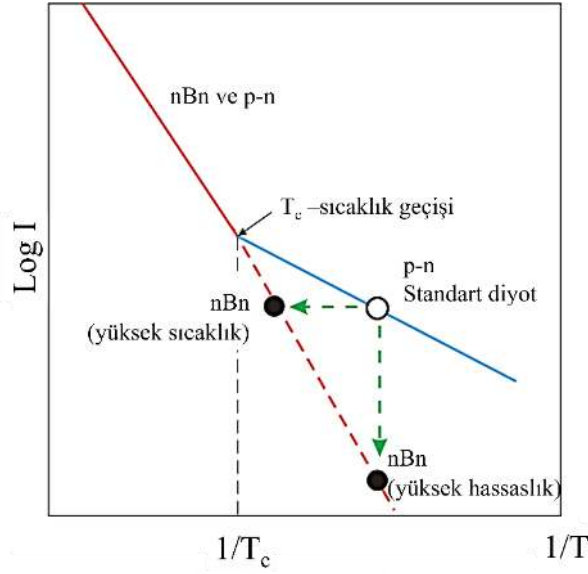
2.2.2. nBn dedektörler

Farklı bariyer dedektör türleri arasında son yıllarda en popüler olanlardan biri de nBn dedektör yapılarıdır. 2006 yılında Maimon ve Wicks’in tarafından InAs tabanlı orta dalgaboyunda çalışan ilk nBn dedektör tasarımlarını incelemişlerdir [13]. nBn bariyerli dedektör yapısında bariyerin bir tarafında dar bant aralıklı n-tipi yarıiletken kontak katmanı ve diğer tarafında yine dar bant aralıklı n-tipi aktif katmandan oluşur. Bariyer ve aktif katmanların katkılama türünün aynı olması karanlık akımın düşük difüzyon akımıyla sınırlandırmanın anahtarıdır. Şekil 2.12’de nBn yapı tasarımına ait baskın karanlık akım mekanizmalarının temsili çizimi bulunmaktadır. Bu nBn dedektör yapısı, fotoakımı engellemeden karanlık akımı ve gürültüyü etkili bir şekilde azaltmak için tasarlanmıştır. Yapının bir tüketim bölgesinin olmaması, üretim-yeniden birleşme, banttan banda tünelleme ve tuzak destekli tünelleme gibi farklı karanlık akım mekanizmaları azaltarak karanlık akım miktarını düşürür. Ayrıca, nBn dedektör mimarisinde bariyer katmanının dedektör yapısı kendi kendini pasifleştirmesine olanak sağlayarak özellikle yüzeyden kaynaklı kaçak akımı da azaltır. Böylelikle, dedektör fabrikasyonun da üretim adımlarından biri olan pasivasyon basamağına olan ihtiyacı da ortadan kaldırır.



Şekil 2.12. nbn yapısına ait akım mekanizmaları

Çoğu p-i-n diyot için, yüksek sıcaklıklarda karanlık akım mekanizmalarından difüzyon akımı ve düşük sıcaklıklarda ise üretim-yeniden birleşme akımı hakimdir. İdeal nBn mimarisinde, tüm sıcaklık aralığında sadece difüzyon akımı baskındır çünkü G-R akımı ya tamamen ortadan kaldırılır ya da büyük ölçüde azaltılır. Şekil 2.13, geleneksel bir p-n fotodiyotu ve bir nBn detektörünün karanlık akımlarının sıcaklığa ve algılama süresi ya da hızı arasındaki logaritmik ilişkiyi veren Arrhenius grafiğidir [17]. Difüzyon akımının sıcaklıkla ilişkisi $T^3 \exp(-E_{g0}/k_B T)$, burada E_{g0} sıfır sıcaklığında tahmini bant aralığı, T sıcaklık ve k_B Boltzman sabitidir. G-R akımının sıcaklıkla ilişkisi $T^{3/2} \exp(-E_{g0}/2k_B T)$ olarak değişir [17]. Standart fotodiyot için Arrhenius grafiğinin alt kısmıyla üst kısmı arasında bir eğim farkı mevcuttur. Eğimler, Boltzman sabiti ile çarpıldığında sırasıyla G-R ve difüzyon sınırlı davranışı için aktivasyon enerjilerine karşılık gelir. Kesintisiz çizgi nBn ve p-n yapılarında difüzyon ve G-R akımlarının eşit olduğunu ifade eder. T_c ise geçiş sıcaklığı olarak tanımlanmıştır. Kesikli çizgilerse, yüksek sıcaklıkta difüzyon sınırlı davranışının T_0 'ın altındaki sıcaklıklara bir uzantısı olup, G-R akımının olmadığı bir nBn bariyer dedektörünün davranışını temsil eder. Düşük sıcaklık bölgesinde, nBn detektörü iki önemli avantaj sunar. İlki, aynı sıcaklıkta çalışan geleneksel bir diyottan daha yüksek bir sinyal-gürültü oranı sergilemesi, ikincisiyse, aynı karanlık akıma sahip geleneksel bir diyottan daha yüksek bir sıcaklıkta çalışmasıdır [17].



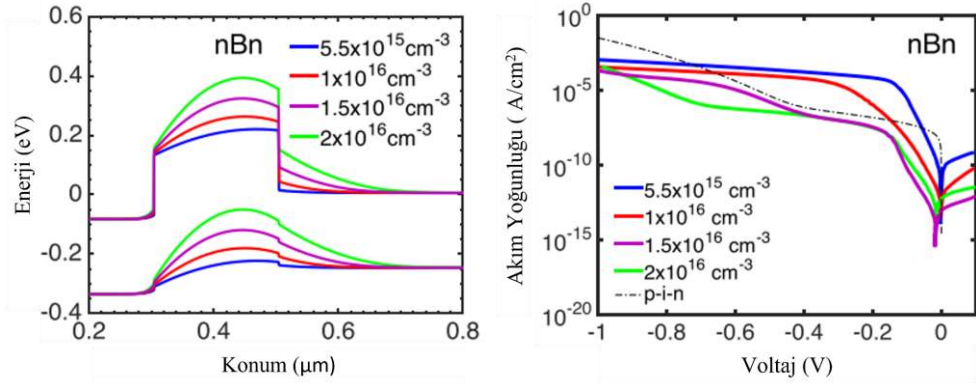
Şekil 2.13. Standart pin fotodiyotun ve nBn yapısının karanlık akım şematik Arrhenius grafiği [17]

Bu bilgiler ışığında nBn ve pin yapılarının karanlık akım mekanizmaları ayrıntılı olarak karşılaştırılmış ve Tablo 2.1’de verilmiştir. Dar bant aralıklı yarıiletkenlere dayanan fotodiyotlarda üç ana karanlık akım mekanizması vardır. Bunlar, bir fotodiyotun tükenme bölgesindeki üretim-yeniden birleşme akımı, yapı genelinde meydana gelen difüzyon akımı ve proses kaynaklı oluşan yüzey sızıntı akımıdır [18]. nBn tasarımının tüketim bölgesinin olmaması düşük karanlık akımı ve bariyer katmanının doğal pasivasyon etkisi gibi avantajları yapıda difüzyon akımını baskın hale getirir. Her iki dedektörün bant genişliği birbirine oldukça yakın olması taşıyıcı ömrüyle sınırlı olan dedektör tepki sürelerini benzer kılmıştır.

Tablo 2.1. nbn ve pin fotodedektörün karanlık akım mekanizmalarının karşılaştırması [19]

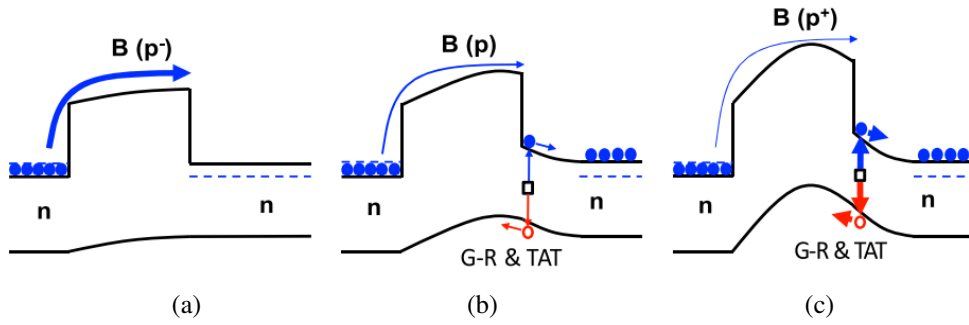
	<i>nBn</i>	<i>pin</i>
<i>Difüzyon akımı</i>	<i>Benzer</i>	<i>Benzer</i>
<i>Üretim-yeniden birleşme akımı</i>	<i>Düşük</i>	<i>Yüksek</i>
<i>Banttan banda tünelleme akımı</i>	<i>Düşük</i>	<i>Yüksek</i>
<i>Yüzey sızıntı akımı</i>	<i>Düşük</i>	<i>Yüksek</i>
<i>Tepki süreleri</i>	<i>Benzer</i>	<i>Benzer</i>

Tip-II InAs/GaSb süperörgü pBn çalışmasının devamında aynı çalışma nBn yapıları içinde yapılmıştır [16]. Yapıdaki bariyerin katkılama oranına bağlı olarak karanlık akım ve enerji bant diyagramları modellenmiş ve hesaplanmıştır (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Farklı bariyer katkılama oranlarındaki ve 77 K de nBn yapının bant ve karanlık akım yoğunluğunun teorik hesaplamaları akım [16]

Farklı kompozisyon oranlarında InAs/GaSb bariyer yapısı eğer yeterince katkılanmazsa taşıyıcılar bariyeri rahatlıkla aşabilir. Yüksek oranda katkılandığı durumda ise G-R ve TAT akımları meydana gelir ve düşük oranda olsa bariyeri aşarak akıma katılan taşıyıcılarda karanlık akımın katkı sayılabilir (Şekil 2.15). Ancak yapı yeteri kadar katkılandığı da G-R ve TAT akımı bir hayli baskılanacaktır. Düşük oranda bariyeri aşan taşıyıcı sayısı da az olduğu için toplam karanlık akım yoğunluğun da ciddi bir şekilde azalır.

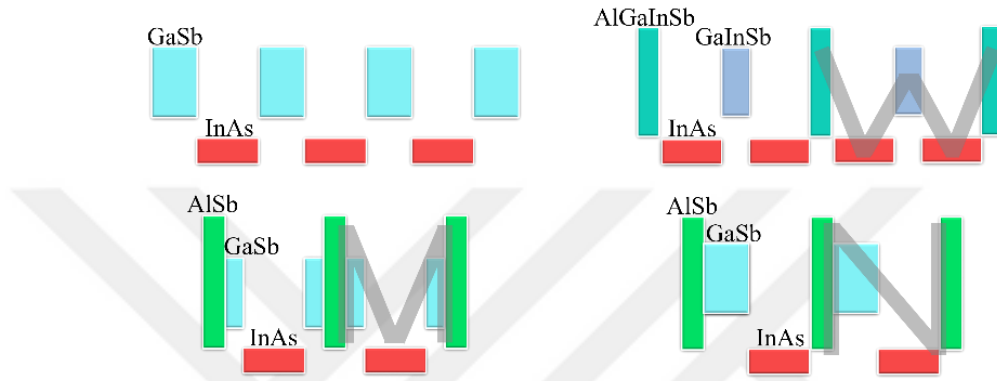


Şekil 2.15. nBn dedektörleri için (a) düşük, (b) ideal ve (c) yüksek bariyer katkı oranlarına göre bant diyagramları ve akım mekanizmaları [16]

2.3. Tip-II Süperörgü Dedektör Yapıları

2000’li yılların başlarında III-V malzeme grubuna ait 6.1 Å örgü ailesinden oluşan fotodedektörlerden elde edilen yüksek performanslı FPA’lerin tanıtılmasıyla dedektör teknolojisinin güncel durumu değişmiştir. Standart InAs/GaSb tip-II süperörgü yapı tasarımına geniş bant aralığına sahip katmanların eklenmesiyle kızılötesi dedektör yapılarında yeni yapı tasarımların yolu açılmıştır. InAs/GaSb süperörgü dedektör yapıları içinde tek kutuplu bariyer tasarımları oluşturmak, 6.1 Å örgü ve III-V malzeme ailesinin

InAs, GaSb ve AlSb esnekliği nedeniyle nispeten basittir. Yüksek örgü uyumu ve aynı katman genişliklerine sahip süperörgüler için değerlik bant kenarları, değişik kütleli nedeniyle çok yakın bir şekilde hizalanma eğiliminde olması tasarımları kolaylaştırır. Süperörgü yapılarında kullanılan yarıiletken malzemelerin bant aralıklarının birbirine göre konumları yapıların enerji bant diyagramlarını oluşturur. Bu bant diyagramlara göre de yapı tasarımlarına W, M veya N gibi kısa anımsatıcı adlarla anılır (Şekil 2.16).



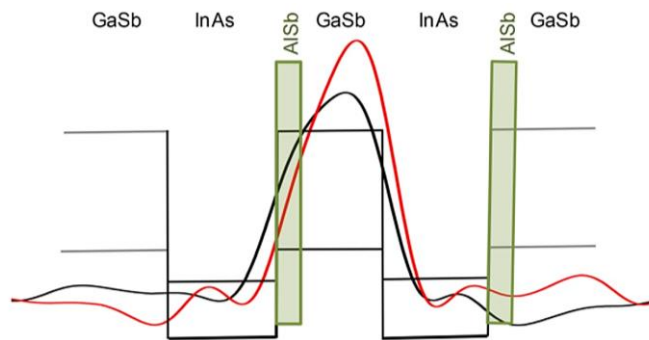
Şekil 2.16. Süperörgü bant dizilim modelleri

"W" yapısı, AlSb veya AlGaInSb katmanını içeren InAs/GaSb/InAs/AlGaInSb dördü ardışık süperörgü oluşmaktadır. Başlangıçta bu tasarım MWIR lazerlerde kazancı artırmak için geliştirilse de [20] LWIR ve VLWIR fotodiyot yapıları için umut vadetmiştir [21,22]. İki InAs elektron kuyusu, bir InGaSb deşik kuyusunun her iki yanında bulunur ve bu yapının her iki tarafta da AlGaInSb katmanları mevcuttur. Bu katmanlar, elektron dalga fonksiyonlarını deşik kuyusu etrafında simetrik olarak sınırlar ve dalga fonksiyonlarını lokalize ederek elektron-deşik örtüşmesini artırır. "W" yapı tasarımının sunduğu esneklik, süperörgü yapılarının hem de elektron engelleyen tek kutuplu bir bariyer, hem deşik engelleyen tek kutuplu bariyer ve aktif katman olarak kullanılmasıdır. Bu yapılar ağırlıklı olarak uzun dalga boyları için çalışılmıştır. W yapılı pin fotodiyotu ve MCT dedektör performansları karşılaştırıldığında W yapısının dedektivite değeri 10^{11} jones olup MCT dedektörler performansına yakın sonuç vermiştir [23].

"M" yapısında, daha geniş enerji bant aralığına sahip AlSb katmanı kullanılır ve GaSb katmanının ortasına yerleştirilir. AlSb katmanı GaSb deşik kuantum kuyusunun ortasında yer aldığından GaSb katmanını çift kuantum kuyusuna böler. AlSb'nin bariyer görevi görmesi değerlik bandındaki deşikleri iki ayrı kuantum kuyusunda sınırlandırarak

değerlik bandında yeni enerji seviyeleri yaratır [24]. Sonuç olarak, etkin kuyu genişliği azalır ve değişim enerji seviyesi kuyu boyutuna duyarlı hale gelir. Ayrıca ardışık InAs kuyularındaki elektronlar arası etkileşim azaldığı için tünelleme olasılığını da düşürür. M yapısı, karanlık akımı önemli ölçüde azaltarak diferansiyel direnci iyileştirir ve aygıtların optik özelliklerinde bozulma veya değişime neden olmaz. Uzun dalgaboyunda yapılan çalışmalarda, 0,128 ms civarında entegrasyon süreli, M yapılı süperörgü dedektörlerin daha önceki standart yapılı FPA'lere kıyasla piksel karanlık akımını 7 kat azaltmıştır [25]. Pek çok farklı yapı tasarımı kullanılan M-yapılı süperörgüler LWIR daki performanslarına ek MWIR [26] ve SWIR [27] dalga boylarında da çalışılmaktadır. SWIR dalgaboyunda dedektörün karanlık akım yoğunluğu $5,6 \times 10^{-8}$ A/cm², kuantum verimliliği %40,3 ve dedektivite değeri 1×10^{13} jones'dur [28]. M tasarımlı süperörgü yapıları p-p-M-n [28] ve pMp [29] gibi farklı tasarımlarda tünelleme akımını bastırmak veya deşik çoğunluk taşıyıcılarını engellemek için bariyer olarak da kullanılmıştır.

Bu süperörgü yapı tasarımları içerisinde en yenisi olan "N" yapısında, InAs ve GaSb den oluşan her bir periyottan önce ve sonra olmak üzere AlSb katmanı büyütülür. Yapıdaki AlSb katmanı konumu gereği büyük bir role sahiptir. Gerilim altında pin fotodiyotunda, elektron ve deşiklerin dalga fonksiyonları birbirine zıt yönde hareket eder. Ancak GaSb ve InAs periyotlarının arasına AlSb bariyeri eklendiğinde elektron ve deşiklerin dalga fonksiyonları AlSb arayüzeyinden daha uzağa doğru itilir [30]. Böylece, gerilim altındayken InAs/GaSb arayüzeyinde elektron ve deşik dalga fonksiyonlarının örtüşmesi artar (Şekil 2.17). Örtüşmenin önemli ölçüde artması sonucunda karanlık akım azalır ve soğurma artar. Bir elektron engelleme bariyeri görevi gören AlSb, karanlık akıma katkı sağlayan difüzyon akımını azaltmak için termal olarak üretilen taşıyıcıları bloke eder. Ayrıca, AlSb nin büyük elektron etkin kütleli ve geniş bant aralıklı bir malzeme olması nedeniyle kriyojenik sıcaklıklara kadar G-R akımını bastırılabilir.



Şekil 2.17. 0,001 meV altında AlSb bariyerli (Kırmızı) ve bariyersiz (siyah) integrali [30]

N yapı tasarımıyla ilgili literatürdeki çalışmaların çoğu N yapılı süperörgü patent yaratıcısı tez danışmanım Prof. Dr. Yüksel Ergün ve çalışma arkadaşlarına aittir. Ancak, 2017 yılında yarıiletken enstitüsünden Wu ve arkadaşları metan gazı tespiti için Resonant Cavity Enhanced (RCE) N-yapılı tip-II üst örgülü MWIR foton detektörü geliştirmişlerdir [31]. Yine aynı enstitüde Du ve arkadaşları InAs/GaSb süperörgü yapılarının M- ve N-tasarımları için elektronik bant yapılarının 8-bantlı k.p metoduyla hesaplamış ve teorik karşılaştırmasını yapmıştır. Teorik hesaplama ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum elde edilmiştir. Standart InAs/GaSb süperörgüyle karşılaştırıldığında, N- ve M- yapısının bant aralığı ve etkin kütlesi, AlSb katmanlarının kalınlığı arttıkça arttığı görülmüştür [32]. Ayrıca, ek olarak AlSb bariyerinin M yapısındaki konumunu değiştirmenin etkisi de incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, üç tip SL'yi karşılaştırarak, N- ve M-yapı tasarımlarında karanlık akım açık bir şekilde baskılandığı ve dalga fonksiyonu örtüşmesini artırılabilir olduğunu bulmuşlardır [32]. Ancak, yapılan tüm bu çalışmalar ışığında, N- veya M- yapılarından birinin diğerine üstün gelebileceğine dair net ve kesin bir çıkarım yapılamamıştır. N- ve M- tasarımlarının tarihçesine bakıldığında ise N-, M- 'den daha yeni bir tasarım olması gelişmelere daha açık olduğu anlamına gelir. Buna ek, N-yapısını dünyada ağırlıklı olarak Türkiye'deki araştırma grupları tarafından çalışılmaktadır. Dolayısıyla, dünya çapında T2SL için N- tasarımında diğer tasarımlar da olduğu kadar henüz yoğun bir araştırma birikimi mevcut değildir. Bu sebeple, bu çalışma kapsamında yapılan araştırmalar ve yayınlar literatür için büyük önem arz etmektedir.

2.4. SWIR ve MWIR Aralıklarında Çalışan Fotodedektörler

III-V grubu yarıiletken tabanlı e-SWIR ve SWIR dedektörleri, çeşitli yapı tasarım olanaklarıyla dünya çapındaki araştırmacılar tarafından aktif olarak takip edilmektedir. Çünkü telekomünikasyon, uzaktan algılama, spektro-radyometri, spektro-fotometri ve astronomik gözlem gibi pek çok uygulama alanı vardır. SWIR bandında görüntüleme, termal-kızılötesi veya görünür bantlarla karşılaştırıldığında hem aktif hem de pasif görüntüleme yapabildiğinden görünür bölgeden çok daha yüksek çözünürlük sunar. Ek olarak teknolojik çeşitlilikleri de dikkate değer avantajlar sağlar. Dedektör yapısı periyodik cetvelin III. ve V. grubundan oluşan e-SWIR dedektörleri, ağırlıklı olarak InP veya GaSb tabanlar üzerine büyütülürler. Birinci grup, InP tabana büyütülen örgü uyumlu ve gerilim telafili InGaAs/GaAsSb tip-II süperörgüleri içerir [33, 34]. İkinci grup daha çok Sb içerikli olup GaSb tabana büyütülen InGaAsSb [35,36], InAs/GaSb/AlSb/GaSb

[37, 38], InAs/AlSb [39] ve InAs/InAsSb/AlAsSb [40, 41] tip-II süperörgü yapılarından oluşmaktadır. Bu başlık altında e-SWIR yapılarından bazıları örnek çalışmalar olarak ele alınmış ve kısaca anlatılmıştır.

SWIR bölgesinde çalışacak şekilde 0.5 μm n-tipi üst kontak, 2 μm aktif katman kalınlığında InAs/GaSb/AlSb M yapılı tip-II süperörgü ve 0,5 μm n-tipi üst kontak tasarımı Hoang ve ark. tarafından yapılmıştır [27]. 150 K sıcaklığında karanlık akım yoğunluğu $5,6 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, önden aydınlatıldığında kuantum verimliliği %40,3 ve dedektivite değeri 1×10^{13} Jones' dur. Sıcaklığı 150 K iken dedektör D* performansı, 77 K'de çalışan InAs/GaSb tip-II SL'ye dayalı foto iletkenlerin dedektivite değerinden 4 kat daha büyük olup $1,0 \times 10^{13}$ Jones'luk değere ulaşmışlardır. Sıcaklığı 300 K ve 0 mV altında $1,7 \times 10^{10}$ Jones' un spesifik dedektivite ve en yüksek yanıtta %41,5'lik bir kuantum verimliliği elde edilmiş. Oda sıcaklığındaki bu yüksek performans, kriyojenik soğutma sistemlerinin çıkarılmasına izin verebileceği ve daha fazla aygıt optimizasyonu yapılarak potansiyel olarak dedektör performansının artabileceği söylenmiş.

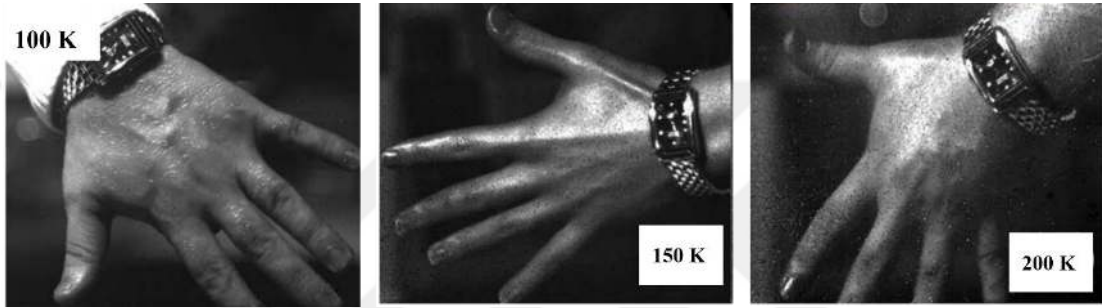
Razeghi ve grubu GaSb tabana büyütülen Tip-II InAs/InAsSb/AlAsSb süperörgü SWIR n-i-p fotodiyot üzerinde çalışmıştır. Oda sıcaklığında, 1,6 μm dalgaboyunda önden aydınlatıldığında pik tepkiselliği 0,47 A/W, sıfır voltaj altında %37 kuantum verimliliği elde etmişlerdir [42]. Karanlık akım yoğunluğu 300 K de ve -50 mV da $9,6 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$, RxA değeri $285 \Omega \text{ cm}^2$ ve dedektivite ise $6,45 \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$ şeklinde ölçülmüş. Aynı aygıtın 200 K sıcaklığında karanlık akım yoğunluğu $1,3 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, kuantum verimliliği %36 ve dedektivite değeri $5,66 \times 10^{12} \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$ şeklinde elde etmişler [42]. Çalışmada aynı zamanda SWIR da algılama yapan diğer tip-II süperörgü teknolojilerin performans değerlerini de karşılaştırmışlardır (Tablo 2.2).

Tablo 2.2. SWIR aralığında çalışan dedektör teknolojilerinin performans karşılaştırılması [42]

	Kesim Dalgaboyu (μm)	Sıcaklık (K)	Spesifik Dedektivite (Jones)
InAs/InAsSb/AlAsSb	1,8	300	$6,45 \times 10^{10}$
InGaAs	1,7	300	5×10^{12}
MCT	2,4	250	$5,92 \times 10^{12}$
InAs/GaSb/AlSb	2,2	300	$1,7 \times 10^{10}$

Dehzangi ve ark. 12 μm 'lik piksel adımlı 1280x1024 dizinli e-SWIR da algılama yapan InAs/AlSb/GaSb süperörgü fotodedektör üretmişlerdir [43]. Yapıda p-tipi üst ve

n-tipi alt kontak katmanlarında daha büyük bant aralığına sahip katmanlar kullanılarak C_pBn tasarımı yapmışlar. Dedektörün karanlık akım yoğunluğu -20 mV voltajda 150 K ve 200 K sıcaklıklarında sırasıyla $1,63 \times 10^{-7}$ ve $8,3 \times 10^{-4}$ A cm^{-2} ve dedektivite değerlerinde $1,01 \times 10^{11}$ ve $4,30 \times 10^{10}$ cm $Hz^{1/2}/W$ ölçülmüş [56]. Fotodedektörün karanlık akımı, 160 K üzerindeki çalışma sıcaklıklarında difüzyon sınırlı ve bu sıcaklığın altında G-R akım sınırlı olduğu belirtilmiş. Geçiş sıcaklığı, T_0 , olan 160 K de ise hem G-R hem de difüzyon akımının birbirine eşit olduğu söylenmiştir. Bu detektöre ait farklı çalışma sıcaklıklarında alınan görüntüler Görsel 2.2’de verilmiştir.



Görsel 2.2. Farklı sıcaklıklarda e-SWIR da çalışan 1280x1024 FPA görüntüsü [43]

Haddadi ve çalışma arkadaşları GaSb taban üstüne nBn yapılı tip-II InAs/AlSb/GaSb süperörgü tasarımına daha geniş bat aralıklı AlAsSb/GaSb süperörgü bariyer yapısını eklemişler ve bu bariyer yapısına H-yapısı adını vermişler [44]. Yapılan karakterizasyon çalışmaları, 300 K sıcaklığında 1,9 μm de dedektörün pik tepkiselliği 0,65 A/W, kuantum verimliliği %41 ve -400 mV voltaj altında karanlık akım yoğunluğu 8×10^{-3} A/cm² şeklinde sonuçlanmıştır. 150 K deki karanlık akım mekanizması $9,5 \times 10^{-9}$ A/cm² ve kuantum verimliliğinde %50 ye ulaşmışlardır [44]. Aynı çalışma grubunun başka bir ekibiyse, aynı nBn yapılı InAs/GaSb/AlSb süperörgü yapısına InAsSb/GaSb süperörgü bariyer yapısını eklemiştir [45]. Test piksellerinden alınan sonuçlara göre 300 K ve 150 K sıcaklıklarında kuantum verimlilikleri sırasıyla %63,8 ve %59,7 elde edilmiş. Aynı voltaj değeri altında, 300 K ve 150 K deki karanlık akımlarıysa $4,75 \times 10^{-2}$ ve $8,75 \times 10^{-8}$ A/cm² dir [45]. Bu yapıdan üretilen dizin dedektörün 100, 200 ve 300 K sıcaklıklarda aldıkları görüntüler Görsel 2.3’te paylaşılmıştır. İki ayrı çalışmanın sonuçları karşılaştırıldığında H-bariyerli yapının süperörgü dedektör performans değerlerinin daha iyi olduğu görülmüş.



Görsel 2.3. Farklı sıcaklıklarda e-SWIR'daki termal görüntüleri [45]

Uzun yıllardır standart pin yapılı InAs/GaSb süperörgü foton dedektörleri çalışılmaktadır. Bariyerli yapıların tip-II süperörgü yapılarına dahil edilmesiyle standart süperörgü tasarımı değişmeye başladı. Böylece dedektör yapı ve malzeme dinamiklerinin anlaşılması için en hızlı ve basit yöntem olan karanlık akımı sıklıkla tercih edilen bir parametre haline geldi. 2019 yılında, Çin'in optik ve fotonik devlet laboratuvarın da yapılan bir çalışma da MWIR dalgaboyu aralığında çalışan InAs/GaSb SL yapısının pin ve nBn için karanlık akım teorik modellemeleri karşılaştırılmıştır [46]. Çalışmada, MWIR dalgaboyunda 10ML InAs/10ML GaSb T2SL'nin soğurma spektrumu teorik olarak hesaplanmış. Düşük sıcaklıkta, p-i-n dedektörünün karanlık akımında tünelleme akımı hakimken, nBn de ise tünelleme etkisini önemli ölçüde engellendiği görülmüş. 200 K'de, her iki yapının da soğurma katmanının katkısı arttıkça karanlık akımı azaldığı da dikkatlerinden kaçmamıştır [46].

InAs/GaSb süperörgü dedektörlerinde MWIR dalgaboyunda ilk dizin dedektör 2005 yılında Walther ve ark. tarafından yapılmıştır [47]. Dedektör 5.4 μm kesme dalgaboyuna sahip 40 μm piksel adımı 256×256 MWIR FPA formatındadır. Performans değerinden kuantum verimi %30, 77 K'de dedektivite değerleri 10^{13} Jones dur [47]. InAs/GaSb az tekrarlı süperörgü FPA dedektöründen aldıkları termal görüntüde kan damarlarının görüntülenebilmesi 10 mK civarındaki NETD değerlerini gösterdiğini vurgulamışlardır. Dedektörden elde edilen termal görüntü Görsel 2. 4'te verilmiştir. İlk FPA olmasına rağmen görüntü kalitesi ve performansı oldukça iyi olması çalışmalarının bu yönde hız kazanmasını sağlamıştır.

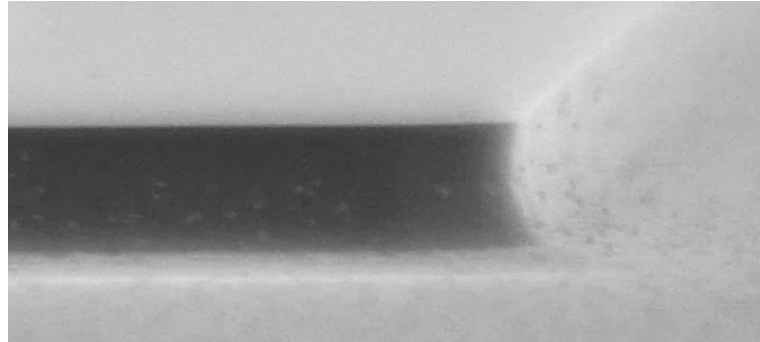


Görsel 2.4. 256x256 MWIR FPA kamera sistemi ile çekilmiş termal görüntü [47]

Kesim dalgaboyu $4,8 \mu\text{m}$ olan 8 ML InAs/ 8 ML GaSb pin T2SL yapısıyla çalışan Y. Q. Lv ve arkadaşları 77 K sıcaklığında dizin dedektör görüntüsü almışlardır (Görsel 2.5). Dedektörün pik dedektivitesi $7,1 \times 10^{11} \text{ cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$, kuantum verimliliği %50, R_oA ise $5 \times 10^5 \Omega \text{ cm}^2$ ve karanlık akım yoğunluğu da 10^{-5} A cm^2 seviyelerindedir [61]. 128x128 dizinli $50 \mu\text{m}$ piksel adımlı dizin üretiminde kuru aşındırma ve ZnS pasivasyonu yapmışlar [48]. Aşındırma sonrası piksellerin yan duvar profillerini Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) de incelemişler ve SEM görüntüsü de Görsel 2.6’da verilmiştir.



Görsel 2.5. Piksellerin ICP aşındırması sonrası SEM görüntüsü [48]



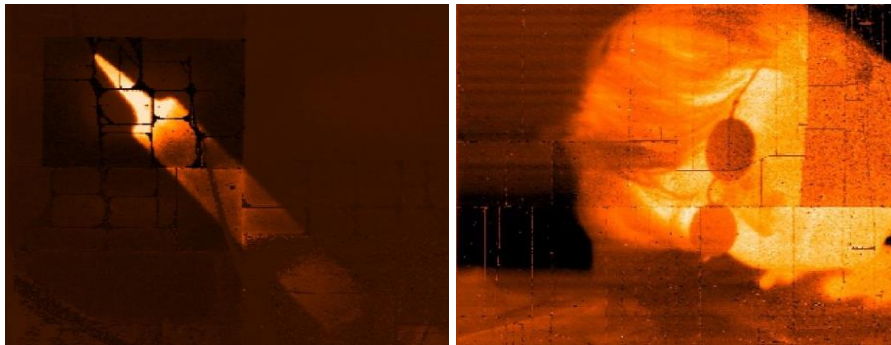
Görsel 2.6. 128x128 dizinli FPA MWIR termal görüntüsü [48]

T2SL yapılarıyla uzun yıllardır çalışan Plis ve grubu çalışmalarına bariyerli T2SL de eklemiştir. 2008 yılında, 77 K de kesim dalgaboyu 4,2 μm olan nBn tasarımı ve bariyer malzemesi AlGaSb olan T2SL dizin dedektör sonuçlarını paylaşmıştır. Çalışma da üretilen 320x256 dizinli 30 μm piksel adımlı 77 K sıcaklığında entegrasyon süresi 16,3 ms olan dedektörden görüntü almışlardır (Görsel 2.7). Aynı sıcaklıkta, 1×10^{-7} A/cm² karanlık akım yoğunluğu, 4 μm 'lik dalgaboyunda 1,5 A/W tepkiselik ve $6,4 \times 10^{11}$ Jones dedektivite elde etmişler [49].



Görsel 2.7. 77 K de 320x256 InAs/GaSb T2SL nBn termal görüntü [49]

Japonya Havacılık ve Uzay Araştırma Ajansı (JAXA) kesim dalgaboyu 6 μm olan MWIR aralığında çalışan tip-II 9-ML InAs/7-ML GaSb pin fotodiyot FPA üretmişlerdir [50]. Dizin dedektör 320x256, 30 μm piksel adımlıdır ve dedektör GaSb tabanı ~50 μm ye kadar mekanik inceltilmiş ve 77 K de görüntüleme yapılmış (Görsel 2.8). Ancak soğutulduktan sonra dedektörlerin de çatlaklar meydana gelmiş ve GaSb taban inceltmesinin yetersiz olduğu sonucuna varmışlar. Bu dedektörün test piksellerinden elde edilen karanlık akım yoğunluğu da 77 K de -0,5 V da $\sim 10^{-3}$ A/cm² olarak ölçülmüş [50].



Görsel 2.8. MWIR aralığında JAXA'nın elde ettiği kızılötesi termal görüntüler [50]

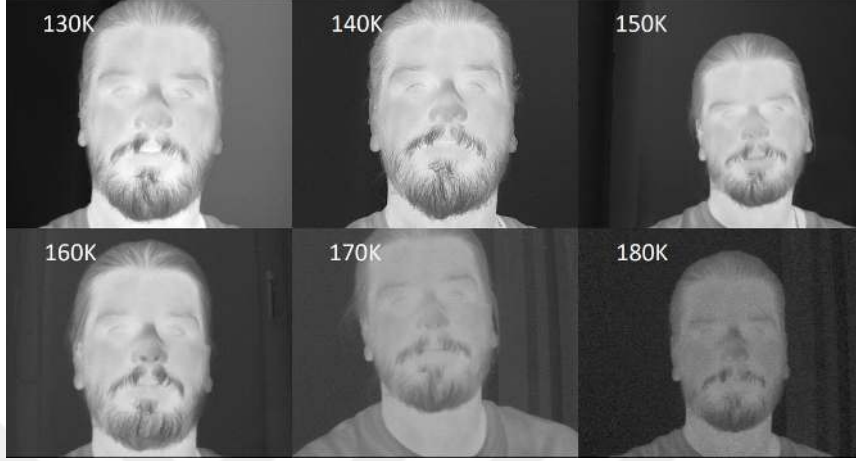
Aynı grup, çalışmada kullanılan T2SL yapısında değişiklik yaparak 320x256, 30 µm piksel adımlı FPA üretmişler. Dedektör performansını iyileştirmek için, p-tipi ve i-tipi katmanlar arasına elektron bariyeri ve i-tipi ve n-tipi katmanlar arasına deşik bariyeri yerleştirilerek pBiBn yapısıyla çalışılmış [51]. Daha sonra 77K de MWIR da görüntü alınmış ve önceki çalışmada NETD değeri 0,25 K iken, bu yapının NETD değeri 0,031 K ya düşmüş [51]. pBiBn ile alınan görüntünün çatlamamış olması dikkat çekmiştir (Görsel 2.9). Ancak çalışmada dedektörün soğutma esnasında neden çatlamadığına dair herhangi bir bilgi paylaşımı yapılmamıştır.



Görsel 2.9. JAXA'nın MWIR dalgaboyundaki düzeltilmiş dedektör görüntüsü [51]

İsveç'in kızılötesi dedektör şirketlerin IRnova firması tarafından 3-5 µm dalgaboyunda çalışan 640x512 dizinli ve 15 µm piksel adımlı T2SL-Hot dedektörü üretilmiş (Görsel 2.10). Araştırmada soğutma sistemine ihtiyacı düşürmek ve yüksek sıcaklıklarda dizin dedektör çalışması hedeflenmiştir [52]. Sıcaklığı 140 K optik açıklığı F/5,5 ve saniyedeki görüntüleme hızı 60 Hz de geçici ve uzamsal NETD değerleri sırasıyla 21 mK ve 6 mK dir [52]. 150 K deki karanlık akım yoğunluğu $6,5 \times 10^{-6}$ A/cm² ve difüzyon sınırlı karanlık akım "Rule07" ye de oldukça yakın sonuç elde edilmiş [52]. Ayrıca dizin dedektörü 10 µm piksel adımlı FPA üretimi daha yapılmış ve detektör karanlık akım değeri 15 µm FPA ile karşılaştığında benzer akım değerleri görülmüş. Buna göre dedektör performansını sınırlayan bir yüzey kaçak akımı olmadığını ve piksel aralığının daha da azaltılabileceği sonucuna varmışlar. Aynı şirketin farklı araştırma grubu, 2014'ten beri yaptığı çalışmalarının üzerine 2017 yılında 320x256 dizinli 30 µm piksel adımlı T2SL dedektörünü metan, bütan, propan gibi zehirli ve patlayıcı olan gazlardan metan tespiti yapmışlar (Görsel 2.11) [53]. MWIR aralığında büyük bir grup uçucu organik bileşikler 3,3 µm civarında absorpsiyon pikleri sergiler. Dedektör

performansı için, yansıma önleyici kaplama yapılarak 3,3 μm de minimum yansıma olacak şekilde optimize edilmiş ve gaz bandında (3-3,5 μm) ortaya çıkan kuantum verimlilik değeri ~%50-55 seviyelerinde sonuç almışlar [53].



Görsel 2.10. IRnova firmasının HOT T2SL farklı sıcaklıklardaki termal görüntülemeleri [53]



Görsel 2.11. 320x256 FPA dedektörüyle metan gazı tespiti anı [53]

Türkiye’ den Oğuz ve arkadaşları MWIR da çalışan 640x512 dizinli 15 μm piksel adımlı pBin T2SL çalışması yapmışlar (Görsel 2.12). Kesim dalgaboyu 4,92 μm olan FPA’in pik tepkiselliği 1,6 A/W, f/2,3 açıklığında NETD değeri 22,6 mK, kuantum verimliliği %65, çalışabilirliği %99,75 olduğu belirtilmiş [54]. Test piksellerin de farklı pasivasyon kaplamaları denenmişler ve IV ölçümleri alıp karşılaştırmışlar. Sonucunda, en iyi karanlık akım değeri düşük sıcaklıklı SiO_2 pasivasyon katmanıyla sağlamışlar. Çalışma sıcaklığı 77 K de 220 x 220 μm^2 test pikselinden elde ettikleri karanlık akım $7,8 \times 10^{-12}$ A seviyesindedir [54].



Görsel 2.12. 640x512 dizimli pBin T2SL FPA'nın MWIR dalgaboyu görüntüleri [54]

Yapılan bir araştırmada MWIR bölgesinde algılama yapan pBin tasarımlı InAsSbP elektron bariyerli ve aktif katmanları InAs_{0,94}Sb_{0,06} ve InAs_{0,89}Sb_{0,11}'dan oluşan iki farklı yapı tasarlanmıştır. Dalgaboyu kesim değerleri 3,9 μm ve 4,4 μm arasında, kuantum verimlilikleri $\sim 50\%$ ve $\sim 35\%$, dedektiviteleri $2,7 \times 10^9 \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$ ve $1,3 \times 10^9 \text{ cm Hz}^{1/2}/\text{W}$ şeklindedir [55]. Aynı zamanda araştırmada, son yıllarda InAsSb farklı tasarım ve farklı bariyer malzemelerindeki dedektör yapıların performans karşılaştırmasını da yapmışlardır ve Tablo 2.3 de verilmektedir.

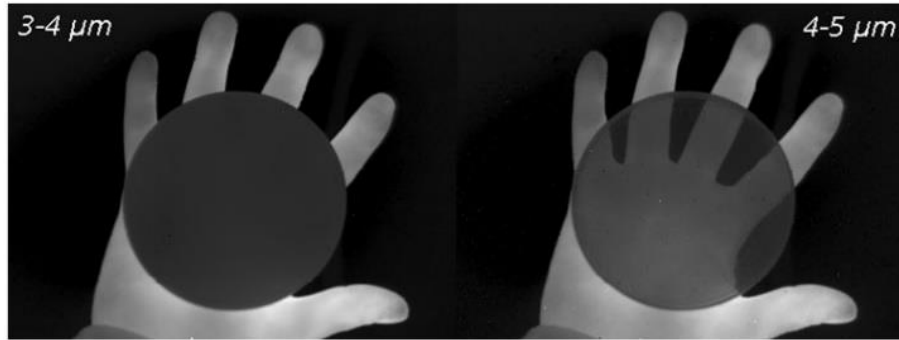
Tablo 2.3. Son yıllar da InAsSb bariyer MWIR dedektörlerin oda sıcaklığındaki performansları [55]

Research group	Barrier material	Applied Bias(V)	$J_d(-0.1 \text{ V})$ (A/cm^2)	$R_{\text{peak}}(\text{A}/\text{W})$	EQE_{peak}	D^* ($\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$)
Rochester University(nBn) [1,21]	AlAsSb	-0.5	0.008	-	65 % (-)	-
Jet Propulsion Laboratory(nBn) [9]	AlAsSb	-0.3	1.60	~ 1 (at 3.5 μm)	35 % (at 3.5 μm)	$1.0 \sim 1.1 \times 10^9$ (2.5 $\sim 4.5 \mu\text{m}$)
Nanyang Technological University(pBin) [622]	AlGaSb	-0.15	0.1	0.85 (at 3.5 μm)	30 % (at 3.5 μm)	$4.0 \sim 8.0 \times 10^9$ (2.5 $\sim 4.2 \mu\text{m}$)
	AlGaSb	-0.4	1.78	-	-	8.3×10^8 ($\sim 4 \mu\text{m}$)
Kunming Institute of Physics(pCBn) [17]	AlAsSb/AlSb	-0.45	0.003	2.08 (at 4.3 μm)	57.5 % (at 4.3 μm)	$2.0 \sim 8.2 \times 10^9$ (2.4 $\sim 4.4 \mu\text{m}$)
Military University of Technology (p ⁺ B _{0.9} p ⁺ n ⁺) [20]	AlSb	-0.5	7	1.63 (at 4.8 μm)	42 % (at 4.8 μm)	7.0×10^8 (at 4.8 μm)
Lancaster University(pBin) [2324]	InAsSbP	0	-	0.5 (at 4.0 μm)	16 % (at 4.0 μm)	$1.5 \sim 3.5 \times 10^9$ (3.5 $\sim 4.8 \mu\text{m}$)
	AlGaAsSb	-0.5	0.03	-	22 % (-)	-
Ioffe Institute (B _{0.9} pnn ⁺) [25]	InAsSbP	0	13	1.6 (at 4.7 μm)	63 % (at 4.7 μm)	7.0×10^8 (at 4.7 μm)
Institute of Semiconductors (nBn) [26]	AlAsSb	-0.2	1.70 (-0.2 V)	2.03 (at 4 μm)	63 % (at 4 μm)	$2.0 \sim 2.3 \times 10^9$ (3.8 $\sim 4.4 \mu\text{m}$)
		0	-	0.97 (at 4 μm)	30 % (at 4 μm)	$8.0 \sim 8.5 \times 10^8$ (3.8 $\sim 4.4 \mu\text{m}$)
Our work (InAs _{0,94} Sb _{0,06} pBin)	InAsSbP	0	0.70	1.6 (at 3.5 μm)	50 % (3 $\sim 3.5 \mu\text{m}$)	$1.0 \sim 2.7 \times 10^9$ (2.0 $\sim 3.9 \mu\text{m}$)
(InAs _{0,89} Sb _{0,11} pBin)			1.70	1.1 (at 3.5 μm)	35 % (3 $\sim 3.5 \mu\text{m}$)	$1.0 \sim 1.3 \times 10^9$ (2.4 $\sim 4.4 \mu\text{m}$)

MWIR/MWIR ikili spektral görüntüleme sistemleri, füze yaklaşma uyarı sistemleri için özellikle ilgi çekicidir. Düşük yanlış alarm oranına ek olarak, füze uyarı sistemleri karşı önlemler için tehditleri çok erken aşamada tespit etmeye ihtiyaç duyar. Tek spektralin aksine, ikili spektral dedektörler hem uzaktan sıcaklık ölçümlerini hem de

güdümlü füzelerin CO₂ egzoz dumanı gibi spektral imzaların tanımlanmasını sağlar. Bu nedenle, ikili spektral sistemler, hedeflerin arka plandan çok daha iyi ayırt edilmesini sağlayarak daha düşük yanlış alarm oranı sunar. Atmosferik iletimin daha yüksek olması sebebiyle de kızılötesi bölgede çalışan MWIR aralığındaki ikili spektral sistemler, UV spektral aralıkta çalışan füze uyarı sistemlerine kıyasla daha geniş bir algılama aralığı ve gelişmiş tehdit reaksiyon süresi sunar.

Almanya'nın Fraunhofer enstitüsünden Rehm ve ark. pin InAs/GaSb süperörgü dedektöründen 288x384 dizinli 40 μm piksel adımıyla FPA ürettiriler [56]. Çalışma sıcaklığı 77 K de 3-4 μm mavi için NETD değeri 17,9 mK ve 4-5 kırmızı içinse NETD değeri 9,9 mK şeklindedir (Görsel 2.13). Takip eden yıllarda aynı gruptan Walther ve ark. da yine aynı yapı ve formatta çalışmalarına devam etmişler [57]. 3-4 μm mavi, 4-5 kırmızı aralığında çalışan dedektörün, 84 K dedektör sıcaklığın da 1.5 ms entegrasyon süreli, F/1,5 optik açıklıklı NETD değerleri sırasıyla mavi ve kırmızı kanal için 18 mK ve 10 mK ölçmüşler [57]. Görsel 2.14'te 3-4 μm mavi kanal da gözlük camı transparan mavi, 4-5 μm kırmızı kanal da gözlük camı opak görüldüğü kızılötesi termal görüntülemeleri sunulmuştur.



Görsel 2.13. İki spektral aralıkta plastik kapağın termal görüntüsü [56]



Görsel 2.14. Soldaki 3-4 μm mavi ve sağdaki 4-5 μm kırmızı kanal da termal görüntü [57]

Fraunhofer Enstitüsü ve AIM iş birliğinde yapılan 3-4 ve 4-5 μm aralıkların da çalışan çift renkli pin InAs/GaSb 384x288 formatında dizin dedektör üretilmiş. 78 K sıcaklığında entegrasyon süresi 0,2 ms, NETD değerleri 3-4 μm mavi ve 4-5 μm kırmızı olmak üzere sırasıyla 25,9 mK ve 14,3 mK dir [58]. Çift renkli dedektör, yaklaşık 4,3 μm civarındaki güçlü CO₂ emisyonu nedeniyle uzaktan tespit için idealdir. Bir sanayi sitesinin 384x288 InAs/GaSb SL çift renkli kamera ile görüntülenmesi Görsel 2.15'te gösterilmektedir. Görüntü, sırasıyla 3 – 4 μm ve 4 – 5 μm algılama aralıkları için birbirini tamamlayan mavi ve kırmızı renklerde kodlanmış iki kanalın görüntülerinin üst üste binmesiyle elde edilmiştir. CO₂ emisyonu yalnızca "kırmızı" da meydana gelip "mavi" kanal da olmadığından, kırmızı bölgelerde sıcak CO₂ emisyonlarını açıkça görmüştür. Su buharından, buharlı egzozlardan veya bulutlardan saçılan ışık Rayleigh saçılma katsayısının frekans bağımlılığı nedeniyle mavi renkte olduğu belirtilmiştir.



Görsel 2.15. Bir sanayi sitesinin 384x288 çift renkli InAs/GaSb SL kamerayla çekilmiş bispektral kızılötesi görüntüsü [58]

HRL laboratuvarında, MWIR ve LWIR dalgaboyu aralığında çalışan 1280x720 dizinli ve 12 μm piksel adımlı süperörgü dedektör çalışması yapılmıştır [59] ve her iki dalgaboyunda görüntü alınmıştır (Görsel 2.16). İki yılı aşkın bir süredir yapılan büyütme ve FPA üretimleri sonucunda süperörgü yapılarının üretilebilirliği ve homojenliğini göstermişlerdir. FPA performansını değerlendirmek için gürültü eşdeğer sıcaklık farkı (NETD) ölçümleri 80K, f/4,21'de ve 22°C ila 32°C'lik bir kara cisim aralığı kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. MWIR bandı için NETD, %99,40'lık 3x medyan NETD işletilebilirliği ile 27,44 mK, LWIR bandı için NETD, %99,09'luk 3x medyan çalışabilirlik ile 27,62 mK olarak ölçülmüşlerdir [59]. Ayrıca 70-290 K arasında her iki dalgaboyu içinde 2000'den fazla tekrar denemesi yapılmışlar. Sonuç olarak hem MWIR

hem de LWIR bantların hassasiyetinde ve çalışabilirliğinde bozulma olmadığını gözlemlemişler.



Görsel 2.16. 80 K de F/4 optikli MWIR/LWIR çift bantlı dedektörden elde edilen termal görüntü [59]

T2SL malzeme teknolojisinin ve aygıt üretim sürecinin hızla gelişmesiyle, yüksek kaliteli T2SL FPA'lar sürekli olarak üretilmekte ve uluslararası dergilerde yayınlanmaktadır. Tablo 2.4'te bu alanda çalışan ünlü enstitüler ve kızılötesi dedektör pazarında bulunan şirketler tarafından son birkaç yıl içinde yayınlanan makaleler de T2SL FPA'nın özellikleri ve performansları tablolştırılmış ve verilmiştir.

Tablo 2.4. T2SL FPA dedektör çalışan enstitü ve firmaların performans karşılaştırması [60]

	Uluslararası Şirketler							
Parametre	Qmagiq	CQD	SCD	JPL	IAF	HRL	IRnova (2022_Delama)	i3System (1210713)
Yapı	p-i-n	p-π-M-N	pBn	Sıcak nBn	Çift-Renk	Sıcak	Sıcak	Sıcak nBn
Sıcaklık (K)	77	81	77	150	77	150	140	130
Dizin	1024x1024	1024x1024	640x512	640x512	288x384	288x384	640x512	1280x1024
Piksel Adım (μm)	18	18	15	24	40	5	15	10
Kesim dalga boyu (μm)	9,5	11	9,5	5,4	4(Mavi) 5(Kırmızı)	5	5,3	4,6
Kuantum verimliği (%)	~50	78	>50	49	-	50	67	63,7
Çalışabilirlik (%)	96	95,8	>99	99,7	99	99,9	99,84	99,5
Piksel kapasitesi (e-)	2x10 ⁶	2x10 ⁶	6x10 ⁶	8x10 ⁶	-	-	-	-
NETD (mK)	30	27	15	18	17,9(Mavi) 9,9(Kırmızı)	20	21	≤25
Optik	F/4	F/2	F/2,7	F/2	F/2	F/2,3	F/5,5	F/2
Entegrasyon süresi (ms)	-	0,13	-	1	1,5	-	-	-

3. SÜPERÖRGÜ YAPI TASARIMI VE ANALİZİ

Süperörgü dedektörler, yüksek örgü uyumlu farklı malzeme özelliklerindeki yarıiletken gruplarının bir arada kullanılabilmesiyle ayarlanabilir bant aralığı imkânı sunar. Bant aralığı tasarımı, elektriksel iletim mekanizmalarının kontrol edilebilmesi gibi yeni tasarımların geliştirilmesine de olanak sağlayan bir alandır. Günümüzde, bant aralığı mühendisliğiyle süperörgü teknolojisine dayalı pek çok dedektör yapısı geliştirilmiştir.

Bu tez kapsamında SWIR, MWIR ve MWIR/MWIR çift bandında çalışan AlGaSb bariyer içeren InAs/AlSb/GaSb malzeme sistemine dayalı özgün N-yapılı süperörgü dedektör tasarımları geliştirilmiştir. Yapı tasarımında kuantum verimliliğinin artırılması ve karanlık akım mekanizmalarının baskılanarak akım seviyelerinin düşürülmesi amaçlanmıştır. Böylece standart süperörgü dedektörlerine göre daha yüksek sıcaklıklarda çalışma olanağına sahip olması hedeflenmiştir.

3.1. Bant Aralığının Teorik Hesaplaması

Süperörgü bant hesaplamalarında yasak enerji aralığı E_g , hh-lh ayrışması, etkin kütle değerlerini içeren Yapay Potansiyel Metodu (Empirical Pseudopotential Method-EPM) kullanılır. EPM özellikle ince tabakalı süperörgülerde bant hesaplamalarında k.p yöntemi gibi duyarlılığı yüksek bir metottur. EPM yaklaşımı kullanarak elde edilecek düzlem dalga çözümleriyle InAs/AlSb/GaSb süperörgü yapısının büyütme doğrultusunda [001] yük dağılımları elde edilir.

Süperörgü sisteminin büyütme doğrultusuna dik doğrultulardaki kristal dalga fonksiyonu Ψ , düzgün bir dalga fonksiyonu ϕ ve farklı iyonlar için dolu çekirdek durumları ξ_t üzerinden alınmış bir toplam şeklinde ifade edilir. Kristal dalga fonksiyonu ve çekirdek durumları arasındaki ortogonal ilişkisiyle bağdaştırılmış ve Denklem 3.1 de tanımlanmıştır.

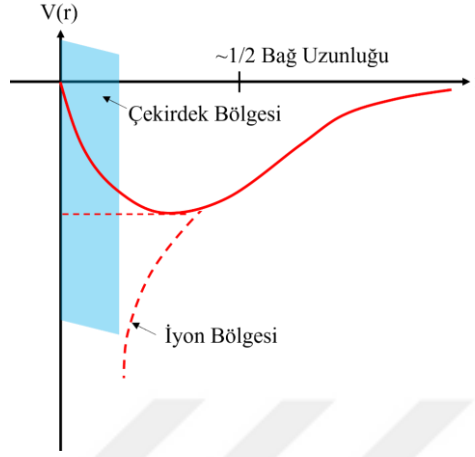
$$\Psi = \phi + \sum_t C_t \xi_t = 0 \quad (3.1)$$

Atomik özdeğerler E_t ile verilmek üzere Denklem 6.1 kristal öz fonksiyonu (Ψ) olarak seçilerek, $H\Psi = E\Psi$ hesaplandığında V_{Pseudo} elde edilir (Denklem 3.2).

$$V_{\text{Pseudo}} = \sum_g (E - E_t) \xi_t \langle \xi_t | \Psi \rangle \quad (3.2)$$

Seçtiğimiz dalga fonksiyonu, Denklem 3.1 ve Denklem 3.2’de verildiği gibi, yapının çekirdek kısmını temsil eden dalga fonksiyonlarına ortogonal olacak şekilde

seçilmekte. Bu sayede çekirdekten gelen katkıyı azaltarak potansiyelin daha yumuşak ve düzgün bir forma girmesi sağlanmaktadır (Şekil 3.1.).



Şekil 3.1. Gerçek uzayda Pseudo-potansiyelin şematik çizimi

EPM, katıdaki örgü potansiyelinde hareket eden yarı serbest elektronlar için hesaplanır. Ters uzaydaki Pseudo Schrödinger denkleminde enerji bantlarını ve dalga fonksiyonları sadece lokal olarak hesaplaması Denklem 3.3'te verilmiştir. Bu denklemde k , Pseudo-bloch fonksiyonunun dalga vektörü, G ters örgü uzayının örgü vektörleri ve V ise Pseudo potansiyel sabitidir.

$$\sum_g \left[\left(\frac{\hbar^2}{2m} |k + G'| - E(k) \right) \delta(G - G') + V(G - G') \right] u_{k+G} = 0 \quad (3.3)$$

Pseudo potansiyel sabitleri simetrik ve anti simetrik form faktörler cinsinden ifadesi Denklem 3.4 de verilmiştir.

$$V(G) = V_s(G) \cos(G \cdot \tau) - i V_a(G) \sin(G \cdot \tau) \quad (3.4)$$

Spin ve orbital etkileşmesi ise Spin'in yukarı ve aşağı bileşenleri olmasından dolayı çifttir. Herhangi bir k vektörü için Pseudo potansiyelinin spin-orbital matriks elemanı yazıldığında Denklem 3.5 elde edilir. Burada, Γ spin-orbital *Split off* bandının büyüklüğünü veren parametredir. Ayrıca σ Pauli spin matrisinin bir vektörü ve S ise spin operatörüdür.

$$V^{Spin}(G - G') = \frac{i\hbar^2}{4m^2c^2} \Gamma \langle S | \sigma | S' \rangle \cdot (G - G') x(G' + k) V(G - G') \quad (3.5)$$

Bu denkleme ayrıca külçe karakterli lokal olmayan etkileşimleri içeren terim eklendiğinde Denklem 3.6' da olduğu gibi daha iyi sonuç elde etme imkânı doğar. Lokal olmayan terimde yer alan değişken ve sabitler; $K=k+G$ örgü vektörü, $F(K)$ küresel Bessel

fonksiyonlarına bağlı bir fonksiyon, $P_l(x)$ Legendre polinomları, α yapıda yer alan atomlara ait indis, l açıl momentum indeksi, $A(l)$ ise enerji bağımlı kuyu derinliğidir. Burada sadece s ve d orbitalleri göz önünde bulundurulduğundan hesaplamalarda $l=0$ ve $l=2$ alınır.

$$V_{K,K'}^{NL} = \frac{4\pi}{\Omega} \sum_{l,\alpha} A_l^\alpha (2l+1) P_l(\cos(\theta_{K,K'})) F_l^\alpha(K,K') S^\alpha(K,K') \quad (3.6)$$

Yapay potansiyeller kullanılarak yapılan düzlem dalga yaklaşım hesaplamalarıyla hetero ve süperörgü yapıların bant yapısı tasarlanmıştır. InAs/GaSb'ın bant yapısının hesaplandığı diğer yöntem, kızılötesi bölgedeki absorpsiyon sabitlerinin yoğunluk matrisiyle hesaplanır. Bu yöntemde, ara yüzey oluşumunun cinsine göre absorpsiyon büyüklüğü ve kesim dalgaboyunda değişiklik gözlenir.

Dante ve Tilton tarafından yapay potansiyel yaklaşımı orta kızılötesinde çalışan yarıiletken lazerlere uygulanmıştır [61]. Önerdikleri basamak potansiyelini örgü uyuşması sağlayan süperörgülere uygulandığında Denklem 3.7 ile verilen özdeğer-özvektör eşitlikleri elde edilir. Denklemden yer alan $\langle G_{ns} | V | G'_{n's'} \rangle$ süperörgü potansiyelinin matris elemanı, s spin yukarı ve aşağı terimi, ξ süperörgü dalga vektörü, P tekrarlı kuyu-bariyer periyot genişliği, a örgü sabiti ve n ise $-P/a+1 \leq n \leq P/a$ aralığında bariyer ve kuyu arasındaki sürekli geçişi sağlayan bir kesim değeri diğer bir deyişle süperörgü uzaysal frekansdır.

$$\frac{\hbar^2}{2m} \left[|G_{II} + \xi_{II}|^2 + \left(G_z + \frac{2\pi n}{P} + \xi_z \right)^2 \right] a_{G,n}^s + \sum_{g,n} \langle G_{ns} | V | G'_{n's'} \rangle a_{G,n}^s = E(\xi) a_{G,n}^s \quad (3.7)$$

Denklem 3.8 de süperörgü potansiyelinin matris elemanını açık formda yazılmıştır.

$$\langle G_{ns} | V | G'_{n's'} \rangle = V_{G-G'}^B + \frac{\sin\left(\frac{\pi P}{W}(n-n')\right)}{\pi(n-n')} (V_{G-G'}^W - V_{G-G'}^B) \quad (3.8)$$

Burada W kuyu genişliği, V^B bariyer materyali Pseudo potansiyel katsayısı, V^W ise kuyu materyalinin Pseudo potansiyel katsayısını ifade etmektedir. Örgü uyumsuzluğu olan süperörgü yapılarıdaki bant genişliğindeki öteleme ise ΔE ile tanımlanmış ve Denklem 3.9 da verilmiştir.

$$\Delta E = (-a_H) 2 \frac{C_{11}-C_{12}}{C_{11}} \cdot \epsilon \quad (3.9)$$

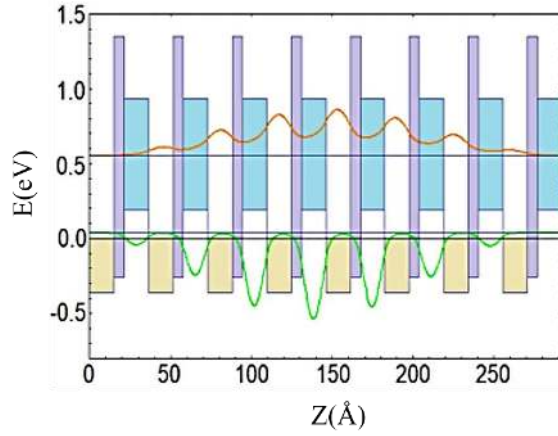
Denklem 3.9 da yer alan a_H hidrostatik deformasyon potansiyeli, C_{11} ve C_{12} elastik modül sabiti, ϵ ise gerilme terimini göstermektedir.

3.2. e-SWIR Epikatman Tasarımı

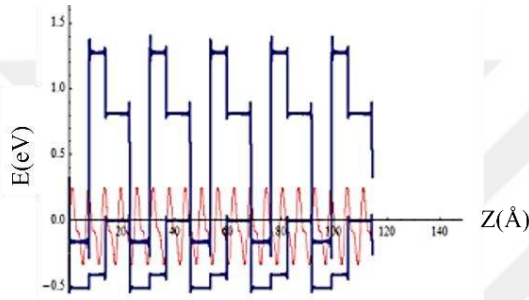
SWIR bant aralığında çalışan InGaAs ve HgCdTe dedektörlere alternatif olarak 6,1 Å ailesinden InAs/AlSb/GaSb N-yapılı tip-II süperörgü dedektör yapı tasarımları paralelde geliştirilmektedir. 6,1 Å ailesi ve N yapı tasarımının sağladığı avantajları; materyal dizilim çeşitliliği, hassas ayarlanabilir tabaka kalınlıkları, farklı çalışma bant aralıkları için dedektör tasarım imkanı, HH-LH ayrışmasına imkân sunması, elektron ve deşiklerin farklı malzeme tabakalarında yer alması nedeniyle Auger birleşim zamanının uzun olması, malzeme sisteminin sahip olduğu elektron etkin kütlesinin tünelleme kaynaklı karanlık akım miktarını azaltması, geniş yasak enerji aralığına sahip AlSb malzemesinin, üretim-yeniden birleşme karanlık akım bileşenini baskılaması ve bunun sonucu olarak yüksek dedektivite değerlerine erişilebilir olması şeklinde sıralanabilir.

SWIR bandında yaygın olarak çalışılan dedektör sistemlerinin başında InP/InGaAs ve HgCdTe dedektörleri gelir. Örgü uyumlu $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{InP}$ ($x=0,53$) dedektörler 1,7µm'ye kadar tepki verir. Yapı içerisindeki In'in (x) konsantrasyonu 0,8'e kadar yükseltildiğinde optiksel duyarlılık daha uzun dalga boylarına kaydırılır ancak kristal yapıda da zorlanma meydana gelir. Diğer taraftan MCT dedektörlerin malzeme konsantrasyonları değiştirilerek SWIR bandından LWIR aralığına kadar geniş bir algılama kabiliyeti gösterir. Fakat MCT dedektör üretimi ve fabrikasyonunda homojenite ve tekrarlanabilirlik hala sıkıntılı olduğundan III-V grubu benzerlerine göre üretim şartları zorlu ve maliyetleri daha yüksektir.

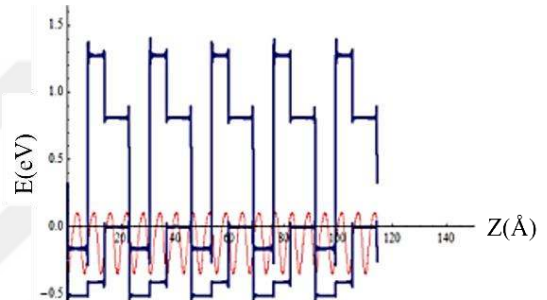
SWIR süperörgü yapılarından dedektör geliştirilmesi için iki temel sorunun çözümü gerekir. İlki, SWIR bandı içerisinde algılama dalgaboyu aralığının ayarlanması, ikincisi ise bu banttaki fotonların soğurulmasının sağlanması için dalgaboyu aralığına uygun malzemelerin tasarlanmasıdır. Süperörgü yapılarında bu sorunların aşılması için Prof. Dr. Yüksel Ergün ve Prof. Dr. Mustafa Hoştut çok sayıda hesaplamalar yapmıştır. Çalışmaların sonucunda, SWIR bandında tasarladıkları InAs/AlSb/GaSb tip-II SL dedektör yapısına ait özel zarf fonksiyonu (Envelope Function Approximation-EFA) geliştirmişlerdir. Yapılan hesaplamalarla elde edilen ilk band profili ve kuşatılmış dalga fonksiyonları Şekil 3.2 (a), EPM ile hesaplanan gerçek uzayda bant profili ve kuşatılmış e-hh fonksiyonları Şekil 3.2 (b) ve (c)'de verilmiştir.



(a)



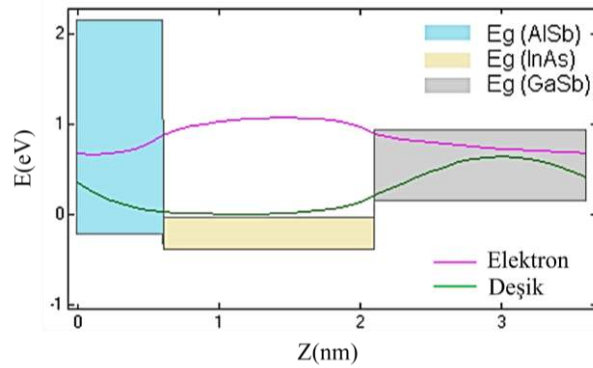
b)



(c)

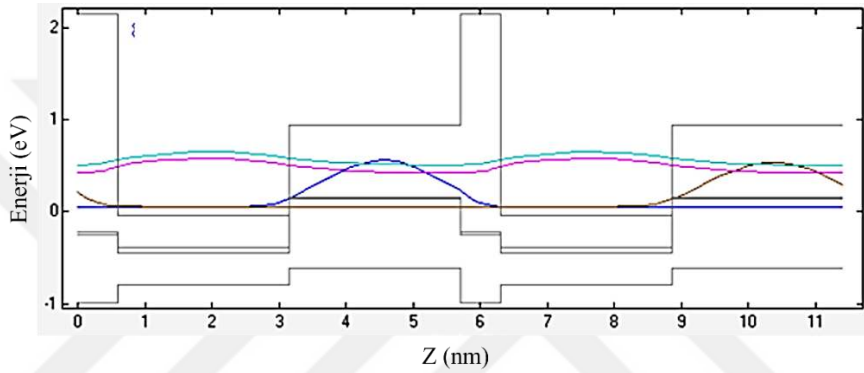
Şekil 3.2. (a) SWIR bölgede çalışılması tasarlanan InAs/AlSb/GaSb süperörgü sistemi, turuncu elektron ve yeşil ise hh dalga fonksiyonlarını göstermektedir. (b) Pseudo potansiyel yaklaşımı ile elde edilen $k=0$ da electron ve (c) hh dalga fonksiyonları

Yapıya ait tabaka kalınlıklarının açıklık kazanması için ilk çalışmalarda bir periyotluk tip-II süperörgüye ait 8-bant k.p hesaplamaları yaparak başlanmıştır. Buradan yola çıkarak, N-yapısı olan AlSb/InAs/GaSb tabakaları sırasıyla 2/5/5 ML (Mono tabaka-ML) kalınlıklarında dizinli süperörgünün gerçek uzayda enerji band diyagramı ve elektron-deşik dalga fonksiyonları üzerinde çalışılmış ve Şekil 3.3'te verilmiştir.



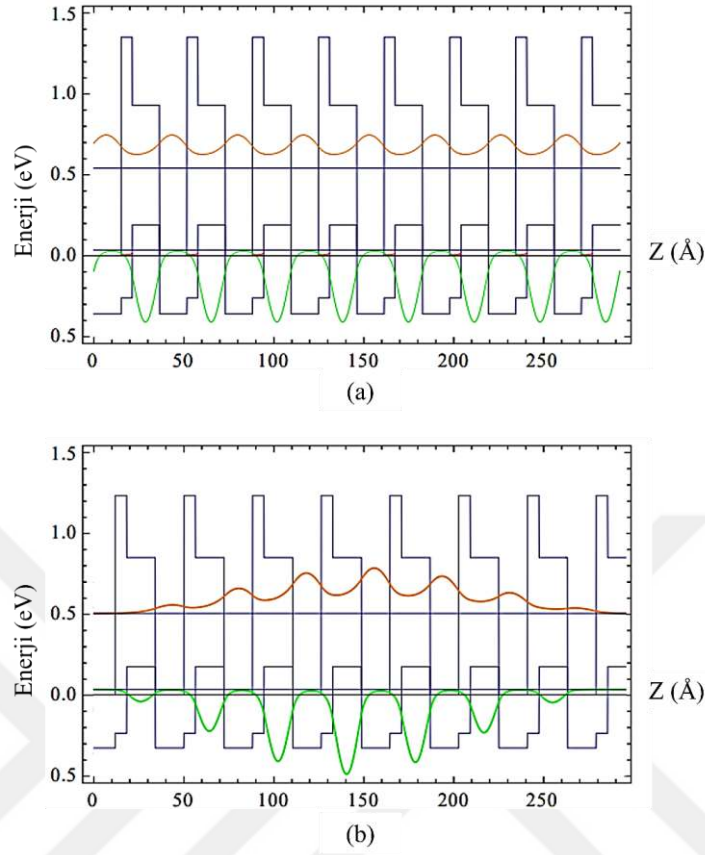
Şekil 3.3. 2ML AlSb/5ML InAs/5ML GaSb tip-II SL enerji band diyagramı

Klasik süperörgü InAs/GaSb (5ML/5ML) yapısına 2ML AlSb tabakasının ilave edildiğinde enerji aralığı $\sim 0,6\text{eV}$ ($2,07\text{ }\mu\text{m}$) olarak hesaplanmıştır. Böylece süperörgü yasak enerji aralığının $0,42\text{eV}$ dan $0,6\text{eV}$ a genişlemiş yani $0,18\text{eV}$ ve $\sim 0,9\text{ }\mu\text{m}$ kadar kısa dalgaboyuna kaymıştır. Algılama aralığını daha da genişletmek için farklı periyotlarda çalışmalara devam edilmiştir. İki periyot halinde AlSb/InAs/GaSb süperörgüsü 2/8,5/8,5 ML ait enerji bant çalışması yapılmıştır (Şekil 3.4). Elektron dalga fonksiyonunun InAs kuyularda lokalize olurken, deşik dalga fonksiyonlarının da GaSb kuyular tarafından kuşatılmıştır.



Şekil 3.4. 3,45 μm de %100 kesim dalga boyu süperörgüye ait enerji bant diyagramı

SWIR da elde edilecek bant aralığı temel olarak InAs tabakada yer alan elektron kuantum kuyusuna ait elektron dalga fonksiyonunun sahip olduğu enerji seviyesi ile GaSb tabakadaki deşik kuantum kuyusuna ait deşik dalga fonksiyonunun yer aldığı enerji seviyesi arasındaki farka eşittir. Elektron-deşik örtüşmeleri ve tip-II geçişleri InAs/GaSb arayüzeylerden olmaktadır. Dedektör performansının bir göstergesi olan elektron-deşik örtüşmesinin (e-h overlap) arttırılması tip-II geçişlerinin iyileştirilmesi bakımından önemli bir parametredir. Bu da soğurmayı arttırarak kuantum veriminin yükselmesini ve dolayısıyla dedektivitenin artmasını sağlayacaktır. Bunun için N tasarımlı pBin SL yapıya ait sırasıyla Periyodik ve Drichlet sınır koşullarında elektron ve deşik dalga fonksiyonları çizilmiştir. Süperörgüye ait bant diyagramı, elektron ve deşik dalga fonksiyonları 8-Bant k.p hesapları yapılarak irdelenmiştir. Böylece süperörgü bant yapısında yüklerin dağılımları ve bulunabileceği enerji seviyeleri hakkında bilgi sahibi olunmuştur. Şekil 3.5'te InAs/AlSb/GaSb 8,5/2/8,5 ML süperörgü yapısının periyodik ve Drichlet sınır koşulları kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucundaki gerçek uzay enerji bant diyagramları verilmiştir.



Şekil 3.5. *InAs/AlSb/GaSb 8,5/2/8,5 ML süperörgü yapısının (a) periyodik ve (b) Dirichlet sınır koşulları kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucundaki gerçek uzay enerji bant diyagramı*

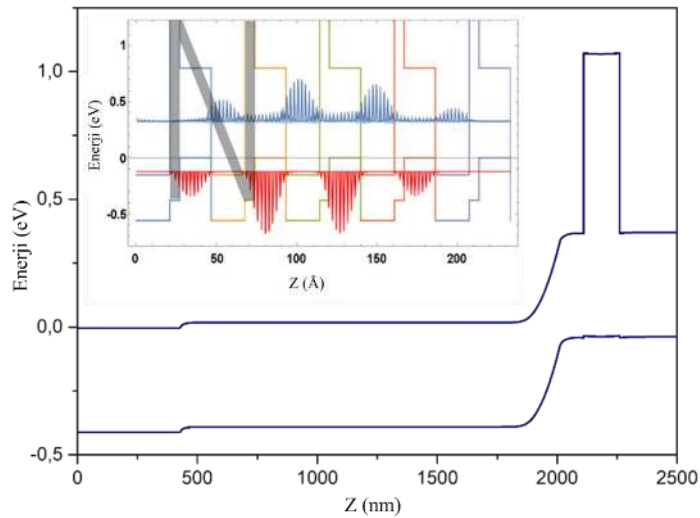
Süperörgü yapı tasarımlarından sonra elde edilen parametre ve deneysel sonuçlar doğrultusunda daha kısa dalgaboyunda algılama için tabaka kalınlıkları sırasıyla 2/6,5/7ML AlSb/InAs/GaSb nihai tasarım yapılmıştır. Tasarım (100) düzlem doğrultulu GaSb taban üzerine MBE sistemiyle anlaşmalı firma tarafından büyütülmüştür. Büyütme tasarımı ilk olarak büyütme şartları düşünüldüğünde yüksek kristal kalitesi için standart olarak kullanılan tampon katmanıyla başlar. Çalışma dalgaboyunun GaSb tarafından soğurulması üretimde seçici aşındırma ihtiyacı doğurur. Bu sebeple tasarıma $\text{InAs}_{(x)}\text{Sb}_{(1-x)}$ 500 nm'lik bulk ve $\text{AlAs}_{(x)}\text{Sb}_{(1-x)}$ / GaSb 5/2 ML'lı süperörgü olmak üzere iki ayrı aşındırma durdurma katmanı dahil edilmiştir. Ardından alt kontak için toplam 430 nm olan 2/6,5/7ML kalınlığında $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ Si katkılı n-tipi AlSb/InAs/GaSb eklenir. Yapının aktif katmanıysa katkısız 1,61 μm kalınlığındaki süperörgüyle devam eder. Devamında üst kontak için $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ Be katkılı p-tipi 80 nm'lik süperörgüyle zemin hazırlanır. Sığ aşındırma yapılabilmesi için 150 nm kalınlığında $\text{Al}_{(x)}\text{Ga}_{(1-x)}\text{Sb}$ külçe katman ve ardından 430 nm kalınlığında üst kontak için süperörgü yapısı yerleştirilir.

Yapının atmosferik koşullardan korunması için 20 nm GaSb şapka katmanıyla tasarım tamamlanır. Yapı tasarımına ait çizim Şekil 3.6’da verilmiştir.

Şapka Katmanı	GaSb			20 nm
p-SL Kontak	90 x	2 / 7 / 6.5 ML	AlSb / InAs / GaSb	430 nm
Bariyer	$Al_{(x)}Ga_{(1-x)}Sb$			150 nm
p-SL Kontak	20 x	2 / 7 / 6.5 ML	AlSb / InAs / GaSb	80 nm
Aktif Bölge	340 x	2 / 7 / 6.5 ML	AlSb / InAs / GaSb	1.61 μm
n-SL Kontak	90 x	2 / 7 / 6.5 ML	AlSb / InAs / GaSb	430 nm
2. Aşınma Durdurma	235 x	5 / 2 ML	$AlAs_{(x)}Sb_{(1-x)}$ / GaSb	500 nm
1. Aşınma Durdurma	$InAs_{(x)}Sb_{(1-x)}$			500 nm
Tampon	GaSb			100 nm
Taban	n-GaSb (100)			

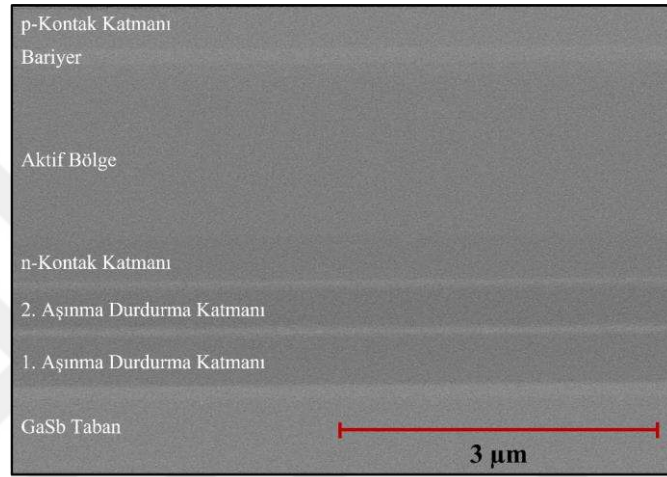
Şekil 3.6. *e-SWIR* da algılama yapan N-pBin yapılı InAs/AlSb/GaSb süperörgü nihai tasarımı

Şekil 3.7, N-pBin detektörünün, taşıyıcı miktarını hesaba katmak için hem iletim hem de valans bandı ofsetlerini ortaya çıkaran sıfır besleme koşulu altında bant diyagram simülasyonunu göstermektedir. InAs/AlSb/GaSb SL yapısının gerçek uzay ($k=0$) bant profili ve deşik enerjisinde 8 bantlı k.p hesaplamaları yapılmıştır. Böylece, e-SWIR aralığında, InAs/AlSb/GaSb N-yapılı süperörgü yapısının bant hizalaması ve taşıyıcı dalga fonksiyonlarını örtüşme sonucu elde edilir. Bant ile taşıyıcı dalga fonksiyonun örtüşmesi ne kadar iyi ayarlanırsa yapı performansının o kadar iyi olacaktır.



Şekil 3.7. N-pBin InAs/AlSb/GaSb dedektörünün potansiyel enerji ve taşıyıcı dalga fonksiyonları için 8 bantlı k.p hesaplama grafikleri

Tasarımı tamamlanan ve büyütülen N-pBin yapısı SEM de yanal kesit görüntülemesi yapılmış, tasarımıyla uyumluluğu incelenmiştir. Kesit görüntülemesinin ana katmanlar arası geçiş kolaylıkla gözlenmiştir. Görsel 3.1'deki SEM görüntüsüne yapı tasarımında karşılık gelen ana katman tanımları eklenerek verilmiştir. Tasarım katman kalınlığı analizi için görüntüleme yöntemlerinden SEM tam anlamıyla net değerler veremese de yapının tasarıma uygunluğu ve katman kalınlıklarının tasarım kalınlık değerlerine yakın olduğu sonucunu sağlamıştır.



Görsel 3.1. *Büyütme sonrası N-pBin süperörgü yapısının yanal SEM görüntüsü*

4. TEST PİKSEL ÜRETİMİ, OPTİMİZASYONU VE KARAKTERİZASYONU

Yarıiletken aygıt üretim teknolojisi 1950'lerden bugüne kadar uzun bir yol kat etmiş ve günümüzdeki güncel üretim teknolojileri olarak yerlerini almıştır. Yarıiletken aygıt üretimleri, her ne kadar karmaşık gibi görünse de ilerleyen teknoloji aygıt üretiminde büyük kolaylıklar sağlamıştır. Bir yarıiletken aygıt üretimi, ardışık bir dizi farklı teknolojilerle yapının işlenmesi ve nihai haline getirilmesi sürecidir. Üretilen aygıtların performansı yapıyla sınırlı olmayıp üretim süreci ve yöntemlerinin de performans üzerinde ciddi ölçüde etkisi vardır. Proses boyunca homojenlik ve üretim adımlarının birbiri içinde uyumu sayesinde tekrar edilebilirlik gibi kriterler yüksek performanslı aygıt üretiminin bel kemiğini oluşturur. Bu nedenle üretim öncesi proses basamaklarının optimize edilmesi hem aygıt performansının iyileşmesini sağlar hem de üretim aşamalarını mümkün olduğunca basitleştirerek üretim kolaylığı sunar.

Kızılötesi fotodedektörler, kullanım amacına bağlı olarak test veya dizin pikseli olmak üzere temelde iki farklı üretim şekline sahiptir. Test dedektörü tasarımları yapının elektro-optik karakterizasyonun yapılmasına olanak sağlayarak dedektör yapısının performansı için hızlı geri dönüş verir. Dizin dedektörse, çalışma dalgaboyunda kızılötesi görüntülemenin yapıldığı tasarımlardır. Üretimin test veya dizin olması üretim basamak sayısını ve sırasını değiştirebilir. Seçilen aygıt üretim tasarımına göre birbirini takip eden her üretim basamağı ayrıntılı ve adım adım optimize edilerek yapı tasarımına uygun hale getirilir.

Bu tez kapsamında her iki üretimde yapılmış olup bu bölümde test dedektörü üretim optimizasyonları, bir test dedektörünün tam üretimi, elektro-optik karakterizasyonlarına yer verilmiştir.

4.1. Test Dedektör Üretim Optimizasyonları

Bir yarıiletken aygıt fabrikasyonuna başlamadan önce aygıt yapı tasarımı dikkate alınarak genel üretim planlaması yapılır. Bu planlamada maske tasarımı da dahil olmak üzere, üretim ana adımlarının belirlenmesi, yapıya uygun aşındırma yönteminin ve aşınma derinliğinin tayin edilmesi, paketlenme, aygıt test ve karakterizasyonu gibi geniş bir resmi kapsar. Üretim ana ve ara adımları basit ve birbiri içinde uyumlu olması önem arz ettiğinden, çalışma kapsamında üretilen test dedektörleri piksel tanımlama, pasivasyon ve metalizasyon olmak üzere üç ana adımdan oluşturulmuştur. Her bir ana

adım standart bir litografi tekniğiyle şekillendirilmiş ve her adım kendi içinde optimize edilmiştir.

4.1.1. Piksel aşındırma optimizasyonu

Aşındırma, yarıiletken aygıt fabrikasyonunda, bir taban üzerindeki malzemenin seçici olarak tabandan uzaklaştırma sürecini tanımlamak için kullanılan terimdir. Kimyasal asitlerin kullanıldığı ıslak aşındırma ve plazma formundaki reaktif gazların kullanıldığı kuru aşındırma olmak üzere ikiye ayrılır. Bu çalışma kapsamında ıslak aşındırma yöntemiyle test ve dizin pikseller oluşturulmuştur.

Islak aşındırmada, yarıiletken yüzeyi ile kimyasalın tepkimeye girmesi sonucunda yüzeyden istenmeyen katmanın uzaklaştırıldığı yöntemdir. Aşındırma hızı, homojenlik, seçicilik, aşınma profili ve yüzey hasarı aşındırıcı kimyasalının belirlenmesinde ana parametrelerdir. Aşınma hızı, malzemenin zamana bağlı yüzeyinden uzaklaşmasının bir ölçüdür. Aşındırma da “seçicilik” aynı yapıdaki farklı malzemelerin aşınma oranları arasındaki farklılık olarak tanımlanır. Seçicilik oranıysa farklı malzemeler arasındaki aşınma hızlarının birbirine oranı şeklinde tanımlanabilir. Islak aşınma, iki mekanizma tarafından sınırlandırılır. İlki, aşındırma hızının yüzeye ulaşan reaktanların hızıyla ya da yüzeyden uzaklaşan ürünlerin hızıyla kontrol edildiği “difüzyon sınırlı” aşındırmadır. İkincisi, “tepkime hız sınırlı” aşındırma olarak adlandırılan ve yüzeyde meydana gelen kimyasal tepkime hızının kontrol edilerek aşındırma hızının sınırlandırıldığı mekanizmadır. Bu sınırlayıcı mekanizmalar, kimyasal bileşim oranı ve sıcaklığın bir fonksiyonudur.

Islak aşındırmada, piksel (Mesa) profili aşındırmanın kristalografik düzlemlere bağımlılığından dolayı izotropik aşınma profili verir. Bu yöntemle dik bir aşınma profili elde edilmesi oldukça zordur. İzotropik aşınma sebebiyle boyut kaybı söz konusu olduğundan çok küçük piksel boyutlarında çalışmaya elverişli değildir. Ancak, anizotropik profil elde edilebilen kuru aşındırma tekniğiyle karşılaştırıldığında yüksek seçicilik oranı, hemen hemen her malzemeye uygulanabilir olması, düşük maliyet, hızlı sonuç ve en önemlisi yapıya elektronik hasar vermemesi ıslak aşındırmanın sıklıkla tercih edilmesindeki sebepleri oluşturur.

Yarıiletken yapılarının büyütme sonrası yüzeyleri oldukça düşük pürüzlülüklere sahiptir, aşınma sonrası yüzey morfolojisinin bozulması yapının elektriksel özelliklerini kötü yönde etkiler. Bu nedenle, aygıt fabrikasyonunda, aşınma sonrası yapı yüzeyinin pürüzsüzlüğü ve aşınma duvar profilinin üretimdeki yeri çok önemlidir. Aşındırma ister

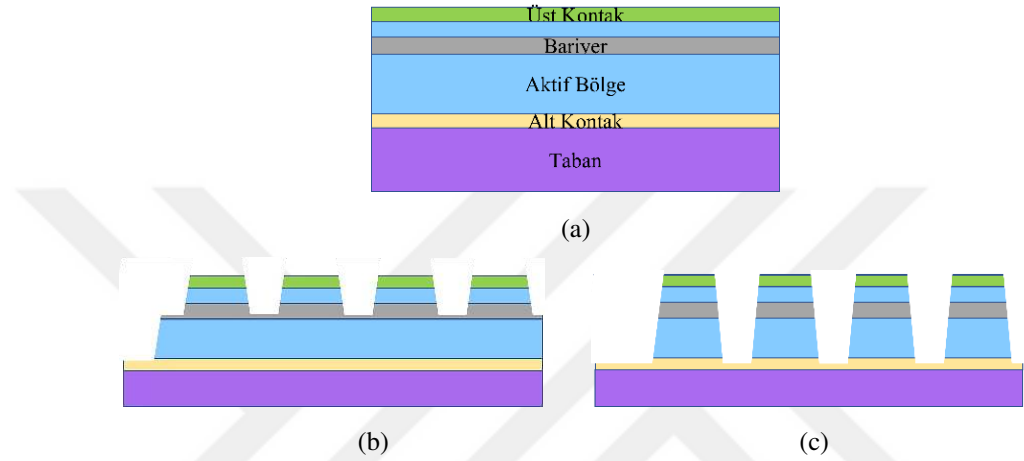
kuru ister ıslak aşındırma olsun her iki yöntemde de yapıya ve prosese uygun aşındırma optimizasyonuna ihtiyaç duyulur. T2SL yapılarında hem ıslak hem kuru aşındırma yöntemleri kullanılmaktadır. Kuru aşındırma da ağırlıklı olarak CH₄, H₂, BCl₃, Cl₂, Cl₄ ve Ar gazlarından oluşan ICP-RIE (Inductively Coupled Plasma Reactive ion etching ICP-RIE) yöntemiyle yapılır. Islak aşındırma da ise aşınma hızları ve seçiciliklerine bağlı olarak farklı kimyasallar kullanılır. T2SL için literatürde bugüne kadar kullanılmış ıslak kimyasal aşındırıcılar Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. Süperörgü yapılarında bugüne kadar kullanılmış ıslak kimyasal aşındırıcılar

<i>Solüsyon No</i>	<i>Kimyasal formüller ve oranlar</i>	<i>Referans</i>
1	C ₆ H ₈ O ₇ : H ₂ O (2ml: 1ml)	[62]
2	C ₄ H ₄ KNaO ₆ : H ₂ O: HCl: H ₂ O ₂ (15 gr: 200 ml: 160 ml: 14 ml)	[62]
3	H ₃ PO ₄ : C ₆ H ₈ O ₇ : H ₂ O ₂ : H ₂ O (1 ml: 1 ml: 4 ml: 16 ml)	[63]
4	1. Adım: H ₃ PO ₄ :C ₆ H ₈ O ₇ :H ₂ O ₂ : H ₂ O, 2. Adım: NaClO: H ₂ O	[64]
5	H ₂ SO ₄ : H ₂ O ₂ : H ₂ O (1 ml: 8 ml: 15 ml)	[65]
6	H ₂ SO ₄ : HF: H ₂ O ₂ : H ₂ O (1 ml: 1 ml: 4 ml: 50 ml)	[65]
7	HCl: H ₂ O ₂ : H ₂ O (1 ml: 1 ml: 4ml)	[66]
8	HNO ₃ : HF: C ₆ H ₈ O ₇ (2 ml: 1 ml: 1ml)	[66]

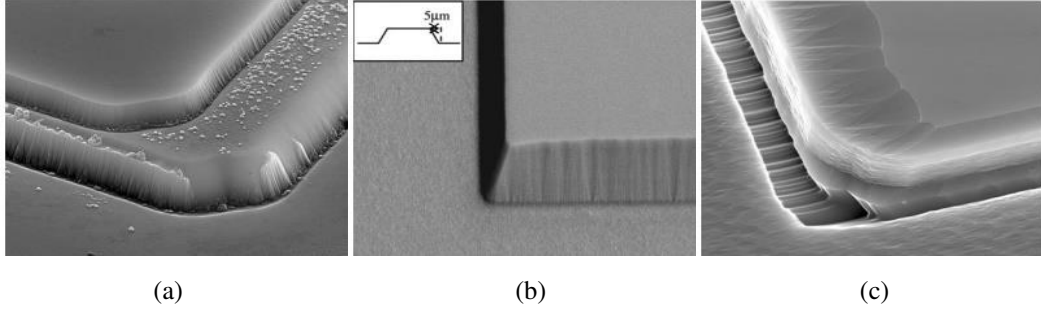
Süperörgü yapılarının aşındırma derinliklerine göre sığ (Shallow) ve derin (Deep) aşındırma şeklinde iki ayrı aşındırma derinliği uygulanabilir. Piksel aşındırmasında, yapı yüzeyinde bulunan ve sadece birkaç ince katmanın aşındırıldığı sığ ve büyütülen yapı kalınlığının neredeyse tamamının aşındırıldığında derin aşındırma olarak adlandırılır. Bu tez çalışmasında kullanılan tasarım yapılarının temelde GaSb taban üzerine InAs, AlSb ve GaSb süperörgü yapısı ve AlGaSb bariyerinden oluştuğunu bir önceki bölümde detaylıca bahsedilmiştir. Söz konusu bu yapıların aşındırılmasında AlGaSb bariyer katmanında duran aşındırmalara sığ, InAs/GaSb/AlSb süperörgü yapısı aşındırılarak alt kontak katmanına kadar giden aşındırmalara derin aşındırma denilmiştir. Bu iki farklı aşındırma derinliğinin temsili çizimleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Her iki aşındırmada da aşındırmanın durması gerektiği katman ve aşındırma derinlikleri birbirinden farklıdır. Bu nedenle yapıya ve aşındırma isterlerini karşılayan aşındırıcının bulunması için aşındırma hızı ve seçiciliklerine göre uygun kimyasal ve karışım oranının belirlenmesi gerekir.

Aşındırma optimizasyon çalışmalarında öncelik sıg aşındırmaya verilmiş ve uygun aşındırıcının belirlenebilmesi için literatürden faydalanılmıştır. Ancak süperörgü yapısını aşındıran ve AlGaSb külçe bariyer katmanını aşındırmayan tamamen seçici bir kimyasal bulunamamıştır. Bu sebeple, katmanlar arasında aşınma hızı farkından yararlanılarak T2SL'ler için seçici aşındırma hedeflenmiş, farklı kimyasallar farklı oranlarda karıştırılarak aşındırma hız kontrolü sağlamak için denemeler yapılmıştır.



Şekil 4.1. (a) Büyütülen yapı, (b) bariyer katmanına kadar aşındırma, (c) kontak katmanına kadar aşındırmanın temsili çizimleri

Tez kapsamında çalışılan süperörgü yapılarında bariyer katmanına kadar olan toplam kalınlık 450 nm'dir. Bariyer katmanı AlGaSb, e-SWIR yapısında 150 nm, MWIR yapısında 100 nm kalınlıklarındadır. Yapı kalınlıkları dikkate alındığında kontrollü aşındırma için her iki yapı için de aşındırma hızının oldukça yavaş olması gerekir. Özellikle, AlGaSb katmanına kadar olan toplam kalınlık düşünüldüğünde aşındırma hızının 50 nm/dk civarında olması hedeflenmiştir. İlk aşındırma denemelerine HCl tabanlı aşındırıcılarla başlanmıştır. Yapılan literatür çalışmalarında, süperörgü aşındırmalarında $H_2O_2:HCl:H_2O$ (1:1:2) karışım oranında $\sim 2,62 \mu m/dk$ aşındırma hızı, yüzey pürüzlülüğün RMS değeri 2,35 nm, $H_2O_2:HCl:H_2O$ (1:1:4) karışım oranındaki aşındırma hızı 1,88 $\mu m/dk$, ve RMS değeri ise 1,59 nm dir [66]. Görsel 4.1'de kuru, HCl tabanlı ıslak aşındırma ve kuru aşındırma sonrası ıslak aşındırmaların SEM görüntüleri verilmiş ve karşılaştırılmıştır. Islak aşındırma da duvar profilli diğer iki yöntemle göre de daha iyi sonuç vermiştir. Dizin dedektör üretiminde 30 μm lik piksel adımlı dizin üretiminde $\sim 5 \mu m$ kadar piksel boyutunda küçülmeye sebep olmuştur [66].



Görsel 4.1. (a) Plazma destekli kuru aşındırma, (b) optimize edilmiş kimyasal aşındırma ve (c) plazma destekli kuru ve kimyasal aşındırma kombinasyonunun yan duvar profilleri [66]

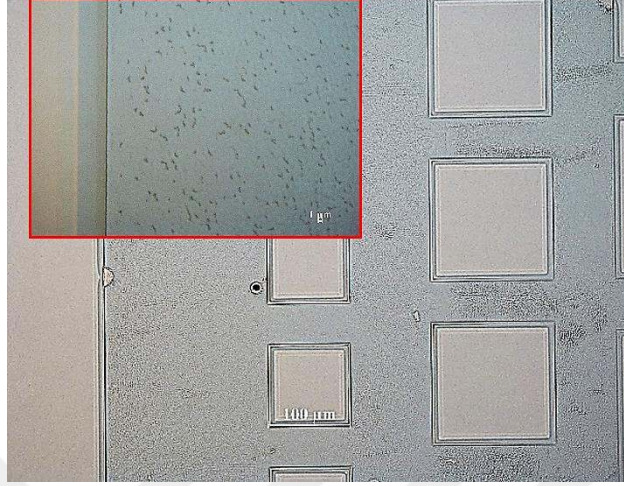
HCl tabanlı aşındırıcıların aşındırma hızı göz önünde bulundurulduğunda yüzey pürüzlülük değerine göre yüzeyi hiç bozmadan aşındırdığı söylenebilir. Ancak, daha az aşındırma derinlikleri ihtiyacında HCl tabanlı aşındırıcıların dakikadaki aşındırma hızı oldukça yüksektir. Bu sebeple derinliğe uygun aşındırma hızının optimize edilmesi için farklı karışım oranlarında HCl çözeltileri hazırlanmış ve uygun aşındırma hızı belirlenmesi yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında, yavaş aşındırma için planlanan ve denemeleri yapılan karışım oranları, aşındırma hızları ve yüzey morfolojisi ile ilgili bilgilerde Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. HCl tabanlı aşındırıcıya ait özet aşındırma tablosu

	<u>HCl:H₂O₂:H₂O</u> <u>Karışım Oranı</u>	<u>Aşındırma hızı</u> <u>nm/dk</u>	<u>Mesa Profil ve</u> <u>Yüzey Durumu</u>
1	60 ml : 1ml : 1 ml	150 nm	Bozuk
2	60 ml : 0,5 ml : 0,5 ml	100 nm	Bozuk
3	100 ml : 0,5 ml : 0,5 ml	110 nm	Bozuk
4	30 ml : 0,5 ml : 0,5 ml	150 nm	Bozuk
5	50 ml : 0,5 ml : 50 ml	105 nm	İyi

Aşındırma sonrası yüzeylerde meydana gelen bozulmalar ve pürüzlülükler optik mikroskopta net bir şekilde görüntülenmiştir (Görsel 4.2). Farklı oranlardaki HCl tabanlı aşındırıcılar yapı yüzeyinde iyi sonuç vermemiştir. Karışım oranı daha da seyreltildiğinde yüzey pürüzlülüğü giderek azalır toparlansa da aşındırma hızı ve seçiciliği AlGaSb bariyer katmanı için uygun değildir. Bunlara ek olarak, aşındırma sonrası piksellerde karşılaşılan boyut kaybı dizin piksel üretimi için oldukça fazla olduğu dikkatte kaçmamıştır. Görsel 4.2’de verilen 100x100 µm² lik piksel boyutunda 1 dakikalık aşınma oranına göre pikselin her bir kenarından ~10 µm lik bir boyut kaybı söz konusudur. Yüzey pürüzlülüğü, piksel boyut kaybı ve aşındırma hızı gibi sebeplerden dolayı HCl karışımı

çözeltilerin aşındırma kabiliyeti N yapılı-T2SL tasarımlarında kontrollü aşındırma için yetersiz kalmıştır.



Görsel 4.2. HCl tabanlı aşındırıcıya ait aşındırma sonrası örnek yüzey görüntüsü

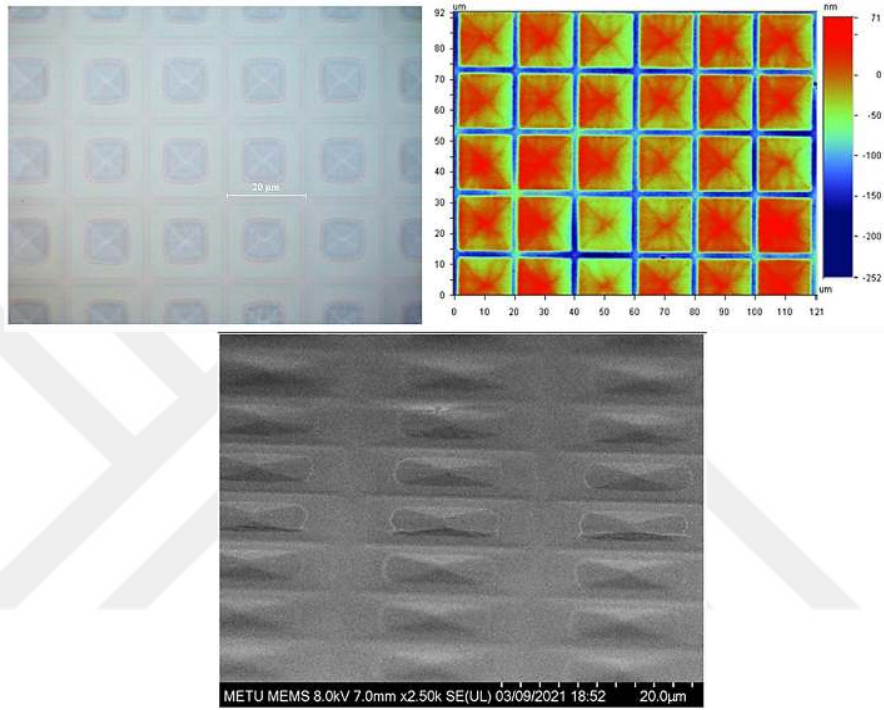
Bu sebeple HCl tabanlı aşındırıcı yerine sırasıyla GaSb ve InAs sorunsuz aşındıran $C_6H_8O_7$ tabanlı ve HCl karışimli asitlerden oluşan yeni kimyasal karışım denemeleri yapılmıştır. Çözelti karışım oranları, aşındırma hızları ve aşındırma sonrası yüzey ve profil bilgileri Tablo 4.3'te özetlenmiştir.

Tablo 4.3. $C_6H_8O_7$ ve HCl tabanlı aşındırıcılara ait aşındırma tablosu

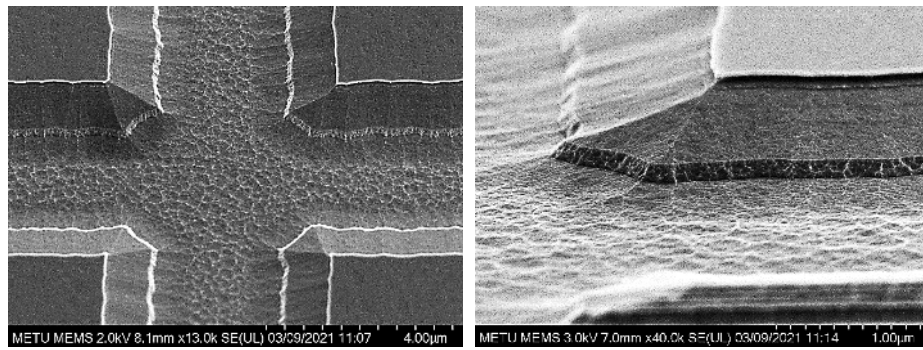
	<u>$C_6H_8O_7$: HCl: H_2O_2: H_2O</u> <u>Karışım Oranı</u>	<u>Aşındırma</u> <u>sıcaklığı</u>	<u>Aşındırma Hızı</u> <u>nm/dk</u>	<u>Mesa Profil ve Yüzey</u> <u>Durumu</u>
1	1 ml: 0 ml: 1ml: 1 ml	50 °C	350 nm	Piramit
2	1 ml: 0ml: 1ml: 1 ml	Oda sıcaklığı	110 nm	Piramit
3	1 ml: 0 ml: 1ml: 1 ml	Oda sıcaklığı	12 nm	-
4	10 gr: 10 ml: 10 ml: 10 ml	Oda sıcaklığı	150 nm	Bozuk
5	20 gr: 10 ml: 10 ml: 80 ml	Oda sıcaklığı	610 nm	Bozuk
6	10 gr: 10 ml: 10 ml: 80 ml	Oda sıcaklığı	180 nm	Bozuk
7	10 gr: 10 ml: 1 ml: 10 ml	Oda sıcaklığı	-	Bozuk

Bu denemelerde, GaSb'i yavaş InAs'yi hızlı aşındıran $C_6H_8O_7$ tabanlı çözeltiler farklı karışım oranlarında hazırlanmıştır. Aşındırma sonrası yapı yüzeyi ve piksellerin aşınma profilleri oldukça kötü sonuçlanmıştır. Piksel boyutlarının çok küçülmesinin yanı sıra piksel geometrisinde ciddi farklılıklar meydana gelmiştir. Aşındırma sonrası piksel geometrisi piramit şeklini almış ve optik mikroskop, optik profiller ve SEM le

görselleştirilmiştir (Görsel 4.3). Sadece $C_6H_8O_7$ asit tabanlı aşındırıcıdan elde edilen sonuçlardan sonra HCl kimyasalı da karışıma dahil edilmiştir. Ancak optik mikroskopta iyi görünen yapı yüzeyi SEM de incelendiğinde bozuk aşınma yüzeyi ve geniş duvar profilleriyle karşılaşmıştır. Tablo 4.3'te yer alan 6 numaralı karışım oranına ait SEM görüntüsü örnek olarak Görsel 4.4'te sunulmuştur.



Görsel 4.3. $C_6H_8O_7$ tabanlı piramit aşınmaya ait (a) optik mikroskop, (b) optik profilometre ve (c) SEM görüntüleri



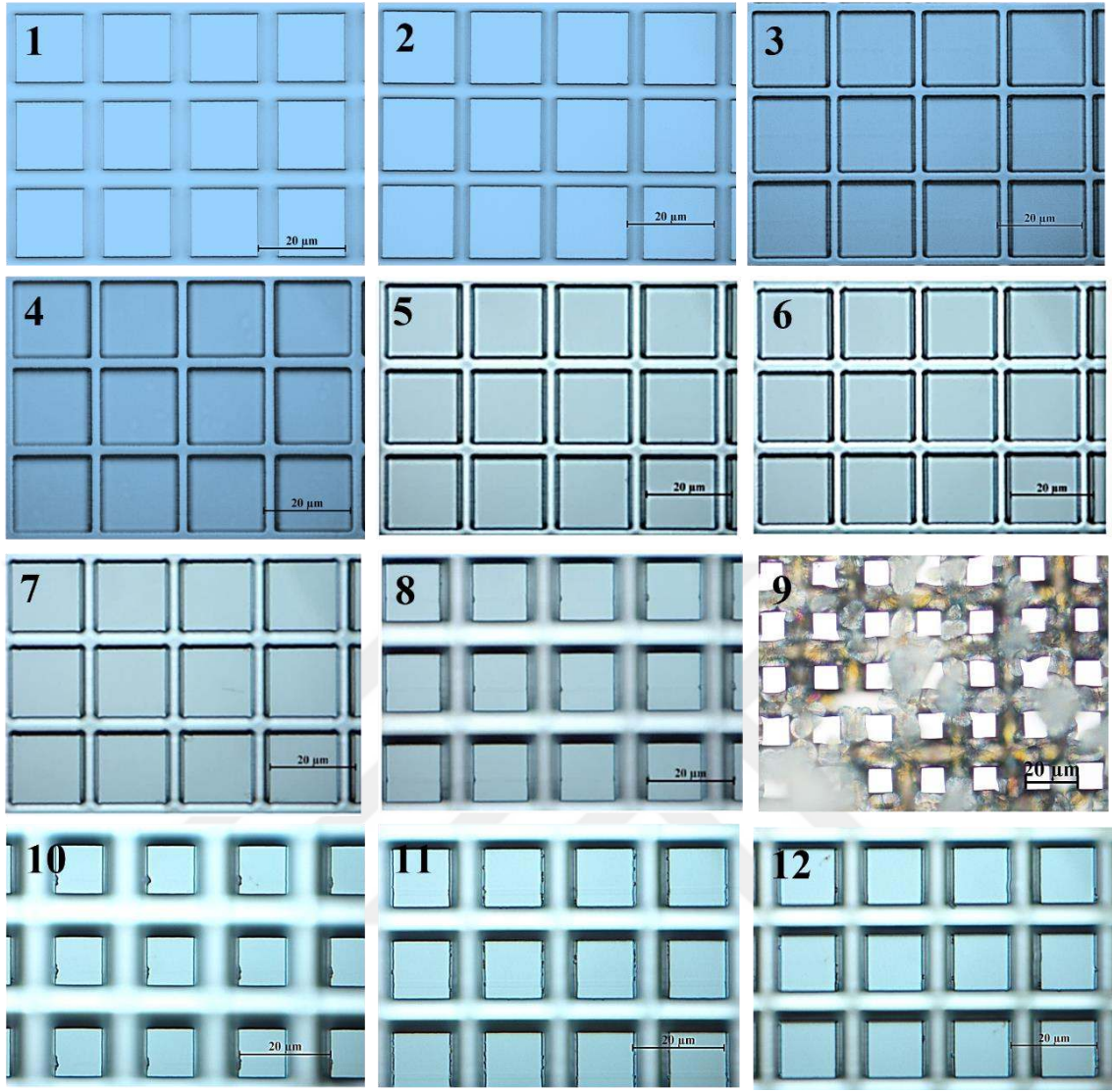
Görsel 4.4. $C_6H_8O_7$: HCl: H_2O_2 : H_2O (10 gr:10 ml:10 ml:80 ml) oranındaki aşındırma sonrası piksel SEM görüntüleri

Yapılan literatür araştırmaları ve aşındırma denemeleri ışığında, T2SL için seçici aşındırma işlemi ıslak aşındırma yöntemiyle uygulanabilir olmadığı teyit edilmiştir. Aşındırma hızlarının oldukça yüksek olması, yapı aşınma yüzeyinin bozulması ve piksel

boyut kayıpları nedenleriyle HCl ve $C_6H_8O_7$ tabanlı ve karışımli çözeltilerin önü bu uygulamalar için kapanmıştır. Bu nedenle, T2SL yapıları için yapısal hasara sebep olmayan sıklıkla tercih edilen ve standart olarak kullanılan H_3PO_4 ve $C_6H_8O_7$ asit karışımli çözeltiliye geçiş yapılmıştır. Bu aşındırıcıyla tam seçici aşındırma mümkün olmadığı için düşük aşındırma hızında ve kontrollü aşındırma opsiyonu üzerine gidilmiştir. Çalışmanın bu kısmında, T2SL'ler de bariyere kadar aşındırma da H_3PO_4 ve $C_6H_8O_7$ karışım oranları değiştirilerek aşındırma hızı yavaşlatılması hedeflenmiştir. Aşındırıcı karışım oranları belirlenirken deiyonize su miktarı sabit tutulmuş ve karışım oluşturan diğer tüm kimyasalların oranları değiştirilerek aşındırma etkileri incelenmiştir. Her bir kimyasalın aşındırmadaki rolü tam olarak anlaşılması için her çözeltide sadece bir kimyasalın oranı değiştirilmiştir. Bu aşındırma çalışmalarında test dedektör maskeleri değil FPA maskeleri kullanılmıştır. Çünkü test dedektör üretim maskelerinde piksel boyutları bir hayli büyüktür. Piksel boyut kaybının tam analizini yapabilmek için $20\text{ }\mu\text{m}$ 'lik piksel adımlı ve $18 \times 18\text{ }\mu\text{m}^2$ lik piksel boyutlu FPA maskeleri tercih edilmiştir. Yapılan aşındırma denemelerinde kimyasal karışım oranları, aşındırma hızı, piksel boyutu ve duvar profil açıları SEM de ayrıntılı olarak incelenmiş ve tablolaştırılmıştır (Tablo 4.4). Ayrıca, her aşındırma sonrası yapı aşındırma yüzeyi ve pikseller optik mikroskopta incelenmiş ve görüntüleri de Görsel 4.5'te paylaşılmıştır.

Tablo 4.4. Standart çözelti karışım oranlarına göre aşındırma tablosu

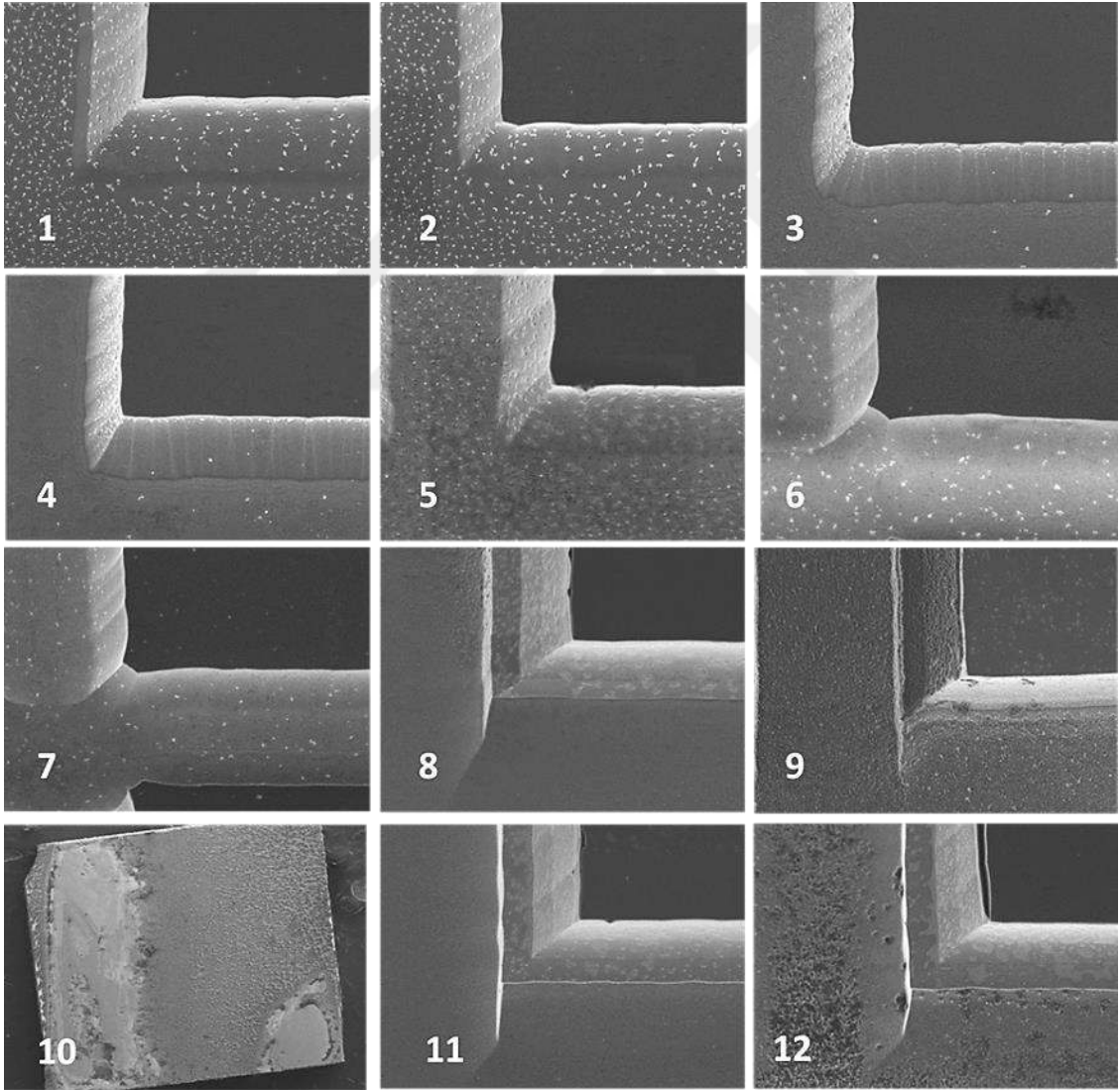
<u>Solüsyon</u> <u>No</u>	<u>$H_3PO_4:C_6H_8O_7:H_2O_2:H_2O$</u> <u>Karışım Oranı</u>	<u>Kontrol</u> <u>Parametresi</u>	<u>Aşındırma</u> <u>Hızı ($\mu\text{m}/\text{dk}$)</u>	<u>Mesa</u> <u>Büyüklüğü</u> <u>(μm)</u>	<u>Mesa Açısı</u> <u>($^\circ$)</u>
1	20ml:5gr:20ml:200ml	Referans	0,45	15,4	51,2
2	10ml:5gr:20ml:200ml	Küçük oranlar	0,31	16,4	49,1
3	10ml:5gr:10ml:200ml		0,3	16,6	63
4	10ml:10gr:10ml:200ml		0,29	16,8	61,5
5	10ml:10gr:20ml:200ml		0,32	16,1	51,6
6	10ml:10gr:30ml:200ml	H_2O_2	0,29	16,2	38,4
7	10ml:10gr:60ml:200ml	H_3PO_4	0,28	15,8	43
8	50ml:10gr:60ml:200ml		0,69	12,4	35,6
9	100ml:10gr:60ml:200ml		-	-	-
10	100ml:25gr:60ml:200ml	$C_6H_8O_7$	1	-	-
11	100ml:50gr:60ml:200ml		0,78	12,4	38,7
12	100ml:75gr:60ml:200ml		0,76	12,7	41,1



Görsel 4.5. Aşındırma işlemleri sonrası elde edilen Mesa yapılarının optik mikroskop görüntüleri

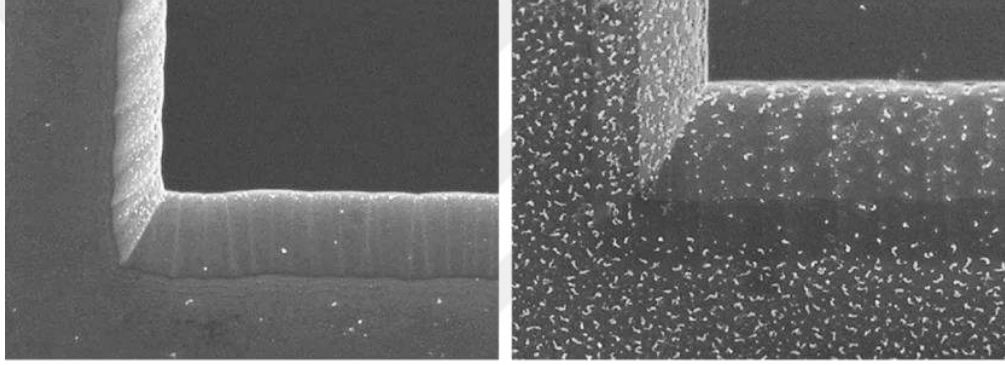
Aşındırılan yapılar optik mikroskopta incelenmesinin ardından her bir örneğin tek tek piksel duvar profili, yüzey morfolojisi, aşındırma derinlikleri gibi daha ayrıntılı incelemeleri SEM de yapılmıştır (Görsel 4.6). Kimyasalların karışım oranlarına göre aşınma profilleri, aşındırma hızları ve yüzey morfolojileri farklılık göstermiştir. Kimyasal karışım oranlarında eğer H_3PO_4 kimyasalı baskın bir orana sahipse daha agresif bir aşınma meydana gelmiş aşınma yüzeyi bozulmuştur. Çözelti içerisinde $C_6H_8O_7$ miktarı artırılrsa da deiyonize su ve H_3PO_4 oranı değişmediğinden agresif aşınma davranışı devam etmiştir. Karışımda, H_2O_2 oranının arttırıldığındaysa aşındırma hızında düşme yaşanmıştır. Ancak, aşınma derinliği dışında, aşınma yüzeyinde veya profilinde büyük bir farklılık meydana gelmemiştir. Kimyasal karışım oranlarında daha küçük miktarda yapılan değişikliklerde aşındırma hızındaki değişim ve yüzeye olan etkisi daha

net bir şekilde görülmüştür. Deiyonize su miktarına göre kimyasalların çok daha düşük miktarlarda karıştırıldığı aşındırıcılarda T2SL yapılarının aşındırma sonrasında, yüzeyde noktasal oluşumlar meydana gelmiştir. Bu durum aynı aşındırıcı karışımı ve benzer yapıların aşındırıldığı çoğu çalışmada da görülmüştür [67]. Aşınan yüzeyde meydana gelen yapı artıklarından oluşan ürünler rastgele ve öbeklenmiş bir şekilde tüm yüzeye yayılmıştır. Çözeltideki su oranına göre çok daha küçük oranlı kimyasal karışımlarında yapılan denemeler sonucunda piksel boyutları ve duvar açıları benzerdir. Ancak, karışım oranlarındaki ufak değişiklikler aşındırma hızının düşmesini sağlamıştır. Böylece sık aşındırma derinlikleri için daha yavaş aşındırma hızının sağlanabileceği görülmüştür.



Görsel 4.6. Aşındırma işlemleri sonrası elde edilen Mesa yapılarının SEM görüntüleri

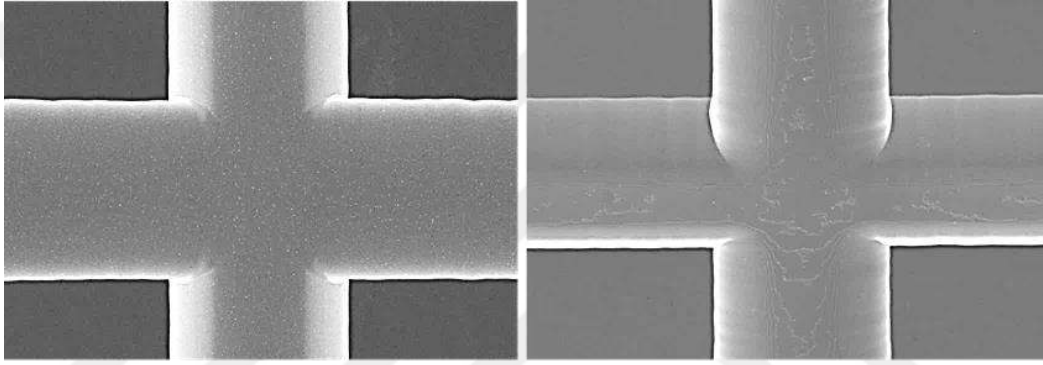
Tablo 4.4'te verilen 3 ve 4 numaralı aşındırma sonrası Görsel 4.6 da verilen SEM görüntüleri incelendiğinde aşınma sonrası yüzeyde oluşan kalıntı öbikleşmesinin daha az olduğu ve düşük miktarda kusur oluşturduğu görülmüştür. Bunun üzerine tekrarlanabilirlik açısından incelemek için bu karışım oranlarında aşındırma işlemi tekrar edilmiştir. İki aşındırma denemesine ilişkin SEM görüntüleri Görsel 4.7'de verilmiştir. Bu iki aşındırma tekrarı arasındaki tek fark aşınma derinlikleridir, ilk örnek SL yapısının ortasında denk gelecek kadar, ikinci örneğe alt kontağa kadar aşındırılmıştır. Bu sebeple aşındırılan yapının derinliği arttıkça yüzeyde oluşan öbikleşmelerinde artışı gözlenmiştir. Böylece 3. ve 4. numaralı karışımlarda aşındırma sonrası yüzey davranışları referans alınan karışım oranıyla benzer olduğu anlaşılmıştır.



Görsel 4.7. Aşındırma derinliğine bağlı olarak az ve çok aşındırılmış örneklerin yüzey davranışlarının incelendiği SEM görüntüleri

Yapı aşındırmasında, aşınmış bölgelerde oluşan öbikleşmeler veya kusurlar yapının elektriksel özelliklerinde kötüleşmeye sebebiyet verebilme ihtimaline karşı aşınma sonrası temizlik prosesi geliştirilmeye çalışılmıştır. Aşındırma sonrası, örnekler aseton, alkol, ultrasonik temizlik ve HCl ile aşındırma sonrası temizliği yapılmıştır. Ancak bu işlemlerden sonra SEM de yüzeyler incelendiğinde herhangi bir değişim veya öbikleşmelerde azalmalar görülmemiş ve başarılı bir sonuç alınamamıştır. Bu sebeple, aşındırma sonrası temizlik işlemi bir adım ileriye taşınarak kimyasal aşındırmayla denemeler yapılmıştır. Bu nokta da dikkat edilmesi gereken husus seçilen kimyasal aşındırıcının sadece aşınmış yüzeylerde görülen öbikleşen kalıntıları aşındırıp süperörgü yapısında aşındırmaya devam etmeyecek şekilde olmalıdır. Süperörgü yapısının tekrarlı katmanların sağladığı kolaylıktan dolayı kimyasal temizlik işleminde yapı aşındırmasında kullanılan H_3PO_4 ve $C_6H_8O_7$ kimyasallarıyla çalışılmıştır. Ancak, burada aşındırma süreleri önemli bir kriterdir, eğer uzun bir kimyasal temizlik yapılsa SL

tekrarlı yapıları bozulabilir. Yapılan kimyasal aşındırma temizliği sonrası SEM de incelemeler yapılmıştır (Görsel 4.8). Fosforik asit ile yapılan temizlik denemesinde öbikleşmelerde küçülme olsa da tamamen temizlik sağlanamamış ve olumlu sonuç alınamamıştır. Ancak sitrik asitle yapılan temizlikte yüzeyde meydana gelen tüm öbikleşmenin temizlendiği gözlemlenmiştir. Böylece aşındırma kaynaklı oluşan kalıntılar tamamen temizlenebilmiştir. Aşındırma sonrası geliştirilen temizlik adımının tekrarlanabilirliği açısından yeniden aşındırma yapılmış ve prosesin tekrar edilebildiği test edilmiştir. Aşındırma yüzeyinde oluşan öbikleşme miktarından bağımsız olarak yapılan kimyasal temizlik her seferinde başarılı sonuç vermiştir.



Görsel 4.8. Fosforik ve sitrik asitlerle yapılan aşındırma denemeleri sonucunda elde edilen yüzeyler

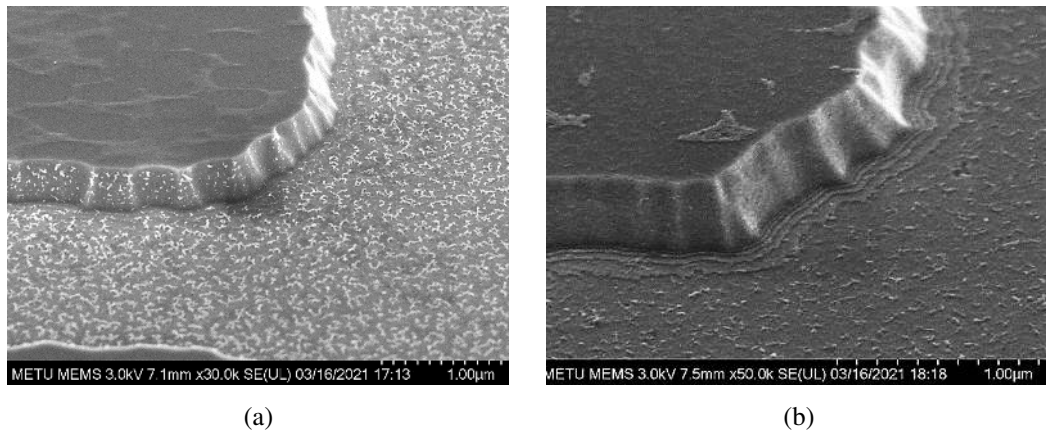
Yapı aşındırma sonrası meydana gelen kusurlardan kurutulduktan sonra bariyere kadar kontrollü aşındırma için aşındırma hızının düşürülmesi çalışmalarına devam edilmiştir. H_3PO_4 ve $C_6H_8O_7$ aşındırıcısında düşük aşınma hızına ulaşabilmesi için karışım oranlarında deiyonize su miktarı yüksek, kimyasal miktarları düşük tutulmuştur. Referans olarak aşındırma hızı 450 nm/dk olan $C_6H_8O_7$: H_2O_2 : H_2O : H_3PO_4 sırasıyla 5 gr: 20 ml: 200 ml: 20 ml karışım oranlarındaki aşındırıcı alınmıştır. H_3PO_4 miktarı yarıya düşürüldüğünde aşınma hızı da yaklaşık olarak yarıya düşmüştür. Deiyonize su oranı iki katına çıkarıldığında ise aşınma hızı 200nm/dk ulaşmıştır. Kimyasalların tamamının miktarı yarıya düşürüldüğünde aşınma hızı 80nm/dk kadar düşmüştür. Kimyasal karışım oranında H_3PO_4 miktarı 5'te 1'e, $C_6H_8O_7$ ve H_2O_2 oranları yarısından biraz daha az olacak şekilde düşürüldüğündeyse 60 nm/dk aşınma hızına sahip olunmuştur. Yapı yüzeyinden bariyer katmanına kadar 450 nm, bu kalınlığına ek 100 nm ve 150 nm olmak üzere AlGaSb bariyer kalınlığı düşünüldüğünde ~ 500 nm'lik sıg aşındırma derinliğine ihtiyaç duyulur. Aşındırma hızının 60nm/dk'ya çekilmesi sıg aşındırma için kontrollü ve yeterli

bir aşındırma hızı olarak kabul edilmiştir. Böylece, seçici aşındırma sağlanamasa da seçici aşındırmaya alternatif olarak kimyasal oranlarının değiştirilmesiyle kontrollü aşındırma elde edilmiştir. Tek tek anlatılan bu aşındırma denemelerinin karışım oranları ve bu oranlara göre aşındırma hızları Tablo 4.5'te sunulmuştur. Çalışma kapsamında kullanılan yapıların tasarımları birbirinden farklı olduğu için seçici aşındırma ihtiyacı bir yapıda ~500 nm iken diğer yapılardaysa ~2,5 µm'dir. Seçici aşındırmada ihtiyaç duyulan aşınma derinliği ~2,5 µm olan yapılarda ikili aşındırmayla önce 450nm/dk aşındırma hızına sahip karışım oranıyla belirli bir aşındırma derinliğine ulaşılmış ve ardından yavaş aşındırıcıya geçilerek 100 nm'lik bariyer katmanında aşındırma durdurulmuştur.

Tablo 4.5. Farklı karışım oranlarındaki standart aşındırıcının aşındırma hızı tablosu

	$C_6H_8O_7: H_2O_2: H_2O: H_3PO_4$ Karışım Oranı	Aşındırma Hızı (nm/dk)
1	5 gr: 20 ml: 200 ml: 20 ml	450nm
2	5 gr: 20 ml: 200 ml: 10 ml	240nm
3	5 gr: 20 ml: 400 ml: 10 ml	200nm
4	2,5 gr: 10 ml: 400 ml: 5ml	80nm
5	2 gr: 8 ml: 400 ml : 4ml	60nm

Aşındırma hızı 60 nm/dk olarak ayarlandıktan sonra aşındırma işlemi tekrar edilerek aşındırma hızı kontrolü yapılmıştır. Aşındırılan süperörgü yapısının piksel profili ve aşındırma derinliği SEM de incelenmiş ve Görsel 4.9 de verilmiştir. Bariyerli T2SL yapısının ıslak aşındırma sonrası meydana gelen kalıntı öbikleşmesi veya aşındırma kirlilikleriyle tekrar karşılaşılmıştır. Geliştirilen aşındırma sonrası temizlik prosesi gerçekleştirilerek aşındırılmış yüzey temizliği yapılmıştır (Görsel 4.9).

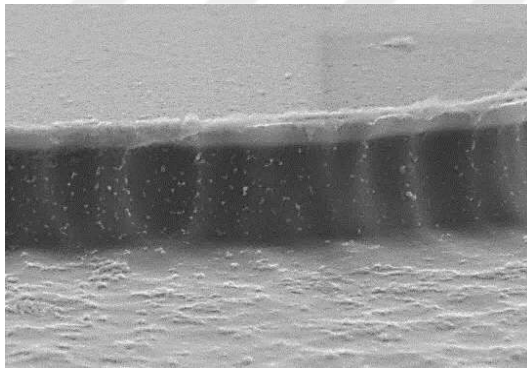


Görsel 4.9. (a) Bariyere kadar aşındırılma (b) aşındırma sonrası kimyasal temizleme ait SEM görüntüleri

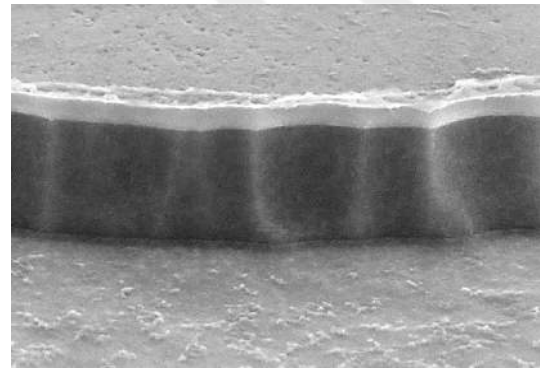
Uygun aşındırıcı belirlendikten sonra test piksellerin aşındırılmasıyla çalışmaya devam edilmiştir. Çalışmanın bu kısmında aşındırma derinlikleri ve temizleme uygulamasına göre 4 ayrı örnek hazırlanmıştır. Alt kontak katmanına kadar olan yaklaşık 3µm'lik derin aşındırmada $H_3PO_4:C_6H_8O_7:H_2O_2:H_2O$ (20ml: 5 gr: 20 ml: 20 ml) karışım oranı, bariyere kadar olan yaklaşık 450 nm/dk aşındırmada ise $H_3PO_4:C_6H_8O_7:H_2O_2:H_2O$ (4ml: 2 gr: 8 ml: 400 ml) karışım oranındaki yavaş aşındırma oranı kullanılmıştır. Yapılan set üretiminde her örneğin diğer eşine kimyasal temizlik uygulanmıştır. Set aşındırma örneklerinin kısa adlandırmalarıyla birlikte Tablo 4.6'da verilmiştir. Ayrıca aşındırma sonrası, örnekler düşük hızlandırma voltajı altında SEM de görüntülenmiştir (Görsel 4.10).

Tablo 4.6. Tek piksel örneklerinin aşındırma uygulama tablosu

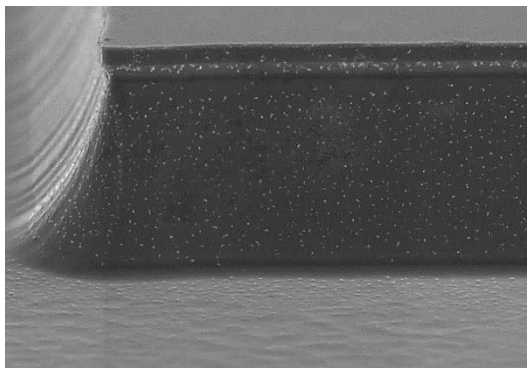
	<u>Aşındırma</u> <u>Derinlikleri (nm)</u>	<u>Aşındırma sonrası</u> <u>temizlik</u>	<u>Örneklerin Kısa</u> <u>Adlandırması</u>
1. Örnek	3200	Yok	1C
2. Örnek	3200	Var	2C
3. Örnek	480	Yok	1B
4. Örnek	480	Var	2B



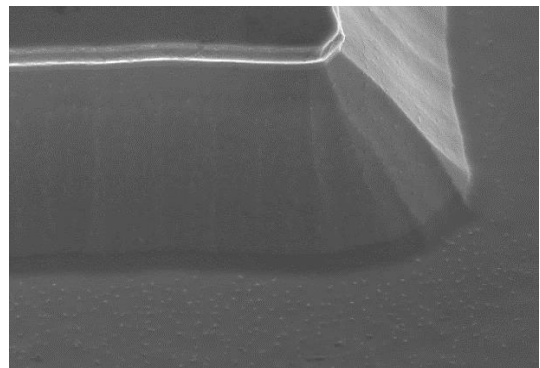
(a)



(b)



(c)



(d)

Görsel 4.10. (a) 1B, (b) 2B, (c) 1C ve (d) 2C örneklerinin yanal yüze SEM görüntüleri

Aşındırma sonrası oluşan bu kalıntıların dedektör performansı üzerine etkisinin incelemek için test dedektörü üretilmiş ve 80 K sıcaklığında IV ölçümleri alınmıştır. Örneklerin her iki durumda da yakın karanlık akım değeri vermiştir. Böylece, aşındırma sonrası oluşan kalıntılar dedektörün elektriksel performansında herhangi bir kötüleşmeye sebep olmadığı anlaşılmıştır.

4.1.2. Pasivasyon üretim optimizasyonu

Dedektör prosesinde, piksel duvarlarında aşındırmadan kaynaklı bağları kopmuş atomlar meydana gelir. Açıkta kalan bu atom bağları atmosferdeki oksijenle oldukça hızlı bir şekilde yeni bağ kurarlar. Kurulan bu yeni bağ yapıda elektriksel olarak sızıntı akımlara ve kayıplara sebep olur. Bu durum dedektör ve piksel performansını kötü yönde etkiler. Dedektörün performansını koruyabilmek için, aşındırma sonrası piksel duvarlarının ortamla olan ilişkisinin hızlı bir şekilde kesilmesi gerekir, bu ilişkinin kesildiği üretim adımına da pasivasyon denir.

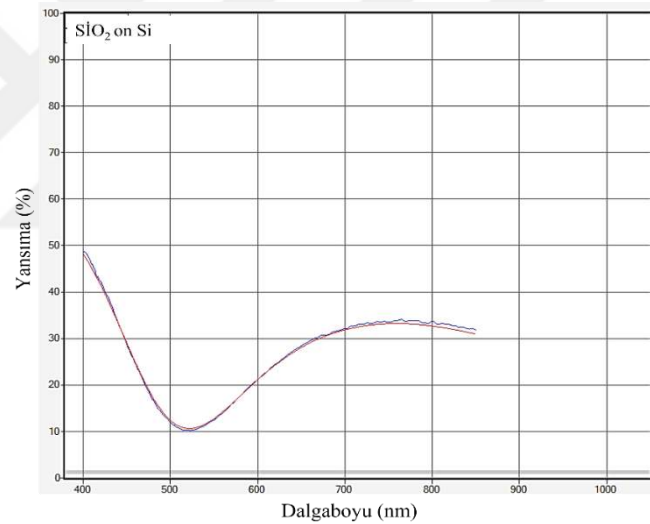
Dedektör proseslerinde epikatman tasarımının gerçek performansının görülebilmesi için proses kaynaklı kayıpların en aza indirgenmesi gerekir. Pasivasyon adımı da bu açıdan kritik bir yere sahiptir. Süperörgü yapıları için literatürde pasivasyon etkisinin incelendiğinde Su-8 [68], Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme (PECVD) yöntemiyle SiO₂ [68], Püskürtme (Sputtering) SiO₂, polimer, Atomik Katman Büyütme (ALD) Al₂O₃ [69] gibi pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda, en iyi sonuç ALD-Al₂O₃ pasivasyonundan elde edilmiştir. Ardından PECVD düşük sıcaklık SiO₂ pasivasyon kaplaması gelmektedir. Bu tez çalışmasında PECVD sisteminde pasivasyon optimizasyonu üzerine yoğunlaşmıştır. Bu kapsamda, PECVD de farklı sıcaklıklarda SiO₂ kaplama denemelerini yapılmış ve Tablo 4.7’de verilmiştir.

Tablo 4.7. Pasivasyon kaplama sıcaklıkları

	<i>Pasivasyon Reçetesi</i>
1. Örnek	Pasivasyonsuz
2. Örnek	100°C PECVD-SiO ₂
3. Örnek	160°C PECVD-SiO ₂
4. Örnek	200°C PECVD-SiO ₂

Sıcaklığa bağlı pasivasyon kaplama çalışmalarında, PECVD sistem sıcaklığını değiştirmeden önce, geri aşındırmayla (etch back) hazne temizliği ve sıcaklık dengeye

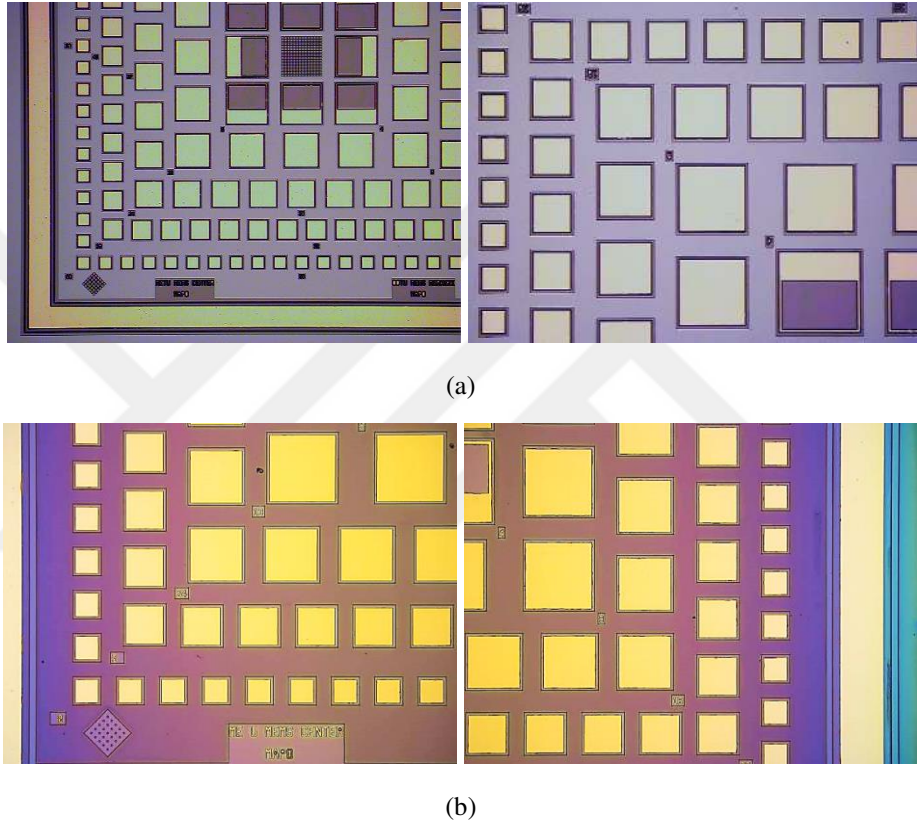
geldikten sonra da kaplama koşullandırması dediğimiz sistem çalışması yapılır. Koşullandırmadan sonra, PECVD sıcaklığına bağlı olarak dakikadaki kaplama kalınlığı belirlenir. Kalınlık optimizasyonu için çalışmaları önce silikon taban üzerine yapılır. Kaplama sonrası, dielektrik katman kalınlığı, filmin üst ve alt ara yüzeyinden yansıyan ışıkların faz farkına dayanan refraktometre yardımıyla ölçülür. Yüzeylerin spektral yansıması ile elde edilen salınım eğrisinin, Frensel denkleminde göre hesaplanan teorik salınım eğrisine göre örtüşme miktarı sonucunda kalınlık bilgisi tanımlanır. Bu ölçümün kabul edilebilir koşulu, spektral yansımayla elde edilen salınım eğrisinin, teorik salınım eğrisine örtüşme oranı 0,99'dan yüksek olmasını gerektirmektedir. Refraktometre cihazına ait kalınlık ölçümüne ait Filmetrics ölçüm programının ara yüz görüntüsü Görsel 4.11'de sunulmuştur. Bu ölçümde salınım eğrilerinin örtüşme oranı 0,99787, Dielektrik kalınlığı 2659,1 Å dur.



Görsel 4.11. Si taban üzerine kaplanan SiO₂ kaplamasının refraktometri yöntemiyle kalınlık ölçümü

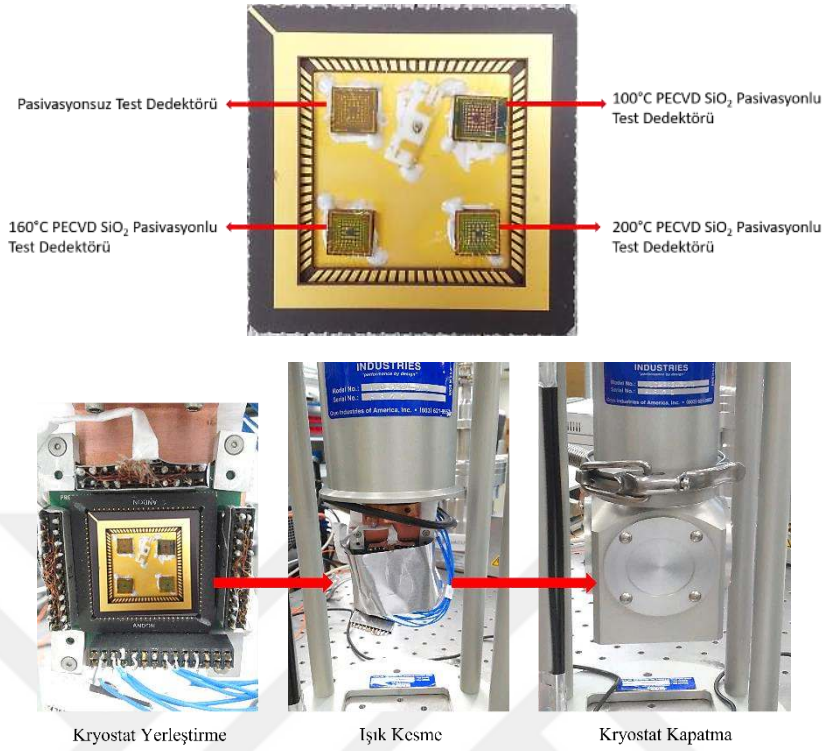
Pasivasyon optimizasyonu sonrası pasivasyonun yapı üzerindeki etkisinin karakterize edilebilmesi için test dedektörü üretimi yapılmıştır. Fabrikasyonda test pikselleri tanımlanıp aşındırıldıktan sonra hızla pasivasyon kaplama adımına geçilir. Örnekler pasivasyon kaplama öncesinde belirli fabrikasyon adımlarından geçtiği için 65°C'de 5'er dakika aseton ve alkolle temizlenir ve PECVD'nin haznesine alınır. Örnek yüzeylerine farklı PECVD sıcaklıkları altında ~250 nm kalınlığında SiO₂ büyütülür. Büyütme esnasında, dedektör örneğinin yanına bir tanede kalınlık ölçümü için GaSb taban konularak kaplama kalınlığı kontrolü yapılır. Böylece GaSb ve Silikon taban

arasında SiO₂ filmin yüzeye tutunum farklılığı saf dışı bırakılarak test dedektör parçalarının gerçek pasivasyon kalınlığı refraktometri yardımıyla 260 nm olarak ölçülmüştür. PECVD kaplama öncesi optik mikroskopta örnek yüzeyleri görüntülenmiş ve aynı görüntüleme PECVD kaplama sonrası da tekrar edilmiştir. Her bir örnek için yapılan yüzey incelemelerinden 100°C de SiO₂ kaplanan test dedektörün kaplama öncesi ve sonrasına ait optik mikroskop görüntüleri Görsel 4.12’de verilmiştir.



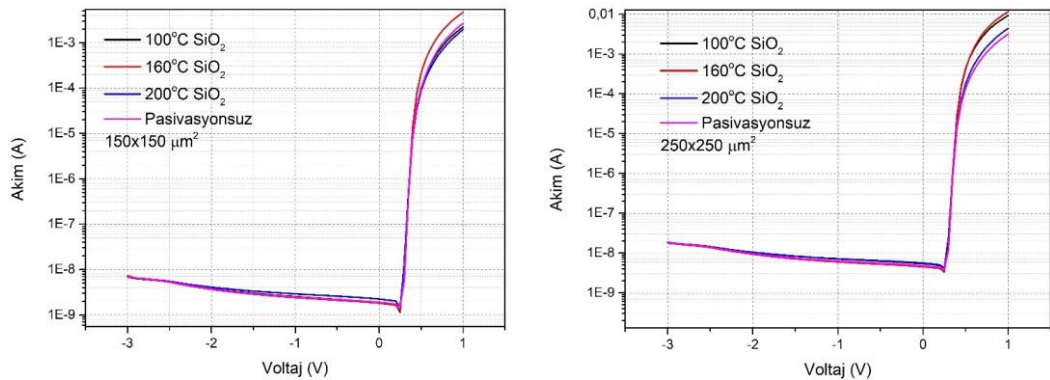
Görsel 4.12. Pasivasyon kaplama (a) öncesi ve (b) sonrasına ait yüzey görüntüleri

Pasivasyonun aygıt performansındaki etkisinin görmek için pasive edilmemiş ve farklı PECVD sıcaklıklarında pasive edilmiş test dedektörlerinin 80 K’de IV ölçümleri alınmıştır. Ölçüm öncesi örnekler tek bir LCC (Leadless Chip Carrier) pakete termal macun ve sabitleyici epoksiyle yerleştirilmiştir. LCC pakete yerleştirilen örneklerin elektriksel bağlantıları altın tel bağlama sistemiyle yapılmıştır. Bütün örnekler tek bir pakete yerleştirilerek IV ölçümleri aynı koşullar altında alınması hedeflenmiştir. Bu aşamadan sonra LCC paket kryostat içine yerleştirilmiştir. Görsel 4.13’te LCC paket içerisindeki örnek konumları ve LCC paketin kryostata yerleştirme basamaklarına ait görselleri bulunmaktadır.



Görsel 4.13. Test dedektörlerin LCC paketteki konumları ve IV ölçümü için kryostata yerleştirme resimleri

Ölçüm hazırlıkları tamamlandıktan sonra standart bir IV ölçüm düzeneği yardımıyla her bir test dedektörünün farklı alan/çevre oranlarındaki test piksellerinden IV ölçümleri alınmıştır. Aynı piksel boyutlarına sahip farklı pasivasyon sıcaklıklarındaki test dedektörlerin karşılaştırmalı IV grafikleri çizilmiştir ve Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Farklı Alan/çevre oranına sahip piksellerin pasivasyona bağlı IV grafikleri

Pasivasyon, yüzeyden kaynaklı sızıntı akımları engelleyerek karanlık akıma katkıyı azaltması beklenmektedir. Pasivasyonsuz ve farklı sıcaklıklarda kaplanarak pasive

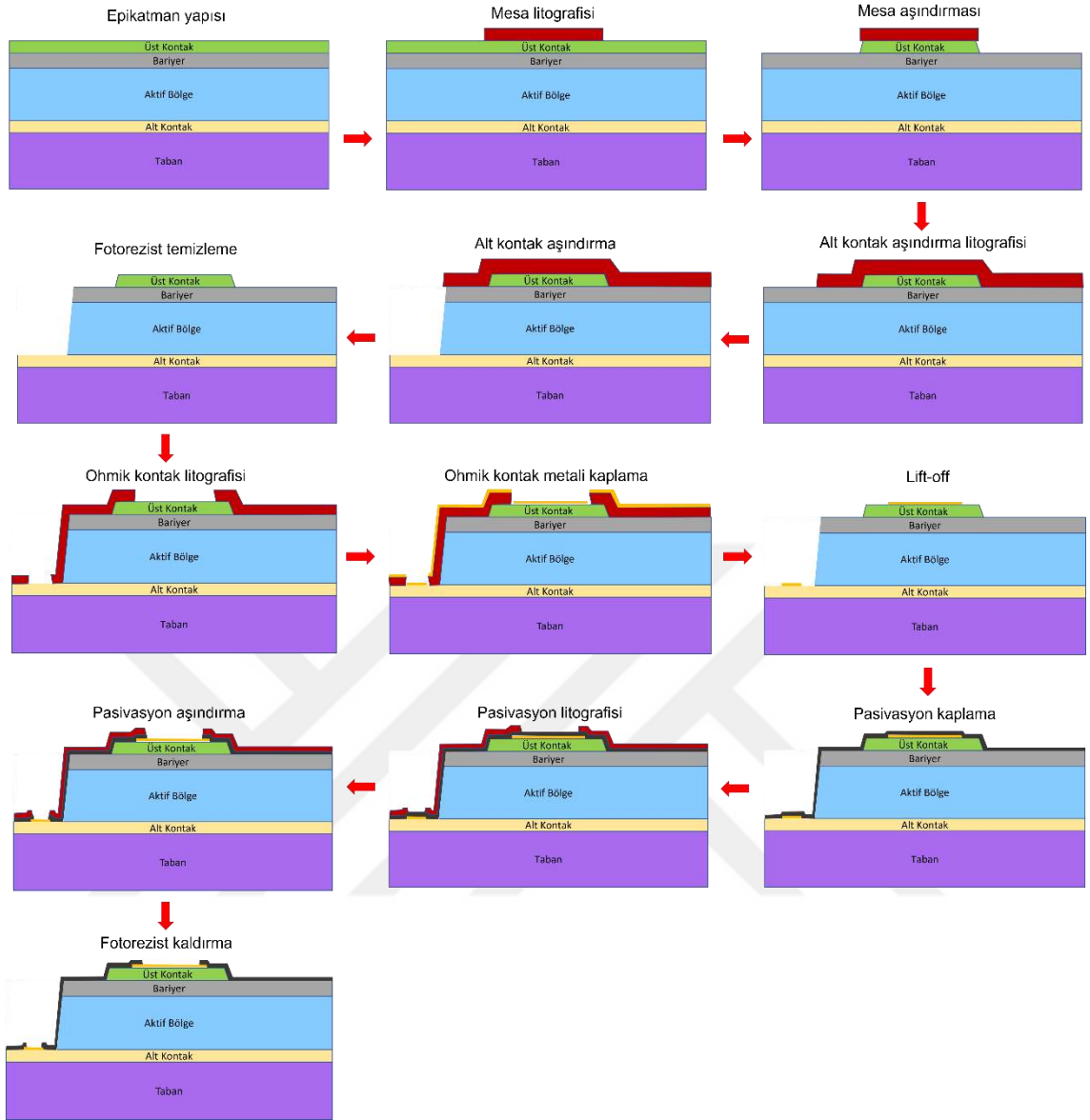
edilmiş $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ ve $250 \times 250 \mu\text{m}^2$ boyutlarına sahip test piksellerin IV ölçümleri birebir aynı sonucu vermiştir. Pasivasyonun dedektör karanlık akım değerini korumuş ve ek bir negatif etkiye sebep olmamıştır. Fakat, aşındırma sonrası pasivasyon kaplaması atmosferle ilişkiyi kesmede yeterli olsa da dedektör performansına olumlu yönde katkı sağlamamıştır. Bu durum, yapının bir hayli düşük bir karanlık akıma sahip olmasından veya büyük test piksel boyutu yüzey akımının hacimsel akımdan çok daha düşük olmasına ve hacim akımının baskın gelerek yüzey akımı farklılıkların gözlenememesiyle de ilişkilendirilir.

4.2. Test Dedektör Üretimi

Test dedektörü, dedektör yapısının elektriksel ve optiksel karakterizasyonlarının yapılmasına olanak sağlayan farklı alan çevre oranlarına sahip tek veya çoklu piksel üretiminin yapıldığı tasarımlardır. Test dedektör üretimi, yapı performansının tayin edilmesinde çok daha hızlı ve pratik sonuç sunduğu için dedektör aygıt üretiminde genellikle önceliklendirilir.

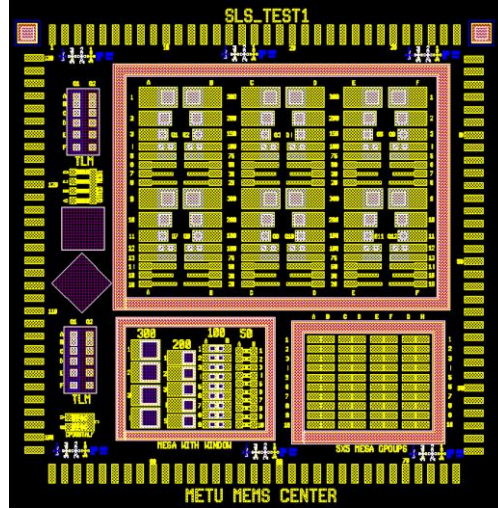
Bir dedektörünün proses adımları ve sıralaması proses maske tasarımıyla belirlenir. Aslında maske tasarımı demek proses tasarımı anlamını taşımaktadır. Maske tasarımına bağlı olarak litografi adım sayısı belli olur ve bu doğrultuda litografi sıralaması da maskelerin proses akışına göre tasarlanır ve şekillendirilir. Bu çalışma kapsamında, test dedektör prosesi piksellerin oluşturulması, pasivasyon kaplaması ve elektriksel bağlantı için metalizasyon ana adımlarından oluşur. Ancak prosesin tamamına ara basamaklarda dahil edildiğinde çok daha fazla litografik ve üretim basamağını içerir. Her bir ana adım içerisinde en az bir kez fotolitografik desenleme, birden fazla temizlik adımı ve çeşitli aşındırma ve kaplama süreçlerden oluşur. Burada önemli olan prosesin yapıya uygun bir şekilde tasarlanması ve üretim kolaylığı sağlamasıdır.

Bu bölümde bir test dedektör üretiminde ara basamaklarda dahil olmak üzere tüm üretim adımları ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan bariyerli T2SL yapılarını için uygulanan prosesin tam akış şeması oluşturulmuş ve Şekil 4.3'te verilmiştir. Bu çalışma kapsamında her bir test dedektörü aynı proses sıralamasıyla üretilmiştir. Proseste değişen tek şey yapıya bağlı olarak piksellerin veya alt kontağın aşındırma derinlikleri olmuştur.

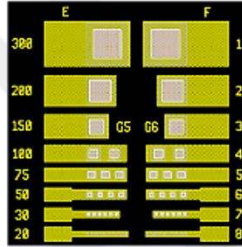


Şekil 4.3. Test dedektör üretiminde proses akış şeması

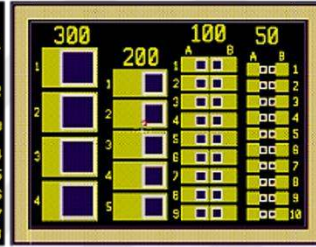
Test dedektör üretimi için tasarlanan litografi maskesine ait çizim Görsel 4.14’te verilmiştir. Tasarlanan litografi maskesinde farklı alan/çevre oranına sahip penceresiz, optiksel ölçümler için yine farklı alan/çevre oranına sahip optik pencere ve paralel bağlı 5x5 dizinli test pikselleri bulunmaktadır.



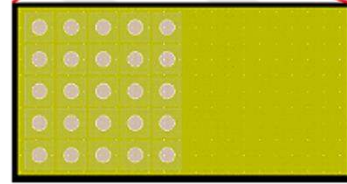
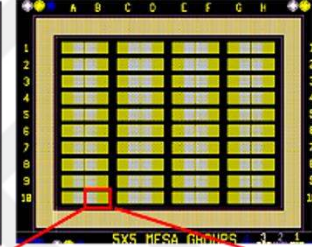
Farklı alan çevre oranına sahip dedektörler



Optik pencere açıklı dedektörler



Paralel bağlı küçük boyutlu dedektörler

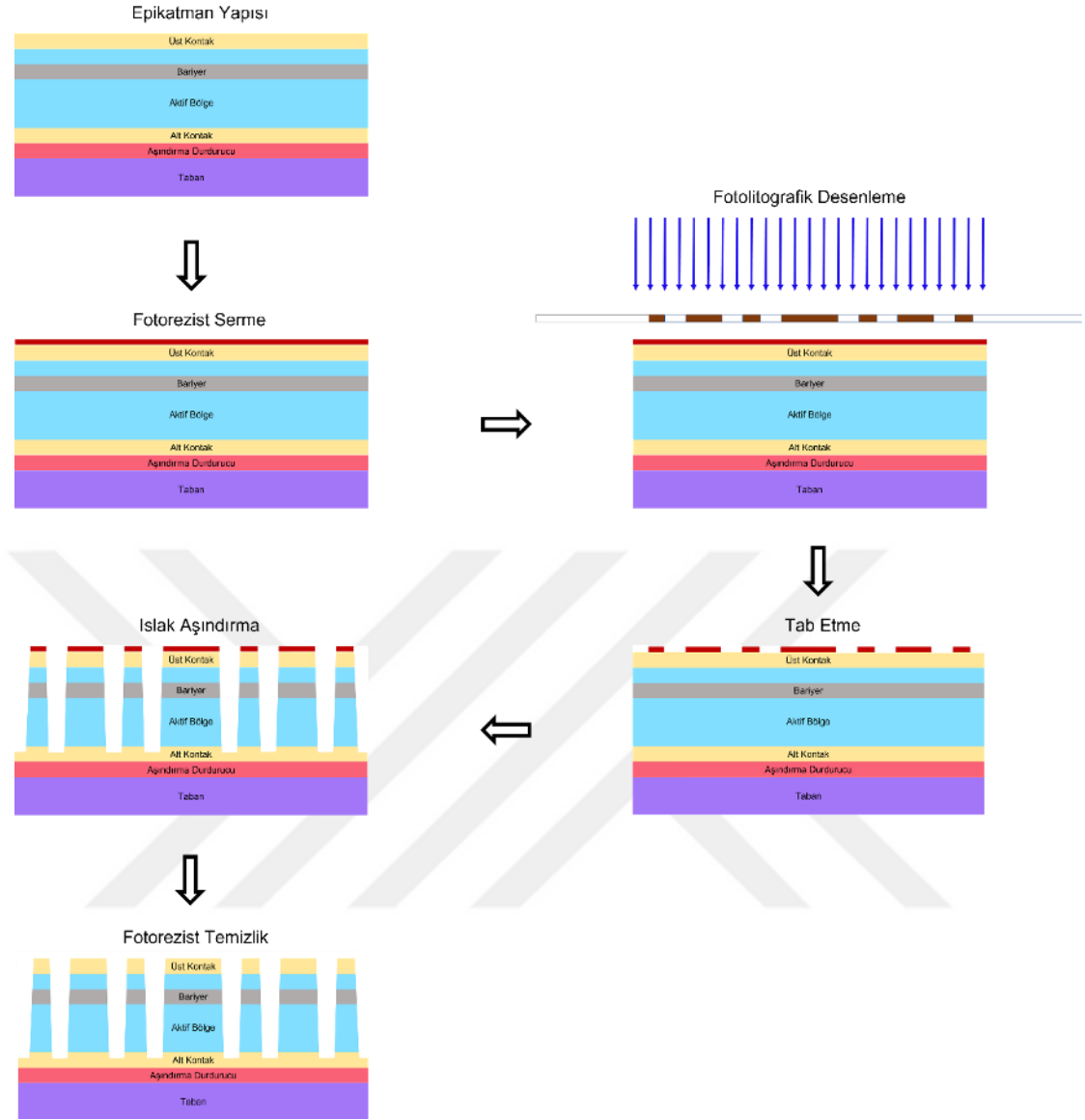


Görsel 4.14. Test dedektör maske tasarımı

Yarıiletken aygıt üretimine başlamadan önce büyütme sonrası atmosferik ve ortam şartlardan kaynaklı yapı yüzeyinde zaman içerisinde oksitlenme, organik ve inorganik kalıntılar gibi yüzeysel kirlilikler oluşur. Eğer procesten önce yapı yüzeyindeki bu kirlilikler temizlenmezse tüm proses boyunca bu kirliliklerin yansımaları aygıtın son haline kadar taşınacaktır. Bu tarz etkiler dedektör performansını olumsuz yönde etkileyebileceğinden proses öncesi yüzey temizliği büyük önem taşır ve mutlaka yapılmalıdır. Organik ve inorganik geçici kirlilikler için sıklıkla tercih edilen temizleme yöntemi 65°C’de 10’ar dakika önce aseton ve sonra alkol içerisinde bekletme ardından de iyonize su ile durulama kuru hava ile kurutmadır. Bunun dışında atmosfer kaynaklı yüzeyde oluşan doğal oksit ise seyreltilmiş HCl yardımıyla yüzeyden uzaklaştırılır. Dedektör üretimi, yapı yüzeyinin temizliği sağlandıktan sonra başlar.

Fabrikasyonun ilk adımı, test piksellerinin veya Mesaların tanımlaması yapılır. Bu basamaktaki ara aşamalar fotorezist serme, fotolitografik desenleme, tabetme, sert ısıtma ve aşındırma alt adımlarından oluşur. Piksel tanımlama ana basamağına ait ara aşamaların temsili çizimleri Şekil 4.4'te verilmiştir.

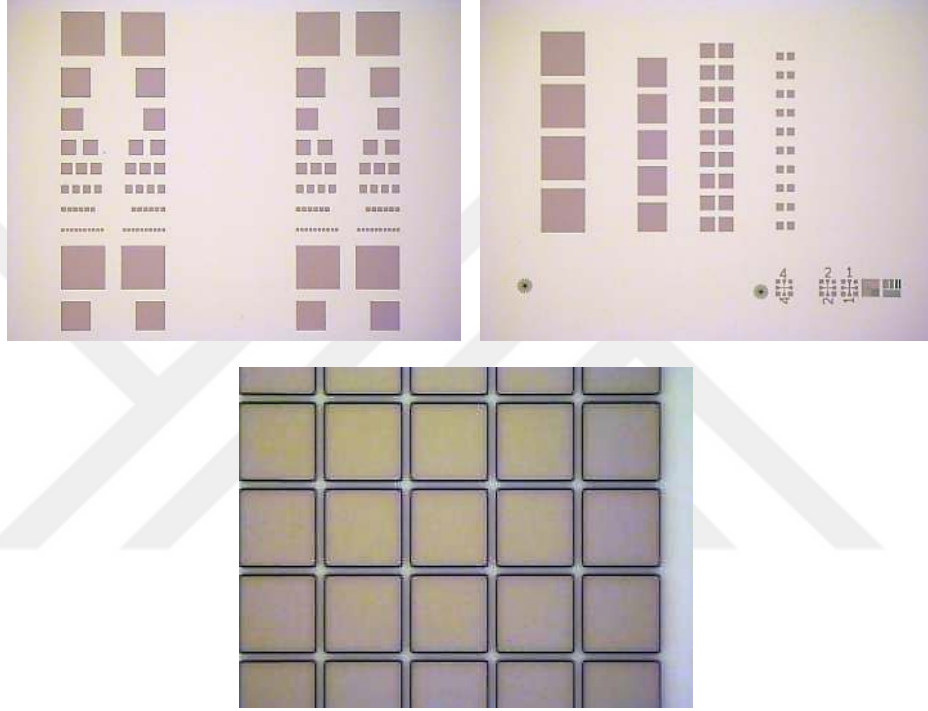
Fotorezistler, UV ışığına oldukça duyarlı ve kimyasal aşındırıcılara karşıda dayanıklı bir içeriğe sahiptir. Fotorezistlerin UV ışığı altındaki davranışlarına göre pozitif veya negatif olmak üzere kendi içinde ikiye ayrılır. Pozitif rezistte, UV ışığı gören yerler, negatifte ise görmeyen yerler bozularak örnek yüzeyinden uzaklaşır. Rezistlerin, bu özelliklerinden faydalanarak maske üzerindeki desenler fotolitografi yöntemiyle örnek yüzeyine aktarılır. Bu ana adımın ilk işlemi fotorezist sermedir. Proseste, S1813 pozitif fotorezisti kullanılarak 4000 rpm 30 sn döner kaplayıcıda rezist örnek yüzeyine serilir. Rezist serme sonrası hemen desenleme işlemine geçilmez. Önce fotorezist kurumalıdır ki desenleme esnasında kolay hizalama yapılabilsin, bunun için örnek yumuşak ısıtma (Soft Bake) dediğimiz 115° C'de 1 dk fırınlanır. Desenlemeye hazır olan örnek, maske hizalayıcıda maske ve örnek birbirine göre hizalanır ve 4 sn boyunca UV ile pozlanır. Böylece, maske üzerindeki test dedektör tasarımı örnek yüzeyindeki fotorezistte işlenmiş olur. Ancak desenin örnek yüzeyine tam olarak geçmesi için UV ışığıyla bozulan rezistin örnek yüzeyinden uzaklaştırılması gerekir ki bu işlemede tabetme denir. Tabetme işlemi fotoreziste uygun geliştirici solüsyonlarla yapılır. Fotoliografik desenleme sonrası, örnek uygun tab çözeltisini (MF319) içine konularak ~55 sn bekletilir ve ışık gören fotorezist yüzeyden uzaklaşır. Böylece maske deseni örnek yüzeyinde net bir şekilde belirir. Bu sayede rezistin koruduğu yapının aşınmayacak ve rezistin yüzeyden uzaklaştığı aşınacak bölgeler birbirinden ayrılır. Geliştiriciden çıkarılan örnek deiyonize su ile durulanır ve ardından kuru hava ile kurutularak adım tamamlanır.



Şekil 4.4. Piksel tanımlama proses aşamalarının temsili çizimleri

Çalışma kapsamında, optimizasyon çalışmaları yapılan ıslak aşındırma yöntemi tercih edilmiştir. Islak aşındırma, kuru aşındırmaya göre kimyasalın doğrudan örnekle temasta olması rezistin yüzeye iyi tutunmasını ve kimyasala karşı dayanıklılığının artırılması ihtiyacını doğurur. Bu nedenle tabedilerek örnek yüzeyinde oluşturulan desenin dayanıklılığı için örnek sert ısıtma (Hard Bake) adı altında 120°C 'de 5 dk boyunca tekrar fırınlanır. Böylece örnek yüzeyi ve rezist birbirine daha iyi tutunur ve su buharından kurtulan rezist sertleşerek kimyasala karşı dayanıklılığı artar. Bu adımların tamamı yapının ıslak aşındırma işlemine hazırlanma sürecidir. Artık fotolitografik desenleme basamağı sonlanmış olur ve sırada kritik önem taşıyan test piksellerinin aşındırılması adımına geçilir. Ancak herhangi bir aygıt üretimi esnasında proses adımları

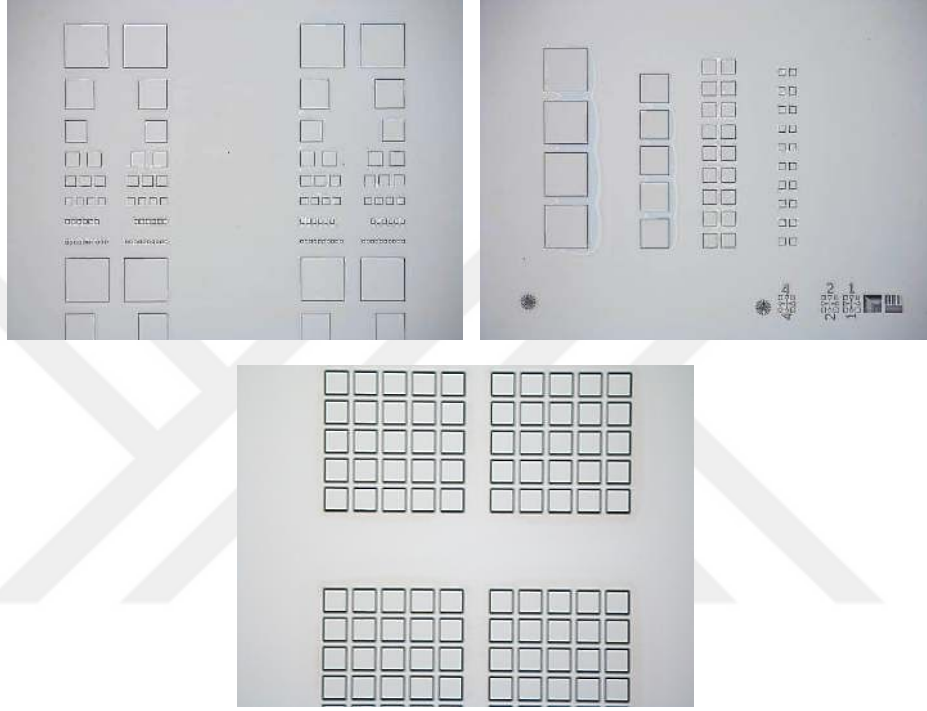
arasında mikroskopik incelemeler büyük bir öneme sahiptir. Her ana basamak ve litografik desenleme sonrası örnek yüzeyi optik mikroskop altında incelenmelidir. Bu yüzden, proses adımları arasında örnek yüzeyi optik mikroskop altında ayrıntılı olarak incelenmiş ve görselleri Görsel 4.15'te paylaşılmıştır. Piksel tanımlama sonrası şekillendirilmiş rezistin farklı alan/çevre oranı, optik açıklı test pikselleri ve 5x5 dizin pikselleri detaylıca incelenmiştir.



Görsel 4.15. Test dedektörü piksel litografisi sonrası örnek yüzeyinin optik mikroskop görüntüleri

Test piksellerinin aşındırılması adımımda ~450 nm/dk aşındırma hızına sahip 20 ml: 5 gr: 20 ml: 200 ml karışım oranlarında hazırlanan H_3PO_4 : $C_6H_8O_7$: H_2O_2 : H_2O çözeltisi kullanılmıştır. Yapının aşındırma işlemi, çözelti karışımı hazırlandıktan 10 dk sonra başlatılmıştır. Her ne kadar yapının çözelti içinde aşındırma hızı bilinse de ıslak aşındırma uygulamalarında hiçbir zaman aşındırılması gereken derinlik tek seferde aşındırılmaz. Çünkü ıslak aşındırmada çözeltinin zamanla yaşlanması, laboratuvar ortam koşulları, aşındırıcı hazırlanırken karışım miktarlarındaki ufak değişiklikler gibi küçük farklılıklar aşındırma hızına etki eder. Bu sebeplerden dolayı, ıslak aşındırmalarda kademeli aşındırma yapılarak aşınma kontrolü sağlanır. Örneğin, yapı tasarımı dikkate alındığında MWIR T2SL tasarımı için alt kontak katmanına kadar olan ~2,3 μm kalınlığı toplamda 7 dk olmak üzere 4 dk, 2 dk ve 1 dk şeklinde kademeli aşındırılarak tamamlanmıştır. Her

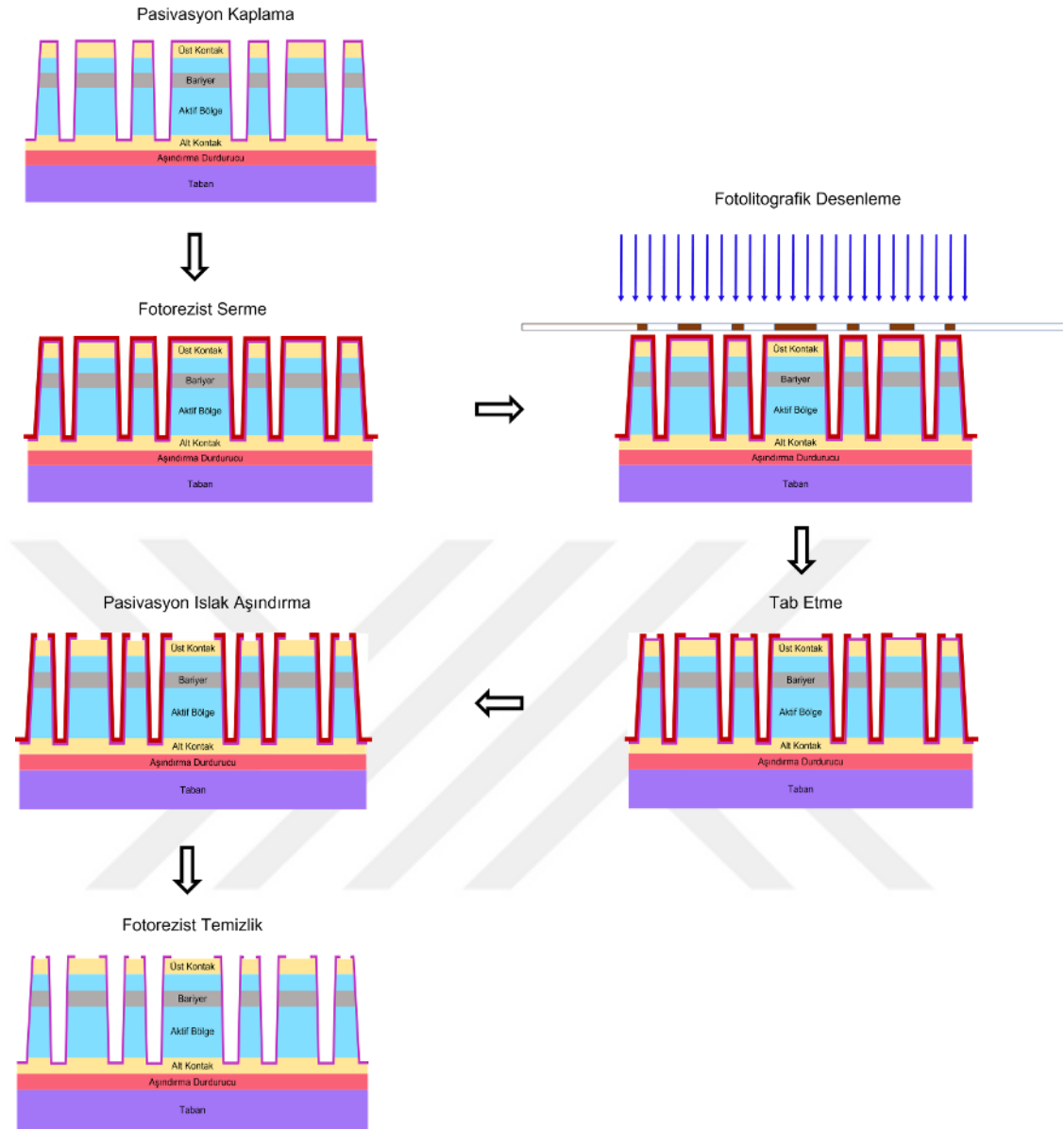
aşındırma süresinden sonra yüzey profil belirleyicisiyle basamak yüksekliği ölçülmüş ve aşındırma hızı ve derinlik kontrolü sağlanmıştır. Hedeflenen aşınma derinliğine ulaştıktan sonra yapı yüzeyindeki fotorezist aseton içinde bekletilerek temizlenmiştir. Aşındırma sonrası temizlenen örnek yüzeyine optik mikroskopta tekrar incelenmiş ve görüntüleri Görsel 4.16 de sunulmuştur.



Görsel 4.16. Test piksellerin aşındırma sonrası örnek yüzeyinin mikroskop görüntüleri

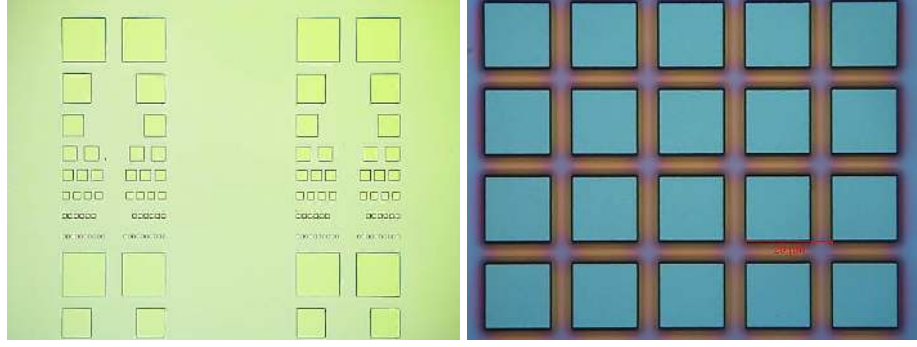
Test pikselleri aşındırıldıktan sonra sırada pasivasyon ana adımı vardır. Pasivasyon ana adımı SiO_2 kaplama, fotorezist serme, pasivasyon desenleme, tabetme, pasivasyon pencerelerinin aşındırılması ve rezist temizliğinden oluşur. Tüm bu alt aşamalarda dahil olmak üzere pasivasyon adımı ait temsili proses çizimi Şekil 4.5’te verilmiştir.

Yarıiletken aygıt üretiminde, proses edilen yapı yüzeyinin temizliğinin önemi daha önce vurgulanmıştır. Bu nedenle, her ana adım sonrası tekrar edilmesi zorunlu olan standart temizlik adımı yapılır ki böylece bir önceki litografi veya ara işlemlerden kaynaklı yüzeyde oluşan kirlilikler ve kalıntılardan kurtulmuş olunur. Yüzey temizliğinden emin olduktan sonra örnek atmosferde çok fazla bekletilmeden hemen PECVD sisteminin haznesine konularak tüm yüzey $100\text{ }^\circ\text{C}$ ’de $\sim 300\text{ nm}$ kadar SiO_2 ile kaplanır.



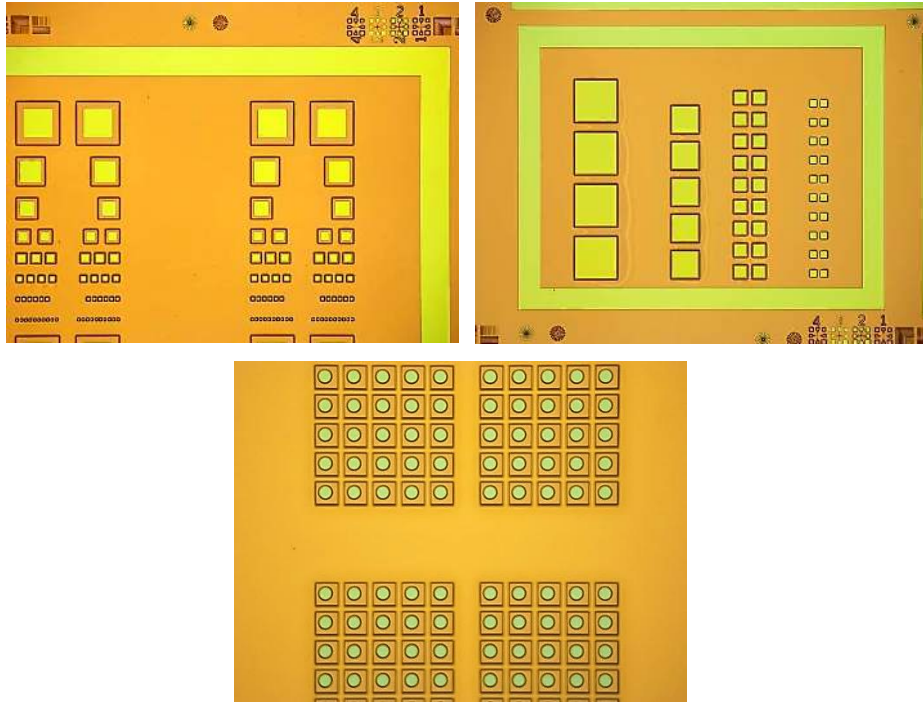
Şekil 4.5. *Ayıt pasivasyon prosesinin temsili çizimi*

Pasivasyon kaplama işlemi sonrasında örnek yüzeyi optik mikroskopta incelenmiştir. Dielektrik kaplama sonrası yüzeyde kaplama kalınlığına göre renk değişimi net bir şekilde görülebilmektedir. Yüzeye ait elde edilmiş olan görüntüler Görsel 4.17’de verilmiştir. Örnek yüzeyinin tamamı pasive edildiği için yapıyla temas sağlanabilecek açıklıklar yani pasivasyon pencereleri mevcut değildir. Dolayısıyla piksellerle elektriksel temasının kurulabilmesi için pasivasyon pencerelerinin aşındırılarak açılması gerekir. Pasive edilen yapının pasivasyon pencerelerini açmak için örnek standart fotolitografi desenleme işleminden geçirilir ve desenlenerek pencerelerin aşındırılıp açılacağı bölgeler belirlenir.



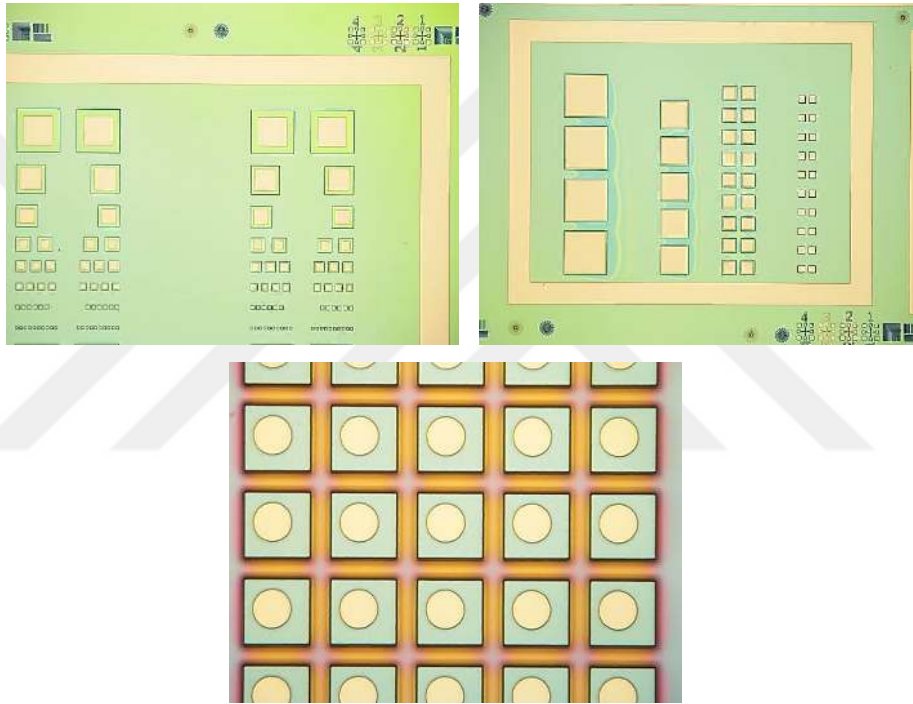
Görsel 4.17. Pasivasyon kaplama sonrası örnek yüzeyinin görüntüleri

Bu litografi adımımda, örnek yüzeyine Dielektrik kaplama sonrası S1813 rezistinin 30 sn 3000 rpm’de serilmesiyle başlar ve 115 °C de 1 dk Soft Bake yapılarak kurutulur. Rezist kurutma işleminin ardından maske hizalayıcıya pasivasyon pencereless maske yerleştirilir. Yüzeydeki Mesa deseniyle pasivasyon maskesinin hizalaması yapıldıktan sonra 5 sn boyunca UV ye maruz bırakılarak desenlenir ve MF319 geliştirici solüsyonunun içerisinde ~70 sn tabedilerek desen transferi gerçekleşir. İşlem sırasında çözülen rezistin uzaklaştırılmasıyla pasivasyonun olmaması gereken bölgeler yani pencere açıklıkları belirlenmiş olur (Görsel 4.18).



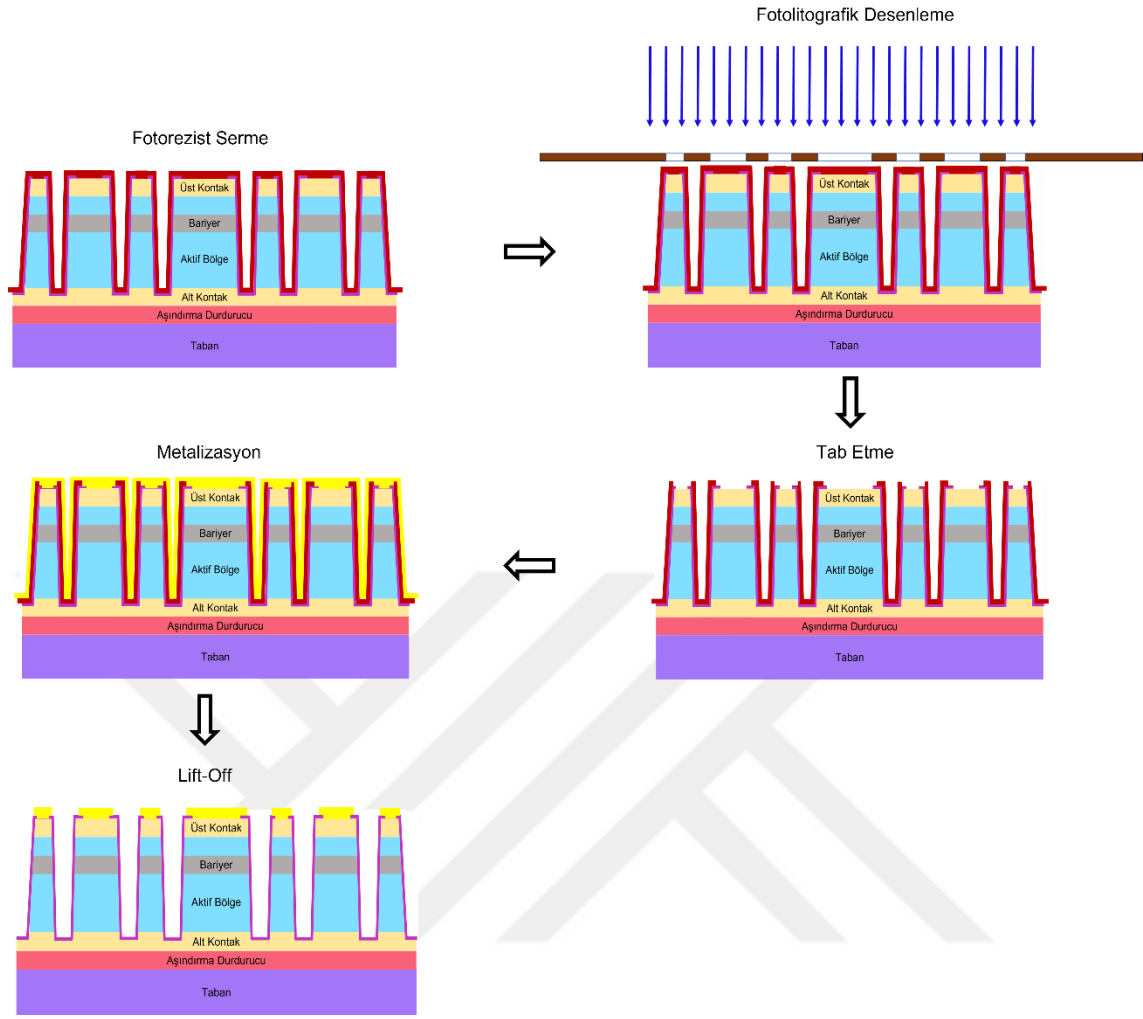
Görsel 4.18. Pasivasyon litografisi sonrası örnek yüzeyinin mikroskop görüntüleri

Pasivasyon açıklıklarının belirlenmesi adımdan sonra esas kritik alt adım olan pasivasyon pencerelerinin aşındırılmasına geçilir. Bu adımda 1:7 oranında BHF kullanılarak pasivasyon ~40 sn aşındırılır. Pasivasyonun aşındığından emin olmak için aşındırma sonrası pencereler optik mikroskop altında incelenmiş ve pencerelerde renk farklılığı veya dalgalanması olmadığı görülmüş ve bu noktada aşınmanın tamamlandığı anlaşılmıştır. Pasivasyon pencereleri açıldığı için örnek yüzeyindeki rezist asetonla temizlenerek pasivasyon ana adım sonlandırılır. Pasivasyon pencereleri açılan ve temizlenen örneğe ait optik mikroskopta görüntüleri Görsel 4.19’da gösterilmiştir.



Görsel 4.19. Pasivasyon aşındırması sonrası açılmış Pasivasyon pencerelerinin mikroskop görüntüleri

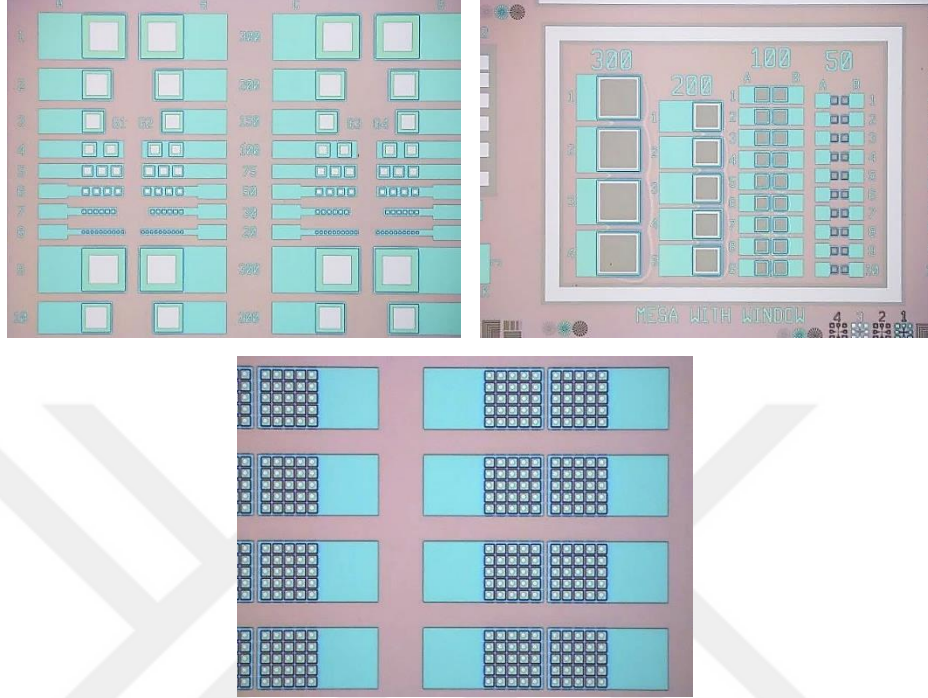
Pasivasyonu tamamlanan test dedektörü, üretimin son basamağı olan elektriksel bağlantıların alınacağı metalizasyon işlemidir. Bu adımda, önceki ana basamaklarla benzer ara işlemlere sahiptir, proses alt adımları fotorezist serme, desenleme, tabetme, metal kaplama ve Lift-off süreçlerini kapsar. Omik kontak metalizasyonuna ait alt adımları içeren temsili proses basamak çizimleri Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Omik kontak metalizasyon litografisinin temsili çizimi

Her prosesin ilk işleminde olduğu gibi süreç yine uygun rezistin yüzeye serilmesiyle başlar. Bu litografiyi önceki litografilerden ayıran temel fark kullanılan rezistin özelliğidir. Üretimin bu kısmında Lift-off kolaylığı sağlaması için SPR220-3 rezisti tercih edilmiş ve 30 sn 4000 rpm’de serilmiştir. Rezit kalınlığı kaplacak metal kalınlığından en az üç kat daha fazla olmalıdır ki Lift-off işlemi kolay ve sorunsuz bir şekilde yapılabilin. Toplamda kaplanacak metal kalınlığı ~600 nm civarındadır. Dolayısıyla da rezist kalınlığı minimum 1800 nm den daha kalın olması tercih sebebidir. Bu aşamada kullanılan rezistin serme rpm değerine göre kalınlığı 2500 nm’dir. Yüzeye serilen rezistin kuruması için 115 °C de 1 dk ısıtılır, ardından omik kontak maskesi kullanılarak 8 sn boyunca UV ışığına maruz bırakılır. Desenleme sonrası MF319 geliştiricisi içerisinde 70 sn tabedilir. Metal kaplanacak bölgelerin açılıp açılmadığını kontrolü optik mikroskopta yapılır, eğer rezist kalıntısı mevcutsa tabetme işlemine devam

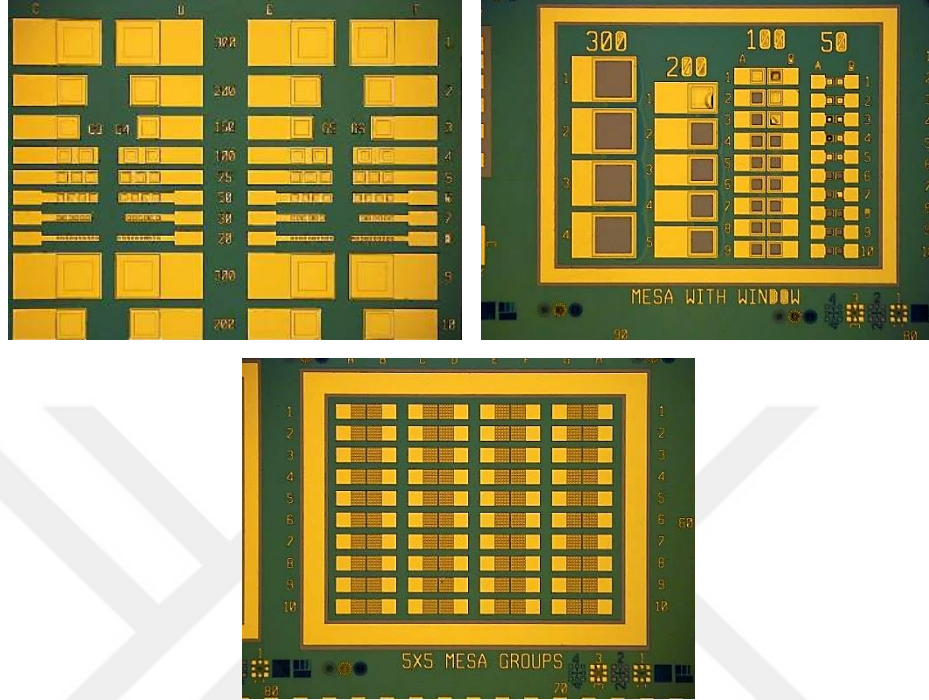
edilebilir. Metalizasyon litografisi sonrası örnek yüzeyine ait görseller Görüntü 4.20 de verilmiştir.



Görsel 4.20. Omik kontak metalizasyon desenlemesi sonrası piksellerin görüntüleri

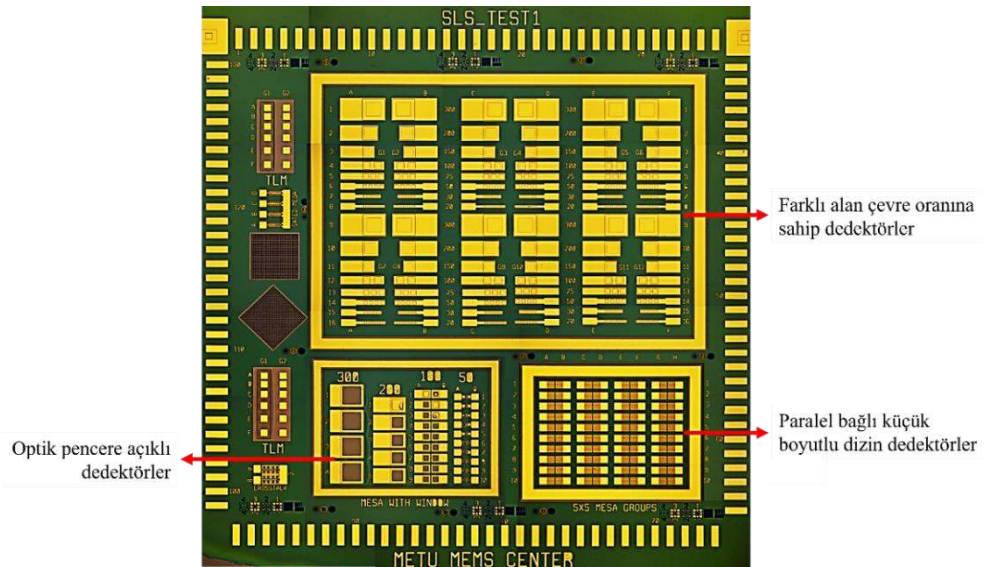
Desenleme işlemi tamamlandıktan sonra gözle veya optik mikroskopta görünmeyen fotorezist kalıntısı ihtimaline karşı örneğe 2 dk boyunca O_2 plazma yapılır. Eğer omik kontak açıklıklarında rezist kalırsa elektriksel bağlantının alınamaması veya Lift-off zorluğu gibi riskler bulunmaktadır. Plazma basamağının ardından örnek metal kaplamanın yapılacağı metal püskürtme cihazına konulur. Metalizasyon kaplama adımında Sputtering tekniğiyle örnek yüzeyine sırasıyla 40/50/500 nm kalınlığında Ti/Pt/Au buharlaştırılır. Omik kontak kaplaması biten test dedektörü aseton içerisine alınır ve bir süre bekletilerek Lift-off olarak adlandırılan süreç tamamlanır. Bu süreçte, metalin altında bulunan rezistin aseton içerisinde çözünmesi sayesinde metal olmaması gereken yüzeylerden uzaklaşır. Fazlalık metaller yüzeyden koparak uzaklaştıktan sonra test dedektörü aseton içerisinden alınarak önce alkol ve sonra DI suyla durularak kurutulur. Omik kontak adımı sonrası örnek yüzeyi mikroskopta incelenir (Görsel 4.21). Eğer, Lift-off sonrası yüzeyden uzaklaşmayan metalli bölgeler varsa Lift-off süreci tekrar edilir. Bu çalışma kapsamında optik açıklıklı piksellerde açılmayan pencereler mevcuttur

ancak yeteri kadar optik açıklıklı piksel olduğu için Lift-off süreci bu aşamada tekrar edilmemiştir.



Görsel 4.21. Metal Lift-off sonrası mikroskop görüntüleri

Tüm bu proses adımları sonucunda test dedektör üretimi tamamlanmıştır. Test dedektörün tüm yüzeyi mikroskopta ayrıntılı incelenmiş ve alınan görüntüler birleştirilerek tüm yüzey görüntüsü paylaşılmıştır (Görsel 4.22).



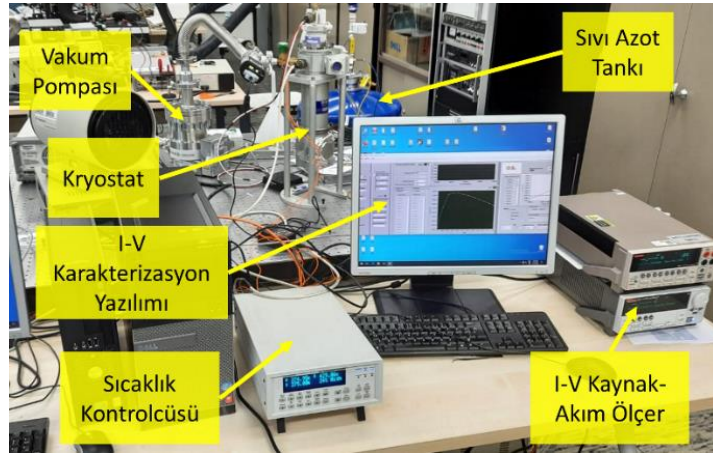
Görsel 4.22. Prosesi tamamlanan test dedektörünün birleştirilmiş optik mikroskop görüntüsü

Test dedektör tam üretimi öncesi yapılan üretim basamak optimizasyonları sayesinde üretim zorlukları ve sorunları aşılmıştır. Böylece homojen ve tekrar edilebilir üretim reçetesi elde edilmiş ve test dedektörü üretimleri başarıyla gerçekleştirilmiştir.

4.3. Test Dedektör Karakterizasyonu

Yapı tasarımının ve fabrikasyonun dedektör performansı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi için test dedektörün elektro-optik karakterizasyonu yapılmalıdır. Bu nedenle, çalışmanın bu bölümünde, N-pBin yapılı e-SWIR dalgaboyunda çalışan test dedektörünün akım-voltaj, karanlık akım yoğunluğu, foto tepki ve spektrum ölçümleri yapılmıştır.

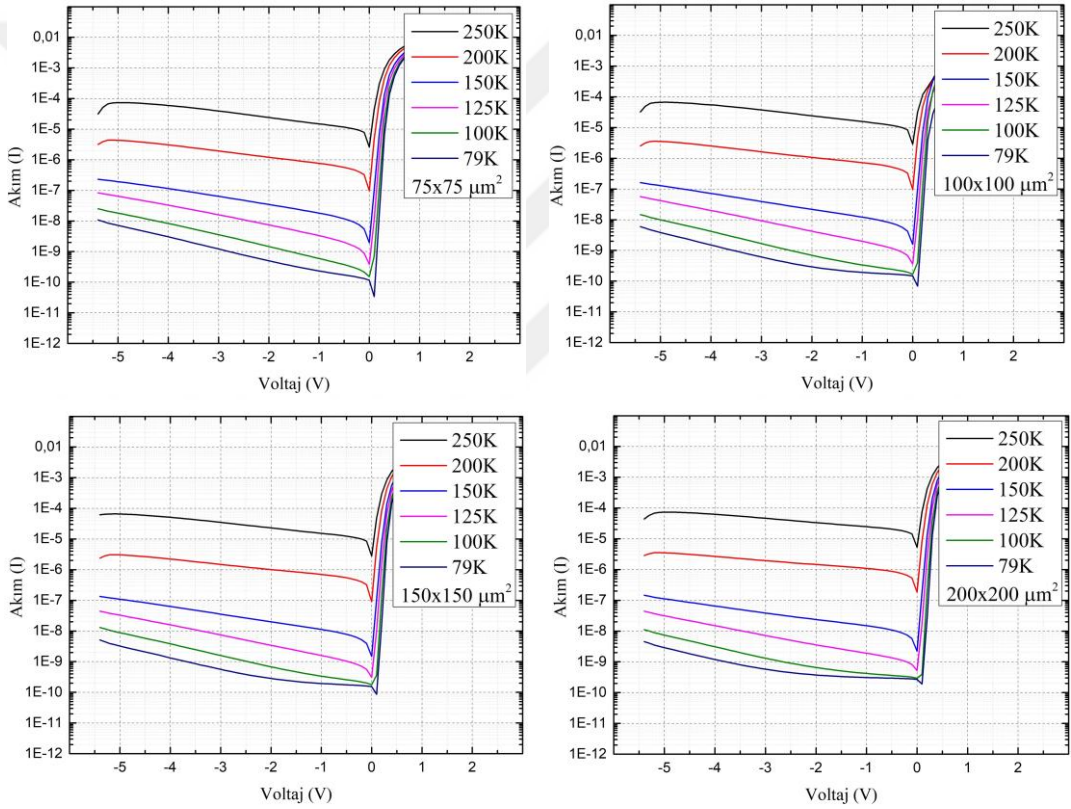
Test dedektörünün elektro-optik karakterizasyonu için ölçüm sistemlerine uyumlu olan 84 pinli taşıyıcı LCC pakete sabitlenir. Elektriksel bağlantılar, Mesa kontak bölgesinden LCC'ye olacak şekilde Au tel ile alınır. Ardından, LCC taşıyıcı paket kapalı devre soğutucusu-Kryostat'a yerleştirilir (Görsel 4.13). Sıvı azotla kontrollü soğutma yapan Kryostat sistemi 80 K'den 300 K'e kadar geniş bir sıcaklık aralığının da kontrol edilebilir. Elektriksel ve optiksel ölçümlerde kullanılan sistemde akım ölçer (KEITHLEY 2635B), sıcaklık kontrolcüsü (Stanford Research Systems CTC100), ayarlanabilir kaviteli kara cisim (Newport Oriel 67000 serisi), Kryostat sistemi ve akım-voltaj ölçümlerinin yapıldığı bilgisayar ve yazılımdan oluşmaktadır (Görsel 4.23).



Görsel 4.23. Elektro-optik ölçüm düzeneği

Dedektör karanlık akımı, ortamda herhangi bir uyarın yokken yapının sahip olduğu akım değerine denir. Şekil 4.7'de farklı piksel boyutlarındaki dedektörlerin 79 K

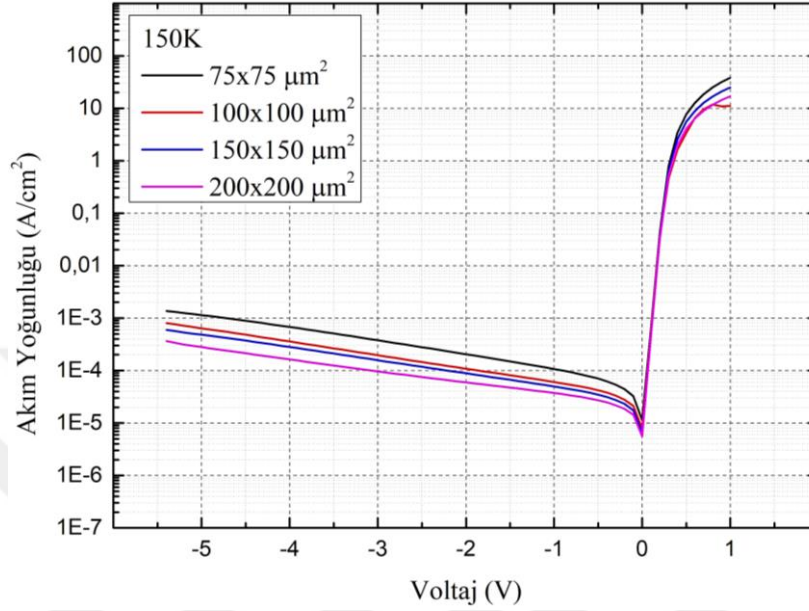
ve 250 K sıcaklığı arasında alınan IV ölçümleri paylaşılmıştır. Karanlık akım miktarı 79 K sıcaklığında $\sim 10^{-10}$ A seviyelerindedir. Sıcaklığa bağlı alanın bu ölçümlerde 150 K'den sonra $-0,1$ V değerine karşılık gelen akım değerindeki farkın daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum dedektörün 150 K'den sonra çalışmaya elverişli olmadığını gösterir. Bir kenar uzunluğu 75, 100, 150 ve 200 μm olan farklı boyutlardaki test piksellerin karanlık akım baskın mekanizmalarında değişim sıcaklığa bağlı IV ölçümlerinde incelenmiştir. Piksel üzerinden geçen akım miktarı piksel boyutu arttıkça azalması beklenir. Fakat bu çalışmada farklı boyuttaki piksellerden geçen akım miktarlarında kayda değer bir oranda değişim olmamıştır.



Şekil 4.7. Farklı alan/çevre oranına sahip piksellerin sıcaklığa bağlı IV grafikleri

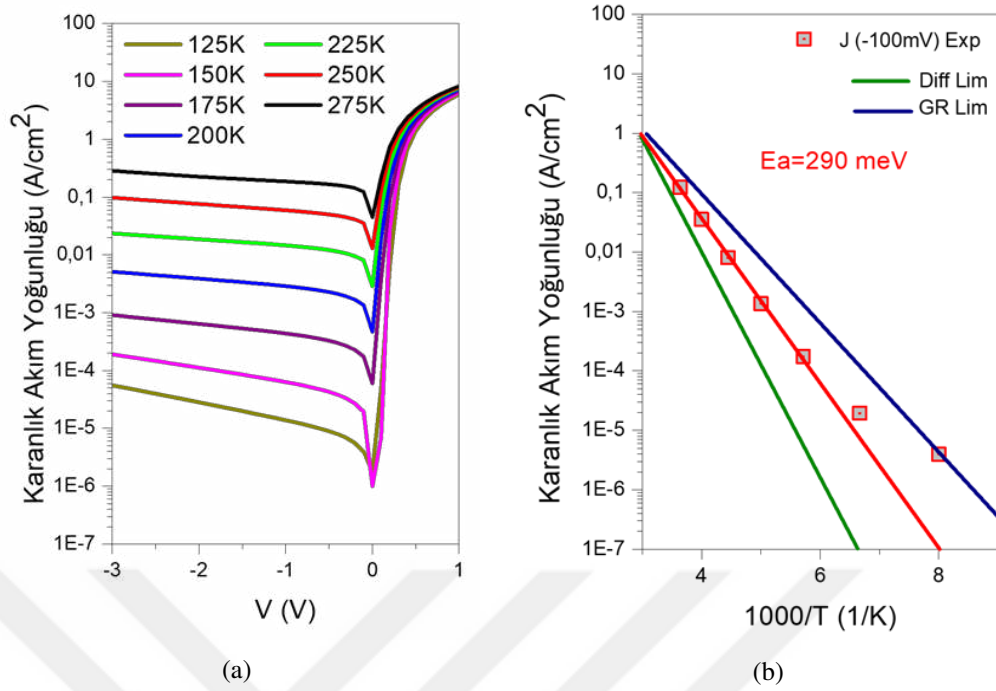
Yapının karanlık akımı, dedektör alanıyla ters orantılı olarak azalması gerekirken karanlık akım yoğunluğu ise piksel alanından bağımsız olmalıdır. Fakat, ölçüm sonucunda piksel boyutları hesaba katılarak elde edilen karanlık akım yoğunlukları arasında farklılıklar meydana gelmiştir. Test piksellerinin karanlık akım yoğunluğu alan/çevre oranından bağımsız olmadığı sonucu çıkar. Sırasıyla 200, 150, 100 ve 75 μm lik kare Mesa piksellerinin -1V gerilim altında $3,7 \times 10^{-5}$, $4,8 \times 10^{-5}$, $6,2 \times 10^{-5}$ ve 1×10^{-4}

A/cm^2 olarak ölçülmüştür (Şekil 4.8). Akım yoğunluklarındaki bu fark, dedektör yapısındaki kusur yoğunluğunun rastgele bir dağılıma sahip olması, test dedektör fabrikasyon etkisi veya ölçüm düzeneği kaynaklı olma ihtimallerini barındırır.



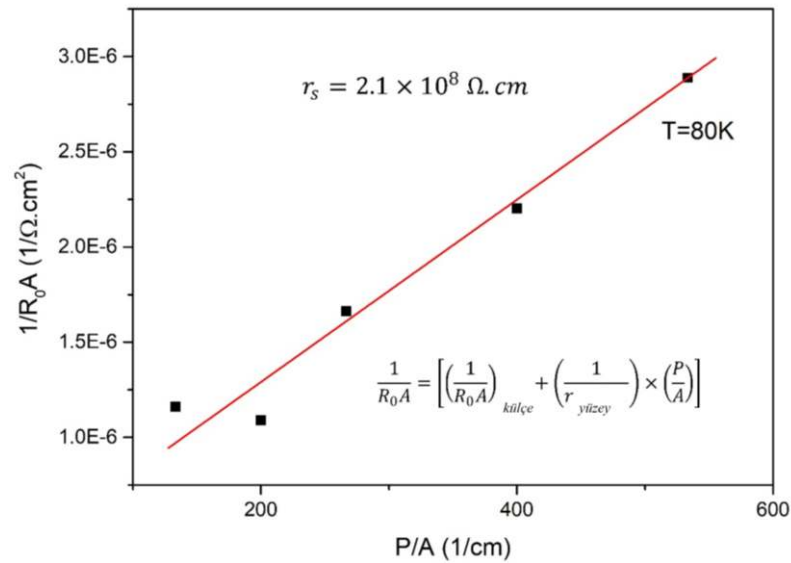
Şekil 4.8. Test dedektörü karanlık akım yoğunluğu

Şekil 4.9 (a)'da $300 \times 300 \mu m^2$ piksel boyutlarına sahip test dedektörünün sıcaklığa bağlı karanlık akım yoğunluğu ve gerilim karakteristikleri verilmektedir. 125-275K aralığında çeşitli sıcaklıklarda karanlık akım mekanizmaları incelendiğinde, test dedektöründe baskın akım mekanizmalarında değişim görülmediği daha önce vurgulanmıştır. 125K sıcaklığında ve $-0,1V$ ön gerilim altında, karanlık akım yoğunluğu $3,9 \times 10^{-6} A/cm^2$ olarak ölçülmüştür. 125 K sıcaklığında ve $-0,1V$ ön gerilim altında karşılık gelen dinamik direnç ve dedektör alan çarpımı (R_dA) $2,11 \times 10^5 \Omega cm^2$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.9 (b), $-0,1V$ ön gerilim altında karanlık akım yoğunluğunun sıcaklığın tersine ($1000/T$) olan bağımlılığını gösterir. 275K ile 125K sıcaklık aralığında, karanlık akım yoğunluğunda Arrhenius tipi bir davranış sergilemiştir. Eğrinin eğiminden hesaplanan aktivasyon enerjisi 290 meV olup, bant aralığı enerjisi (410meV) ile üretim-rekombinasyon (G-R) enerjisi (210meV) arasında yer almıştır. Bu nedenle, karanlık akım üretim-rekombinasyon akımını tamamen bastırarak saf difüzyon akımı davranışı göstermez. Yapının karanlık akımı G-R ve Difüzyon sınırlı akım mekanizmalarından oluşmaktadır. Karanlık akımın daha fazla bastırılması için yapı ve aygıt mimarisinin optimizasyonu gerekebilir.



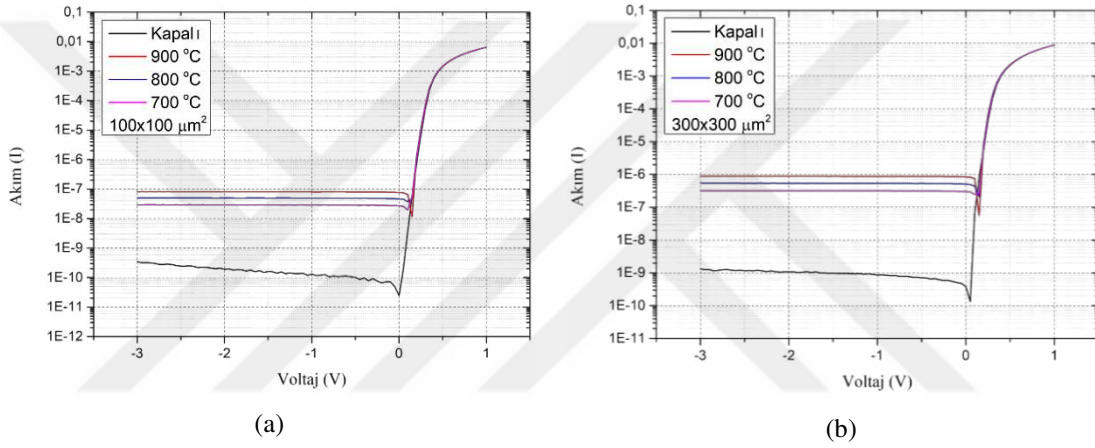
Şekil 4.9. Test dedektörlerinin (a) sıcaklığa bağlı J-V karakteristikleri, (b) sabit bir gerilim altında (-0.1V) karanlık akım yoğunluğunun sıcaklığın tersine (1000/T) olan bağımlılığı

N-pBin detektör yapısında yüzeyden kaynaklanan sızıntı akımı analiz etmek için, çevre-alan oranına (P/A) göre ters diferansiyel direnç alanının ($1/R_0A$) 80K sıcaklığında grafiği çizilir. Grafik eğimi, Şekil 4.10 da gösterilen direnç-alan çarpımının yüzey ile doğru orantılıdır ve yüzey direnci ($r_{yüzey}$) $2,1 \times 10^8 \Omega.cm$ olarak hesaplanır. Yüksek yüzey direnci, N-pBin konfigürasyonundaki geniş elektron bariyerinin N tasarımı yüzeyle ilgili akımları etkili bir şekilde bastırdığını gösterir.



Şekil 4.10. Sıfır öngerilim ve 80 K'de diferansiyel direnç alanın, çevre-alan oranına bağımlılığı

Karanlık akım incelemelerinden sonra test dedektörünün foto-akım ölçümleri için optik açıklıklı piksellerin ışığa tepkisi incelenmiştir. Sıvı azot sıcaklığı (~80 K) altındaki test dedektörünün önüne 24,5 cm mesafede ve farklı sıcaklıklarda ayarlanabilen kavite tipli kara cisim yerleştirilmiştir. Sırasıyla 700, 800 ve 900 °C'ye ayarlanan kara cisim uyarımı altında IV ölçümleri yapılarak dedektör üzerinden geçen akım değerleri ölçülmüş ve dedektör tepkisi elde edilmiştir. Her bir sıcaklıkta kara cisimin önü kapatılmış ve IV ölçümleri alınarak dedektörün foto-akım hesaplamaları için gerekli veriler toplanmıştır. Şekil 4.11'de farklı boyuttaki iki pikselin farklı sıcaklıklardaki kara cisime verdikleri tepkilerin IV grafikleri paylaşılmıştır.



Şekil 4.11. (a) 100x100 μm² ve (b) 300x300 μm² büyüklüğündeki dedektörlerin gerilime bağlı karanlık akım ve farklı karacisim sıcaklıklarına vermiş oldukları fotoakım tepkileri

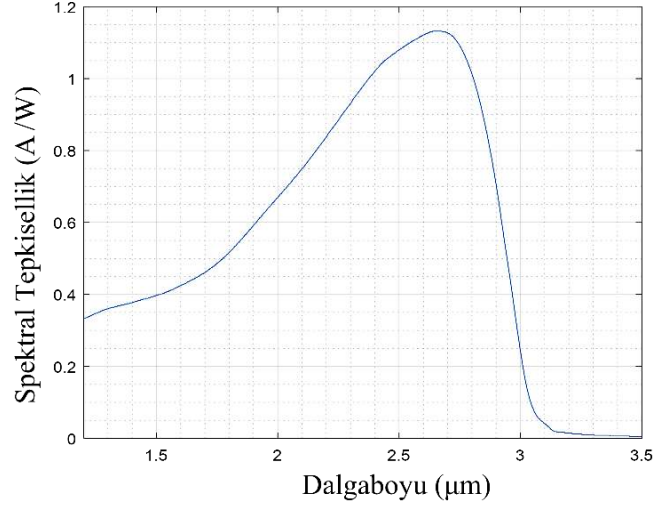
Detektör tepkiselliği için,

$$I_{\text{Foto-akım}} = \int_0^{\infty} R_{\text{Tepe}} \times R(\lambda) \times \Phi(\lambda) d\lambda$$

$$\Phi(\lambda) = \int_0^{\infty} \frac{M(\lambda, T_{BB})}{\pi} \times A_{BB} \times \frac{A_{\text{det}}}{d^2} \times W(\lambda) \times F(\lambda) d\lambda$$

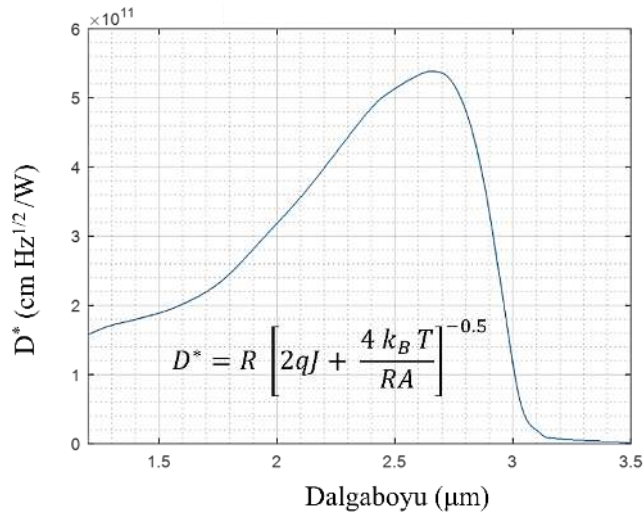
formüllerinden faydalanılmıştır. Burada, $I_{\text{Foto-akım}}$ foto-akımı, $M(\lambda, T_{BB})$ kara cisim spektral uyarım (exitance), A_{BB} kara cisim alanını, A_{det} dedektör alanını, d kara cisim ile dedektör arasındaki mesafeyi, $W(\lambda)$ pencere geçirgenliğini ve $F(\lambda)$ dedektör ile kara cisim arasına yerleştirilen filtre geçirgenliğini vermektedir.

Yapılan hesaplamalar sonucunda 300x300μm² Mesa boyutunda test dedektörünün spektral tepkiselliği Şekil 4.12'de verilmiştir. Dedektör sıcaklığı 125 K'de ve -1 V gerilim altında 2,9 μm'lik %50, 3,2 μm'lik %100'lük kesim dalgaboyuna sahiptir. Tepe tepkiselliği 2,75 μm dalgaboyunda 1,6 A/W olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.12. Test dedektörünün spektral tepkiselliği

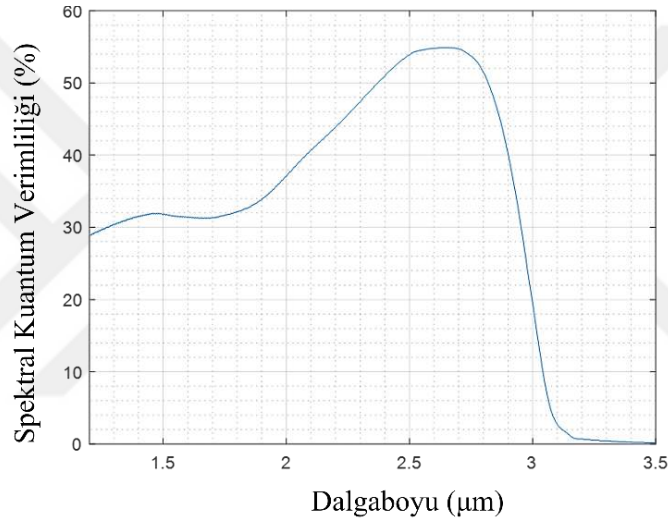
Spektral tepkisellik değerleri kullanılarak dedektörün Johnson ve Atış gürültü limitli spektral dedektivitesi hesaplanmıştır (Şekil 4.13). Grafikten tepe dedektivite değerinin 125 K sıcaklık için $5,4 \times 10^{11}$ Jones olduğu görülmektedir. N-pBin dedektörünün Johnson gürültü sınırlı spektral dedektivite değeri (D^*), $-1V$ ön gerilim altında duyarlılık ve dinamik direnç alanı (RA) ölçümleri kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.13 de 125 K dedektör sıcaklığında $3,2 \mu m$ 'lik %100 kesim dalgaboyuna sahip dedektivitenin dalgaboyu bağımlılığını da gösterir. Elde edilen sonuçlar literatürde karşılaşılan değerlerle benzerdir.



Şekil 4.13. Test dedektörünün spektral dedektivite grafiği

Dedektörün spektral kuantum verimliliği, normalize edilmiş spektral yanıt verileri ve kalibre edilmiş bir kara cisim kaynağı ile 973 K'de aydınlatılan dedektörün fotoakımı

kullanılarak hesaplanmıştır. Şekil 4.14, önden aydınlatma altında 125K'da 2,9 μm 'lik %50 kesme dalgaboyu sergileyen 300 μm kare Mesa test dedektörünün kuantum verimliliğini (QE) göstermektedir. N-pBin dedektörü, 2,7 μm 'de %50'lik QE'ye karşılık gelen, 1,17A/W tepe duyarlılığına ulaşır. Daha kısa dalga boylarında QE değeri kademeli olarak %30'un altına düşer. ~2,5 μm dalgaboyunun altında görülen QE'deki azalma, muhtemelen AlGaSb bariyer tabakasının emiliminden kaynaklanmaktadır. Test dedektörünün 125 K'deki kuantum verimliliği incelendiğinde dalgaboyu aralığına göre %30-55 arası değişmekte ve tepe noktasının kuantum verimliliği %55 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.14. Test dedektörünün spektral kuantum verimliliği

Test dedektörü karakterizasyonundan elde edilen sonuçlar doğrultusunda çalışmanın devamında üretilmesi planlanan arkadan aydınlatmalı FPA uygulamaları için ciddi bir motivasyon kaynağıdır. Süperörgü yapılarında çalışma bant aralığının geniş olması ve dedektör performansının literatürle kıyaslanabilecek düzeyde olması e-SWIR çalışmaları için öncü niteliğindedir.

5. ODAK DÜZLEM DİZİN DEDEKTÖRÜ ÜRETİMİ, OPTİMİZASYONU VE KARAKTERİZASYONU

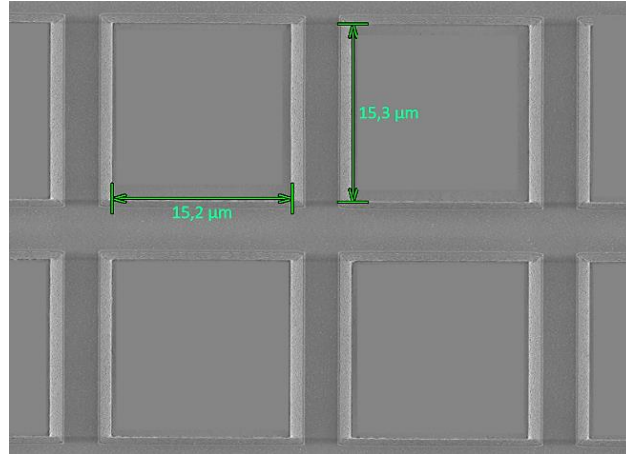
Odak düzlem dizin dedektörü-FPA çoklu ve küçük boyutlarda piksellerin bir araya geldiği ve sonucunda termal görüntülemenin yapılabildiği kamera sistemlerinin ana parçasıdır. Dizin dedektörler test piksel dedektörlerinden ayrı olarak 10, 15, 20, 25 ve 30 µm gibi çok küçük piksel adımlı ve 320x256, 640x512 veya 1240x1080 çoklu piksellerden oluşurlar. Test ve dizin dedektör arasındaki piksel sayısı ve boyutlarından dolayı maske tasarımları farklı olduğu için proses optimizasyon ihtiyaçları da değişkenlik gösterir. Her fabrikasyonda olduğu gibi FPA içinde çeşitli proses adımlarının optimize edilmesi gerekir. Proses açısından, iki üretim arasında fabrikasyon basamak sayısı ve sıralaması değişkenlik gösterse de temel de üretim mantıkları bir hayli benzerdir. Ancak, dizin dedektör proseslerinde metalizasyon adımı sonrasında elektriksel bağlantı ihtiyacı için ek üç adım daha vardır. Bu da FPA üretiminin test dedektörleri üretimine kıyasla daha uzun, karmaşık ve zorlu fabrikasyon adımlarına sahip olduğunu gösterir. Dizin dedektör üretimindeki ana basamaklar,

- Hizalama işaretlerinin oluşturma
- Piksel litografi ve aşındırma
- Omik kontak litografi ve kaplama
- Pasivasyon
- Topçuk alt metalizasyon (UBM) Litografi
- UBM ve indiyum metal kaplama
- Okuyucu devreyle hibritleme
- Alt dolgu uygulama
- Taban inceltme ve parlatma

Çalışmanın devam eden bölümünde test dedektör üretiminde yapılan optimizasyon çalışmalarına ek olarak dizin dedektör prosesinde yaşanan zorlukların iyileştirilmesi içinde optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar, üretimin her bir basamağı için değil bir FPA üretimi sırasında sorun yaşanan basamaklarda yapılmış ve ayrıntılı olarak alt başlıklar halinde anlatılmıştır.

5.1. FPA Proses Optimizasyonları

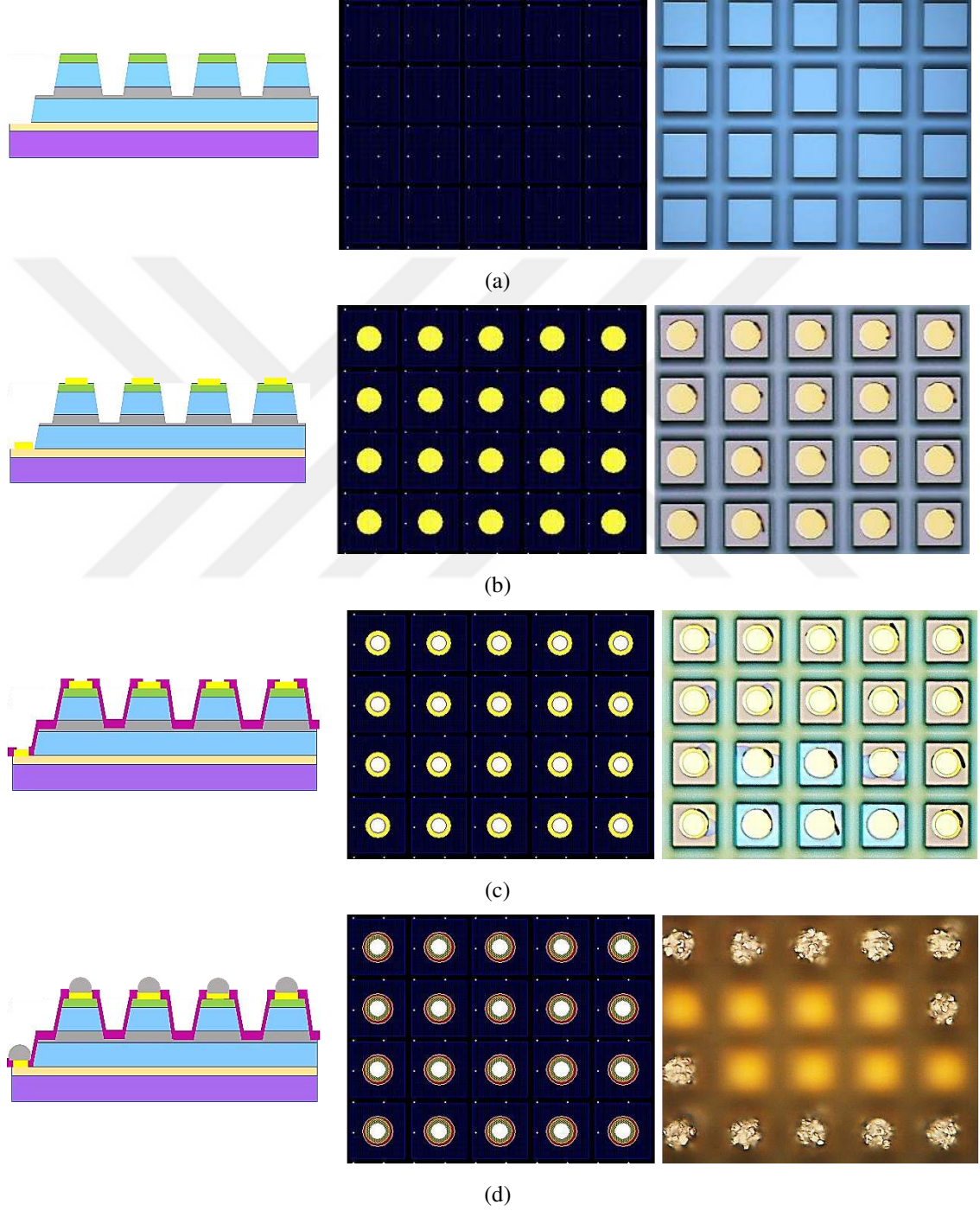
FPA üretiminde piksel adımı ve sayısı göz önünde bulundurulduğunda proses homojenliği kritik öneme sahiptir. Proses homojenliği söz konusu olduğunda akla ilk piksel aşındırmanın gelmesi oldukça doğaldır. Piksel adımı ve boyutu düşünüldüğünde 2 μm 'lik gibi açıklıkların aşındırılması ve homojen olması oldukça zorlayıcıdır. Ancak, aşındırma optimizasyonları test dedektör üretim optimizasyonları başlığı altında geniş çerçevede çalışılmış ve detaylıca anlatılmış olduğundan bu bölümde yer verilmemiştir. Deneysel çalışmalar ve incelemeler sonucunda ıslak aşındırma yönteminin T2SL'ler için homojen ve hasarsız olduğu önceki bölümlerde gösterilmiştir. Test piksellerin aşındırılmasında elde edilen olumlu sonuçlar FPA üretiminde de başarılı olmuştur (Görsel 5.1). Piksel aşındırmada ıslak aşındırma yöntemi aşındırma derinliğine bağlı olarak piksel boyutlarının küçülmesine sebep olur. FPA üretiminde yapı tasarımına göre çoğunlukla 2,5 μm aşındırma derinliğine ihtiyaç duyulmuştur. Bu aşındırma derinliğine göre 20 μm 'lik piksel adımı aynı kalırken $18 \times 18 \mu\text{m}^2$ piksel boyutlarında ~3 μm kadar küçülmüştür. Ancak, ıslak aşındırmanın sunduğu yüzey hasarı vermemesi, kontrol edilebilirlik, homojenlik gibi artılarla piksel boyutundaki kayıp kıyaslandığında bu küçülme göz ardı edilebilir.



Görsel 5.1. $18 \times 18 \mu\text{m}^2$ piksellerin aşındırma sonrası yeni boyutlarının SEM görüntüsü

Üretimin erken basamaklarında yaşanan zorluklar ve problemler ilerleyen basamaklarda farklı sorunlara neden olduğu için sorunlu proses basamağı iyileştirilmeden veya çözülmeyen üretimde istenilen sonucun elde edilmesi mümkün değildir. Bu nedenle, proseste yaşanan her bir üretim zorluğunun üzerinde durulmalı, farklı ve alternatif

çözümlerle iyileştirmeler yapılmalıdır. Bu tez çalışması boyunca çok sayıda FPA üretimi yapılmış ve her üretimde çeşitli sorunlarla karşılaşmıştır. Proseslerde aşındırma dışında ağırlıklı olarak metalizasyon, pasivasyon ve indiyum topçukların oluşturulması basamaklarında fiziksel sorunlar ve uygulama problemleri yaşanmıştır (Görsel 5.2).



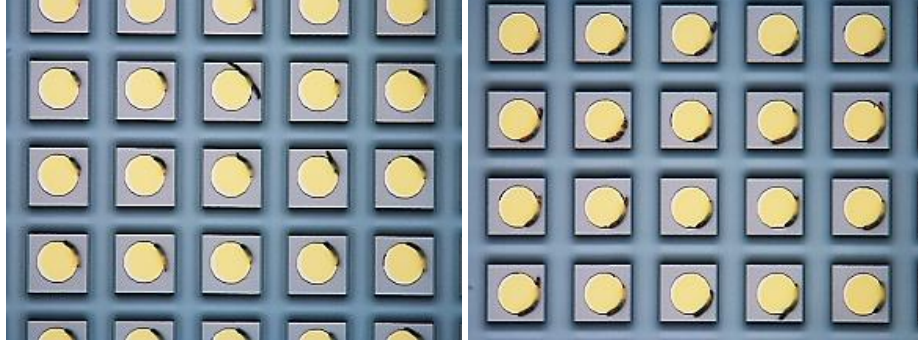
Görsel 5.2. Dizin dedektör prosesi sırasıyla kesit şematiği, maske tasarımı ve proses sonrası optik mikroskop görüntüsü olmak üzere (a) piksel aşındırma, (b) omik kontak metalizasyonu, (c) pasivasyon ve (d) UBM-İndiyum metalizasyon ana adımlarına ait görseller

Bu sorunlardan ilki, üretimde de ikinci sırada yer alan metalizasyon Lift-off'dur. Bu süreçte kontakların pencere kenarlarında metal çapaklar kalmaktadır ve Lift-off işlemi defalarca tekrar edilse bile çapaklar temizlenmemektedir. Yaşanılan ikinci üretim sorunu, pasivasyon pencerelerinin fazla aşınarak pencere açıklıklarının tasarımıdaki çapından çok daha büyük, şekilsiz olması ve ek olarak bazı bölgelerde pasivasyonun kaybedilmesidir. Pasivasyon açıklığında yaşanan bu sorun kontak pencerelerinde kalan artık metallerden kaynaklı olabileceği gibi pasivasyonun fazla aşınması, yanlış litografi uygulaması gibi sebeplerden de olabilir. Bu nedenlerle pasivasyon optimizasyonu da çalışmaya dahil edilmiştir. Pasivasyon sorunun kaynağının teşhis ve çözümünün bulabilmesi için önceki problemin çözülmesi gerekmektedir. Fabrikasyonda son olarak yaşanan diğer sorun ise indiyumların yüzeye tutunamaması, yer yer indiyum kayıpları yaşanılması ve yeniden şekillendirmede indiyumların topçuk halini almamasıdır.

Dedektör üretiminde karşılaşılan problemler sadece proses veya FPA üretim adımlarında yaşanmaz. Başarıyla üretilmiş bir FPA'nın hibretlenmesinde, dolgu uygulamasında, taban inceltme ve parlatma gibi proses sonrası süreçlerde de yaşanabilir. Bu adımların sorunsuz gerçekleştirilmesi için süreç içerisinde dikkat edilmesi gereken çok küçük ve ince nüanslar vardır. Proses ve sonrasında karşılaşılan sorunlar tez süresince tek tek ele alınmış, optimizasyon ve iyileştirme çalışmaları yapılmış ve tez kapsamında anlatılmıştır.

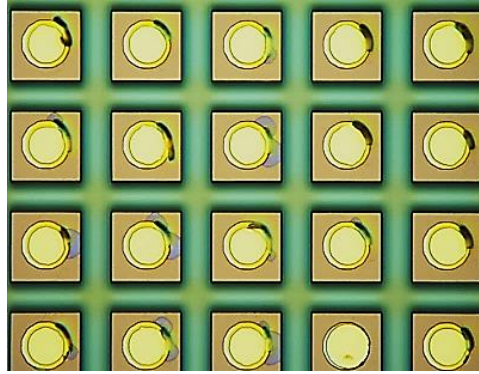
5.1.1. Omik kontak optimizasyonu

Piksel tanımlama sonrası 640x512 FPA fabrikasyonunda sıra omik kontak litografisi ve Ti/Pt/Au metalleri sırasıyla 40/50/75 nm kalınlıklarda kaplanması gelir. Metalizasyon işlemi yapılan FPA parçası asetonla rezist Lift-off edilerek kontaklar tanımlanır. Yapılan her FPA üretiminde Lift-off sonrasında kontak çevresinde metal çapaklar gözlemlenmiştir (Görsel 5.3). Kalan bu çapaklar için aseton içinde oldukça uzun süre bekletilmesi veya ultrasonik banyo içerisinde Lift-off edilmesine rağmen sonuç değişmemiştir. Her bir piksel kontağının etrafında kalan bu çapaklar sonraki adımlarda kirlilik ve litografi güçlüğü neden olduğu gibi beraberinde ölü piksel sayısında da artışa sebep olur.



Görsel 5.3. Omik kontak Lift-off'u sonrası kontakların optik mikroskop görüntüsü

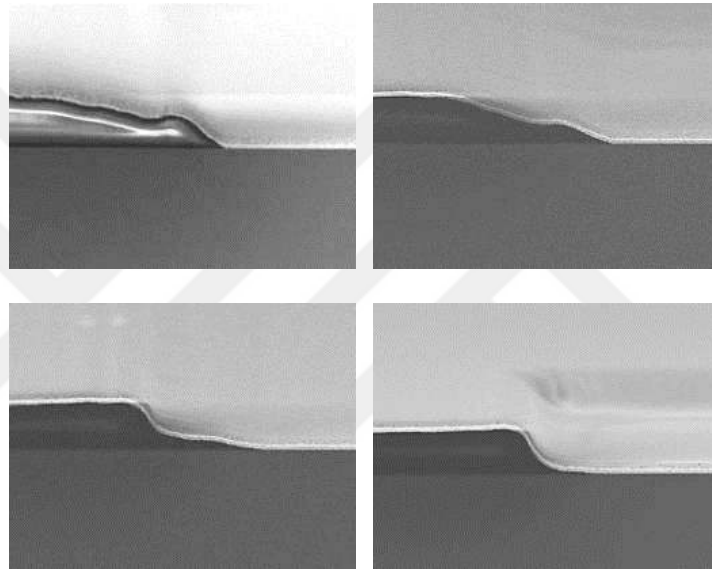
Kalan bu çapaklar kontak etrafında çok ciddi bir yükselti farkı yaratır. Dolayısıyla, sonraki litografilerin şekillendirilmesinde, aşındırılmasında veya kaplanmasında ayrı etkiler yapacağı için her bir üretim basamağında farklı sorunlar çıkarır. Örneğin, çapak kalıntılı FPA de metalizasyon sonrası gelen pasivasyon adımında pasivasyonun homojen kaplanmasını, pencere açıklığının doğru şekillendirmesini engellediği gibi pasivasyon aşındırmasında pencere açıklıklarının genişlemesine ve bazı piksellerde pasivasyonun tamamen açılmasında neden olmuştur (Görsel 5.4).



Görsel 5.4. Pasivasyon pencere aşındırması sonrası piksellerin görüntüsü

Lift-off sonrası oluşan bu çapakanmaların sebebi rezisttin modeliyle ve metal kaplama yöntemiyle ilişkilendirilir. Omik kontak litografisinde SPR 220-3e pozitif rezist kullanılır fakat bu rezistin duvar profili, metal kaplama yöntemi de düşünüldüğünde, metalizasyon kaplaması plazma püskürtme tekniğiyle yapılmaktadır, Lift-off için yetersizdir. Plazmayla yapılan malzeme kaplamalarında piksel ve rezist duvarları da rahatlıkla kaplanır. Metalle kaplanan rezist duvarında asetonun sızması için var olan açıklık genel Lift-off'u sağlasa bile pencere etrafının temiz bir şekilde açamamaktadır. Yaşanılan bu durumda FPA sadece aseton içinde uzun süre bekletilmemiş aynı zamanda

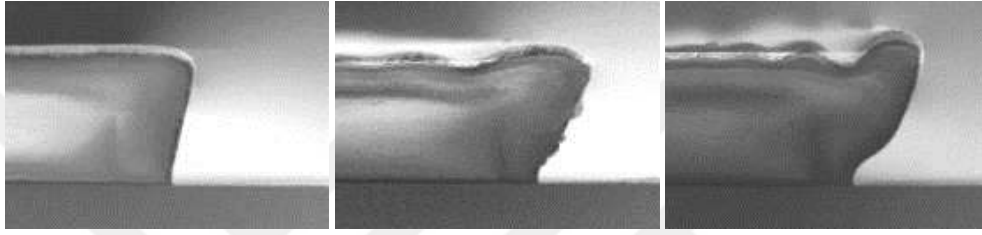
FPA aseton içerisindeyken ultrasonik titreştiriciyle 5'er dk aralıklarla sürekli titreşim uygulanmıştır. Bunun sonucunda çapaksız pikseller olsa bile genel yüzey dağılımı çapaklı olarak kalmıştır. Bu nedenle, omik kontak optimizasyonunda öncelikli olarak Lift-off'a uygun farklı rezist çalışmaları ve optimizasyonları yapılmıştır. Pozitif litografi dışında AZ5214 rezistiyle farklı UV ve tap (Developer) etme sürelerinde tersine desenlemeyle (image reversal) denemeleri yapılmıştır ve rezist profilleri SEM de düşük voltaj altında incelenmiştir (Görsel 5.5). Ancak yapılan çalışma sonucunda AZ5214 le elde edilen rezist profillerinde beklenen duvar eğimi ve alt açıklığı yakalanamamıştır.



Görsel 5.5. AZ5214 fotorezistine ait farklı UV ve tap etme sürelerindeki rezist profilleri

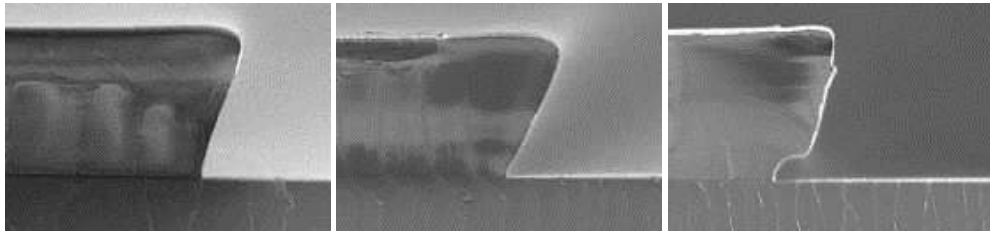
Metalizasyon adımlarının kolay, hasarsız ve kontak kayıpsız yapılabilmek için litografide Lift-off rezistleri tercih edilmelidir. FPA üretiminde kontak metalinin toplam kalınlığını ~160 nm dir. Dolayısıyla rezist kalınlığının da 1,5-2 μm civarında olması Lift-off için uygun olacaktır. Ters desenlemeyle yapılan AZ5214 rezist denemesi dışında negatif ve Lift-off rezitsti olarakta bilinen Nlof serisinden 2020 ve 2035 rezitleriyle bu denemeler tekrar gerçekleştirilmiştir. Nlof rezistlerinde 2 μm rezist kalınlığını için Nlof 2020 ve 2035 sırasıyla 3000 ve 4000 rpm de örnek yüzeyine serilmiştir. Rezist profillerinin eğimli ve alt açıklık elde edilmesi için farklı UV ve tap etme sürelerinde iki değişken belirlenmiştir ve ardından SEM de profil incelemeleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre rezitlerde uygun profili yakalayana kadar UV ve tap etme süreleri değiştirilerek çalışmalar sürdürülmüştür. İlk olarak UV süreleri değiştirilmiş tabetme süresi sabit tutulmuştur. Nlof 2020 rezistine ait UV süresi artırıldıkça rezist daha keskin

ve net bir profil vermiştir. Görsel 5.6’da sırasıyla 7, 6 ve 5 sn UV sürelerindeki rezist profillerin SEM görüntüleri verilmiştir. UV süresi azaldıkça Lift-off kolaylığı oluşturacak altt açıklık oluşmuş ama rezistteki dalgalanmalar artmış desen netliği ve keskinliği kaybolmuştur. Ayrıca, UV süresi kısaltıldıkça alt açıklık boyutu da artmış ve geniş alt açıklıklar püskürtme yöntemiyle kaplandığından Lift-off için uygun bulunmamıştır. Buradan yola çıkarak daha uzun süre UV ye maruz bırakılan profillerde tabetme süreleri değiştirilerek alttan açıklık elde edilmeye çalışılmıştır. Fakat tabetme süresi ne kadar uzatılsa da istenilen profil Nlof 2020’le sağlanamamıştır.



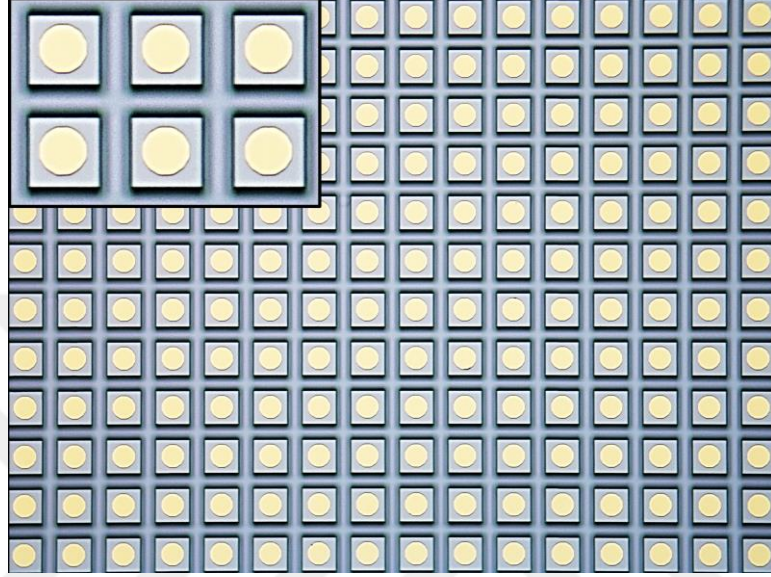
Görsel 5.6. Nlof 2020 rezistinin 7, 6 ve 5 sn UV sürelerindeki rezist profillerinin SEM görüntüleri

Nlof 2035 rezistiyle denemeler benzer bir temelde tekrar edilmiştir. Ancak bu rezistte de 2020’den farklı olarak değişen UV süresinde istenilen profil elde edilememiştir. Bu sebeple en uygun olabilecek profili veremeye daha yatkın olan 9 sn’lik UV süresi seçilmiş ve farklı tap etme süreleri uygulanmıştır. Her deneme sonrası rezist profil görüntüleri SEM’le incelenmiştir. Görsel 5.7’de tabetme sürelerinin 60, 90 ve 120 sn olduğunda elde edilen rezist profillerine ait SEM resimleri paylaşılmıştır. Tap etme süresi arttıkça duvar profilinde Lift-off kolaylığı sağlayacak açıklık oluşmaya başlamış ve 120 sn tab etme süresi hedeflenen profil duvar sonucunu vermiştir. Böylelikle, kolay Lift-off için, 400 rpm de kaplanan nlof 2035 rezisti 9 sn UV şekillendirmesi ve 120 nm tab etme süresi şeklinde uygun reçete sağlanmıştır.



Görsel 5.7. Nlof 2035 rezistinin 9 sn UV maruz bırakılan ve sırasıyla 60, 90 ve 120 sn tapedilen rezistlerin SEM görüntüleri

Omik kontakların Lift-off sonrası kontak etrafındaki çapaklanma sorunu rezist uygulanmasıyla büyük ölçüde çözüme kavuşturulmuş ve çapaklanmaların çoğu ortadan kaldırılmıştır. Lift-off sonrası elde edilen omik kontakların genel halinin mikroskop görüntüsü Görsel 5.8’de verilmiştir.

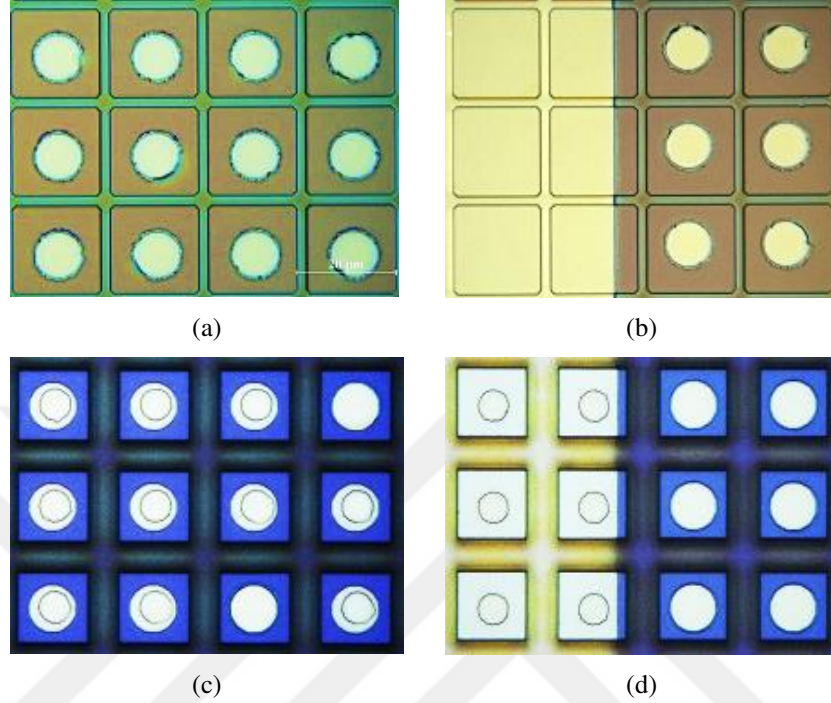


Görsel 5.8. Omik kontak Lift-off sonrası kontakların genel mikroskop görüntüsü

5.1.2. Pasivasyon litografi optimizasyonu

FPA fabrikasyonun devam eden optimizasyon çalışmalarında, omik kontaktaki çapaklanma büyük ölçüde giderilmesiyle pasivasyon genişlemesi ve bozulmasının da çözüme kavuştuğu düşünülmüştür. Ancak yapılan üretimlerde pasivasyon pencerelerinde beklenen iyileşme görülmemiştir. Görsel 5.9’da farklı FPA üretimlerinde pasivasyon pencerelerinin aşındırılması adımıyla her bir üretim sürecinde yaşanan farklı sorunların görselleri verilmiştir. Bazı proseslerde pasivasyon pencerelerin çok fazla açıldığı, omik kontağa kadar genişlediği ve pasivasyonun omik kontak penceresi etrafında incelendiği dikkat çekmiştir. Bazı üretimlerdeyse, FPA’ın alt kontak bölgesinde pasivasyonun tamamen aşınarak kontak bölgesi boyunca pasivasyonun kaybedildiği görülmüştür. Bir başka üretimdeyse, alt kontakta pencere doğru şekilde açılırken piksellerin pasivasyon penceresi kaybolmuştur. Bunun dışında bir FPA boyunca hem piksel üzerinde doğru açılan pasivasyon pencereleri varken hem de tamamen kaybolan rastgele dağılımlı pencere açıklıkları görülmüştür. Bu gözlemler doğrultusunda, her üretimde farklı sonuç

alınan pasivasyon aşındırmasındaki tek sorunun omik kontak çapaklanması olmadığı ortaya çıkmıştır.

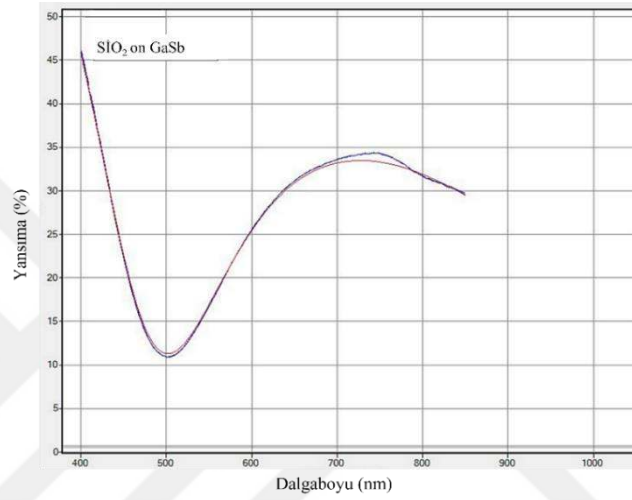


Görsel 5.9. Pasivasyon aşındırmasının (a) piksel pasivasyon incelmesi, (b) alt kontak pasivasyon kaybı, (c) rastgele kayıp ve (d) piksel pasivasyon kaybı olmak üzere karşılaşılan pasivasyon aşındırma problemlerinin mikroskop görüntüleri

Yarıiletken aygıt üretim sürecinde fabrikasyon adımlarında yaşanan problemler bir sonraki üretim basamağına taşınarak dedektör fabrikasyonunda veya performansında farklı sorunlara sebep olduğunun altı önceki bölümlerde çizilmiştir. Bununla beraber fabrikasyonun bazı adımları hem kendi içinde iyileştirilmeli hem de tam üretim akışı içinde optimize edilmelidir. Dedektör pasivasyon basamağı da bu adımlardan biridir; çünkü dedektör, pasivasyon ve rezist yüzeyleri arası etkileşim, pasivasyon katman kalınlığı ve tüm sürecin homojenliği gibi pek çok değişkeni içinde barındırmaktadır. Bu sebeple, dedektör fabrikasyonunda pasivasyon optimizasyonu veya iyileştirilmesi sadece Dielektrik malzemeyle sınırlandırılmaz. Çalışmanın bu kısmında, pasivasyon kalınlığı, prosesin ara basamaklarının birbiri içindeki uyumu, dedektör yüzey temizliği, doğru litografik uygulama veya uygun aşındırma süresi gibi çözümlerle yaşanan sorunların önüne geçilebilir.

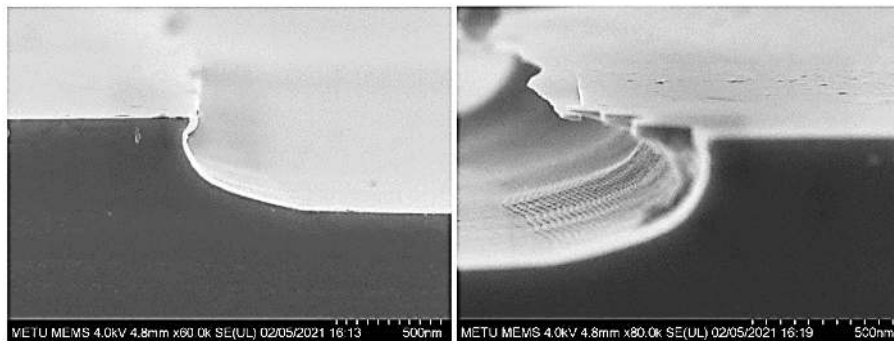
FPA üretiminde pasivasyon kaplaması için PECVD sistemi kullanılır ve düşük sıcaklıkta (100°C) ~250 nm kalınlığında SiO₂ kaplaması yapılır. Kaplama sonrası film

kalınlığı refraktometre yardımıyla ölçölerek teyit edilir (Görsel 5.10). Pasivasyon kaplamasında, kaplama anında kalınlık ölçümü teyiti için test dedektör üretimlerinde olduğu gibi her FPA in yanına GaSb taban parçası konulur. Kaplama anında FPA ve Dielektrik kalınlığının ölçölüleceği örneğin aynı taban malzemesinden olması tercih edilir. Çünkü kaplamanın yüzeyle olan etkileşimi için önemli bir referans noktası oluşturur. PECVD kaplama sonrası GaSb tabanın üzerindeki SiO₂ kaplamasının salıntı eğrisi teorik hesaplamayla 0,99869 oranında örtüşerek ~255 nm kalınlık sonucunu verir.



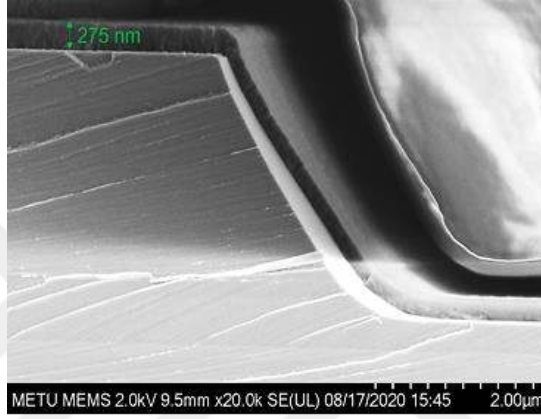
Görsel 5.10. SiO₂ film kalınlığının refraktometre ölçümü

Pasivasyonda bir diğér önemli kriter ise piksel duvarlarının Dielektrikle tamamen kaplanabilmesidir. Bu durum, aşındırma duvar profiliyle beraber, pasivasyon kaplama kalınlığına bağlıdır. Aşındırılan piksellerin duvar profilleri kaplamaya engel bir durum oluşturmamalı ve aşınmış yüzeyin tamamını homojen bir şekilde kaplanmalıdır. Görsel 5.11’de pasivasyon açısından uygun olmayan piksel duvar profillerine örnekler gösterilmiştir.



Görsel 5.11. Pasivasyon kaplamasına uygun olmayan duvar profil örnekler

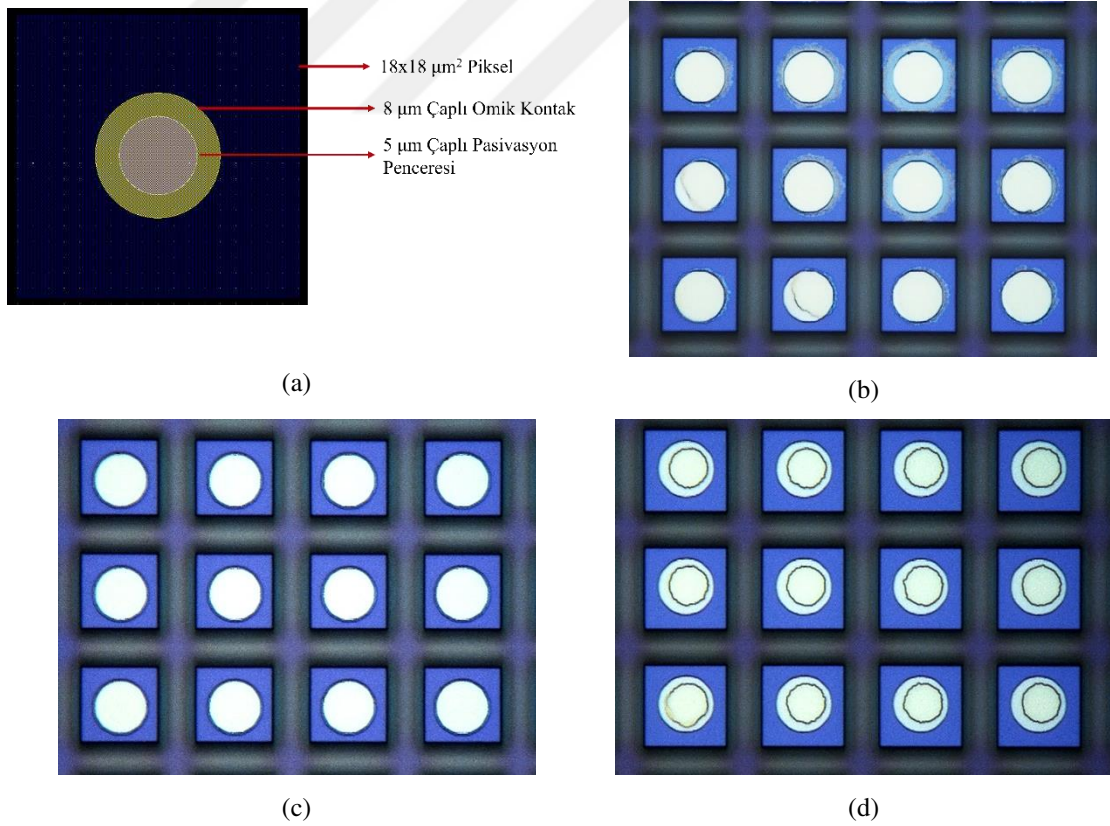
Tez çalışmasında ıslak aşındırmayla üretilen FPA'ların piksel duvar profilinin pasive edilmiş hali SEM de görüntülenmiş (Görsel 5.12) ve aşındırma profili, pasivasyon kaplaması ve kalınlıkları incelenmiştir. Pasivasyon kaplaması, piksel duvarları da dahil olmak üzere tüm yüzeyi kaplamıştır. Pasivasyonun kaplama kalınlığı yüzeylerde kalın iken piksel duvarlarında daha ince olduğu dikkat çekmiştir. Buna rağmen kalınlık azalsa bile piksel duvarlarını da tamamen kapladığı için ve kaplama kalınlığı pasivasyon için yeterli olduğundan elde edilen bulgular başarılı olarak kabul edilmiştir.



Görsel 5.12. FPA üretiminde pasivasyon kaplı piksellin yanal SEM görüntüsü

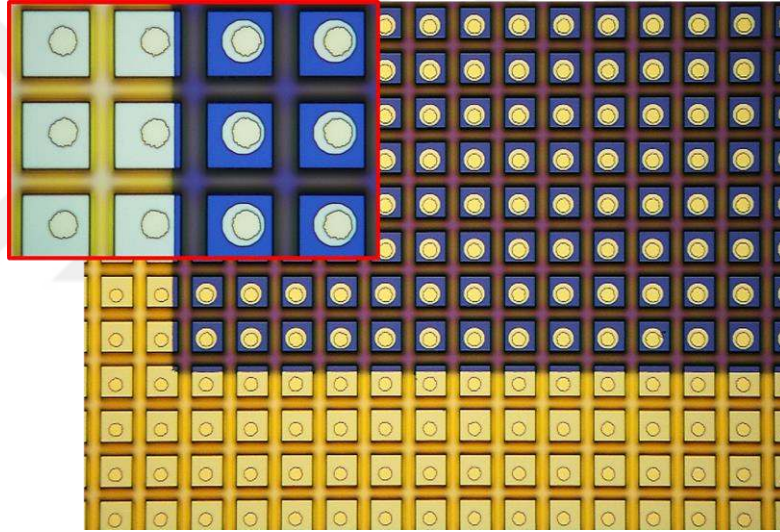
Pasivasyon kaplamasından emin olduktan sonra sıra litografi optimizasyonuna gelir. Bu basamakta litografi için S1813 pozitif rezisti kullanarak standart bir desenlemeyle pencereler tanımlanır ve pasivasyon pencere açıklıkları aşındırmaya hazır hale gelir. Burada, 1:7 oranında hazırlanan BHF'le ıslak aşındırma yapılarak SiO_2 aşındırılır. Çözülen omik kontak sorununa rağmen devam eden pasivasyon pencere açıklık sorunları (Görsel 5.9) ilk olarak aşındırma süresiyle ilişkilendirilmiştir. Fakat, aynı FPA yüzeyinde yer yer pasivasyon kaybı Dielektriğin yüzeylerde farklı etkileşimde olmasıyla ilişkilendirilmiştir. FPA yüzeyinde herhangi bir rezist kalıntısı veya doğal oksit gibi sebepler iki yüzey arasında tutunumu zorlaştırabilir. Bu nedenle yüzeyler arası tutunumun artması için pasivasyon kaplama öncesi temizlik adımı geliştirilmiştir. Lift-off yapılan FPA klasik 65°C de 5'er dk aseton alkol temizliğinin yanı sıra mikroskopla görünmeyen ince rezist kalıntıları için 2 dk süreli O_2 plazma eklenmiştir. Önceki litografi kaynaklı kirlilik temizliği sonrası FPA, PECVD sistemine yüklenmeden önce yüzeyinde oluşan doğal oksit temizliği için 10 sn seyreltilmiş HCl de yüzey oksidi aşındırılır ve FPA atmosferde bekletilmeden sisteme yüklenir. Ana proses adımlar arası

geçişler için geliştirilen temizlik sürecinden sonra doğru pencere açıklığı için kritik önem SiO_2 'nin aşınma süresine verilir. Bu süre iyi optimize edilmezse pencerelerde genişleme, pasivasyonda incelme, tamamen kaybetme ya da açılmamış pencere gibi sorunlar yaşanabilir. Bu nedenle, aşındırma optimizasyonunda pasivasyon kaplanan deneme örneklerinde farklı sürelerde BHF 'de aşındırmalar yapılmıştır. Aşındırma sonrasında örnek yüzeylerindeki rezistler temizlenerek pencere açıklıkları mikroskopta gözlemlenmiştir (Görsel 5.13). Aşındırma süreleri sırasıyla 30, 45 ve 60 sn şeklinde planlanmış ve uygulanmıştır. Aşındırılan pasivasyon penceresinin açıklığı metal kontakların çapı içerisinde kalması gerekirken 60 sn'lik pasivasyon aşındırmasında omik kontaktardan dışarıya doğru aşındırmanın devam ettiği ve piksel yüzeyinde pasivasyonun daha da incelmesi görülmüştür. Aşındırma 45 sn yapıldığıdaysa piksel yüzeyindeki pasivasyon katmanında incelme olmasa da pasivasyon açıklığı omik kontak çapıyla aynı boyutta açılmıştır. Süre daha da kısaltıp 30 sn aşındırıldığında pencere açıklıkları $5\ \mu\text{m}$ çaplı olup doğru aşındırma gerçekleşmiştir.



Görsel 5.13. (a) Litografi sonrası beklenen piksel görünümünün temsili çizimi, BHF de SiO_2 pasivasyonunun (b) 60 sn, (c) 45 sn ve (d) 30 sn deki optik mikroskop görüntüleri

Pasivasyon doğru aşındırma süresinin belirlenmesinin ardından kaplama öncesi geliştirilen temizlik adımının etkisi incelenmiştir. Piksel aşındırması, omik kontak metalizasyonu tamamlanan bir FPA de pasivasyon optimizasyonlarında geliştirilen temizlik adımı eklenmiş ve pencereler BHF içerisinde 30 sn aşındırılmıştır ve klasik temizlik süreci yapılarak FPA yüzeyindeki rezist temizlenmiş ve yüzey incelenmiştir. Pasivasyon açıklık çapları tasarımıyla uyumlu ve doğru bir şekilde açılmıştır (Görsel 5.14). Aynı zamanda FPA yüzeyinin tamamında tüm açıklıkların homojen olması ve pasivasyon kaybının olmaması optimizasyonların başarıyla sonuçlanmasının kanıtı olarak kabul edilmiştir. Üretim optimizasyonu ile görülen iyileşme dışında, Dieletirik malzemesinin geliştirilmesiyle daha yüksek dedektör performansını elde edileceği de bilinen bir gerçektir.

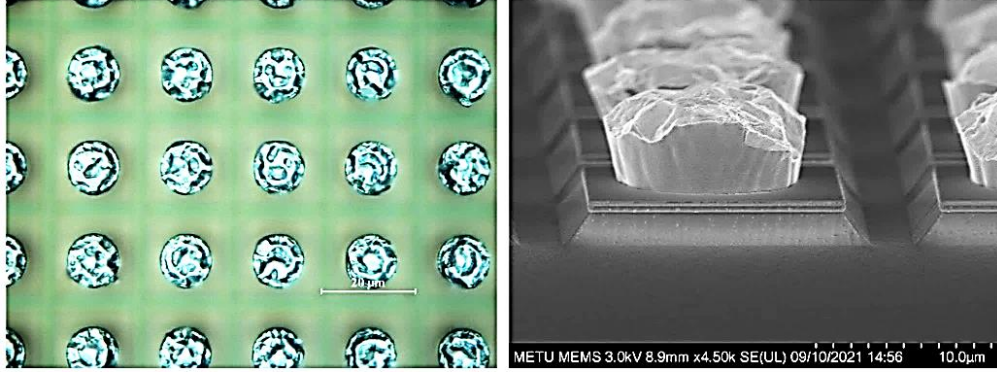


Görsel 5.14. *Optimizasyon sonrası açılan pasivasyon pencerelerinin mikroskop görüntüsü*

5.1.3. İndiyum topçuk optimizasyonu

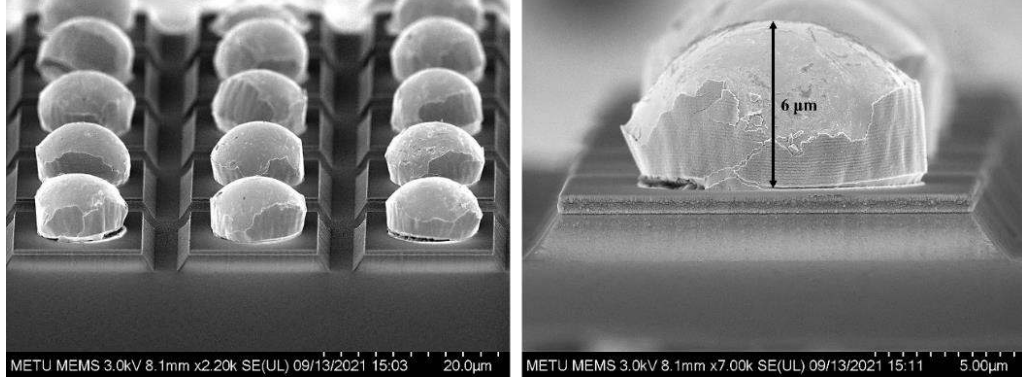
Bir FPA dedektörünün üretimindeki son ana basamak indiyum topraklarının oluşturulmasıdır. Bu tez çalışması kapsamı boyunca dedektör üretim proseslerinde, litografi maskelerinin üretimi sınırlandırması nedeniyle, UBM ve indiyum topçuklar için ayrı ayrı litografi adımı yapılamamıştır. Bu sebeple hem UBM hem de indiyum açıklıkları tek litografiyle tanımlanır. Metal kaplama işlemleriyle, ardışık olarak önce UBM metali için plazma kaplamayla Ti/TiW/Au sonra termal buharlaştırma yöntemiyle indiyum metali kaplanarak gerçekleştirir. Kaplama sonrası FPA aseton içerisinde bekletilerek

rezistin Lift-off işlemi yapılır. Her üretim basamağında olduğu gibi indiyumlar optik mikroskopta incelenmiş ve SEM görüntüsü alınarak Görsel 5.15'te sunulmuştur.



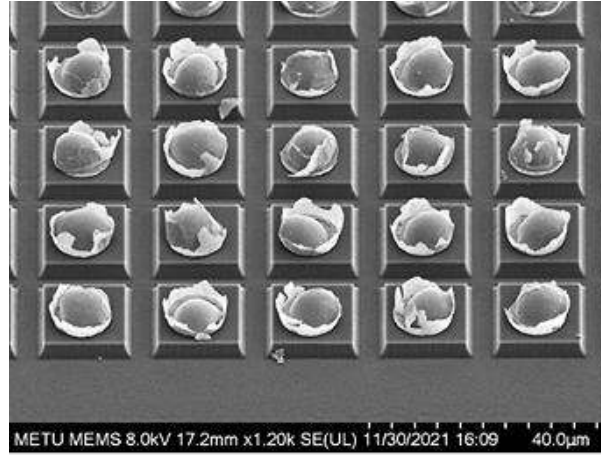
Görsel 5.15. İndiyumların optik mikroskop ve SEM görüntüsü

FPA in okuma entegre devresi (ROIC)'le hibritlenme (hybridization) veya tümleştirme öncesi indiyumların şekillendirilmesi gerekir. İndiyum şekillendirme süreci hibritleme sisteminde formik asit buharı altında ve indiyumların tamamen erimeye yakın sıcaklığına yakın değerlere kadar ısıtıldığı belirli bir sıcaklık altında yeniden şekillendirilerek (Reflow) gerçekleştirilir. Formik asit buharı ve yüksek sıcaklık sayesinde bir yandan indiyumların yüzeyindeki oksit tabakasından kurtulurken diğer yandan sıcaklıkla indiyumların toparlanması sağlanır. Yeniden şekillendirilen FPA üzerindeki indiyumların SEM görüntüleri Görüntü 5.16'da verilmiştir. Bu işlem sayesinde indiyumun külçe görünümünü kaybetmesi ve top haline gelmesi beklenir. Bu işlemin amacı okuma devresi ve FPA'nın daha kolay birleştirebilmek için yapılır. Yeniden şekillendirilme sonrası indiyumların tam bir küre şeklini değil yarımküre şeklini alır. Bu durum, UBM ve indiyum topçuk litografisinin ayrı ayrı yapılmamasından kaynaklıdır. Yeniden şekillendirme sonrası SEM görüntüleri detaylıca incelendiğinde her indiyum topunun etraflarında kabuğa benzer bir katman olduğu da görülür. İndiyum etrafındaki bu kabukların tek litografi işlemiyle ardışık olarak kaplanan indiyum öncesi UBM kaynaklı metal olduğu ön görülmüştür.



Görsel 5.16. İndiyumların yeniden şekillendirme sonrası SEM görüntüleri

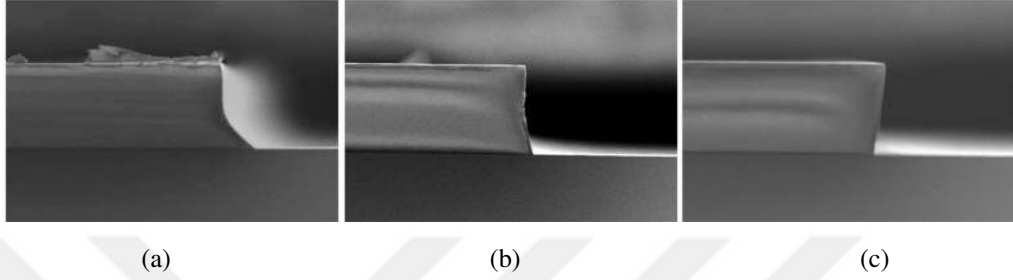
İndiyum topçukları etrafındaki kabuğun gerçekten UBM den kaynaklı olup olmadığını anlamak için indiyum aşındırma yapılmıştır. HCl asit kullanılarak indiyum topçuklar aşındırılarak küçültülmüştür (Görsel 5.17). Sonuçta geriye sadece UBM metalinin kaldığı görülmüştür. Dolayısıyla yeniden şekillendirmede indiyumun etrafındaki bu Ti/TiW/Au metali indiyumların küre şeklini almasını zorlaştırdığından yarım küre görünümü oluşur. Yarım küre indiyumlar okuma devresiyle birleşme anında herhangi bir engel teşkil etmediğinden çalışmalara bu şekilde devam edilmiştir. Ancak gelecek çalışmalarda tek litografi yerine UBM ve indiyum için ayrı proses adımları oluşturularak çift litografiyle indiyum topların oluşturulması planlanmıştır.



Görsel 5.17. İndiyumların HCl ile aşındırılma sonrası SEM görüntüsü

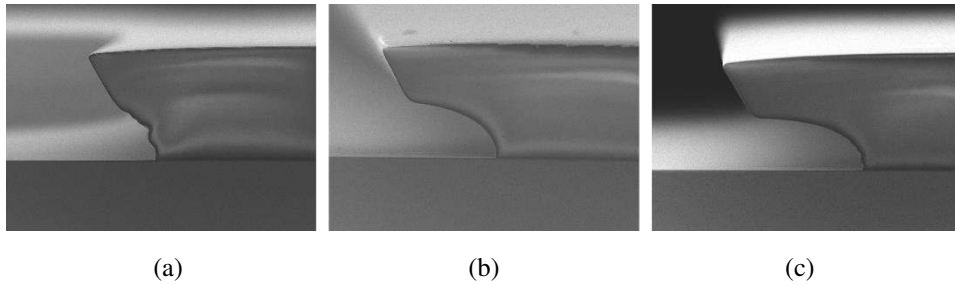
FPA de indiyum kaplamasının 5 µm kalınlığında olması Lift-off esnasında yer yer indiyumların kopmasına veya küçülmesine neden olmaktadır. Bu litografide kullanılan AZ9260 rezistinin ~14 µm kalınlığında olması yeterli olsa da rezist profili bu kadar kalın metal kaplamalar için elverişli değil. Buradan yola çıkarak alternatif rezist araştırmaları

ve denemeleri yapılmıştır. AZ9260 rezisti yerine kalınlık açısından benzer kalınlıkta kaplanabilen nlof 2070 rezistiyle çalışmalara yapılmış ve 16 μm kalınlığındaki nlof 2070 rezisti için ilk olarak maruz kalacağı UV süresi belirlemiştir. Bunun için sırasıyla 36, 24 ve 18 sn UV süreleri kullanılarak elde edilen fotorezist profili incelenmiştir ve Görsel 5.18’de fotorezist profilleri paylaşılmıştır.



Görsel 5.18. Nlof 2070 fotorezistinin (a)36 sn, (b)24 sn ve (c)18 sn deki UV sürelerine bağlı duvar profillerinin SEM görüntüleri

Rezist profili incelendiğinde 18 sn’deki resit şekli ve profili yeterli görülmüştür. Bu aşamadan sonra ikinci adımda UV süresini değiştirmek yerine tabetme süreleri değiştirilmiştir. Tabetme sürelerine göre elde edilen rezist profilleri SEM yardımıyla incelenmiş ve Görsel 5.19’da sunulmuştur. Tabetme süreleri ardışık 90, 130 ve 150 sn olacak şekilde artırılmış ve rezist profilinde oluşan alt açıklık genişliğinin de arttığı gözlemlenmiştir. Oluşan alt açıklık genişliği çok fazla artırıldığında fotorezistte çökmeler olduğundan desen bozulmalarının ortaya çıkama ihtimali söz konusudur. Bu nedenle, alt açıklık derinliğinin hem enine hem de boyuna göre indiyum kalınlığından daha büyük olduğu tabetme süresi kullanılabilir. Yapılan bu çalışma sonucunda, 18 sn UV ışığa maruz bırakma ve 130 sn tap etmeyle elde edilen profil indiyum litografisi için uygun bulunmuştur. Gelecekte yapılacak çalışmalarda AZ9260 yerine nlof 2070 rezist ve uygulama reçetesi belirlenmiştir.



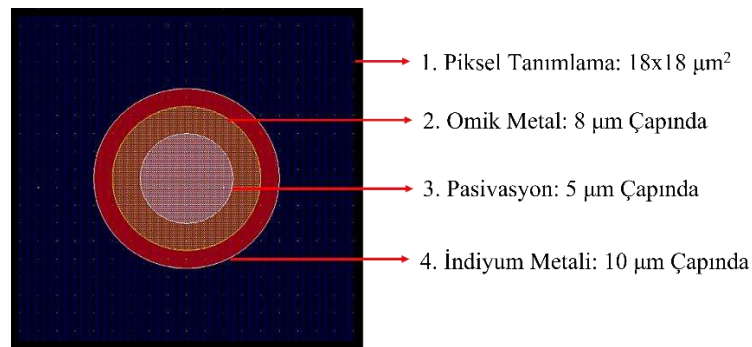
Görsel 5.19. Nlof 2070 fotorezistinin (a)90 sn, (b) 130 sn ve (c) 150 sn deki tabetme sürelerine bağlı rezist profilleri

Dizin dedektörler üretiminde iyileştirilmesi gereken üretim ana adımlar kendi içinde optimize edilerek tamamlanmıştır. Ancak yapılan optimizasyonlar FPA proses sıralamasına göre ana ve ara adımların birbirine uyumu ve üretimde yeni zorluklara sebep olmamaları da gerekir. Bu nedenle, optimizasyon çalışmaları sonrasında güncellenen proses reçetesine göre tam bir FPA üretimi yapılarak üretim kontrollüde sağlanmıştır.

5.2. Odak Düzlem Dizin-FPA Üretimi

Bir FPA'nın üretim planlaması dedektör yapısına ve üretim maske tasarımına bağlı olarak şekillenir. Bu planlamalara göre, üretim adımlarının sıralaması değişse de üretim ana basamakları temelde hep aynıdır. Bir FPA üretimi genel olarak piksel tanımlama, elektriksel bağlantılar için metalizasyon, piksel yüzeyini sızıntı akımlara karşı izole eden pasivasyon, okuma devresiyle birleştirilmesi için indiyum kaplama şeklinde dört temel adımdan oluşmaktadır. FPA üretimi tamamlandıktan sonra okuma devresiyle hibritleme, alt dolgu uygulama ve mekanik taban inceltme/parlatma veya taban kaldırma olmak üzere proses sonrası üç ayrı üretim adımı daha mevcuttur. Bu bölümde bir FPA üretiminin başından sonuna kadar tam bir üretim reçetesi ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

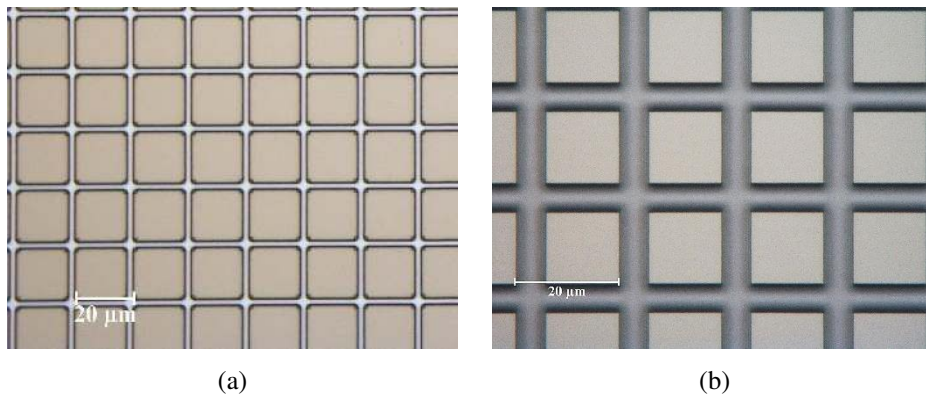
Odak düzlem dizini üretimine geçmeden önce proste kullanılan maske tasarımına ait piksel boyutları ve üretim pencere açıklık boyutları Şekil 5.1'de paylaşılmıştır. Dedektör üretiminde kullanılan fotolitografi tekniğiyle maske desenlerinin dedektör yüzeyine doğru bir şekilde transfer edilmesi kritik öneme sahiptir. Çünkü, bu üretim basamaklarında yer alan desenlerin boyutları ve açıklıkları çok küçük ve üretim maskeleri arasındaki hata payı da çok azdır. Şekil 5.1'de paylaşılan tasarım boyutları, prosesin tam anlaşılması için üretim sıralamasına göre verilmiştir. Böylece maske tasarım boyutu, proses üretim sıralaması ve fotolitografik desenleme arasındaki ilişkisi kurulmuştur.



Şekil 5.1. Odak düzlem dizin dedektör üretim tasarım boyutları

Bir süperörgü FPA dedektör üretiminde, yapı büyütme maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı çok sayıda proses ve karakterizasyon denemesi yapabilmek için epikatan pulu parçalara bölünür. FPA üretimi için 640x512 pikseli ve 20 µm piksel adımlı tasarıma uygun olacak şekilde tam pul parçalara kesilir. Kesim işlemi, Dicer olarak adlandırılan döner bıçaklı sistemde yapıldığından, kaba ve tozlu bir yöntem olması yapıya zarar verme ihtimalini içerir. Bu sebeple pul yüzeyi kesimden önce rezistle korunur. Kesilen parça pul aseton ve alkolle temizlenerek optik mikroskopta yüzey incelemesi yapılır. Yüzeyde kesim kaynaklı herhangi bir sorun yoksa, pul artık FPA üretimi için hazırdır.

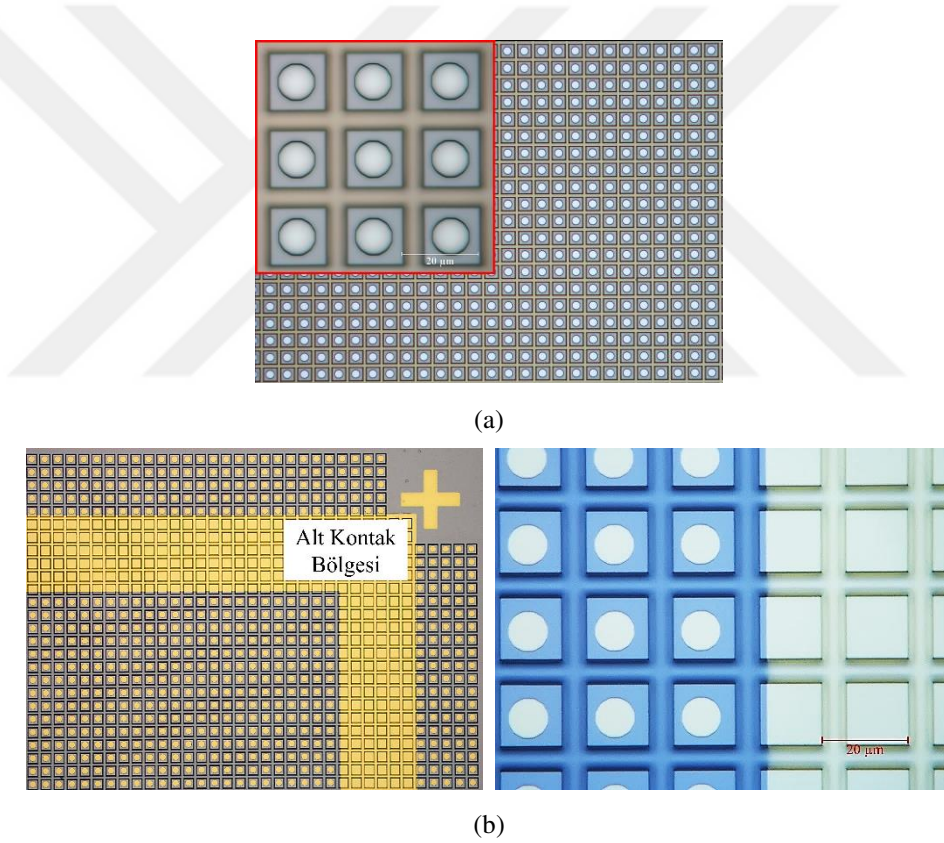
Kesim sonrası kaba temizliği yapılan parça pul genel yüzey temizliği için standart temizlik prosedüründen geçirilir. Bu temizlik adımına ek olarak, yapı yüzeyinde atmosfer kaynaklı oluşan oksitlenmenin temizliğiyle seyreltilmiş HCl ile gerçekleştirilir. Temizliğin ardından standart litografiyle aşındırılacak bölgeler tanımlanır. Aşındırma hızı ~450 nm/dk olan 5 gr: 20 ml: 200 ml: 20 ml karışım oranlarında hazırlanan $C_6H_8O_7$: H_2O_2 : H_2O : H_3PO_4 çözeltisiyle alt kontak katmanına kadar aşındırılır. Her aşındırma adımı sonrası aşınma derinliği yüzey profil belirleyicisiyle ölçülür. Hedeflenen aşındırma derinliğe ulaşıldığında parça pul aseton/alkol temizliği yapılarak prosesin piksel tanımlama adımı tamamlanmış olur. Prosesin bu basamağında yapıya ait piksel desenleme sonrası ve aşındırma sonrası temizlenen parça pulun dizin piksel yüzeyi mikroskopta incelenmiş Görsel 5.20 de verilmiştir.



Görsel 5.20. (a) Piksel litografisi sonrası fotorezistli, ve (b) piksellerin aşındırma sonrası fotorezistsiz mikroskop görüntüsü

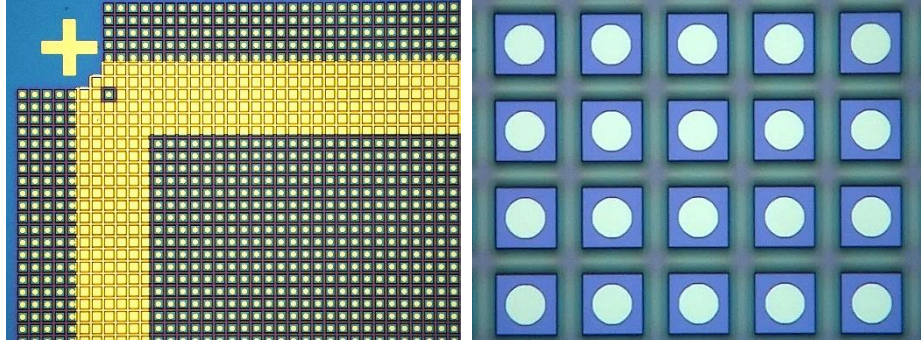
Tanımlanan piksellere metalizasyon için yeniden desenleme yapılır. Bu doğrultuda dedektör yüzeyi tekrar fotorezistle kaplanarak kontak maske desenlenmesi yapılır. Tabedilen desenleme sonrası kontak pencere hizalanma ve açıklığından emin olmak için

optik mikroskopla kontrol edilir. Görsel 5.21 (a)'da litografi sonrası piksellerin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Pencere açıklıklarında emin olunduktan sonra, omik metalizasyon kaplaması için Sputter cihazında sırasıyla kalınlıkları 40/50/75 nm olacak şekilde Ti/Pt/Au metaliyle kaplanır. Metalizasyon sonrası parça pul aseton içirişinde Lift-off edilir. Böylece, sadece elektriksel temasın olacağı pikseller ve alt kontak temasının sağlanacağı yüzeyde metaller kalır. Tamamlanan omik kontak basamağı sonrası tüm FPA yüzeyi optik mikroskopta detaylıca incelenir ve Görsel 5.21(b) de FPA'nın omik kontak sonrası son hali bulunmaktadır. Her ana litografiden sonra FPA yüzeyi yeni litografi için 65°C sıcaklıkta 5'er dk. aseton ve alkolle genel FPA yüzey temizliği yapılarak FPA bir sonraki ana üretim adım için hazır hale getirilir.



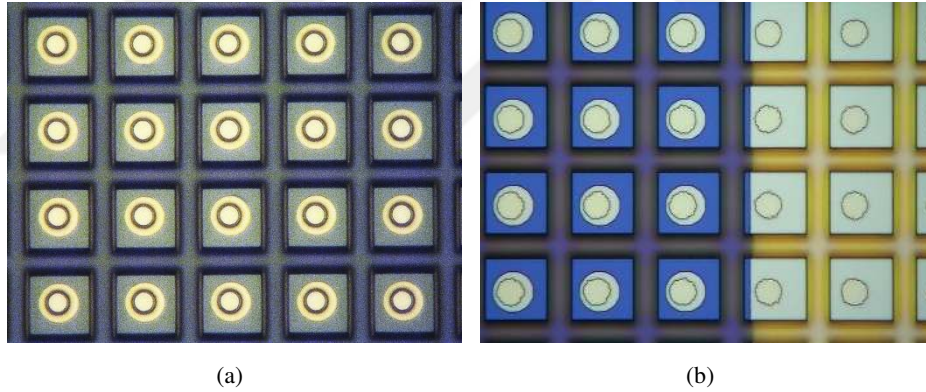
Görsel 5.21. (a) Omik kontak litografisi sonrası fotorezistli, ve (b) Omik kontak Lift-off'u sonrası mikroskop görüntüsü

Sırada dedektör fabrikasyonun üçüncü adımı olan pasivasyon kaplaması vardır. Omik kontak sonrası standart temizlik prosedürüne ek seyretilmiş HCl ile dedektör yüzeyi temizlenir ve PECVD sisteminde 100°C sıcaklık altında ~250 nm SiO₂ büyütülür. Dielektrik kaplama sonrası da FPA yüzeyine ait optik mikroskop görüntüleri Görsel 5.22'de verilmiştir.



Görsel 5.22. Pasivasyon kaplama sonrası parça pulun yüzeyinden görüntüleri

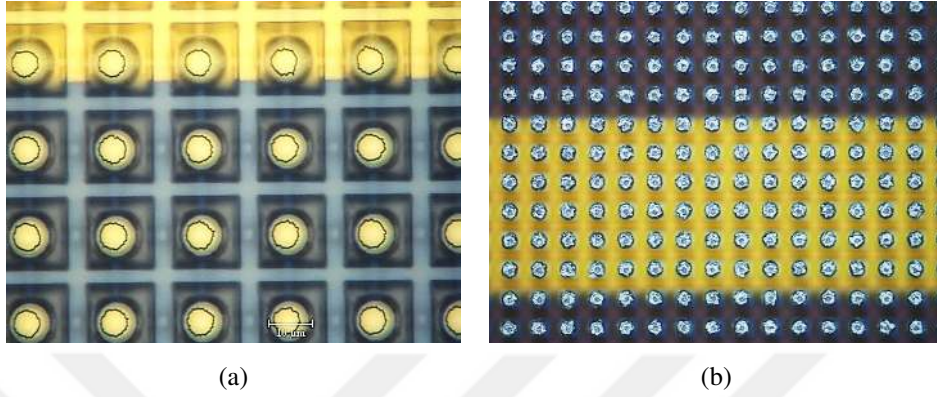
Yüzey pasivasyonu sonrası, elektriksel temas sağlayabilmek için piksellerin pasivasyon açıklıkları litografiyle desenlenerek oluşturulur (Görsel 5.23). Böylelikle, piksellerin üzerinde pasivasyonun olmaması gereken pencere açıklıkları tanımlanır ve 1:7 oranında BHF'le ~40 sn boyunca aşındırılır ve rezist temizlendikten sonra pasivasyon adımı tamamlanır.



Görsel 5.23. (a) Pasivasyon litografisi sonrası fotorezistli, ve (b) Pasivasyon pencere aşındırma sonrası fotorezistsiz mikroskop görüntüsü

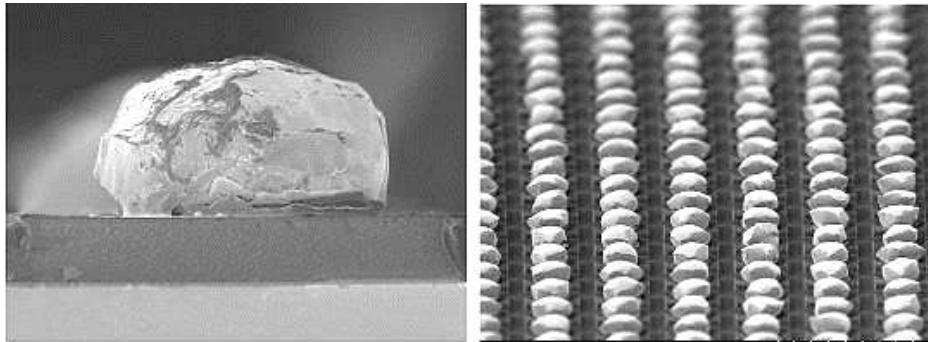
Tüm bu basamaklardan sonra prosesin son adımı olan UBM ve indiyum kaplamasına geçilir. İndiyum litografi sürecinde daha önce bahsedildiği gibi AZ9260 Rezisti kullanılır. Bu fotorezist ile çalışırken diğer litografilerden farklı olarak fotorezistin çok kalın serilmesi ihtiyacından kaynaklı uygulama farklılığı söz konusudur. Rezist serildikten sonra 30 dk. ve tabetme öncesi ise 60 dk olmak üzere iki bekleme süresi vardır. Reçeteye uygun yapılan litografik desenlemenin ardından FPA yüzeyi mikroskopta incelenerek desen hizalama kontrolü yapılır. Görsel 5.24'te verilen rezistli görüntüden anlaşılacağı gibi üst üste hizalama kusursuz bir şekilde yapıldığından pasivasyon açıklıkları bile nettir. Litografi sonrası sırada UBM ve İndiyum kaplama adımı vardır.

UBM için Sputtering tekniği ile Ti/TiW/Au (20/50/20nm) metalleri ve ardından termal buharlaştırma yöntemiyle ~5 µm kalınlığında İndiyum kaplanır. Ultrasonik titreşim ve aseton içinde Lift-off işlemi de gerçekleştirildikten sonra FPA üretimi tamamlanır.



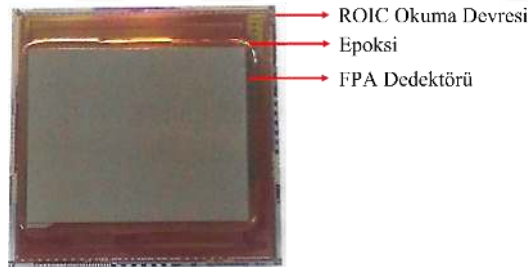
Görsel 5.24. (a) UBM litografi sonrası ve (b) In buharlaştırma sonrası FPA yüzeyinin mikroskop görüntüleri

Dizin dedektör üretim sürecinden sonra sırada görüntü alabilmek için okuma devresi-ROIC ile hibritleme, alt-dolgu uygulama, taban inceltme ve seçici aşındırma adımlarından oluşan “Back-End” proses olarak adlandırılan üretime süreçleri gelir. Hibritleme işlemleri Flip Chip Bonding-FC150 sisteminde yapılır. Ancak, her zamanki gibi hibritleme öncesi her iki yüzeyde mikroskopta ayrıntılı olarak incelenir. Eğer yüzeylerden birinde bile herhangi bir kalıntı varsa temizlik adımı tekrar edilir. Hibritlemeden önce FPA formik asit buharı alıntıda 210 °C ye kadar ısıtılarak indiyum yeniden şekillendirmesi yapılır. Görsel 5.25’te indiyum şekillendirme sonrasına ait SEM görüntüleri verilmiştir. İndiyum toparlanması sonra FPA ve ROIC 120 °C de hizalama işaretleri kullanılarak birbirine göre hizalanır ve 5 kg’lık basınç uygulayarak her iki yüzeyde bulunan indiyumları birbirine bağlanır.



Görsel 5.25. İndiyumun yeniden şekillendirme sonrasına ait SEM görüntüleri

Hibritleme sonrası, soğutmalı dedektörler sıvı azot sıcaklıklarında dedektör ve okuma devresinin termal genleşmelerinin birbirine uyum sağlaması gerekir. Bu uyumda ancak tabanın tamamen kaldırılması veya oldukça inceltilmesiyle sağlanır. Tabağın inceltme süreci ise mekanik bir zımparalama işlemine benzer olduğu için dedektör ve okuma devresi büyük bir basınca maruz kalır. Bu basınç iki elemanın birbirinden ayrılmasına sebep olabilecek kadar yüksektir. Hibrit yapının taban inceltme sürecindeki mekanik basınca karşı dayanıklı olmaları için FPA ile ROIC arasındaki boşluk alt-dolgu epoksisi ile doldurulur. Epoksi seçimi yapılırken, ROIC ve dedektör arasında boşluk bırakmayacak şekilde doldurmasına ve sıvı azot sıcaklığında termal genleşme uyumunu sağlamasında bakılarak karar verilir. Epoksi, şırınga yardımıyla FPA ve ROIC arasına enjekte edilerek uygulanır. Bu tez kapsamında, beş farklı epoksiyle farklı uygulama sıcaklıklarında deneme doldurma çalışmaları yapılmıştır. Epoksi doldurma sonrası akustik mikroskopla arada kalan boşluk görüntülemeleri yapılmış ve en uygun dolgu malzemesi seçilmiştir. Epoksi uygulama sonrası, 80°C'de 3 saat bekletilerek epoksi sertleşmesi sağlanmıştır. Görsel 5.26'da hibritleme sonrası dedektör ve okuma devresinin resmi verilmiştir.



Görsel 5.26. ROIC ve FPA dedektörünün birleştirme sonrası fotoğrafı

Taban inceltme işlemleri 0,5 μm 'lik parçacıklar içeren solüsyon kullanılarak mekanik yöntemle inceltilir. İlk aşamada, süperörgü yapısının büyütüldüğü taban kalınlığına bağlı olarak inceltilecek kalınlık miktarı belirlenir. Bu çalışmada kullanılan GaSb alt tabanın kalınlığı ~625 μm 'dir ve tabanın kalınlığı mekanik inceltmeyle 50 μm 'ye kadar düşürülmüştür. İnceltmesi gereken kalınlığın çok kalın olması inceltme anında kırılma veya tek yönlü fazla inceltme gibi sorunlar meydana getirebilmektedir. Bu yüzden, proses süresince belirli aralıklarla inceltmeye ara verilip yüzey ve kalınlık kontrolü yapılır. İnceltme sonrası FPA'nın görüntüleme yüzeyinin mikroskop görüntüsü Görsel 5.27'de paylaşılmıştır.



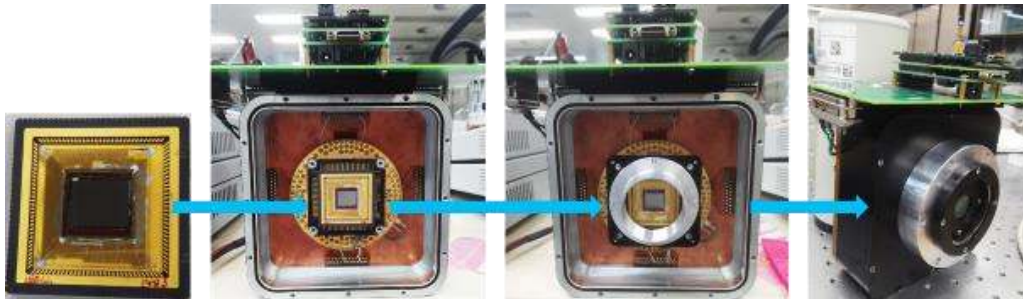
Görsel 5.27. *Dedektörün taban inceletme sonrası yüzeyin fotoğrafı*

Proses optimizasyonlarıyla sayesinde üretim akışında uyum yakalanmış ve zorlu FPA dedektör üretimleri başarıyla tamamlanmıştır. Geriye kızılötesi görüntüleme için dedektörün paketlenmesi ve soğutucu kaba yerleştirilmesi kalmıştır.

5.3. FPA Test ve Karakterizasyonu

FPA dedektör üretimleri, MWIR dalgaboyunda algılama yapan N-pBin ve MWIR/MWIR çift dalga boylu N-nBn yapılarıyla yapılmıştır. Yapıların çalışma dalgaboyuna göre bant aralığı ayarlamaları için teorik hesaplamalar ve modellemeler Prof. Dr. Yüksel Ergün ve Prof. Dr. Mustafa Hoştut tarafından yapılmıştır. Her iki yapının da InAs/AlSb/GaSb oluşan süperörgü yapı tasarımları Şekil 5.2’de paylaşılmıştır.

FPA üretimleri tamamlanan dedektörler, kızılötesi görüntüleme için soğutmalı kap Dewar’a uygun 124 pinli LCC pakete termal macun ve beyaz epoksi yardımıyla sabitlenir. Sabitlenen FPA den LCC ye Au tel ile elektriksel bağlantılar alınır. Böylece görüntüleme için hazır olan FPA görüntüleme Dewar’ına nazik bir şekilde yerleştirilir (Görsel 5.28).



Görsel 5.28. *Görüntüleme soğutucu kabına FPA in yerleştirilmesi*

Şapka Katmanı	GaSb			100 nm
p-SL Kontak	60 x	2 / 10.5 / 7 ML	AlSb / InAs / GaSb	360 nm
Bariyer	$Al_{(x)}Ga_{(1-x)}Sb$			100 nm
p-SL Kontak	30 x	2 / 10.5 / 7 ML	AlSb / InAs / GaSb	160 nm
Aktif Bölge	300 x	2 / 10.5 / 7 ML	AlSb / InAs / GaSb	1.78 μm
n-SL Kontak	90 x	2 / 10.5 / 7 ML	AlSb / InAs / GaSb	530 nm
Tampon	GaSb			500 nm
Taban	n-GaSb (100)			

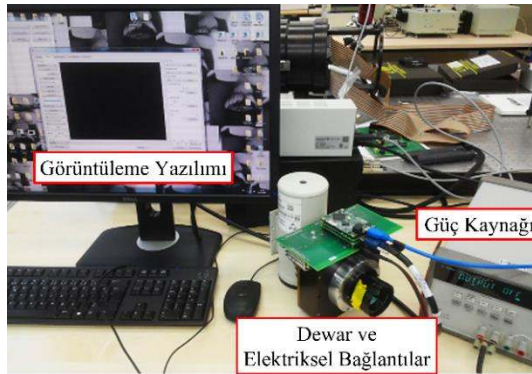
(a)

Şapka Katmanı	InAs			100 nm
n-SL Kontak	100 x	2 / 10.5 / 7 ML	AlSb / InAs / GaSb	590 nm
Aktif Bölge	240 x	2 / 10.5 / 7 ML	AlSb / InAs / GaSb	1.43 μm
Bariyer	$Al_{(x)}Ga_{(1-x)}Sb$			100 nm
Aktif Bölge	330 x	2 / 8.5 / 8.5 ML	AlSb / InAs / GaSb	1.91 μm
n-SL Kontak	100 x	2 / 8.5 / 8.5 ML	AlSb / InAs / GaSb	580 nm
Tampon	GaSb			500 nm
Taban	n-GaSb (100)			

(b)

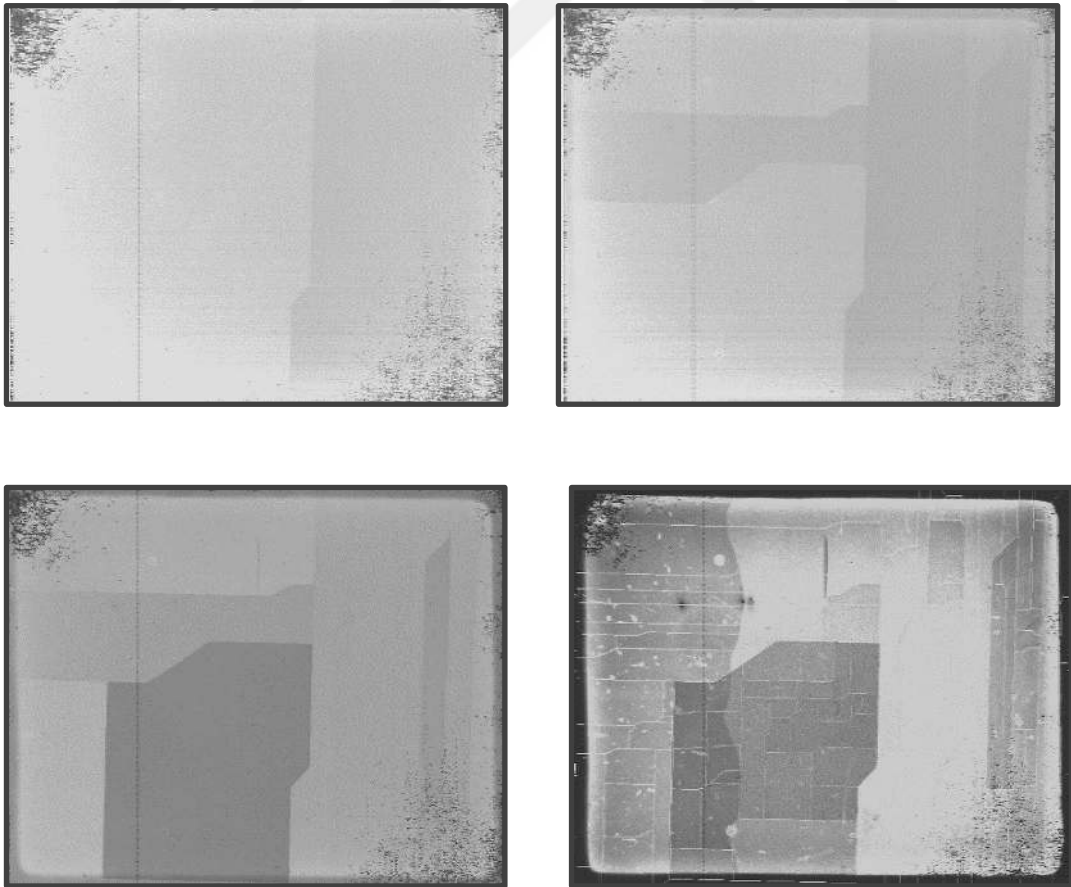
Şekil 5.2. (a) N yapılı pBin MWIR ve (b) N yapılı nBn MWIR/MWIR çift dalgaboyunda algılama yapan yapı tasarımları

Soğutmalı kabın içine yerleştirilen detektörden görüntü almadan önce Dewar vakuma alınır. Dedektör soğutma anında meydana gelen termal genişleme farkının etkisinin azaltmak için soğutma işlemi oldukça yavaş ve kontrollü bir şekilde yapılır. Görüntülemelerin yapıldığı düzenek Görsel 5.29’da paylaşılmıştır.



Görsel 5.29. FPA görüntüleme ölçüm düzeneği

Soğutmalı dedektörlerde görüntüleme anında termal genleşme farkından kaynaklı zaman zaman elektriksel bağlantılarda veya dedektör kontak noktalarında kayıplar yaşanabilmektedir. Bu sebeple soğutma anında ara ara dedektörün tepkisi incelenir. Soğutma başladıktan bir süre sonra FPA'lerde termal genleşme farkının etkisi görünmeye başlar. GaSb tabanın termal genleşme katsayısı $7,75 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ iken Si okuma devresinin termal genleşme katsayısı $2,6 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ dir. İki malzeme arasındaki termal genleşme katsayıları arasında fark ~ 3 kat kadardır. Değişen sıcaklıkla malzemelerin termal genleşmeleri değiştiği için aralarındaki farkta giderek artar. Bu sebeple, FPA ve ROIC'in soğutma esnasında termal genleşmeleri değişirken bir taraftan da birbirine uyum sağlamaya çalışırlar. Bu iki zıt yönlü baskı dedektöre zor yaşatmaya başlar. Meydana gelen bu zor sıcaklık düştükçe ROIC'in FPA'ya baskın gelmesiyle sonuçlanır ve FPA de çatlamalara sebep olur. Çatlamalar sisteme gömülen zoru yenmek için meydana gelir. Bu sebeple, baskın gelen her zorda FPA'de çatlamaya devam eder. Soğuma anında dedektörde meydana gelen bu çatlamalar oluşum sırasıyla görüntülenmiş ve Görsel 5.30'da verilmiştir.

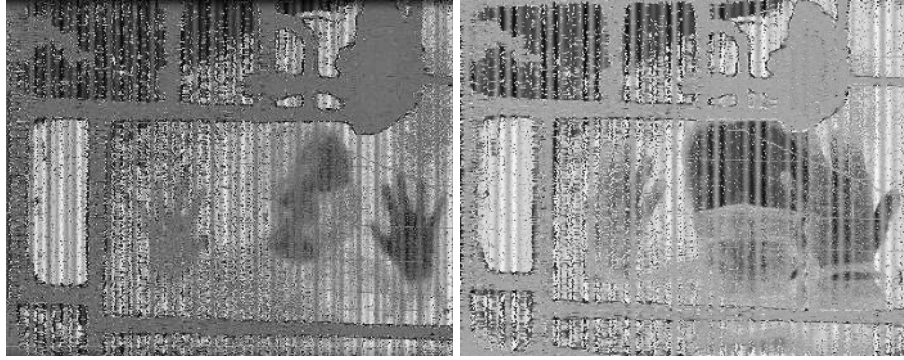


Görsel 5.30. Soğutma anında dedektör de meydana gelen çatlamaların oluşumu

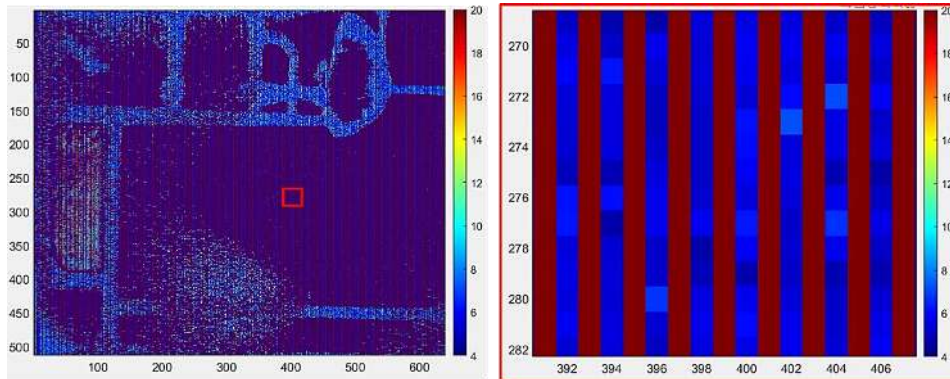
Soğutma anında dedektörün çatlaması, dedektörün çatlayan kanallarında temas kaybı yapar ancak bu durum görüntüleme için engel teşkil etmez. Bu tez çalışmasında da üretilen dedektörlerden çatlamalara rağmen görüntüler alınabilmektedir.

5.3.1. N-pBin yapıli MWIR dalgaboyunda FPA görüntüleme

İlk FPA görüntülemesi, N-pBin yapıli MWIR dalgaboyunda çalışan yapıyla gerçekleştirilmiştir. Soğutma anında dedektörde kırılmalar oluşmuş ve elektriksel temas kaybı sebebiyle ilk soğutma anında MWIR görüntü alınamamıştır. Elektriksel bağlantılar kontrol edildikten ve sorun çözüldükten sonra görüntüleme yapılmış ve Görsel 5.31’de alınan ilk MWIR görüntülerinden örnekler paylaşılmıştır. Görüntülemede ilk soğutmada anında oluşan çatlaklar ikinci soğutmada daha geniş kayıplara sebep olmuştur. Aynı zamanda geniş yüzey alanlı bölgedeki çatlaklarda görüntülemede kendini belli etmiştir. Görüntüleme anında kolonlardan biri kaybedildiği için görüntü tek bir kolondan oluşturulmuştur (Görsel 5.32). Kızılötesi görüntüleme 2,2 V öngerilim altında, 20 ms entegrasyon süresi, 20 ve 40 FPS görüntüleme sürelerinde yapılmıştır. Görüntüleme anından kaybedilen kolon dedektör performansında da kendini belli etmiştir

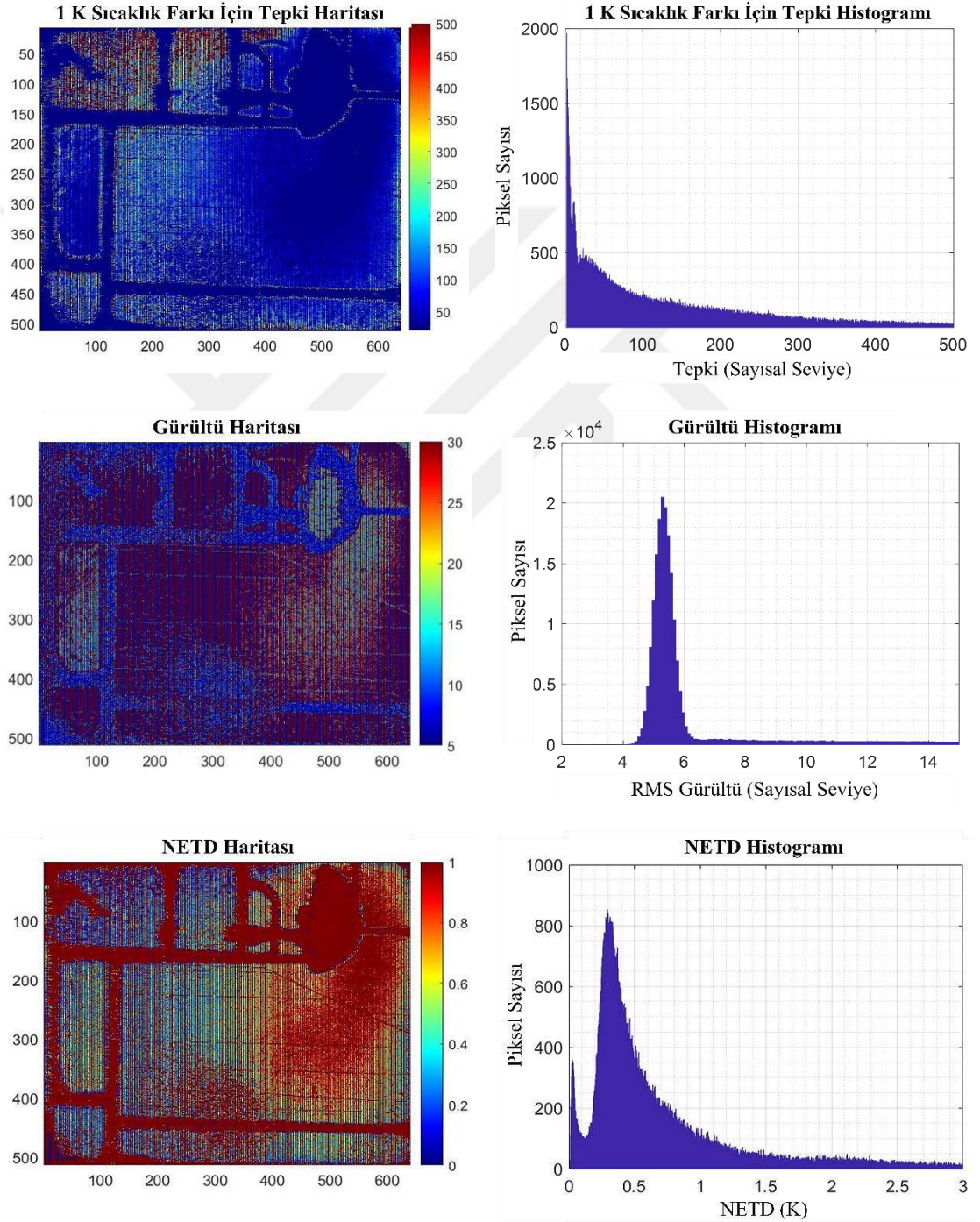


Görsel 5.31. N-pBin yapıli MWIR dalgaboyunda görüntüleme



Görsel 5.32. Gürültü haritasında kaybedilen kolonun haritaya yansımaları

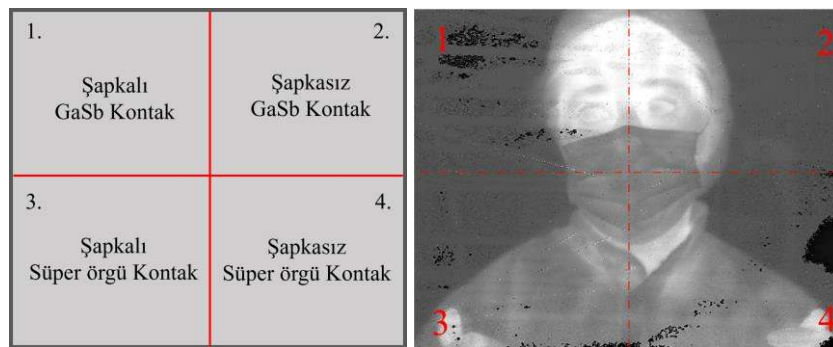
Kızılötesi görüntülemesi yapılan FPA'lerin tepki, gürültü ve NETD performans haritaları ve histogramları çıkartılmış ve Şekil 5.3'te verilmiştir. Tepki ve NETD histogramlarında çalışmayan kolon nedeniyle 0 noktasında yüksek bir sinyal alınmıştır. Gürültü ve NETD histogramlarında uzayan sinyal kenarları dedektörün kırılması ve sistemin sahip olduğu gürültüden kaynaklıdır.



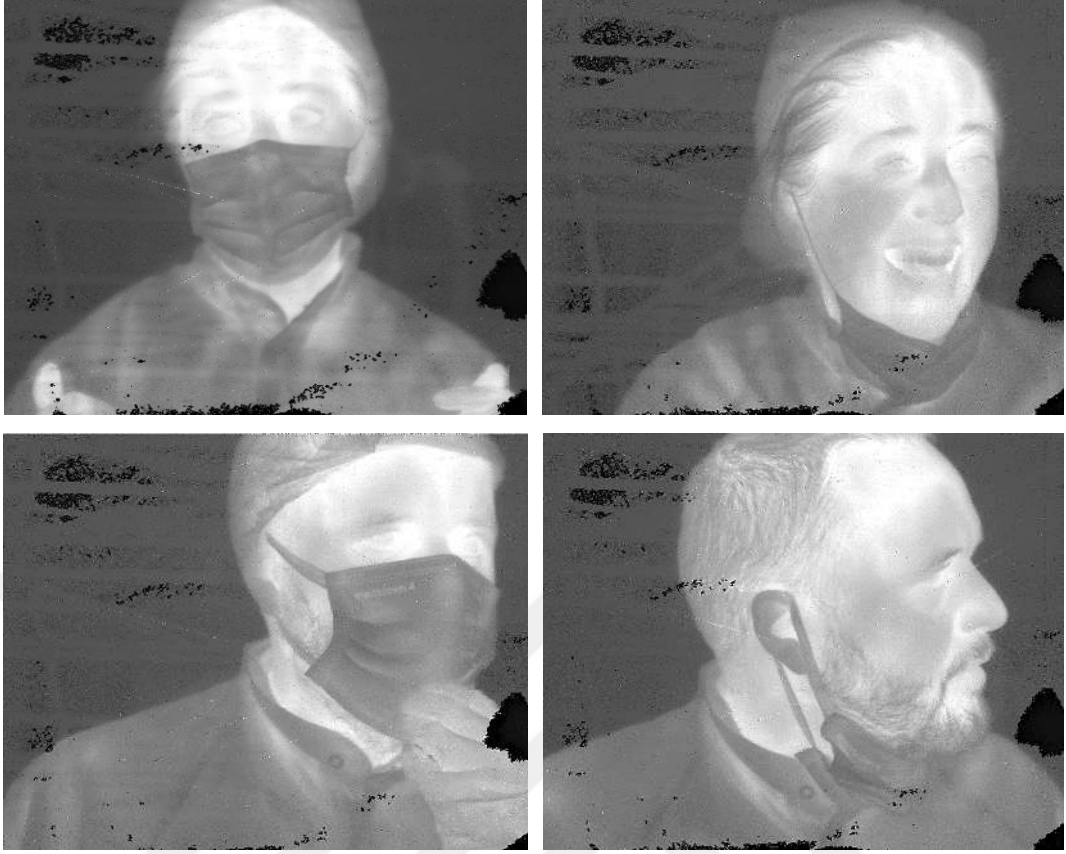
Şekil 5.3. İlk FPA'ya ait görüntü performans harita ve histogramları

FPA dedektör fabrikasyonun dedektör termal görüntüsü ve performansı üzerindeki etkisini gözlemek için bir dedektör dört ayrı alana bölünerek farklı üretim basamaklarından geçirilmiştir. Bu üretimde, büyütme sonrası yapının atmosfer etkisinden korumak için 100 nm kalınlığında GaSb şapka katmanının FPA dedektör performansına etkisi incelenmiştir. Bunun için şapka katmanı varken ve yokken olmak üzere FPA yüzeyi iki ayrı alana bölünmüştür. Piksel aşındırma derinliğinin etkisi içinse, tasarımda 2. kontak katmanı olarak düşünülen $\text{Si-}2 \times 10^{18}$ yüksek katkılı 500 nm kalınlığında n-GaSb katmanı ve gerçek kontak katmanı olarak tasarlanan yine 2×10^{18} yüksek katkılı süperörgü katmanlarına kadar iki ayrı aşındırma derinliğinin performansa etkisi araştırılmıştır. Bir dedektör parçasının yüzeyi dört ayrı alan bölünerek farklı piksel tanımlama litografileri yapılmıştır (Şekil 5.4). İlk ve ikinci alanlarda GaSb katmanından alt kontak alınmış ama sırasıyla şapkalı ve şapkasız olmak üzere kendi içinde iki ayrı alana daha ayrılmıştır. FPA'nın üçüncü ve dördüncü bölümleriyse süperörgü alt kontak katmanına kadar aşınmış ve yine şapkalı ve şapkasız olacak şekilde üretilmiştir. Böylece aynı görüntüleme şartları altında FPA fabrikasyonun dedektör performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışmanın devamında üretilen bu dedektör 2. FPA olarak adlandırılmış ve böyle bahsedilmiştir.

Soğutmalı dedektör, kızılötesi görüntülemeye hazırlık aşamasında sıvı azotla soğutma aşamasında dedektör yüzeyinde yine çatlamlar meydana gelmiştir. Çatlamlar dedektörde ciddi bir temas kaybı yaratmadığı için görüntü almaya engel oluşturmamış dedektörün tüm yüzey alanı aktif kalmıştır. Şekil 5.4'te verilen FPA 2.'ye ait termal görüntü dört ayrı alana bölünerek üretimdeki numaralarına karşılık gelecek şekilde temsili çizimle gösterilmiştir. Böylece kızılötesi görüntülerde hangi alanın hangi bölgeye denk geldiği daha iyi anlaşılır. Görsel 5.33'te 2.FPA'ya ait MWIR görüntülerinden örnekler paylaşılmıştır.



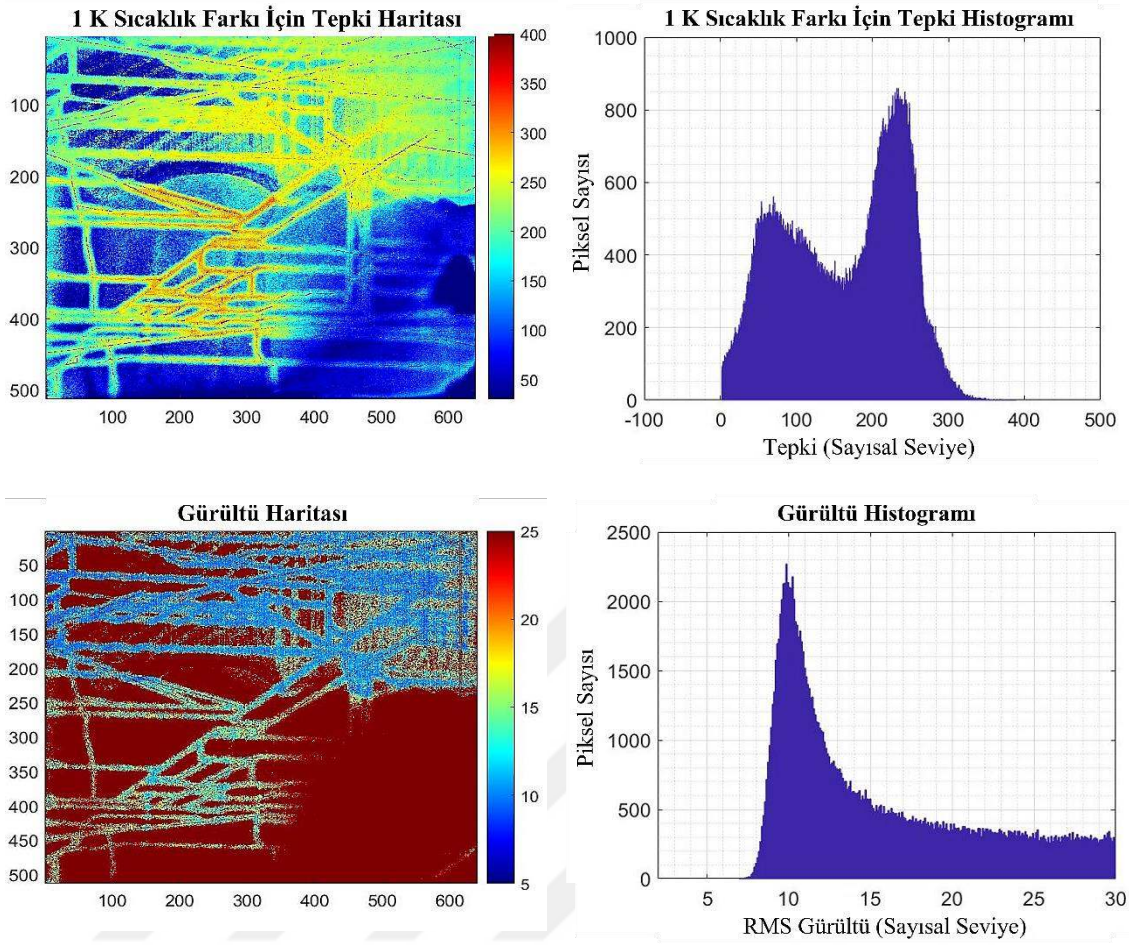
Şekil 5.4. Dört ayrı alana bölünen 2. FPA'nın temsili çizimi ve örnek termal görüntü



Görsel 5.33. 2. FPA den MWIR dalgaboyunda alınan görüntüler

İlk bakışta, termal görüntülerin bölgelere göre görüntü kalitesi benzer gibi görünse de detaylı incelendiğinde termal görüntünün kalitesi her bir bölgede farklıdır. Bazı bölgelerin tepkisi düşük veya ölü piksel oranı yüksekken bazı bölgelerdeyse termal görüntü daha detaylıdır. Görsel olarak yakalanan ufak farklılıkların dedektör performansı üzerinde etkisi olup olmadığını açıkça anlaşılabilmesi için MWIR da çalışan 2.FPA kızılötesi görüntüleri için tepki, gürültü ve NETD harita ve histogramları hesaplanmıştır (Şekil 5.5). Dedektörün dört ayrı üretim bölümden oluşması sebebiyle tepki haritasında dağılım aralığı çok geniştir, yüksek ve düşük tepkili piksellerin yoğunluğu yüksek olması sebebiyle tepki histogramıda iki ye ayrılmıştır. Soğutma anında, dedektörün tüm yüzeyi çatlamıştır. Çatalamaların olduğu bölgelerde piksellerin NETD, gürültü ve tepkisellikleri yüksek görünsede bu durum yanıltıcıdır. Değerlendirmelerde çatlamaların olduğu alanlar dikkate alınmamıştır.

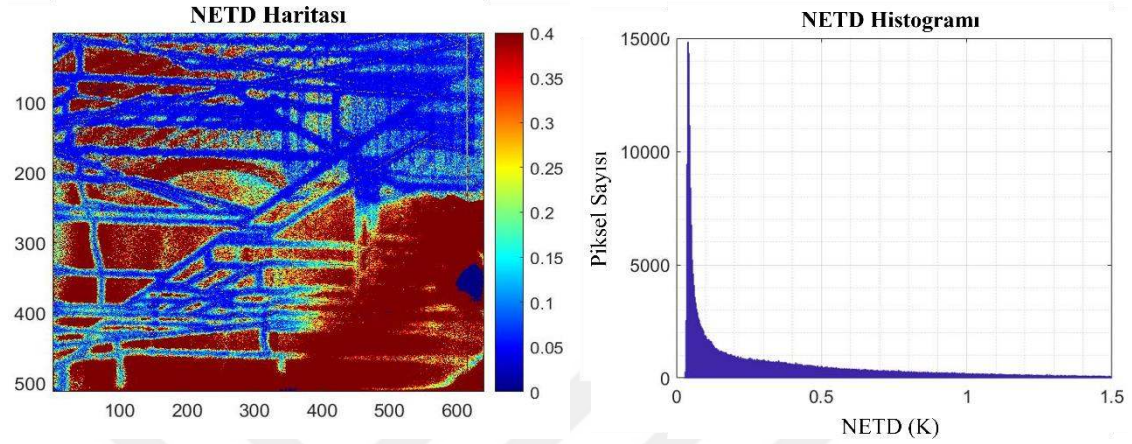
Gürültü haritası incelendiğinde dedektör gürültüsü oldukça yüksektir. Tek bir bölge hariç geri kalan üç bölgede de gürültü baskındır. Dedektör gürültüsü yüksek ve dağılımda homojen olmadığı için gürültü histogramıda yüksek RMS değerlerine doğru uzamıştır.



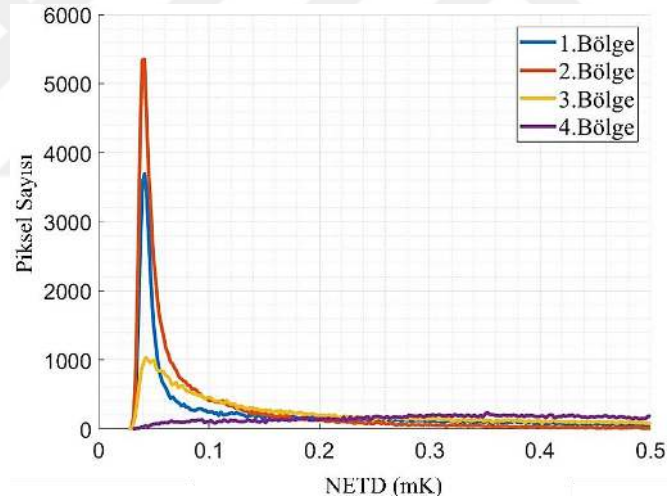
Şekil 5.5. 2. FPA e ait performans harita ve histogramları

Dedektör tepki ve gürültü haritaları incelendiğinde dört ayrı bölgenin de davranışı birbirinden farklıdır. Tepkisi en düşük ve gürültüsü en yüksek kısım şapkasız ve aşındırma derinliği süperörgü alt kontağa kadar olan 4. alandır. Gürültü değeri baskın geldiği için bu bölgede oluşan kırk ve çatlaklar gürültü ve NETD haritalarında belirgin değildir (Şekil 5.6). Dedektör genelinde NETD değeri ortalama değerden 3 kat daha küçük olanlardan itibaren alınarak piksel düzensizlik dağılımı hesaplandığında 0,791 oranında yüksek düzensizlik dağılımıyla sonuçlanmıştır. Bu dağılım dedektörün dört ayrı proses sürecinden kaynaklıdır. NETD değeri, en iyi sonuç veren bölgede ~15 ila 50 mK aralığında değişmektedir. Histogram da da bu bölgeye düşen piksellerin pik değeri yüksektir. Tepkisi en yüksek ve gürültü değeri en düşük olup en iyi performans değerine sahip olan bu bölge şapkasız ve aşındırma derinliği GaSb alt kontağa kadar olan 2. alandır. Tepkisi yüksek olan bu bölgenin en dikkat çeken özelliği gürültünün de düşük olmasıdır, dolayısıyla en iyi NETD değerini bu bölge sağlamıştır. Elde edilen tepki, gürültü ve NETD haritalarına göre bölgelerin performansı kendi içinde sırandığından en

iyiden en kötüye doğru 2, 1,3, ve 4 şeklindedir. Bu bölgelerin NETD histogramları ayrı ayrı hesaplanıp üst üste çizdirilmiş ve bölgeler arası sıralamanın doğruluğu teyit edilmiştir (Şekil 5.7).

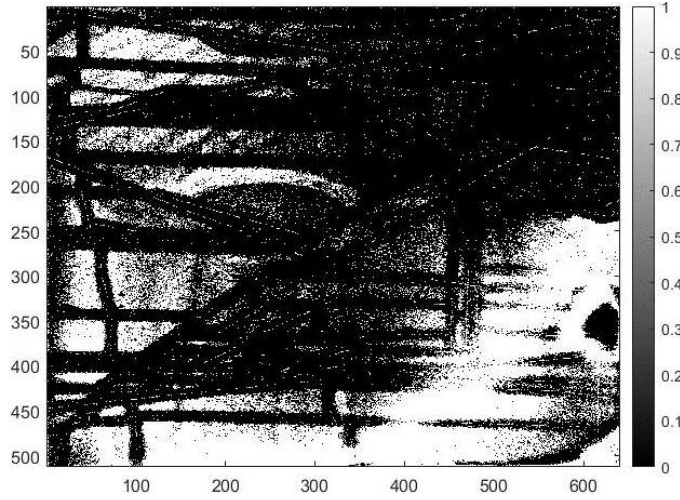


Şekil 5.6. Dört ayrı bölge FPA'nın NETD harita ve histogramı



Şekil 5.7. Dört ayrı bölgenin NETD histogramı

Bu FPA de ayrıca ölü piksel haritasıda çıkartılmıştır (Görsel 5.34). Ölü veya kötü piksel haritasına göre elde edilen dağılım diğer performans haritalarıyla uyum içerisindedir. Haritada görünen beyaz pikseller düşük tepkili, yüksek gürültülü veya çalışmayan pikselleri göstermektedir. Bu durumda beyaz pikseller görüntüleme anında kayda değer veri taşımadığı için termal görüntüde ölü yani siyah piksel olarak görünmüş ve görüntü kalitesini düşürmüştür. Ölü piksel haritasıda diğer dedektör performan haritasıyla uyum içerisindedir. Çatlamalardan kaynaklı etki göz ardı edildiğinde en az ölü piksel yine 2. bölgededir.



Görsel 5.34. 2. FPA in ölü piksel haritası

5.3.2. N-nBn yapılı MWIR/MWIR çift dalgaboylu FPA görüntüleme

Bu tez çalışması kapsamında, çift dalgaboylu 2-3 μm ve 3-4 μm aralıklarında çalışan N-nBn yapısından başarılı FPA üretilmiş ve termal görüntü alınmıştır. FPA soğutulurken ve görüntüleme anında dedektör üzerine uygulanan gerilim, entegrasyon süresi, kazanç ve resim hızı gibi parametreler değiştirilerek FPA'nin vermiş olduğu termal tepki maksimum seviyede tutulmaya çalışılmıştır. Fakat FPA soğudukça dedektör üzerinden geçen akım seviyesi ve ROIC kapasitörlerinin doluluk oranının çok düştüğü gözlemlenmiştir. Dedektör daha yüksek gerilim seviyelerinde daha iyi tepki verdiği için dedektör gerilim seviyesi mevcut görüntüleme elektroniği konfigürasyonun da uygulanabilecek maksimum seviye olan 2,2V'a kadar artırılmış ve resim hızı kısılarak entegrasyon süresi makul kapasitör doluluk oranı elde edebilmek için 100 ms mertebelerine çıkarılmıştır ve görüntüleme bu noktada yapılabilmektedir. Anlatılan bu kart elektroniği ve yazılım sınırlamaları sebebiyle görüntüleme sadece uzun dalgaboyunda gerçekleştirilmiştir. Görsel 5.35'de N-nBn yapılı FPA'e ait uzun dalgaboyundaki görüntülere yer verilmiştir.

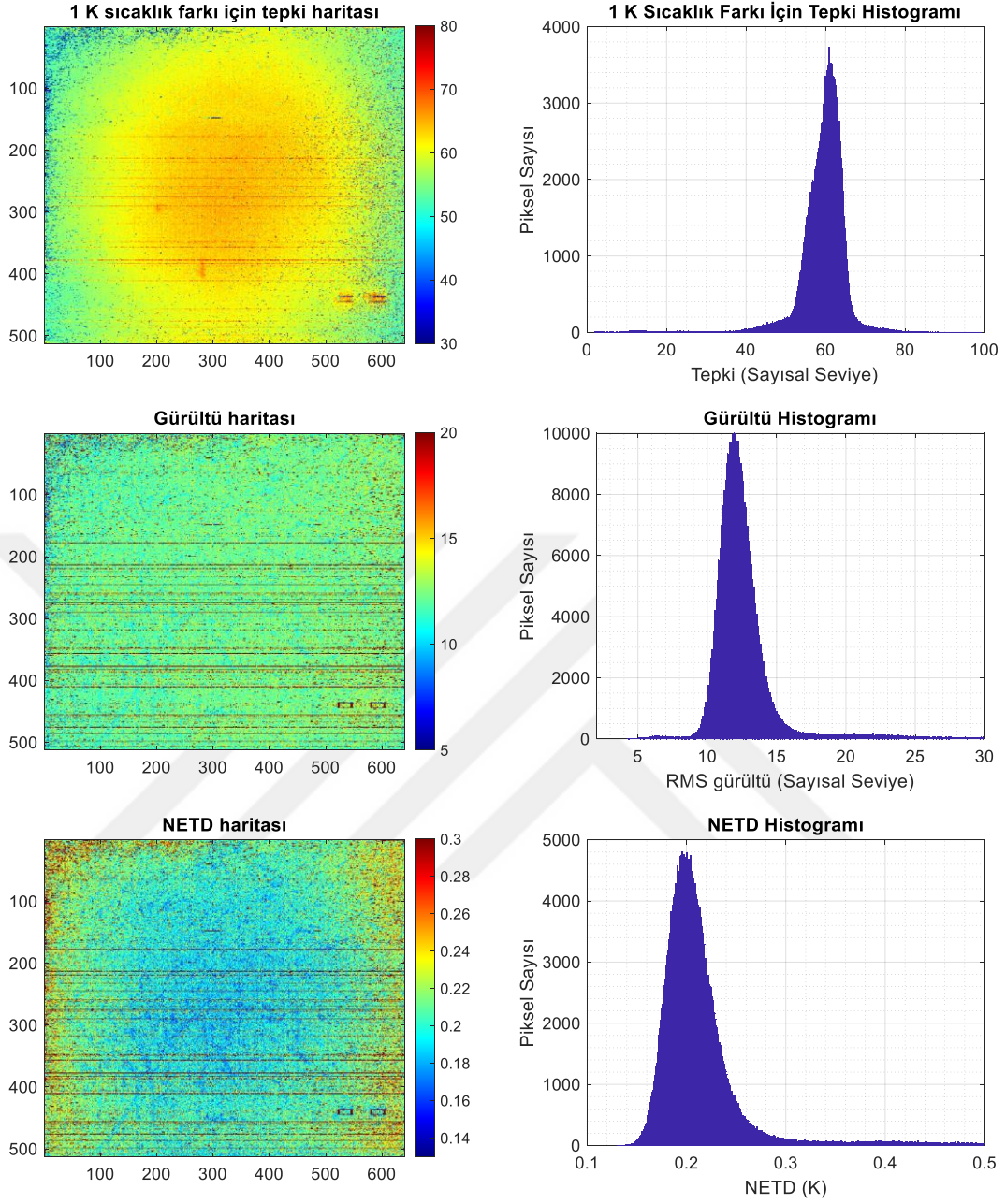
FPA bu noktada sıvı azot sıcaklığında değil de daha yüksek bir sıcaklıkta sabit tutulmaya çalışılmıştır. Maalesef görüntüleme Dewar'ında sıcaklık sensöründeki sorunlar nedeniyle görüntülemenin ve ölçümlerin yapıldığı sıcaklık tespit edilememiştir. Dedektör çalışma sıcaklığı tayin edilemese bile soğutulan bu dedektörü N-pBin yapılı MWIR görüntülerinden ayıran en önemli özelliği soğutma anında dedektör yapısında kırılma ve çatlamların olmamasıdır.



Görsel 5.35. Çift dalgaboyunda çalışan dedektörün uzun dalgaboyunda elde edilen görüntüsü

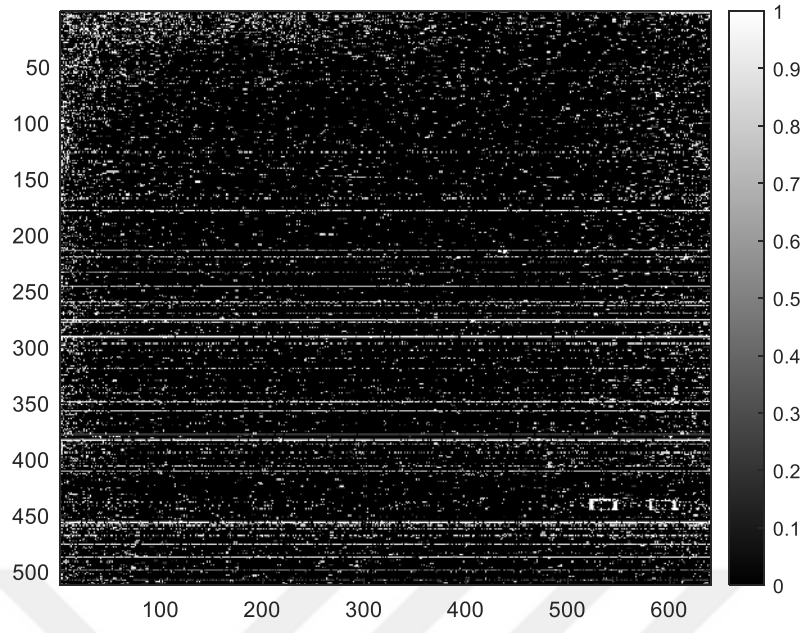
Yapılan görüntüleme sonrası tepki, gürültü ve NETD hesaplamaları yapılmış ve her bir performans parametresinin haritası ve histogramı Şekil 5.8’de verilmiştir. Görüntü haritalarında görülen yatay çiziklerin yüksek gürültü ve düşük tepkili satırlardan gelmektedir. Bu durum ya kart elektroniğinden ya da okuma devresinden kaynaklı olabilmektedir. Görüntüleme sonrası tüm histogramlarda benzer olarak görülen sinyallerin uzamış kuyruk kısımları elektronik veya FPA üretim kaynaklı gürültü sebebiyle oluşmaktadır. Termal görüntülemelerde standart olarak gözlemlenen bu dağılım köşelere doğru gidildikçe piksellerin görüş alanının daralmasından kaynaklı tepki haritasında tipik $\text{Cos}^4\theta$ dağılımı hakimdir. Performans haritalarından Tepki ve NETD radyal dağılıma sahipken, gürültü haritası oldukça homojen bir dağılım sergilemiştir. NETD haritası gürültü ve tepkinin bir yansıması olduğu için yine $\text{Cos}^4\theta$ etkisinin gözlenmesi oldukça normaldir.

Homojen gürültü dağılımına sahip bu dedektörün NETD değeri yüksek ve ortalama değerden 3 kat küçük olanlardan yapılan hesaplamada düzensizlik dağılımı ortalaması 0,275 çıkmıştır.



Şekil 5.8. Çift dalgaboyunda algılama yapan N-pBin yapısının görüntü karakterizasyon sonuçları

Dedektörün ölü piksel dağılımı yatay çizgiler hariç homojen dağılım sergilemiştir. Sol üst köşede ölü piksel yoğunluğu biraz daha fazla olup bunların hibridizasyondan kaynaklı olabileceği değerlendirilmiştir. NETD değeri $>0,3$ mK olan pikseler haritada ölü piksel olarak işaretlenmiş ve ölü piksel oranı %3,5 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, ölü piksellerin büyük birçoğunlu çiftli davranış sergilemiş ve bu durum görüntüleme elektroniğiyle ilişkilendirilmiştir. FPA ait ölü piksel haritası Görsel 5.36’da sunulmuştur.



Görsel 5.36. Çift dalgaboyunda algılama yapan N -pBin yapısına ait FPA ölü piksel haritası

6. SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında farklı dalga boylarında N yapılı InAs/AlSb/GaSb bariyerli süperörgü yapılarının üretimi ve karakterizasyonu hedeflenmiştir. Teorik hesaplamalarla yapı tasarımların bant modellemeleri yapılmış ve çalışmaya dahil edilmiştir. Tasarlanan yapılar büyütücü firma tarafından büyütülmüştür. E-SWIR dalgaboyunda N-pBin süperörgü dedektör çalışmaları literatürde örneği bulmadığı için öncelik test dedektörü üretimine ve karakterizasyonuna verilmiştir. Nispeten literatürde örnek teşkil edebilecek kızılötesi görüntüleme araştırmaların bulunduğu MWIR dalga boylu N-pBin ve çift renkli MWIR/MWIR N-nBn süperörgü yapılarından dizin dedektör üretimleri yapılmıştır. Dolayısıyla, bu dedektör çalışmalarında elektro-optik karakterizasyonlar FPA formatında gerçekleştirilmiştir.

Fabrikasyonun, dedektör performansı üzerinde ciddi etkisi olması sebebiyle çalışmada üretimin tüm basamakları çeşitli optimizasyon adımlarından geçirilmiştir. Süperörgü dedektörleri yapısı gereği de karmaşık bir tasarıma sahip olduğu için fabrikasyonun oldukça basitleştirilmesi sağlanmıştır. Kontrollü ve seçici aşındırma için çok sayıda farklı ıslak aşındırma denemeleri yapılmıştır. Çalışma sonucunda N yapılı süperörgüler için seçici aşındırıcı bulunamamıştır. Bu sebeple kontrollü aşındırma için literatürde sıklıkla kullanılan ve yapıya uygun $H_3PO_4:C_6H_8O_7:H_2O_2:H_2O$ aşındırıcısıyla yola devam edilmiştir. Aşındırma derinliklerinde üstün kontrol sağlayabilmek için aşındırıcı karışım oranı değiştirilerek hızlı aşındırma hızı 450nm/dk ve yavaş aşındırma hızı 60nm/dk olan 5 gr:20 ml:200 ml:20 ml ve 2 gr:8 ml:400 ml:4ml olmak üzere iki ayrı karışım oranı belirlenmiştir. Dedektör performansında kritik etkisi olan pasivasyon farklı sıcaklıklarda kaplanarak ve dedektör performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Farklı sıcaklıklarda kaplanan SiO_2 pasivasyonların karanlık akımı, pasivasyonsuz test dedektörüyle birbirlerine yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Bu sebeple, süperörgü bant yapısını ve yapı yüzey morfolojisini bozma ihtimali en az olan düşük kaplama sıcaklığı en uygun pasivasyon kaplaması olduğuna karar verilmiştir. Yapılan ana adım optimizasyonları sayesinde başarılı test piksel üretimleri rutin, homojen ve tekrarlanabilir bir şekilde yapılmıştır. Test dedektör üretimi dışında FPA üretimleri içinde metalizasyon Lift-off, pasivasyon kaplama ve aşındırma ve indiyum topçuk oluşturma gibi litografi optimizasyon çalışmaları yapılmış ve FPA üretimlerinde de başarılı bir şekilde tekrar edilebilir fabrikasyon reçetesi oluşturulmuştur.

e-SWIR aralığında çalışan test dedektör üretimi yapılmış ve elektro-optik karakterize edilmiştir. Çalışmanın bu bölümü literatürde ilk olma özelliğine sahiptir. Bu sebeple, çalışmanın bu bölümü makale haline dönüştürülmüş ve literatürdeki yerini alması beklenilmektedir. Kesim dalgaboyu literatürde bulunan diğer SWIR dedektörlerinden oldukça geniş olup kesim dalgaboyu 2,9 μm 'dir. Ayrıca sağladığı bu avantaja ek kuantum verimliliğinin de ortalama değeri %40 civarında ve karanlık akım yoğunluğu 125 K sıcaklığında 10^{-6} A/cm² dir. Dedektörün karanlık akım yoğunluğu, kesim dalgaboyu ve çalışma sıcaklığı gibi performans parametreleri dikkate alındığında literatür çalışmalarıyla benzer performans özellikleri göstermektedir. Ancak, geniş kesim dalgaboyu değeri bu yapının potansiyelini öne taşımaktadır. Gelecek çalışmalarımızda FPA üretimi, e-SWIR bandında görüntüleme, FPA elektro-optik karakterizasyonu gibi performans değerleri incelenecektir.

FPA çalışmalarında pek çok fabrikasyon denemesi yapılmış ve üretimlerdeki litografi sorunları çözülmüştür. Bu tez kapsamında elde edilen görüntülemelerde literatürde sıklıkla karşılaşılan kızılötesi görüntü çerçevesi gözlenmemiştir. Fakat çerçevenin temel kaynağı hakkında net bir kaniya varılamamıştır. Soğutmalı dedektör teknolojisini ana problemlerinden ilki termal genleşme uyumsuzluğu ve sonuçta FPA'de meydana gelen çatlaklardır. Termal genleşme kaynaklı yaşanan çatlaklar alt dolgu ve hibritleme optimizasyonlarıyla zaman zaman çözüm sağlanmıştır. Dedektör piksellerin aşındırma derinliğinin performans üzerindeki etkisi incelenmiş ve böylece en uygun aşındırma derinliğinin belirlenmesi hedeflenilmiştir. Bunun için, MWIR aralığında farklı üretim adımlarına sahip dört bölge dedektör performansında en iyi sonuçları veren GaSb alt kontaklı ve şapkasız dedektör piksel alanı olmuştur. Çalışmaların devamında, dedektör performans etkisinin netleşmesi için yeni FPA üretimi yapılacaktır.

Çift renkli FPA görüntüleme düzeneğinin elektronik kart ve yazılım sınırlaması sebebiyle sadece uzun dalgaboyunda görüntü alınabilmiştir. Devam eden dönemlerde uygun elektronik kart ve yazılımla çift dalgaboyunda görüntüleme çalışmaları amaçlanmıştır. Çift renkli MWIR/MWIR dedektöründe görüntüleme yapılan uzun dalgaboyu dedektör performansı bu tez çalışmaları kapsamında üretilen tüm FPA'ler arasında en iyi değerlere sahiptir. Fakat, standart süperörgü dedektör performansı düşünüldüğünde bu değer iyileşmesi gerekmektedir. Bu FPA'nin piksel düzensizliği 0,275 mertebelerinde olsa da literatürde referans alınabilecek benzer çalışmalar mevcut

değildir. Bu nedenle, bilimsel çalışmalara devam edilerek literatürdeki açığın kapatılması planlanmaktadır.

İlerleyen çalışma döneminde, FPA üretimlerine devam edilecektir. Tez kapsamında çalışmalara başlanılan seçici taban kaldırma adımı geliştirilecek ve Back-end prosesine uyarlanacaktır. Böylece çift dalgaboyunda çalışan yüksek performanslı görüntüleme çalışmaları sürecektir. Buna ek olarak, tez çalışmasına dahil edilmeyen epoksi deneme çalışmaları sonuçlandırılacaktır. Gelecek çalışma planları arasında Lift-off kolaylığı açısından tezde bahsedilen negatif rezist uygulamaları prosese dahil edilecektir.

Sonuç olarak bu tez çalışmanın temelini oluşturan N yapılı pBin ve nBn süperörgü tasarımları farklı dalga boylarında yüksek performansta çalışma kabiliyetine sahip olabilecekleri gösterilmiştir. Bilimsel çalışmalarda mevcut açığı kapatmak için temeller atılmıştır.

KAYNAKÇA

- [1] Rogalski, A. (2012). History of infrared detectors. *Opto-electronics Review*, 279-308.
- [2] Plis, E.A. (2007). Mid-IR Type-II InAs/GaSb Nanoscale Superlattice Sensors. Doktora Tezi. New Mexico Üniversitesi.
- [3] Joseph D. B. (2006). *Medical Devices and Systems*, CRC Taylor and Francis group.
- [4] Seuser, A., Kurnik, K., Mahlein, A. (2018). Infrared Thermography as a Non-Invasive Tool to Explore Differences in the Musculoskeletal System of Children with Hemophilia Compared to an Age-Matched Healthy Group, *Sensors*, 1-10.
- [5] Coffey, V. C. (2011). Seeing in The Dark: Defense Applications of IR imaging. *Optic and Photonic News*, 27-31.
- [6] Rogalski, A. (200). *Infrared Detectors*. Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam.
- [7] Arıkan, B. (2015). InAs/GaSb Tip-II Süperörgü Kızılötesi Fotodedektör Yapıların MBE Tekniği İle GaSb ve GaAs Altaşlar Üzerine Büyütülmesi. Doktora Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [8] Richards, A. (2017). Advantages of strained layer superlattice detectors for high-speed thermal events. *SPIE*, 10111, 101111B, 1-8.
- [9] Plis, E., Rodriquez, J.B., Krishna, S. (2011). InAs/(In)GaSb Type II Strain Layer Superlattice Detectors. *Comprehensive Semiconductor Science and Technology*, Edited by Bhattacharya, P., Fornari, R., Kamimura, H., Elsevier, 229-264.
- [10] Esaki, L. (1986). A bird's-eye view on the evolution of semiconductor superlattices and quantum wells. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 22(9), 1611-1624.
- [11] Harrispn, W. A. (1977). Elementary theory of heterojunctions. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 14(4), 016–1021.
- [12] Sai-Halasz, G.A., Esaki, L. and Harrison, W. A. (1978). InAs-GaSb superlattice energy structure and its semiconductor-semimetal transition. *Physical Review B*, 18(6), 2812.
- [13] Smith, D.L. ve Mailhiot, C. (1987). Proposal for strained type II superlatticeinfrared dedectors, *J. Appl. Phys.*, 62 (6), 2545-2548.
- [14] Sullivan, G. J., Ikhlassi, A., Bergman, J., Dewames, R. E., Waldrop, J.R. (2005). Molecular beam epitaxy growth of high quantum efficiency InAs/GaSb superlattice detectors. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 23(3), 1144.
- [15] Savich, G. R., Pedrazzani, J. R., Sidor, D. E., Maimon, S., Wicks, G. W. (2011). Dark current filtering in unipolar barrier infrared detectors. *Applied Physics Letters*, 99, 121112, 1-3.
- [16] Thi, Y. L., Kamakura, Y., Mori, N. (2020). A comparison of mechanisms for improving dark current characteristics in barrier infrared photodetectors. *Japanese Journal off Applied Physics*, 59, 0444005,1-6.

- [17] Klipstein, P. (2008). XBN Barrier Photodetectors for High Sensitivity and High Operating Temperature Infrared Sensors. SPIE, 6940, 69402U, 1-12.
- [18] Rogalski, a., Kopytko, M., Martyniuk, P., (2018). Antimonide-based infrared detectors: A new perspective. SPIE Press, Washington, USA.
- [19] He, Z. (2016). MWIR and visible nBn photodetectors and their monolithically-integration for two color photodetector application. Doktora Tezi, USA, Arizona State Üniverisitesi
- [20] Meyer, J.R., Hoffman, C.A., Bartoli, F.J., Ram-Mohan, L.R. (1995). Type-II quantum-well laser for the mid-wavelength infrared. APL, 67, 757-759.
- [21] Aifer, E. H., Tischler, J. G., Warner, J. H., Vurgaftman, I., Kim, J. C., Meyer, J. R., Bennett, B. R., Whitman, L. J. (2005). W-structured type-II superlattice-based long- and very long wavelength infrared photodiodes. SPIE, 5732, 259- 272.
- [22] Aifer, E. H., Vurgaftman, I., Canedy, C. L., Warner, J. H., Jackson, E. M., Tischler, J. G., Meyer, J. R. (2007). Recent progress in W-structured type-II superlattice photodiodes. SPIE, 6479, 64790Y, 1-11.
- [23] Canedy, C. L., Aifer, E. H., Vurgaftman, I., Tischler, J.G., Meyer, J. R., Warner, J. H., Jackson, E. M., (2007). Antimonide Type-II “W” Photodiodes with Long-Wave Infrared R0A Comparable to HgCdTe. Journal of Electronic Materials, 36, 852-856.
- [24] Sharifi, h., Roebuck, M., Terterian, S., Jenkins, J., Tu, B., Strong, W., De Lyon., T. J., Rajavel, R. D., (2017). Advances in III-V Bulk and Superlattice-based High Operating Temperature MWIR Detector Technology. SPIE, 10177, 101770U, 1-6.
- [25] Delaunay, P.Y., Nguyen, B. M., Razeghi, M. (2009). Background limited performance of long-wavelength infrared focal plane arrays fabricated from Type-II InAs/ GaSb M-structure superlattice. SPIE, 7298, 72981Q, 1-12.
- [26] Nguyen, B. M., Razeghi, M., (2007). MWIR_M_Type-II M structure photodiodes: an alternative material design for midwave to long wavelength infrared regimes. 6479, 64790S, 1-10.
- [27] Hoang, A. M., Chen, G., Haddadi, A., Abdollahi Pour, S., Razeghi, M. (2012). Demonstration of shortwavelength infrared photodiodes based on type-II InAs/GaSb/AlSb superlattices. Applied Physics Letters, 100, 211101.
- [28] Nguyen, B. M., Hoffman, D., Delaunay, P. Y., Razeghi, M., (2007). Dark current suppression in type II In As Ga Sb superlattice long wavelength infrared photodiodes with M-structure barrier. Applied Physics Letters, 91, 163511.
- [29] Nguyen, B. M., Bogdavan, S., Abdollahi Porur, S., Razeghi, M. (2009). Minority electron unipolar photodetectors based on type II InAs/GaSb/AlSb superlattices for very long wavelength infrared detection. Applied Physics Letters, 95, 183502.
- [30] Salihoglu, O., Muti, A., Kutluer, K., Tansel, T., Turan, R., Ergun, Y., Aydinli, A. (2012). N structure for type-II superlattice photodetectors. Applied Physics Letters, 101, 073505.

- [31] Wu, H., Xu, Y., Li, J., Bai, L., Yu, H., Fu, D., Zhu, H., Song, G. (2017). High quantum efficiency N-structure type-II superlattice mid-wavelength infrared detector with resonant cavity enhanced design. *Superlattices and Microstructures*, 105, 28-33.
- [32] Du, Y., Xu, Y., Song, G. (2020). Theoretical analysis on the energy band properties of N- and M-structure type-II superlattices. *Superlattices and Microstructures*, 145, 106590.
- [33] Xie, Z., Deng, Z., Zou, X., Chen, B. (2020). InP-Based Near Infrared/Extended-Short Wave Infrared Dual-Band Photodetector. *IEEE Photonics technology letters*, 32(16), 1003-1005.
- [34] Uliel, Y., Elias, D.G., Sicron, N., Grimberg, I., Snapi, N., Paltiel, Y., Katz, M. (2017). InGaAs/GaAsSb Type-II superlattice based photodiodes for short wave infrared detection. *Infrared physics and technology*, 84, 63-71.
- [35] Nguyen, T. D., Kim, J. O., Kim, Y. H., Kim, E. T., Nguyen, Q. L., Lee, S. J. (2018). Dual-color short-wavelength infrared photodetector based on InGaAsSb/GaSb heterostructure. *AIP Advances*, 8, 025015.
- [36] Li, N., Chen, W., Zheng, D., Sun, J., Jia, Q., Jiang, J., Wang, G., Jiang, D., Xu, Y., Niu, Z. (2020). The investigations to eliminate the bias dependency of quantum efficiency of InGaAsSb nBn photodetectors for extended short wavelength infrared detection. *Infrared physics and technology*, 111, 103461.
- [37] Chevallier, R., Haddadi, A., McClintock, R., Dehzangi, A., Lopez-Dominguez, V., Amiri, P. K., Razeghi, M. (2018). High frequency extended short wavelength infrared heterojunction photodetectors based on InAs/GaSb/AlSb type-II superlattices. *IEEE journal of quantum electronics*, 54 (6), 4000305.
- [38] Razeghi, M., Dehzangi, A., Li, J. (2021). Multi-band SWIR-MWIR-LWIR type-II superlattice based infrared photodetector. *Results in optics*, 2, 100054.
- [39] Cohen-Elias, D., Snapi, N., Klin, O., Weiss, E., Shusterman, S., Meir, T., Katz, M. (2017). Minority carrier diffusion length for electron in an extended SWIR InAs/AlSb type-II superlattice photodiode. *Applied physics letters*, 111, 201106.
- [40] Ting, D. Z., Rafol, S. B., Khoshakhlagh, A., Soibel, A., Keo, S. A., Fisher, A. M., Pepper, B. J., Hill, C. J., Gunapala, S. D. (2020). InAs/InAsSb type-II strained layer superlattice infrared photodetectors. *Micromachines*, Review, 11, 958.
- [41] Jiang, J., Wang, G., Wu, D., Xu, Y., Chang, F., Zhou, W., Li, N., Jiang, D., Hao, H., Cui, S., Chen, W., Xu, X., Ni, H., Ding, Y., Niu, Z. (2022). High performance infrared photodetectors based on InAs/InAsSb/AlAsSb superlattice for 3,5 μm cutoff wavelength spectra. *Optic Express*, 30(21), 38208.
- [42] Razeghi, M., Haddadi, A., Suo, X.V., Adhikary, S., Dianat, P., Chevallier, R., Hoang, A. M., Dehzangi, A. (2016). High-performance short-wavelength infrared photodetectors based on type-II InAs/InAs_{1-x}Sb_x/AlAs_{1-x}Sb_x superlattices. *SPIE*, 9819, 98190A, 1-7.
- [43] Dehzangi, A., Haddadi, A., Chevallier, R., Zhang, Y., Razeghi, M. (2019). Fabrication of 12 μm pixel-pitch 1280x1024 extended short wavelength infrared

- focal plane array using heterojunction type-II superlattice-based photodetectors. *Semicond. Sci. Technol.*, 34, 03LT01.
- [44] Haddadi, A., Chevallier, R., Dehzangi, A., Razeghi, M. (2017). Extended short-wavelength infrared nBn photodetectors based on type-II InAs/AlSb/ GaSb superlattices with an AlAsSb/GaSb superlattice barrier. *Applied physics letters*, 110, 101104.
 - [45] Dehzangi, A., Haddadi, A., Chevallier, R., Zhang, Y., Razeghi, M. (2018). nBn extended short-wavelength infrared focal plane array. *Optics letters*, 43 (3), 591-594.
 - [46] Li, Y., Xiao, W., Wu, L., Xie, X., Lu, P., Wang, S. (2019). Dark current characterizatic of p-i-n and nBn MWIR InAs/GaSb superlattice infrared detectors. *Optoelectronics global conference*, 978, 70-75.
 - [47] Walther, M., Rehm, R., Fuchs, F., Schmitz, J., Fleibner, J., Cabanski, W., Eich, D., Finck, M., Rode, W., Wendler, J., Wollrab, R., Ziegler, J. (2005). 256x256 focal plane array midwavelenght infrared camera based on InAs/GaSb short-period superlattices. *Journal of electronic materials*, 34 (6), 722-725.
 - [48] Lv, Y. Q., Zhang, L. X., Si, J. J., Peng, Z. Y., Zhang, L., Cao, X. C., Zhang, X. F., Ding, J. X., Zhu, X. B., Yao, G. S., Zhang, X. L., Niu, Z. C. (2015). Mid-wavelenght focal plane arrays infrared detector based on type-II InAs/GaSb superlattice. *Opt. Quant Electron*, 47, 1731-1738.
 - [49] Plis, E., Kim, H. S., Rodriguez, J. B., Bishop, G. D., Sharma, Y. D., Khoshakhlagh, A., Dawson, L. R., Bundas, J., Cook, R., Burrows, D., Dennis, R., Patnaude, K., Reisinger, A., Sundaram, M., Krishna, S. (2008). nbn Based infrared detectors using type-II InAs/(In, Ga)Sb superlaattices. *SPIE*, 6940, 69400E, 1-10.
 - [50] Katayama, H., Murooka, J., Naitoh, M., Sato, R., Kawasaki, S., Itoh, Y., Sugano, S., Takekawa, T., Kimata, M., Patrashin, M., Hosaka, I., Iguchi, Y. (2013). Development status of Type II superlattice infrared detector in JAXA. *SPIE*, 8704, 870416, 1-7.
 - [51] Katayama, H., Hirose, M., Sato, S., Shinozaki, K., Kimura, T., Balasekaran, S., Inada, H., Iguchi, Y., Kimata, M. (2021). Development status of T2SL infrared detector in JAXA. *SPIE*, 11741, 117410V, 1-8.
 - [52] Delmas, M., Höglund, L., Ivanov, R., Ramos, D., Zurauskaite, L., Becanovic, S., Almqvist, S., Evans, D., Tinghag, P., Rihtnesberg, D., Fattala, S., Smuk, A., Smuk, S., Costard, E. (2022). Hot SWaP and HD detectors based on type-II superlattices at IRnova. *SPIE*, 12107, 121070R, 1-8.
 - [53] Höglund, L., Asplund, C., Marcks von Würtemberg, R., Gamfeldt, A., Katariaa, H., Lantz, D., Smuk, S., Sontard, E., Martijn, H. (2016). Advantages of T2SL-Results from production and new development at IRnova. *SPIE*, 9819, 98190Z, 1-10.
 - [54] Oguz, F., Ulker, E., Arslan, Y., Nuzumlali, Ö. L., Bek, A., Ozbay, E. (2022). High performance 15 μm pitch 640x512 MWIR InAs/GaSb Type-II superlattice sensors. *IEEE journal of quantum electronics*, 58 (1) 4200106.

- [55] Xie, H., Lin, H., Zhou, Z., Wen, Z., Sun, Y., Hao, J., Hu, S., Dai, N. (2023). Room temperature InAsSb pBin detectors form id-infraared aapplication. *Infrared physics and technology*, 128, 104475.
- [56] Rehm, R., Walther, M., Rutz, F., Schmitz, J., Wörl, A., Masur, J.M., Scheibner, R., Wendler, J., Ziegler, J. (2011). Dual-color InAs/GaSb superlattice focal-plane array technology. *Journal of electronic materials*, 40, 8, 1738.
- [57] Walther, M., Rehm, R., Schmitz, J., Niemasz, J., Rutz, F., Wörl, A., Kirste, L., Scheibner, R., Wendler, J., Ziegler, J. (2011). Defect density reduction in InAs/GaSb type-II superlattice focal plane array infrared detectors. *SPIE*, 7945, 79451N.
- [58] Walther, M., Rehm, R., Schmitz, J., Fleissner, J., Rutz, F., Kirste, L., Scheibner, R., Wendler, J., Ziegler, J. (2010). InAs/GaSb type-II superlattices for advanced 2nd and 3nd generation detectors. *SPIE*, 7608, 76081Z.
- [59] Delaunay, P.Y., Nosh, B.Z., Gurga, A.R., Terterian, S., Rajavel, D. (2017). Advances in III-V based dual-band MWIR/LWIR FPAs at HRL. *SPIE*, 10177, 101770T.
- [60] Xie, L., Wang, G., Sun, Q. (2020). Advances and trends of type-II superlattice infrared detectors. *SPIE*, 11563, 115630K.
- [61] Dante, G.C., Tilton, M. L. (1999). Pseudopotential methods for superlattices: Applications to mid-infrared semiconductor lasers. *Journal of Applied Physics*, 86, 1420.
- [62] Dier, O., Lin, C., Grau, M., Christian, M. (2004). Selective and non-selective wet-chemical etchants for GaSb-based materials. *Semicond. Sci. Technol.*, 19, 1250-1253.
- [63] Kowalewski, A., Martyniuk, P., Markowska, O., Benyahia, D., Gawron, W. (2016). New wet etching solution molar ratio for processing T2SLs InAs/GaSb nBn MWIR infrared detectors grown on GaSb substrates. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 42, 261.
- [64] Changhi, R., Cervera, C., Ait-Kaci, H., Grech, P., Rodriguez, J.B., Christol, P. (2009). Wet etching and chemical polishing of InAs/GaSb superlattice photodiodes. *Semicond. Sci. Technol.*, 24, 065010.
- [65] Song, L., Degroote, S., Choi, K.H., Broghs, G., Heremans, G. (2003). Release of epitaxial layers grown on InAs substrates. *Electrochemical and Solid State Letters*, 6, G25.
- [66] Kutty, M.N., Plis, E., Khoshakhlagh, A., Myers, S., Gautam, N., Smolev, S., Sharma, Y.D., Dawson, R., Krishna, S., Lee, S.J, Noh, S.K. (2010). Study of surface treatments on InAs/GaSb superlattice LWIR detectors. *Journal of Electronic Materials*, 39, 10.
- [67] Jia, W., Cheng, X.Z., Xin, C.J., Li, H. (2019). Wet etching for InAs/Ga(As)Sb superlattice long wavelength infrared detectors. *J. Infrared Milim. Waves.*, 38, 5, 549-553.

- [68] Kim, H., Plis, E., Myers, S., Khoshakhlang, A., Gautam, N., Kutty, M.N., Sharma, Y.D., Dawson, L.R., Krishna, S. (2009). Improved performance of InAs/GaSb Strained Layer Superlattice detectors with SU-8 passivation. SPIE, 7467, 74670U-1.
- [69] Salihoglu, O., Muti, A., Kutluer, K., Tansel, T., Turan, R., Kocabaş, C. Aydinli, A. (2012). Atomic layer deposited Al₂O₃ passivation of type-II InAs/GaSb superlattice photodetectors. Journal of Applied Physics, 111, 074509.
- http-1:** https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum (Erişim tarihi: 05.01.2023)
- http-2:** https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_window (Erişim tarihi: 13.01.2023)
- http-3:** https://www.vworldterrain.com/Gb/viewterra_sensors_images_gallery.html (Erişim tarihi: 15.01.2023)
- http-4:** https://inflammationimaging.com/?page_id=2251 (Erişim Tarihi: 29.01.2023)
- http-5:** <https://www.luciepatelvarekova.com/why-should-every-woman-add-thermal-imaging-to-their-breast-health-protocol/> (Erişim tarihi: 29.01.2023)
- http-6:** <https://www.flir.com/discover/cores-components/can-thermal-imaging-see-through-walls/> (Erişim tarihi: 08.02.2023)
- http-7:** <https://www.sensorsinc.com/gallery/images/> (Erişim tarihi: 08.02.2023)
- http-8:** <https://www.concordia.ca/news/stories/2019/10/01/thermal-imaging-of-housing-stock-can-tell-us-where-energy-costs-will-hurt-say-concordia-researchers.html> (Erişim tarihi: 11.02.2023)
- http-9:** https://www.photonics.com/Articles/SWIR_Imaging_An_Industrial_Processing_Tool/a25134 (Erişim tarihi: 11.02.2023)
- http-10:** <http://www.tuiservices.com/infrared-inspections-infrared-thermography.html> (Erişim tarihi: 11.02.2023)
- http-11:** <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2019/milky-way-s-center-will-be-revealed-by-nasa-s-webb-telescope> (Erişim tarihi: 12.02.2023)
- http-12:** <https://www.tudelft.nl/en/2022/lr/far-infrared-detector-kid-reaches-highest-possible-sensitivity> (Erişim tarihi: 13.02.2023)
- http-13:** https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semi_en/kap_5/backbone/r5_1_4.html (Erişim tarihi: 14.02.2023)

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0002-0175-538X

Ad Soyad : Seval ŞAHİN

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim:

- 2017-2023 Eskişehir Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Katıhal Fiziği Bilim Dalı.
- 2011-2014 Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Katıhal Fiziği Bilim Dalı.
- 2006-2011 Anadolu Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü.

İş Tecrübesi:

- **2019-Halen**, Uzman Araştırmacı, ODTÜ MEMS (MikroElektroMekanik Sistemler) Merkezi,
- **2015-2019**, Ar-Ge Mühendisi, EON Photonics, Ermaksan, Opto-Elektronik Ar-Ge Merkezi,
2015-2017, Misafir Araştırmacı, Bilkent Üniversitesi, İleri Araştırma Laboratuvarı,
- **2011-2015**, Araştırmacı, Anadolu Üniversitesi, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı,

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Arslan, S., Şahin, S., Demir, A., ve Aydın, A. (2018). IFVD-based large intermixing selectivity window process for high power laser diodes. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 10682, 106821.
- Arslan, S., Demir, A. Şahin, S., ve Aydın, A. (2018). Conversation of Quantum efficiency in quantum well inetrmixing by stress engineering with dielectric bilayers. Semiconductor Science and Technology, 33, 2.

- Arpaway, B., Şahin, S., Arıkan, B. ve Serincan, U. (2014). Redundant Sb condensation on GaSb epilayers grown by molecular beam epitaxy during cooling procedure. Thin Solid Films, 564, 110- 114.
- 2013, 9th Nanoscience and Nanotechnology Congress, MBE Grown GaSb Epi-layers on GaSb Substrate: The Effect of Growth Parameters, Erzurum– Turkey.
- 2013, 9th Nanoscience and Nanotechnology Congress, Characterization of GaSb Epi- layers grown on GaSb substrate, Erzurum – Turkey

