



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**III-V GRUBU YARIİLETKENLERE DAYALI AYGIT ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Burak KAY

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Programı

DANIŞMAN

Prof. Dr. Ayşe EROL

II. DANIŞMAN

Prof. Dr. Tolga GÜVER

Eylül, 2021

İSTANBUL

Bu çalışma 21.09.2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziğı Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Ayşe EROL (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Doç. Dr. Ferhat NUTKU
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Merih SERİN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Fen - Edebiyat Fakültesi



- **İntihal Programı Beyanı**

20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

- **Proje Destekleri**

Bu tez 2016K121370 numaralı proje ile T.C. Kalkınma Bakanlığı tarafından desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Uzun eğitim hayatım sürecinde, İstatistik Bölümü ile başlamış olduğum yolculuğa, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümünün ardından Fizik Bölümü ile devam etmemi, ilk tanıdığım anda düşündüren, manevi danışmanım Prof. Dr. M. Çetin ARIKAN'a, Prof. Dr. M. Çetin ARIKAN ve Merhum Prof. Dr. Naci BALKAN'ın bilgisini ve fikirlerini harmanlayarak, alanında önemli işler başaran, nice öğrenciler yetiştiren ve yetiştirecek olan biricik danışmanım Prof. Dr. Ayşe EROL'a, Astronomi ve Fizik düşüncelerimi birleştirmemi sağlayan ikinci danışmanım Prof. Dr. Tolga GÜVER'e, aksilikler ile dolu olan tez yolculuğumda deneysel çalışmalarımda destek olan Dr. Öğr. Üyesi Fahrettin SARCAN'a ve Nano ve Optoelektronik Araştırma Laboratuvarında tanıdığım tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Hayatta bazen ve nadiren iyi insanlarla karşılaşsınız, beklentisizce size yardım ederler. Maddi manevi her durumda, öz abim olsa bu kadar desteklemezdi dediğim, manevi abim Naci HACİBAŞIOĞLU'na minnetimi sunarım. Beni her zaman usanmadan dinleyen, her zaman fikir alışverişinde olduğum, okulda hocam dışarıda arkadaşım olabilen, klasik müzik konserlerinde az koşturmadığımız, sevgili hocam Doç. Dr. Ferhat NUTKU'ya en içten dileklerimle teşekkürlerimi sunarım. Hayatta birçok arkadaş gelip geçici olsa da hiçbir zaman iletişimi koparmayacağım, sırdaşım, destekçim ve sevgili arkadaşım Tuğba BOZTEPE'ye hayatımda olduğu için teşekkür ederim. Yakın zamanda anne olan fakat öncesinde bana anne gibi davranan, her eksliğime koşan, her derdimi derdi sayan, yediğimiz içtiğimiz ayrı gitmeyen, hakkını ödeyemeyeceğim sevgili hocam Dr. Öğr. Üyesi Kamuran KARA KOÇ'a teşekkürü bir borç bilirim. Kedi köpek gibi tartışsak da bazen kafasını ütülesem de dostluğunu hiçbir şeye değişmeyeceğime emin olduğum can dostum polis memuru Ramazan ÖZKUL'a teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemi sağlayan, dik durmam için elinden geleni yapan emekçi Annem Gülizar KAY'a ve fikirlerimi her zaman destekleyen Babam Cahit Ahmet KAY'a teşekkür ederim. Her ne zorluk çıkarsa çıksın, yılmadan azimle istenilen sonucun göstergesi olan bu tezi Annem Gülizar KAY'a ithaf ediyorum.

*Hiç tadılmamış bâdedir gül rengi dudakların,
Aşk sözleri söyler bana her dem gözlerinle kaşların,
Meftun olmuş Burak sana; deme sakın tek hayalin ben miyim? Şaşkınım.
İzanim ulvi ilk bakışta aşk böyleymiş buldu bu ten seni cananım...*

Hayatıma ansızın giren, adı bende saklı kişiye kalbimde her zaman olacağını unutmaması için; Aşkla ve sevgilerimle...

Eylül, 2021

Burak KAY

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	x
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	xiii
ÖZET	xv
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR	6
2.1. SEYRELTİK AZOTLU III-V GRUBU ALAŞIMLAR	6
2.2. KUANTUM KUYUSU SİSTEMLERİ	11
2.2.1. Yarıiletken Yapılarda Kuantum Kuyusu Sistemleri	11
2.2.2. Kuantum Kuyusu Sistemlerinde Soğurma	12
2.2.3. Çoklu Kuantum Kuyusu Yapıları ve Süperörgü	14
2.2.4. Dağıtılmış Bragg Yansıtıcıları	15
2.3. FOTODEDEKTÖR PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ	19
2.3.1. Absorpsiyon	19
2.3.2. Duyarlılık ve Kuantum Verimliliği	20
2.3.3. Bant Genişliği ve Cevap Süresi	21
2.3.4. Gürültü	22
2.4. FOTODEDEKTÖRLER VE ÇALIŞMA PRENSİPLERİ	23
2.4.1. p - n ve p - i - n Eklem Fotodedektörler	23
2.4.2. p - i - n Eklem Çığ Fotodedektörler	26
2.4.2.1. İmpakt İyonizasyon	27
2.4.2.2. Çığ Fotodedektörlerde Gürültü	29
2.4.2.3. Ayrılmış Absorpsiyon ve Kazanç Bölgesi p - i - n Fotodedektörler	29

2.4.2.4. Kademeli Ayrılmış Absorpsiyon ve Kazanç Bölgesi p-i-n Fotodedektörler	32
2.4.2.5. Çoklu Kuantum Kuyulu p-i-n Eklem Çıg Fotodedektörler	33
2.4.2.6. Rezonans Kavitesi	34
2.4.2.7. Ayrılmış Çoğalma, Yük ve Absorpsiyon Bölgesi Fotodedektörler	37
3. MALZEME VE YÖNTEM	38
3.1. ÖRNEK YAPILARI VE TASARIMLARI	38
3.2. FOTODEDEKTÖR FABRİKASYONU	44
3.2.1. Kristal Kesme	44
3.2.2. Temizleme	45
3.2.3. Fotodirenç Kaplama	46
3.2.4. Maske ve Maske Hizalayıcı	46
3.2.5. Kimyasal Aşındırma	48
3.2.6. Metalizasyon	49
3.2.7. Lift-Off (Kaldırma) İşlemi	51
3.2.8. Tel Bağlama	51
3.2.9. Fabrikasyon Süreci ve Uygulama Parametreleri	53
3.2.9.1. Rezonans Kaviteli GaInNAs SACM Fotodedektörlerin Fabrikasyonu	53
3.2.9.2. Rezonans Kaviteli GaInNAs p-i-n Çıg Fotodedektörlerin Fabrikasyonu	56
3.3. KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ	58
3.3.1. Akım – Voltaj	58
3.3.2. Yansıma Ölçümü	59
3.3.3. Fotoluminesans	60
3.3.4. Spektral Fotoakım	61
4. BULGULAR	63
4.1. REZONANS KAVİTELİ SACM FOTODEDEKTÖRLER	63
4.1.1. Akım - Voltaj Ölçüm Sonuçları	68
4.1.2. Spektral Fotoakım Ölçüm Sonuçları	71
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	74
KAYNAKLAR	78
ÖZGEÇMİŞ	83

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1:	GaInNAs alaşımları için bant aralığı (eV) örgü sabiti(Å) değişimi (Henini, 2005).	7
Şekil 2.2:	BAC modeline göre GaNAs'ın iletkenlik bandı yapısı (Wu ve diğ., 2002).	8
Şekil 2.3:	$Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaN_zAs_{1-z}$ kuantum kuyusu yapısı ve altbant enerjileri.	11
Şekil 2.4:	a) AlGaAs/GaAs Kuantum kuyusu sisteminde izinli geçişler ve b) AlGaAs/GaAs çoklu kuantum kuyusu sisteminde soğurma spektrumu (Erol, 2013).	13
Şekil 2.5:	a) Çoklu Kuantum Kuyusu Sistemi b) Süperörgü.	14
Şekil 2.6:	d kalınlıklı ince film tabakası.	16
Şekil 2.7:	Kırılma indisleri n_1 ve n_2 olan m tane çift, çeyrek dalgaboyu kalınlığına sahip Bragg yansıtıcıları.	17
Şekil 2.8:	Bazı yarıiletkenlerin dalgaboyuna bağlı absorpsiyon katsayısı değişimi (Kasap, 2013). 20	
Şekil 2.9:	$p-n$ eklem denge durumundaki bant diyagramı.	23
Şekil 2.10:	$p-n$ eklem fotodedektörün a) basitleştirilmiş dedektör tabaka yapısı ve b) geri besleme durumundaki bant diyagramı.	24
Şekil 2.11:	$p-i-n$ eklem fotodedektörün a) basitleştirilmiş dedektör tabaka yapısı ve b) geri besleme durumundaki bant diyagramı.	25
Şekil 2.12:	$p-i-n$ eklem χ ğ fotodedektörün a) basitleştirilmiş dedektör tabaka yapısı ve b) konuma bağlı olarak iç elektrik alan değişimi.	27
Şekil 2.13:	$p-i-n$ eklem χ ğ fotodedektörlerde a) $\alpha_e = \beta_h$ b) $\alpha_e \gg \beta_h$ için ve c) bant diyagramı üzerinde impakt iyonizasyon mekanizması.	28
Şekil 2.14:	SAM $p-i-n$ eklem χ ğ fotodedektörün basitleştirilmiş dedektör tabaka yapısı gösterimi.	30
Şekil 2.15:	SAM $p-i-n$ eklem χ ğ fotodedektörlerde a) konuma bağlı olarak iç elektrik alan değişimi b) $\beta_h \gg \alpha_e$	31
Şekil 2.16:	a) SAM GaInAs/InP ve b) SAGM GaInAs/GaInAsP/InP $p-i-n$ eklem fotodedektör sistemi bant diyagramı.	32
Şekil 2.17:	Geri besleme altında GaInNAs/GaAs çoklu kuantum kuyulu $p-i-n$ χ ğ fotodedektör. .	33
Şekil 2.18:	GaInNAs/GaAs çoklu kuantum kuyulu $p-i-n$ χ ğ fotodedektörde sıcaklığa bağlı kaçış zamanı (Khalil ve Balkan, 2014).	33
Şekil 2.19:	Fabry-Pérot kaviteli $p-i-n$ eklem fotodedektör.	35

Şekil 2.20: AlAs ve GaAs yarıiletkenin dalgaboyuna bağlı kırılma indisleri.	36
Şekil 2.21: AlAs/GaAs DBR çiftlerinin farklı periyotlar için hesaplanan dalgaboyuna bağlı teorik yansıma spektrumu.	36
Şekil 2.22: SACM fotodedektörün a) basitleştirilmiş dedektör tabaka yapısı ve b) konuma bağlı olarak iç elektrik alan değişimi.	37
Şekil 3.1: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM fotodedektörünün SimWindows kullanılarak hesaplanan denge durumu bant yapıları ve iç elektrik alan dağılımları.	39
Şekil 3.2: Tasarlanan Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM Fotodedektör Yapısı.	41
Şekil 3.3: Tasarlanan Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaAs$ SACM Fotodedektör Yapısı.	42
Şekil 3.4: Büyütülen Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM Fotodedektör Yapısı.	43
Şekil 3.5: Büyütülen Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM Fotodedektör Yapısı.	43
Şekil 3.6: Kaplama mekanizmasının şematik gösterimi.	46
Şekil 3.7: Fotolitografide kullanılan maske.	47
Şekil 3.8: Fotodirenç kaplanmış yüzeyin UV ışına maruz bırakılması.	47
Şekil 3.9: Fotolitografi adımları sonrasında üretilen örneğin kesiti.	49
Şekil 3.10: Profilmetre ölçümünden örnek bir çıktı.	49
Şekil 3.11: Metalizasyon maskesinin uygulanması ve Lift-off işleminin şematik gösterimi.	50
Şekil 3.12: Lift-Off safhası ve sonrası.	51
Şekil 3.13: Tel bağlama işlemi sonrası örnek görünümü.	52
Şekil 3.14: Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM Fotodedektör.	55
Şekil 3.15: Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM Fotodedektör.	56
Şekil 3.16: Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ p-i-n Çığ Fotodedektör.	57
Şekil 3.17: Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ p-i-n Çığ Fotodedektör.	57
Şekil 3.18: Akım-Voltaj ölçüm düzeneği.	58
Şekil 3.19: Dalgaboyuna bağlı yansıma ölçüm düzeneği.	59
Şekil 3.20: Olası optik geçişler.	60

Şekil 3.21: Fotolüminesans ölçüm düzeneği.	61
Şekil 3.22: Spektral fotoakım ölçüm düzeneği.	62
Şekil 4.1: a) Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM Fotodedektör, b) Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM Fotodedektör.	64
Şekil 4.2: a) Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ <i>p-i-n</i> Çığ Fotodedektör, b) Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ <i>p-i-n</i> Çığ Fotodedektör.	64
Şekil 4.3: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM fotodedektörün ve b) rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM fotodedektörün fotolüminesans dalgaboyunun konumsal değişimi.	66
Şekil 4.4: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM fotodedektörün a) yansıma ve b) fotolüminesans spektrumu. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM fotodedektörün c) yansıma ve d) fotolüminesans spektrumu.	67
Şekil 4.5: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM fotodedektörün a) karanlık ve aydınlık altında alınan akım-voltaj ölçüm sonuçları b) yarı logaritmik skalada gösterimi.	68
Şekil 4.6: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM fotodedektörün a) karanlık ve aydınlık altında alınan akım-voltaj ölçüm sonuçları b) yarı logaritmik skalada gösterimi.	69
Şekil 4.7: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ <i>p-i-n</i> çığ fotodedektörün a) karanlık ve aydınlık altında alınan akım-voltaj ölçüm sonuçları b) yarı logaritmik skalada gösterimi.	70
Şekil 4.8: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM fotodedektörün geri besleme altında spektral kuantum verimi sonuçları.	71
Şekil 4.9: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM fotodedektörün geri besleme altında spektral kuantum verimi sonuçları.	72
Şekil 4.10: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ <i>p-i-n</i> eklem çığ fotodedektörün spektral kuantum verimi sonucu.	73

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 2.1: III ve V grubu elementlerin bazı özellikleri.....	7
Tablo 3.1: Fotodedektör yapılarının aktif bölgelerinin özellikleri.	38
Tablo 3.2: III-V grubu alaşımlar için belirlenmiş aşındırma çözeltileri.	48
Tablo 3.3: $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O$ çözeltisi için belirli oranlar.....	48
Tablo 3.4: <i>n</i> -tipi GaAs-tabanlı mazleme için metalizasyon malzemeleri.	50
Tablo 3.5: <i>p</i> -tipi GaAs-tabanlı mazleme için metalizasyon malzemeleri.	50
Tablo 4.1: Fotodedektör yapılarının farklı geri besleme altındaki duyarlılıkları.....	73
Tablo 4.2: Fotodedektör yapılarının farklı geri besleme altındaki kuantum verimleri.	73

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Etkin fotodedektör alanı
a_S	: Alt tabakanın örgü sabiti
a_L	: Üst tabakanın örgü sabiti
α	: Absorbsiyon katsayısı
α_e	: Elektronun impakt iyonizasyon katsayısı
α_t	: Termal genleşme katsayısı
β	: Debye sıcaklığı
β_h	: Boşluğun impakt iyonizasyon katsayısı
β_o	: Bowing (kavislenme) parametresi
C	: Kapasite
C_{NM}	: İletkenlik bandı ile azotun lokalize enerji seviyesi arasındaki etkileşim parametresi
d	: Tabaka kalınlığı
D	: Dedektivite
D^*	: Normalize edilmiş dedektivite
e	: Elektron yükü
E	: Elektrik alan
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_r	: Malzemenin dielektrik sabiti
E_g	: Yarıiletkenin bant aralığı
E_i	: İmpakt iyonizasyon enerjisi
E_M	: Ev sahibi yarıiletkenin iletkenlik bandı enerjisi
E_N	: Azotun lokalize enerji seviyesi
E_{ph}	: Fotonun enerjisi
F	: Elektrik alan kuvveti
h	: Boşluk
h	: Planck sabiti
$\hbar$	: İndirgenmiş Planck sabiti
I_0	: Karanlık akım

I_{ph}	: Fotoakım
I_T	: Toplam akım
i	: Asal yarıiletken
k	: Momentum vektörü
k_B	: Boltzmann sabiti
m_0	: Elektronun boşluktaki kütlesi
m_e^*	: Elektronların etkin kütlesi
m_{hh}^*	: Ağır boşlukların etkin kütlesi
m_{lh}^*	: Hafif boşlukların etkin kütlesi
n	: Kırılma indisi
m	: Dağıtılmış Bragg Yansıtıcıları çifti sayısı
n_0	: Boşluğun kırılma indisi
n_s	: Yarıiletkenin kırılma indisi
N_a	: Akseptör atomları yoğunluğu
N_d	: Donör atomları yoğunluğu
η	: Kuantum verimi
ϕ	: Fit parametresi
P_0	: Gelen optik güç
P_{min}	: Ölçülebilir minimum optik güç
r	: Fresnel yansıma katsayısı
R	: Duyarlılık
R_L	: Yük direnci
R_s	: Örnek direnci
S/N	: Sinyal gürültü oranı
T	: Kristal sıcaklığı
τ	: Fotodedektör tepki süresi
τ_{R_sC}	: RC zaman sabiti
τ_{tr}	: Taşıyıcı geçiş zamanı
ω	: Açısal frekans
W_{dep}	: Arınmış bölge genişliği
ν	: Foton frekansı
ν_s	: Taşıyıcı sürüklenme hızı
V	: Besleme voltajı

Kısaltmalar	Açıklama
<i>APD</i>	: Çığ fotodedektör (Avalanche Photodetectors)
<i>BAC</i>	: Band Anti-Crossing Model
<i>BW</i>	: Bant genişliği (Bandwidth)
<i>DBR</i>	: Dağıtılmış Bragg Yansıtıcı (Distributed Bragg Reflector)
<i>DUV</i>	: Derin mor ötesi (Deep Ultraviolet)
<i>EUV</i>	: Uç mor ötesi (Extreme Ultraviolet)
<i>FWHM</i>	: Yarı maksimumdaki tam genişlik (Full Width at Half Maximum)
<i>MBE</i>	: Moleküler demet epitaksisi (Molecular Beam Epitaxy)
<i>NEP</i>	: Gürültünün güç karşılığı (Noise Equivalent Power)
<i>NF</i>	: Gürültü faktörü (Noise Factor)
<i>PDA</i>	: Kısmen arınmış bölgesi fotodedektör (Partially Depleted Photodetector)
<i>RIE</i>	: Reaktif iyonla aşındırma (Reactive Ion Etching)
<i>SAMPD</i>	: Ayrılmış absorpsiyon ve çoğalma bölgesi fotodedektör (Separated Absorption Multiplication Photodetector)
<i>SAGMPD</i>	: Kademeli ayrılmış absorpsiyon ve kazanç bölgesi fotodedektör (Separated Absorption Graded Multiplication Photodetector)
<i>TMM</i>	: Transfer Matris Metodu (Transfer Matrix Method)
<i>UV</i>	: Mor ötesi (Ultraviolet)
<i>VCSEL</i>	: Dikey kaviteli yüzey ışıması yapan laser (Vertical Cavity Surface Emitting Laser)

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

III-V GRUBU YARIİLETKENLERE DAYALI AYGIT ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Burak KAY

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ayşe EROL

II. Danışman: Prof. Dr. Tolga GÜVER

Bu çalışmada, $1.3 \mu m$ dalgaboyu civarına duyarlı olmak üzere tasarlanmış çoklu kuantum kuyulu rezonans kaviteli $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ ve $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/Ga_{0.035}N_{0.965}As_{0.965}$ SACM fotodedektör yapıları incelenmiştir. Dedektörlerin aktif bölgesi $Ga_{1-x}In_xN_{1-y}As_y$ oluşmaktadır. Bariyer tabakaları ise $GaAs$ ve GaN_yAs_{1-y} 'tir.

Fotodedektör yapıları, 9 kuantum kuyulu, 10 üst ve 15 alt, "dağıtılmış Bragg yansıtıcı'larından" (Distributed Bragg reflectors, DBRs) oluşmaktadır. Bu parametreler; fotodedektörlerin çalışacağı dalgaboyu dikkate alınarak, aktif bölge ve bariyer malzemelerinin alaşım konsantrasyonları tercih edilmiştir. Fotodedektörlerin tasarımları yapılırken; aktif bölge ve bariyer malzemesi için bant aralığı hesaplamaları, Band Anti-Crossing modeli ve Vegard yasası kullanılarak yapılmış, iç elektrik alan dağılımları için SimWindows programından yararlanılmış ve rezonans kavitesini oluşturan DBR yapılarının yansıtıcılığı da Transfer Matris Metodu (TMM) kullanılarak hesaplanmıştır.

Fotodedektör yapıları, Moleküler Demet Epitaksi (Molecular Beam Epitaxy, MBE) büyütme yöntemi kullanılarak Tampere Teknoloji Üniversitesi Optoelektronik Araştırma Merkezi (Finlandiya) tarafından büyütülmüştür.

İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü bünyesinde bulunan Nano ve Optoelektronik Araştırma Laboratuvarları altında, İleri Litografik Yöntemler Laboratuvarı olanakları kullanılarak bu fotodedektör yapılarının 125 - 650 μm çaplarda mesa yapı litografik teknikler kullanılarak fabrikasyonu yapılmıştır.

Fotodedektörlerin elektronik ve optik karakterizasyonları da yine aynı araştırma laboratuvarları bünyesinde Nano ve Optoelektronik Araştırma Laboratuvarı olanakları kullanılarak yapılmıştır. Oda sıcaklığında akım-voltaj ve spektral fotoakım ölçümleri yapılarak, fotodedektörlerin karanlık akım limitleri, duyarlılıkları ve kuantum verimlilikleri belirlenmiştir.

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.66}\text{In}_{0.34}\text{N}_{0.018}\text{As}_{0.982}/\text{GaAs}$ SACM fotodedektör için kuantum verimi 1274 nm’de maksimum değerini almış, duyarlılık ise 13 mA/W olarak hesaplanmıştır. FWHM 5 nm olarak belirlenmiştir. Kuantum verimliliği maksimum dalgaboyunda ve -1 V geri besleme altında %1,34 olarak elde edilmiştir. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.733}\text{In}_{0.267}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975}/\text{GaN}_{0.035}\text{As}_{0.965}$ SACM fotodedektöründe kuantum verimi 1282 nm’de maksimum değerini almış, duyarlılık ise 64 mA/W olarak hesaplanmıştır. FWHM 5 nm olarak belirlenmiştir. Kuantum verimliliği maksimum dalgaboyunda ve -1 V geri besleme altında %6,27 olarak elde edilmiştir. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.733}\text{In}_{0.267}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975}/\text{GaN}_{0.035}\text{As}_{0.965}$ *p-i-n* eklem çığ fotodedektörü için kuantum verimi 1296 nm’de maksimum değerini almış, duyarlılık ise 8 mA/W olarak hesaplanmıştır. FWHM 5 nm olarak belirlenmiştir. Kuantum verimliliği maksimum dalgaboyunda ve 0 V geri besleme altında %0,79 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve yorumlanmıştır.

Eylül 2021, 101 sayfa.

Anahtar kelimeler: Fotodedektör, IR Fotodedektör, GaInNAs, Optik Haberleşme, *p-i-n* Fotodedektör

SUMMARY

M.Sc. THESIS

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF DEVICES BASED ON III-V GROUP SEMICONDUCTORS

Burak KAY

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Ayşe EROL

Co-Supervisor: Prof. Dr. Tolga GÜVER

In this study, multi-quantum well resonant cavity $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ and $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM photodetector structures which are sensitive to $1.3 \mu m$ wavelength have been investigated. The active region of the detector is consists of $Ga_{1-x}In_xN_{1-y}As_y$. Barrier layer is $GaAs$ and $GaN_{1-z}As_z$.

Photodetector structures consist of 9 quantum wells, 10 top and 15 bottom “Distributed Bragg Reflectors” (DBRs). These values were determined depending on materials of active region and barrier as well as alloy concentrations of these materials. In the modeling process of the photodetector structures, Band Anti-Crossing Model and Vegard’s Law were utilized for calculations of active region and barrier materials. On the other hand, SimWindows has been used for internal electric field distributions and DBR structures that provide resonance cavity were calculated using Transfer Matrix Method (TMM).

Photodetector structures were grown by the Tampere University of Technology Optoelectronics Research Center (Finland) using the Molecular Beam Epitaxy (MBE) Magnification method were fabricated as mesa structure with a diameter of $125 - 650 \mu m$ by using facilities of Advanced Lithography Laboratories/Istanbul University Science Faculty Physics Department.

Electronic and Optical characterizations were also carried out using the facilities of Nano and Optoelectronics Research Laboratory within the same research laboratories. Dark current, responsivity and quantum efficiencies of the photodetectors were obtained by current-voltage and photocurrent measurements at room temperature.

Resonant cavity 9 QWs $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM photodetector structure, the quantum efficiency was calculated as maximum value at 1274 nm and responsivity was calculated as 13 mA/W. The FWHM has been determined at 5 nm. The quantum efficiency (QE) of %1.34 has been achieved at -1 V. Resonant cavity 9 QWs $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM photodetector structure, the quantum efficiency was calculated as maximum value at 1282 nm and responsivity was calculated as 64 mA/W. The FWHM has been determined at 5 nm. The quantum efficiency (QE) of %6.27 has been achieved at -1 V. Resonant cavity 9 QWs $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* photodetector structure, the quantum efficiency was calculated as maximum value at 1296 nm and responsivity was calculated as 8 mA/W. The FWHM has been determined at 5 nm. The quantum efficiency (QE) of %0.79 has been achieved at 0 V. All obtained results are presented by comparing with the literature.

September 2021, 101 pages.

Keywords: Photodetector, IR Photodetector, GaInNAs, Fiber Optic Communication, *p-i-n* Photodetector

1. GİRİŞ

Düşük boyutlu elektronik ve optoelektronik aygıtlar için en önemli dönüm noktası "Moleküler Demet Epitaksisi" (Molecular Beam Epitaxy - MBE) ve "Metal-Organik Kimyasal Buhar Çökmesi" (Metal-Organic Chemical Vapour Deposition - MOCVD) büyütme yöntemlerinin gelişmesiyle olmuştur. Bu yöntemler sayesinde kontrollü bir şekilde; yüksek saflıkta atomik kalınlıkta yarıiletkenler büyütülebilmüş ve tabaka tabaka farklı yarıiletkenler büyütülebilmek olanağına sahip olunmuştur. Özellikle Kuantum Kuyulu (Quantum Well, QWs), Kuantum Noktalı (Quantum Dots, QDs), süperörgü ve heteroeklem yapılar üretilebilir hale gelerek, çok hızlı şekilde teknolojiye uygulamalarda yer bulmuşlardır. Bu yapıların fiziksel olarak var olması birçok fizik probleminin teorik hesaplardan çıkarak deneysel olarak somut şekilde gözlenmelerine olanak sağlamıştır.

Üretim tekniklerindeki bu gelişme III-V grubu yarıiletken alaşımların büyütülmesi için de önem arz etmektedir. Epitaksiyel büyütme teknikleri sayesinde teknolojinin gereksinimlerine uygun bant aralığına ve örgü sabitine sahip olan yeni alaşımların büyütülmesi mümkün hale gelmiştir. 20. yüzyıl sonlarında yeni nesil optik haberleşmenin gereksinim duyacağı 1.2-1.6 μm aralığında çalışan optoelektronik aygıtlara temel teşkil edecek "uyumsuzluğu yüksek alaşımlar" (Highly Mismatched Alloys, HMAs) olarak tanımlanan alaşım grubunun keşfine katkı sağlamıştır. Bu alaşımların ilk üyesi GaN_yAs_{1-y} olup, sonrasında $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}$ alaşımı yaklaşık 1.3 μm 'de çalışacak optoelektronik aygıtların üretimi için önerilmiştir (Wu ve diğ., 2002).

Fotodedektörler basitçe optik sinyali elektrik sinyaline dönüştüren aygıtlardır. Günümüzde bir fotodedektör için önemli olan, gelen optik sinyallerin ne kadarının işlenebilir hale getirdiğidir. Bu nedenle bazı parametrelerin bilinmesi gerekli ve şarttır. Dedektör karakteristiğindeki en önemli parametreler, duyarlı olduğu dalgaboyu aralığı, responsu ve çalışma hızıdır.

Günümüz iletişim teknolojisinde 1.3 - 1.55 μm dalgaboyuna duyarlı InP-tabanlı fotodedektörler kullanılmaktadır. GaInAlAs/InP ve GaInAsP/InP optik haberleşme için yüksek performanslı optoelektronik aygıtlardır (Hu ve diğ., 1997). Alaşım konsantrasyonuna

ve kuyu genişliğine bağlı olarak; GaInAsP/InP için iletkenlik bandı süreksizliği yaklaşık olarak 100 meV ve GaInAlAs/InP için ise 150 meV civarındadır (Hu ve diğ., 1997). İletkenlik bandı süreksizliği kuyu içerisinde elektronların ne kadar iyi hapsedileceğini gösteren parametredir. İletkenlik/valans bandı süreksizlikleri büyük olan yapıların çalışma koşulları sıcaklıktan daha az etkileneceği için verim açısından daha başarılıdır. Isınmadan daha az etkilenmek aygıtın ekstra soğutma maliyetini azaltacağı için daha yüksek iletkenlik/valans bandı süreksizliklerine sahip malzemelerin kullanılması avantajdır.

Her ne kadar günümüzde optik haberleşme sistemlerinde fosfat tabanlı malzemeler kullanılsa da bu malzemelerde, örgü uyumsuzluğundan dolayı GaAs/AlAs DBR'lerin kullanımı uygun değildir. Oysa ki büyütme teknolojisi çok iyi bilinen ve kırılma indisi farkı büyük olan GaAs/AlAs DBR'lerinin kullanımı laser ve dedektör yapılarında dalgaboyu seçiciliği için önemli bir unsurdur. Bu nedenlerle iletkenlik bandı süreksizliği daha büyük olan GaAs üzerine büyütülebilen ve GaAs/AlAs DBR yapılarının kullanılabileceği GaInNAs/GaAs yapılarının optik haberleşmede; laser, fotodedektör ve optik yükselteç olarak InP-tabanlı yapıların yerine kullanılabileceği önerilmiştir.

GaInAsP/InP tabanlılara alternatif olarak gelecek nesil fiber optik haberleşmesinde önerilen $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}$ dörtlü alaşımının bant aralığı 1 eV olacak şekilde ayarlanabilmektedir. Ayrıca tek büyütme sürecinde GaAs alttaş üzerine büyütülebilmekte ve Al(Ga)As/GaAs DBR yapılarının da rezonans kavitesini oluşturmaları olanaklı kılmaktadır. Böylece optik haberleşmenin 1.3 μm 'de olan fiber optik haberleşme için uygun bir alternatiftir. Yapıdaki İndiyum (In) ve Azot (N) konsantrasyonuna bağlı olarak 1.3 μm dalgaboyuna duyarlı fotodedektörlerin üretimi, bu elementlerin GaAs alaşımı ile olan örgü uyumu nedeniyle GaInNAs dörtlü alaşımının üretimini kolay kılmaktadır. Ancak bu alaşımlar 2000'lerin başında keşfedildiği için literatürde InP-tabanlı fotodedektörlerin daha çok çalışıldığı görülmektedir (Hu ve diğ., 1997).

Optik haberleşmede sinyalin algılanmasında kullanılan fotodedektörlerin 1.3 μm ve 1.55 μm 'de çalışan, yüksek dalgaboyu seçiciliğine sahip, verimleri yüksek olan ve düşük maliyetli olmaları istenmektedir.

Yarıiletken tabanlı fotodedektörler de $p-i-n$ yapıda olanların verimi $p-n$ eklem tabanlılardan daha yüksektir. Ancak ne $p-i-n$ ne de $p-n$ eklem tabanlı fotodedektörler iç kazançla sahip değildir ve dalgaboyu seçicilikleri de yoktur. Duyarlılıkları soğurma katsayısının dalgaboyu

bağıllığıyla ilişkilidir. Fotodedektörlerin dar bir dalgaboyu aralığında seçici duyarlılığı DBR yapısı kullanılarak sağlanabilmektedir. "Rezonans kavitesi ile etkinleştirilmiş fotodedektör" (Resonance Cavity Enhanced Photodetector, RCEPD) yapıları ilk kez "Resonant Cavity-Enhanced (RCE) Photodetector" adlı makalede (Kishino *ve diğ.*, 1991); aktif bölgesi InGaAs olan, 10 üst ve 15 alt AlGaAs/GaAs DBR yapıları kullanılarak yayınlanmıştır (Kishino *ve diğ.*, 1991). Bu çalışma ile optik haberleşmede o ana kadar kullanılan yüksek iç kazançlı çığ fotodedektörleri (Avalanche Photodetector - APD), *p-i-n* eklem fotodiyot (*p-i-n* PD) ve metal-yarıiletken-metal fotodiyotlar'a (MSM PD) karşı avantajları ortaya konmuş ve alternatif olarak kullanılabilecekleri öne sürülmüştür.

GaInNAs dörtlü alaşımlı RCEPD'lere örnek olarak; GaInNAs/GaAs 1.3 μm dalgaboyuna ayarlı üç kuantum kuyulu, 5.5 nm FWHM sahip, 8 üst ve 22 alt AlAs/GaAs DBR yapıları kullanılan (Zhang *ve diğ.*, 2001), GaInNAs/GaAs 1.3 μm dalgaboyuna ayarlı üç kuantum kuyulu, 4 nm FWHM'a sahip, 8 üst ve 22 alt AlAs/GaAs DBR yapıları kullanılan (Zhang, 2001) ve GaInNAs/GaAs 1.55 μm dalgaboyuna ayarlı altı kuantum kuyulu, 10 nm FWHM'a sahip, 8 üst ve 25 alt GaAs/AlAs DBR yapıları bulunan, %33 kuantum verimliliğine (Han *ve diğ.*, 2005) sahip fotodedektör çalışmaları bulunmaktadır.

p-n ya da *p-i-n* eklem yapıdaki yarıiletken dedektörlerde iç kazanç yoktur, ancak iç kazanç mekanizması *p-i-n* eklem tabanlı çığ fotodedektörlerde (Avalanche Photodetector - APD) impakt iyonizasyon mekanizmasına dayalı olarak elde edilebilmektedir. APD dedektörler Silisyum tabanlı (Si APD), Germanyum tabanlı (Ge APD), InGaAs tabanlı APD'ler ve benzeri APD'ler elektronikte spektrumun farklı bölgelerinde kullanılmak üzere üretilmiştir.

Si APD ile 100 kata kadar iç kazanç elde edilmiştir, iç kazanç mekanizması sayesinde dedektörün duyarlılığı artırılmaktadır ve gürültü düşük seviyededir (Lee *ve diğ.*, 1964). Ancak Si 1.12 eV olan bant aralığından dolayı optik haberleşmenin dalgaboylarında kullanılamaz. InGaAs tabanlı klasik çığ fotodedektörlerde ise her iki tür taşıyıcının (elektron/boşluk) çoğaltılması nedeniyle verim düşük ve gürültü yüksektir (Chen *ve diğ.*, 1993; Zheng *ve diğ.*, 2001).

APD'lerin verimli olarak adlandırılabilmesi için tek tip taşıyıcı yoğunluğunun artması gereklidir. Bunun için İmpakt İyonizasyon mekanizmasının tetiklenmiş olması gerekir (Saleh *ve diğ.*, 2001). Normal şartlarda tek tip taşıyıcı yoğunluğunu arttırmak için ayrı bir yük çoğaltıcı bir tabaka yapı ile beraber büyütülür (Jain *ve diğ.*, 2017; Ren *ve diğ.*, 2017).

Absorpsiyon bölgesinde oluşturulan elektron - boşluk çifti kontaklara doğru iç elektrik alan altında süpürülürken, tek tip taşıyıcı çoğaltıcı tabakadan geçtiği süreçte impakt iyonizasyon mekanizmasını tetikleyerek taşıyıcı sayısını artırır ve fotodedektöre kazanç sağlar.

GaInAs alaşımında Azot (N) konsantrasyonu varlığı sistemin iletkenlik bandını pertürbe ederek E_- ve E_+ olmak ikiye ayırır (Wu ve diğ., 2002). Bu durum %1 Azot konsantrasyonu başına yasak bant aralığını yaklaşık 180 meV kadar daraltır (Erol ve diğ., 2012; Sarcan, 2012; Sarcan ve diğ., 2012). Bunun sonucunda GaInNAs/GaAs QW çoklu kuantum kuyulu sisteminde iletkenlik bandı süreksizliği valans bandı süreksizliğinden yaklaşık üç kat daha büyük olduğu için valans bandındaki boşluklar termiyonik emisyonla kuyu içerisinden daha hızlı kaçacağından GaInNAs'da sadece elektronların çoğaltılması mümkün olacaktır (Sun ve diğ., 2009). Sonuç olarak GaInNAs/GaAs çoklu kuantum kuyulu sistemlerde ayrıca çoğaltıcı bölgeye ihtiyaç duyulmadan impakt iyonizasyonu sağlanmış olacaktır (Balkan ve diğ., 2015).

Son dönemde ise optik haberleşmenin dalgaboylarında çalışan mevcut çığ fotodedektörlerde verimi yükseltmek için, fotonların soğurulduğu tabaka ile taşıyıcıların çoğaldığı bölgeyi birbirinden ayıran fotodedektör yapıları önerilmiştir. "Ayrılmış çoğalma, yük ve absorpsiyon bölgesi" (Separated Absorption, Charge and Multiplication, SACM) olarak adlandırılan bu fotodedektörlerde, absorpsiyon ve çoğalma farklı bölgelerde gerçekleşir; ayrılan elektron ve boşluklardan herhangi bir tip taşıyıcı yüksek elektrik alanlı çoğalma bölgesine gelir ve impakt iyonizasyonu gerçekleşir.

Literatürde SACM fotodedektörlere bakıldığında; GaAsSb 1.3 μm dalgaboyuna ayarlı, FWHM'u 7 nm olan, %36 kuantum verimine sahip (Xiaoguang ve diğ., 2003), InGaAs QDs 1.06 μm dalgaboyuna ayarlı, %57 kuantum verimine sahip (Nie ve diğ., 1998) ve GaInNAs 1.3 μm dalgaboyuna ayarlı, FWHM'u 7 nm olan, %54 kuantum verimine ulaşılan (Xiaoguang ve diğ., 2002) farklı çalışmalar görülmektedir.

GaInNAs/GaAs tabanlı RCEPD yapıları üzerine son yıllarda İstanbul Üniversitesi Nano ve Optoelektronik Araştırma Grubu'nda yapılan çalışmalarda, GaInNAs/GaAs 1.3 μm dalgaboyuna ayarlı dokuz kuantum kuyulu 5 nm FWHM'a sahip iç kazançlı fotodedektörler üretilmiştir. Bu fotodedektörlerde, 1 volt geri beslemede %43 kuantum verimliliğine, 2.5 volt geri beslemede ise %67 kuantum verimliliğine ulaşılmıştır (Sarcan, 2018).

Tez çalışması kapsamında farklı bariyer malzemelerinin (GaAs, GaNAs) fotodedektörlerin performansı üzerine etkilerini de incelemek için 9 kuantum kuyulu rezonans kaviteli $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ ve $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* eklem SACM fotodedektör yapıları kullanılmıştır ve fotodedektör yapıları yaklaşık $1.3 \mu m$ dalgaboyunda çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Fotodedektör yapıları, MBE yöntemi kullanılarak Tampere Teknoloji Üniversitesi Optoelektronik Araştırma Merkezi (Finlandiya) tarafından büyütülmüştür. İstanbul Üniversitesi Nano ve Optoelektronik Araştırma Laboratuvarları olanakları kullanılarak farklı çaplarda mesa yapıları fotolitografi ile yapılmış ve fotoışına, akım-voltaj ve fotoakım ölçümleri ile karakterize edilmiştir.

Tez, "Giriş Bölümü" ile beraber beş bölümden oluşmaktadır. Genel Kısımlar bölümünde tez kapsamında üzerinde çalışılan örneklerin aktif tabakasını oluşturan GaInNAs alaşımının fiziği, düşük boyutlu (kuantum kuyusu) sistemlerinde soğurma süreçleri, fotodedektör yapıları ve fotodedektör parametrelerine ilişkin bilgi verilmiştir. Malzeme ve Yöntem bölümünde örnek yapıları, fotodedektör üretim süreçleri ve fotodedektörlerin karakterizasyonlarının yapıldığı sistemler hakkında bilgi sunulmuştur. Bulgular bölümünde deney sonuçları, Tartışma ve Sonuç bölümünde ise elde edilen sonuçları literatürle kıyaslayarak tartışılması ve geleceğe yönelik öneriler sunulmuştur.

2. GENEL KISIMLAR

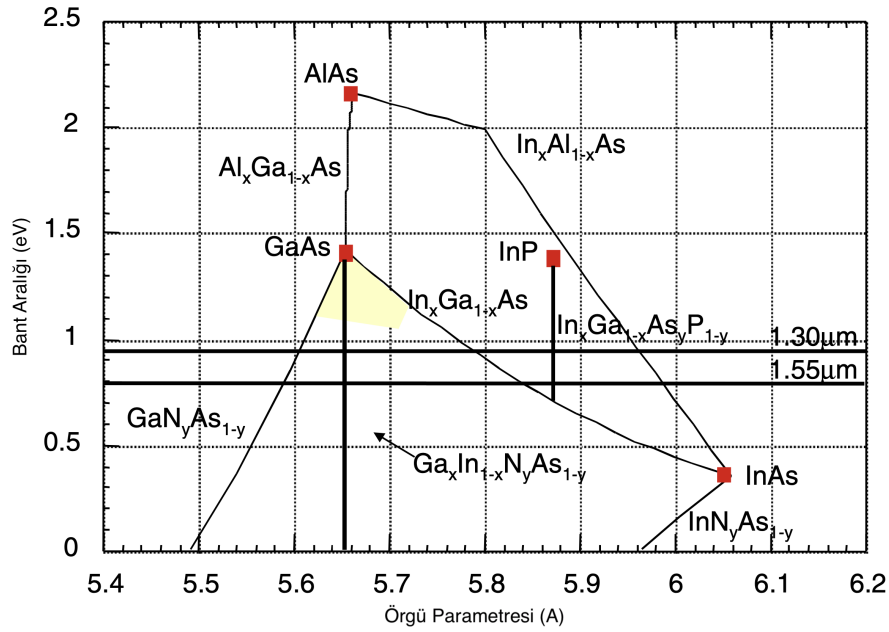
Tez çalışmasında incelenen fotodedektörlerin aktif tabakası olan $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}$ farklı alaşım konsantrasyonlarındaki çoklu kuantum kuyusu içeren ve dalgaboyu seçiciliği bulunan yapıların, optik haberleşmede; fotodedektör, laser ve optik yükselteç olarak kullanılması potansiyeli son dönemdeki çalışmalarda ve teknolojiye geniş olarak yer almasına neden olmuştur. Tez çalışmasında bu alaşımlardan üretilen fotodedektör yapıları incelenmiştir. Bu yapılar seyreltik azotlu III-V grubu alaşımlar ailesinden olması sebebiyle seyreltik azotlu alaşımlardan bahsedilmiş, kuantum kuyusu sistemlerinin fiziği, fotodedektör parametrelerinin belirlenmesi ve fotodedektörlerin çalışma prensipleri ayrıntılı olarak bu bölümde anlatılmıştır.

2.1. SEYRELTİK AZOTLU III-V GRUBU ALAŞIMLAR

Seyreltik azotlu ("dilute nitride") yapılar, III-V grubu yarıiletken bileşik/alaşımlara yaklaşık %1-2 oranında veya daha az azot (N) eklenmesi ile oluşturulan yapılardır. İlk kez 1995 yılında M. Kondow tarafından GaAs'a N katılmasıyla seyreltik azotlu yapılar üretilmiştir (Kondow *ve diğ.*, 1996). Kondow'un önerisi alaşım konsantrasyonuna bağlı olarak GaAs'ın bant aralığı olan 1.42 eV'tan, GaN'ın bant aralığı olan 3.42 eV'a kadar değişen bant aralıklarına sahip yarıiletkenler oluşturabilmektir. Ancak yapılan çalışmalar; GaN_yAs_{1-y} 'ın alaşım konsantrasyonu ile bant aralığında artış değil, azalma olduğunu ortaya koymuştur.

GaAs alttaş üzerine büyütülen GaN_yAs_{1-y} alaşımının GaAs ile büyük örgü uyumsuzluğuna sahip olması nedeniyle, In örgüye katılarak örgü uyumunun GaAs ile daha iyi olduğu $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}$ alaşımını üzerine çalışmalar yapılmıştır. Hem N hem de In'un alaşım konsantrasyonundaki artışı ile bant aralığı kontrollü olarak değiştirilebilmektedir. Şekil 2.1'de gösterildiği gibi uygun In ve N alaşım konsantrasyonu ile $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}$ alaşımını GaAs alttaş üzerine örgü uyumlu büyütülebilmekte ve bant aralığı da $1.3 \mu m$ ve $1.55 \mu m$ 'ye karşılık gelecek şekilde ayarlanabilmektedir. Ancak yapılan çalışmalarda; N konsantrasyonu %2 olduğunda $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}$ alaşımının optik ve yapısal kalitesinin çok bozulduğu gözlenmiştir (Gambin *ve diğ.*, 2002). Bu nedenle bant aralığı $\sim 1.3 \mu m$ dalgaboyuna karşılık

gelecek şekilde $\sim \% 1-1.5$ N ile nispeten iyi optik kalitede örnekler büyütülebilmektedir.



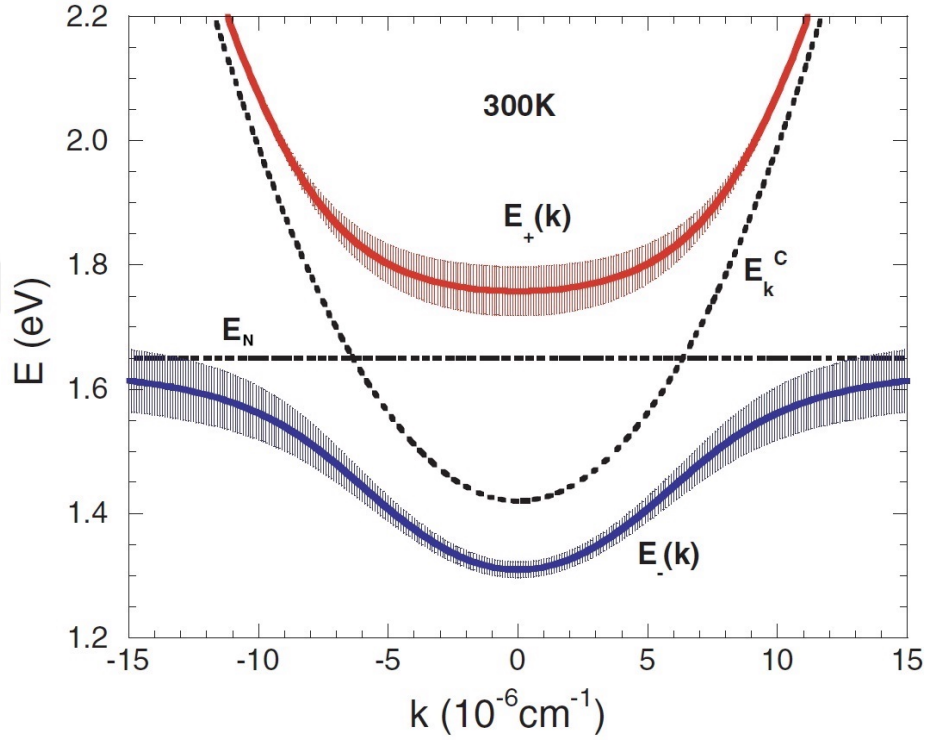
Şekil 2.1: GaInNAs alaşımları için bant aralığı (eV) örgü sabiti(Å) değişimi (Henini, 2005).

İkili bileşik yapılar üretilirken, bu bileşiğe katılan Azot, örneğin; GaAs'de Arsenik atomlarının Azot atomları ile yer değiştirdiği görülür. Tablo 2.1'de atom boyutlarının kıyaslamasına bakıldığında, azot atomunun yarıçapı Arsenik atomunun yarıçapına oranla çok daha küçük ve elektronegatiflikleri kıyasla da farklı olması sonucu, elde edilen alaşımların bant aralığının azalma yönünde olduğu gözlenmiştir (Erol, 2008). Azotun GaAs örgüde yerine geçtiği As ile elektronegatiflikleri ve atom çapı açısından çok uyumsuz olması, örgü potansiyelinde ciddi bir pertürbasyona neden olmaktadır.

Tablo 2.1: III ve V grubu elementlerin bazı özellikleri.

<i>Element</i>	<i>Grup</i>	<i>Atom Sayısı</i>	<i>Elektronegatiflik</i>	<i>Atom Çapı</i>
Alüminyum (Al)	III	13	1.61	1.25
Galyum (Ga)	III	31	1.81	1.3
İndiyum (In)	III	49	1.78	1.55
Azot (N)	V	7	3.04	0.65
Arsenik (As)	V	33	2.18	1.15

Azotun bant aralığında yaratmış olduğu etki, yarı deneysel bir model olan Bant Anticrossing (BAC) modeli (Shan *ve diğ.*, 1999) tarafından açıklanmıştır. Yapıdaki Azot atomunun varlığı, iletkenlik bandı dispersiyonunun değişmesine neden olurken valans bandı dispersiyon eğrisinin üzerinde ise doğrudan etkisi yoktur. Bant aralığı daralması iletkenlik bandındaki değişimden dolayı gerçekleşmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2: BAC modeline göre GaNAs'ın iletkenlik bandı yapısı (Wu *ve diğ.*, 2002).

BAC modelinde Azot, GaAs veya GaInAs içinde akseptör tipi safsızlık gibi davranır ve iyonizasyon enerjisi E_N , iletkenlik bandının üzerinde yer almaktadır ve BAC modeline göre yapı içine katılan Azotun lokalize enerji seviyesi, ev sahibi yarıiletkenin iletkenlik bandı ile rezonansta olup, Azotun pertürbasyonu sonucu evsahibi yarıiletkenin iletkenlik bandı Şekil 2.2'de görüldüğü gibi E_- ve E_+ olarak iki banda ayrılır (Shan *ve diğ.*, 1999).

GaInAs ya da GaAs'e katılan yaklaşık %1 oranındaki Azot, alaşımın bant aralığının 100-150 meV kadar azaltma imkan sağlar. Bu sayede GaInNAs tabanlı 1.2-1.3 μm 'de çalışan laser, dedektör ve optik yükselteçlerin yapımını mümkün kılar.

BAC modeline göre Azot atomlarının rastgele dağıldığı, E_N enerji seviyesinin yalnızca ev sahibi alaşımın/bileşiğin iletkenlik bandı ile etkileştiği valans bandı ile etkileşmediği varsayımı yapılarak, yeni iletkenlik bandının enerji özdeğerini veren 2x2'lik özdeğer matrisi (Batool *ve diğ.*, 2012; Francoeur *ve diğ.*, 2008),

$$\begin{vmatrix} E - E_M & V_{NM} \\ V_{NM} & E - E_N \end{vmatrix} = 0 \quad (2.1)$$

şeklinde verilir. Denklemden V_{NM} , Azot konsantrasyonuna bağlı E_N ile evsahibi alaşımın iletkenlik bandı arasındaki etkileşimi veren matris elemanıdır ve

$$V_{NM} = C_{NM}\sqrt{y} \quad (2.2)$$

olarak tanımlanır. Burada y , Azot konsantrasyonu; C_{NM} , E_N ile evsahibi alaşımın iletkenlik bandı arasındaki etkileşimi; E_M ise evsahibi yarıiletkenin iletkenlik bandını tanımlar. Ayrıca, E_N enerji seviyesinin sıcaklığa bağlı olarak değişmesi ile C_{NM} 'nin de sıcaklığa bağlı olarak değişmesi beklenir fakat yapılan çalışmalarda C_{NM} 'nin sıcaklıktan bağımsız olduğu varsayılmış ve parametre değeri olarak 2.1-2.7 eV arasındaki değerler kullanılmaktadır (Batool *ve diğ.*, 2012; Francoeur *ve diğ.*, 2008).

Teorik olarak iletkenlik bandının dispersiyon bağıntısı Denklem 2.1'in özdeğer denkleminin çözümü ile elde edilir,

$$E_{\pm} = \frac{(E_N + E_M) \pm \sqrt{(E_N - E_M)^2 + 4V_{NM}^2}}{2} \quad (2.3)$$

Düşük enerjili E_- bandı $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}$ alaşımın bant aralığı olup;

$$E_- = \frac{1}{2} \left[E_N + E_M - \sqrt{(E_N - E_M)^2 + 4V_{NM}^2} \right] \quad (2.4)$$

olarak ifade edilir. E_- yeni iletkenlik bandı enerji seviyesi, E_N Azotun lokalize enerji seviyesi, V_{NM} matris elemanı ve E_M ev sahibi yarıiletkenin iletkenlik bandı enerjisi olarak tanımlanır.

Klasik yarıiletken alaşımların bant aralığı, alaşımı oluşturan elementlerin konsantrasyonuna bağlı olarak Vegard Yasası ile tanımlanır. Vegard Yasası alaşımdaki atomların özellikleri (atomik yarıçapları, iyonizasyon enerjileri ve elektronegatiflikleri) bakımından çok farklı değilse, alaşım konsantrasyonu lineer olarak hesaplanır. Lineerlikte sapma parabolik bir katkı olarak kavislenme (bowing) parametresi ile verilir (Young *ve diğ.*, 2003).

Bant aralığı hesaplamak için örnek kullanacak olursak; üçlü alaşım $Ga_{1-x}In_xAs$ yarıiletkeni için bant aralığı Vegard Yasasına göre ifadesi,

$$E_g(Ga_{1-x}In_xAs) = (x)E_g(InAs) + (1-x)E_g(GaAs) + (x)(1-x)\beta_o \quad (2.5)$$

ile hesaplanabilir. Birçok III-V grubu alaşım için kavislenme parametresi küçüktür. Bu sebeple GaAs ile InAs bütün alaşım konsantrasyonları için $Ga_{1-x}In_xAs$ alaşım sistemlerinin bant aralığı değişimi lineer olur.

GaN ile GaAs'ın alaşımlanmasıyla elde edilen GaN_yAs_{1-y} için Vegard Yasası için β_o 'nin çok büyük olması öngörülür. Ancak Vegard Yasası deneysel sonuçlarla iyi bir uyum içinde değildir. Bu nedenle seyreltik azotlu yapıların bant aralığının belirlenmesinde BAC modeli kullanılır.

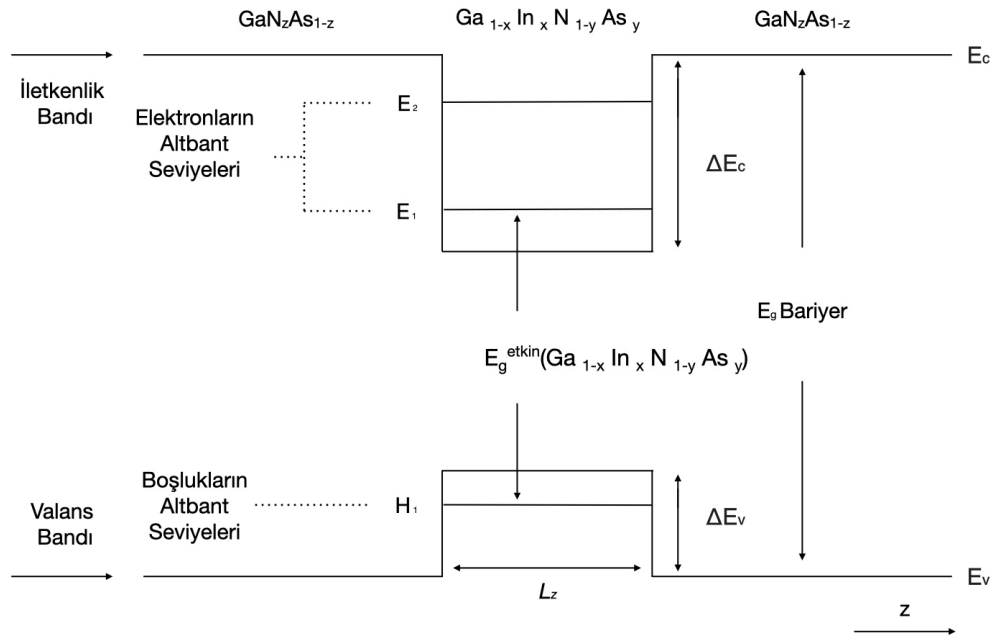
2.2. KUANTUM KUYUSU SİSTEMLERİ

Tez çalışmasında incelenen $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaN_zAs_{1-z}$ ve $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaAs$ kuantum kuyusu yapılarıdır. Bu nedenle bu kısımda 2D düşük boyutlu sistemler olarak da adlandırılan kuantum kuyusu sistemlerinden bahsedilecektir.

Yarıiletkenin boyutları, taşıyıcıların de Broglie dalgaboyu veya taşıyıcıların ortalama serbest yolları ile kıyaslanabilir olduğunda, kuantum boyut etkileri gözlenmeye başlar. Kuantum boyut etkileri yarıiletkenin elektronik özelliklerini de değiştirir.

2.2.1. Yarıiletken Yapılarda Kuantum Kuyusu Sistemleri

Yarıiletken malzemelerde, iki farklı bant aralığına sahip yarıiletken malzemelerin tabakalar halinde ard arda büyütülmesi ve dar bant aralıklı yarıiletkenlerin kalınlığının $L_z > \lambda_{dB}$ olması sonucu kuantum kuyusu sistemleri oluşmaktadır. Kuantum kuyusu sistemlerinde büyütme doğrultusuna (z) dik x ve y doğrultularında taşıyıcılar serbest haldedir. Büyütme doğrultusunda ise enerji spektrumları sürekliliğini kaybeder ve kesikli değerler almaya başlar çünkü taşıyıcıların hareketi büyütme doğrultusunda kuantize olur (Erol, 2013). Şekil 2.3'te $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaN_zAs_{1-z}$ için kuantum kuyusu sistemi gösterilmiştir.



Şekil 2.3: $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaN_zAs_{1-z}$ kuantum kuyusu yapısı ve altbant enerjileri.

Sonsuz kuyudaki parçacık yaklaşımı ile iletkenlik bandında bulunan taşıyıcılar için kuyu bölgesinde kuantize enerji durumları, E_N ;

$$E_N = \frac{\pi^2 \hbar^2 N^2}{2m_e^* L_z^2} \quad N = 1, 2, 3, \dots \quad (2.6)$$

ifadesinden elde edilir. E_N lokalize enerji seviyesi ve L_z kuantum kuyusu genişliğidir. N değerine karşılık gelen durumlara alt bantlar denir.

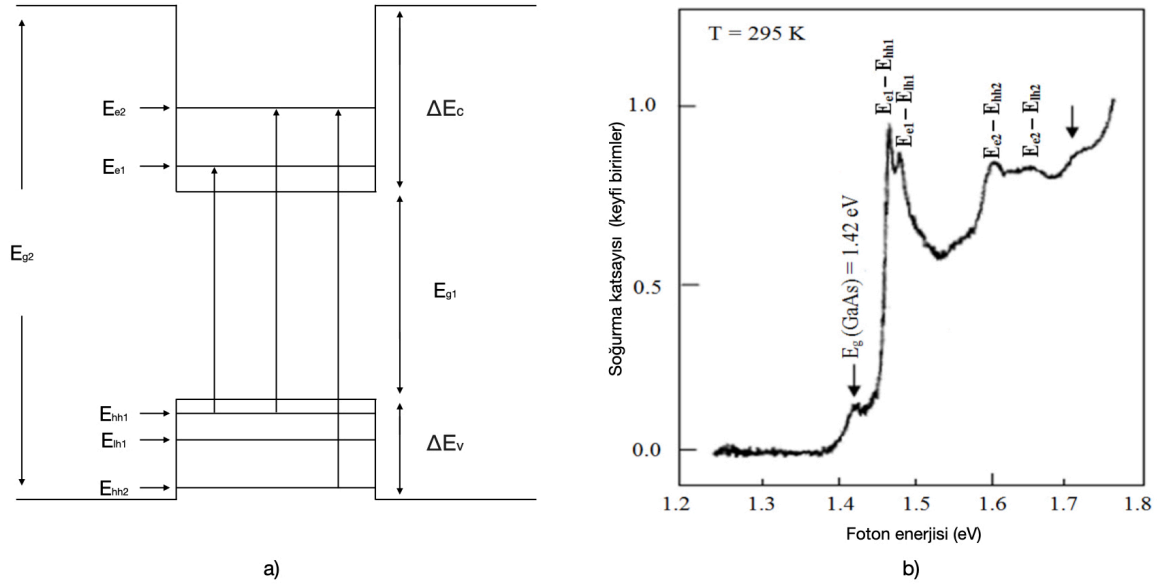
Şekil 2.3'te $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/Ga_{1-z}N_zAs_{1-z}$ için kuantum kuyusu sistemi örnek olabilecek bir heteroeklem görülmektedir. İletkenlik bandındaki kuantum kuyusunun derinliğini belirleyen ΔE_c 'ye, iletkenlik bant süreksizliği, değerlik bandındaki kuantum kuyusunun yüksekliğini belirleyen ΔE_v 'ye, değerlik bandı süreksizliği denilir. ΔE_c ve ΔE_v değerleri heteroeklemlerde ardışık tabakalardaki yarıiletkenlerin bant aralıklarının farkının belli oranlarda paylaşılmasıyla belirlenir.

Taşıyıcıların hareketlerinin büyütme doğrultusunda kuantize, buna dik doğrultularda ise serbest parçacıklarmış gibi davrandığı düşük boyutlu yapılar yarıiletken kuantum kuyusu sistemi ya da 2 boyutlu yapılar olarak adlandırılırlar.

2.2.2. Kuantum Kuyusu Sistemlerinde Soğurma

$E = E_g + E_{e1} + E_{hh1}$ ifadesi soğurma sürecinin gerçekleşmesi için gereken en küçük enerjiyi ifade eder. E , külçe yapıdaki optik soğurmanın başlangıç değerinden $E_g = E_{e1} + E_{hh1}$ kadar büyüktür ve bu değer kuyu genişliğine bağlıdır. $E_g + E_{e1} + E_{hh1} < \hbar\omega < E_g + E_{e2} + E_{hh2}$ aralığındaki foton enerjisinde, soğurma katsayısı sabittir, fakat $\hbar\omega = E_g + E_{e2} + E_{hh2}$ değerinde durum yoğunluğunun değişimini izleyerek basamak şeklinde artar. Sonsuz bariyerli kuantum kuyusu sistemlerinden valans bandındaki kuyudan iletkenlik bandına geçişlerde $\Delta N = 0$ geçişleri izinli olup, $\Delta N \neq 0$ geçişleri yasak geçiş olup, soğurma spektrumunda genellikle çok zayıf olarak gözlenebilir.

Örnek olarak, GaAs/AlGaAs'in izinli alt bantlar arası geçişleri ve soğurma katsayısının foton enerjisine göre değişimi Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Bu yapıda AlGaAs yarıiletkeninin kalınlığı 12.5 nm olup, GaAs yarıiletkeninin ise 5 nm kalınlığındadır (Erol, 2013).



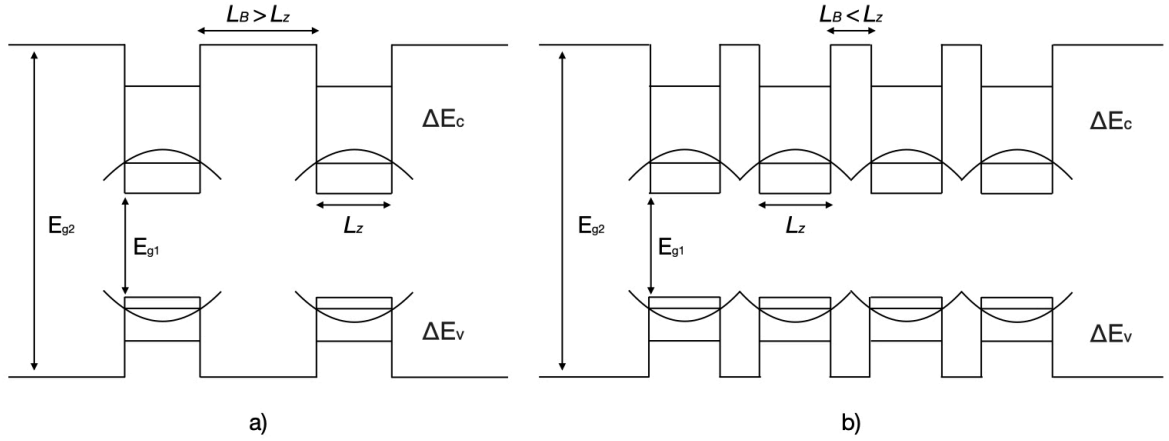
Şekil 2.4: a) AlGaAs/GaAs Kuantum kuyusu sisteminde izinli geçişler ve b) AlGaAs/GaAs çoklu kuantum kuyusu sisteminde soğurma spektrumu (Erol, 2013).

Spektrumda en şiddetli piklerin $N = 1$ seviyeleri arasındaki geçişlere karşılık geldiği görülmektedir. Bu yapıda GaAs yarıiletkeninin bant aralığı AlGaAs yarıiletkeninden küçük olduğu için, GaAs yarıiletkeni kuyuyu oluşturmaktadır ve külçe şeklindeki bant aralığı (1.425 eV) ile kıyaslandığında kuantum kuyusu sisteminin bant aralığı Şekil 2.4b'deki gibi bant aralığının daha büyük enerji değerine kaydığı görülmektedir ve daha yüksek enerji değerlerinde $N = 2$ alt bantları arasındaki geçişe karşılık gelen pikler görülmektedir. Aynı şekilde, ok ile gösterilen zayıf pik $E_{hh1} - E_{e3}$ ($\Delta N = 2$) izinli olmayan geçişe denk gelir. Şekil 2.4b'de görüldüğü gibi soğurmanın gerçekleşmesi için kuantum kuyusu sisteminde eşik değeri külçe yapının bant aralığı (1.425eV) değildir. Çünkü bu yapıda geçiş için ilk izinli seviyeler, valans bandında ağır boşluk ve iletkenlik bandında elektron seviyesidir. Bu yapının bant aralığı, bu iki geçiş arası ile ifade edilir ve etkin bant aralığı olarak adlandırılır. Geçişler etkin bant aralığına sahip veya daha büyük enerjideki fotonların soğurulması ile başlar. Aynı yaklaşımın ışıma süreci için de geçerli olduğu söylenebilir.

Kuantum kuyusu sistemlerinde, etkin bant aralığı enerjisine karşılık gelen değer aynı zamanda ışımının gözleneceği değerdir. Bu durumda optik süreçlerin gözleneceği 2 boyutlu yapılarda enerji değeri 3 boyutlu yapıyla kıyaslandığında $E_{e1} + E_{hh1}$ kadar artmış olacaktır. Kuantum kuyusunun genişliği değiştiğinde etkin bant aralığı değişeceğinden, bant aralığı ayarlanabilen bir yapı elde edilmiş olur.

2.2.3. Çoklu Kuantum Kuyusu Yapıları ve Süperörgü

Düşük boyutlu yarıiletken yapılar, büyütülen tabaka sayısına, tabaka kalınlığına ve bu tabakaların özelliklerine göre, tekli kuantum kuyuları (Single Quantum Well, SQW), çoklu kuantum kuyuları (Multiple Quantum Well, MQW) ya da süperörgüler olarak adlandırılırlar (Şekil 2.5). Tekli kuantum kuyusu sistemi yapısının ard arda büyütülmesi ile MQW ya da süperörgü yapıları elde edilir. Eğer bariyerleri oluşturan yarıiletken tabakaları, kuyuyu oluşturan tabakalardan kalınsa, dar bant aralıklı yarıiletkenin oluşturduğu kuantum kuyusunda bulunan taşıyıcıların dalgafonksiyonları, bariyerin içine doğru fazla tünelleyemez ve sönüme uğrarlar. Dalga fonksiyonun karesi, elektron ya da boşluk bulunma olasılığını temsil ettiğinden ard arda dalga fonksiyonlarının kuyruklarını çakışma olasılığı bulunmaz ve taşıyıcılar kuyudan kuyuya tünelleyip hareket edemezler. Bariyer tabakasının kalın olduğu yapılarda her bir kuyu sanki tek bir kuantum kuyusuymuş gibi davranır. Bu tip kuantum kuyusu sistemlerine çoklu kuantum kuyusu sistemleri denir. Bu yapıların elektronik özellikleri, tek bir kuyu için hesaplanan sonuçların çoklu kuantum kuyularına uyarlanması ile kolayca elde edilebilir.



Şekil 2.5: a) Çoklu Kuantum Kuyusu Sistemi b) Süperörgü.

2.2.4. Dağıtılmış Bragg Yansıtıcıları

Tez kapsamında incelenen fotodedektörlerde ilerleyen fotonların çoklu yansımalara maruz bırakarak aktif bölge içinde soğurulmasının artırılması ve dalgaboyu seçici olarak aygıtın çalışabilmesi için Dağıtılmış Bragg Yansıtıcıları (Distributed Bragg Reflectors, DBR) kullanılmıştır. Bu nedenle bu bölümde DBR yapıları ile yansıtıcılığın artırılması ve dalgaboyu seçiciliğinin fiziğine değinilecektir.

DBR'lar periyodik olarak yüksek ve düşük kırılma indisine sahip dielektrik malzemelerin kullanılması ile oluşturulan dielektrik tabakası yığıdır. Yüksek ve düşük kırılma indisine sahip her bir çift tabakanın kalınlığı kavite dalgaboyunun çeyreğine göre ayarlandığından "çeyrek dalga boylu DBR çifti" olarak da adlandırılırlar. Çeyrek dalgaboyu kalınlığındaki tabakalarda duran dalga elde edilir. Yansıtıcı tabaka kalınlıklarının elde edilmesinde Bragg Yasası kullanılmaktadır ve Bragg Yasası,

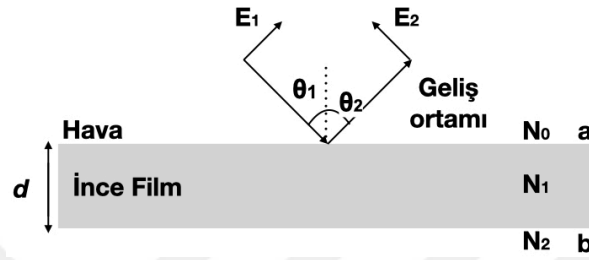
$$n_1d_1 + n_2d_2 = \lambda/2 \quad (2.7)$$

ifadesi ile verilmektedir. DBR çiftlerinin yüzeyine dik gelen elektromanyetik dalga varlığında toplam yansıtıcılık,

$$R = \left[\frac{\frac{n_0}{n_s} - \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^{2m}}{\frac{n_0}{n_s} + \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^{2m}} \right]^2 \quad (2.8)$$

ifadesi ile verilmektedir (Erol, 2002). Burada n_0 havanın ve n_s aktif bölgenin, n_L düşük kırılma indisli tabakaların ve n_H yüksek kırılma indisli tabakaların kırılma indislerini, m ise DBR çiftlerinin sayısını temsil etmektedir. Denklem 2.8'e bakıldığında sistem üzerinde yüksek yansıtıcılık elde etmek için; DBR çifti sayısının çok olması ve/veya DBR çiftini oluşturan dielektrik malzemelerin kırılma indisi farklarının büyük olması gereklidir. Örnek olarak, bu çalışmada da kullanılan $1.3 \mu m$ rezonans dalgaboyu için; GaAs tabanlı III-V grubu alaşım yarıiletkenlerle oluşturulan rezonans kaviteli fotodedektörlerde kırılma indisi farklarının $n_H/n_L > 1$ olmasının yanında tabakalararası örgü uyumundan dolayı da GaAs/AlAs (n_H/n_L , 3.41/2.91) DBR çiftleri tercih edilmektedir (Han ve diğ., 2005; Sarcan ve diğ., 2017).

DBR yapısı içeren sistemlerin üretiminden önce yapının tasarlanması ve kuramsal olarak yansıma spektrumunun elde edilmesi gerekmektedir. Bu hesaplamaların yapılmasında Transfer Matris Metodu'ndan (Transfer Matrix Method, TMM) yararlanılmaktadır (Erol, 2002). Kalınlığı d olan ince film tabakası Şekil 2.6'da verilmektedir. Gelen elektromanyetik dalganın bu ince film tabakası içerisindeki davranışı incelenerek ince filmin yansıma katsayısı bulunmaktadır.



Şekil 2.6: d kalınlıklı ince film tabakası.

Gelen elektromanyetik dalganın geliş ortamındaki kompleks kırılma indisi $N_0 = n_0 + ik_0$, ince film ortamının kompleks kırılma indisi $N_1 = n_1 + ik_1$ ve alttaşın kompleks kırılma indisi $N_2 = n_2 + ik_2$ ifadeleri ile verilir. İfadelerde, $n_{0,1,2}$ ortamların gerçek kırılma indislerini ve $k_{0,1,2}$ ortamların sönmeme katsayılarını ifade etmektedir. Şekil 2.6'da verilen ince film sisteminde elektromanyetik dalganın yansıdığı ve soğurmanın ihmal edildiği durumda karakteristik matrisi,

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta_1 & (i \sin \delta_1) / n_1 \\ in_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ n_2 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada δ_1 ince film tabakasında oluşan faz farkını temsil eder ve

$$\delta_1 = \frac{2\pi n_1}{\lambda} d \cos \theta_1 \quad (2.10)$$

ifadesi ile verilmektedir. Karmaşık kırılma indisi,

$$Y = B/C \quad (2.11)$$

yansıma katsayısı ise,

$$r = \frac{n_0 - Y}{n_0 + Y} \quad (2.12)$$

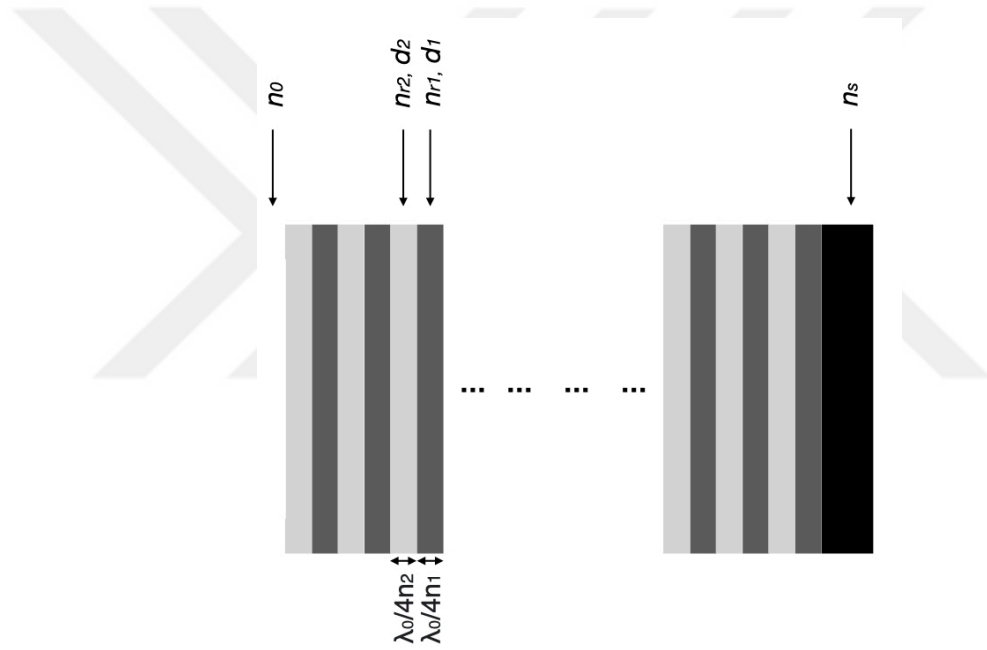
ifadesi ile bulunur. n tabakalı bir ince film sisteminin karakteristik matrisi ise her tek tabaka matrisinin birbiri ile çarpımıyla bulunur,

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \prod_r^n \begin{pmatrix} \cos \delta_1 & (i \sin \delta_1) / n_1 \\ i n_1 \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ n_2 \end{pmatrix} = \prod_r^n M_i \begin{pmatrix} 1 \\ n_{n+1} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

burada n_{n+1} çok katmanlı sistemin alttaşının kırılma indisidir. Bu sistemin fazı da;

$$\delta_1 = \frac{2\pi n_1}{\lambda} d \cos \theta_1 \quad (2.14)$$

ifadesi ile verilmektedir.



Şekil 2.7: Kırılma indisleri n_1 ve n_2 olan m tane çift, çeyrek dalgaboyu kalınlığına sahip Bragg yansıtıcıları.

Kırılma indisleri n_1 ve n_2 olan ve m tane çift DBR tabakasına sahip yapı (Şekil 2.7) için transfer matrisi,

$$M = \prod_{i,j=1}^m (M_i M_j) = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada M_i , n_1 kırılma indisli ortamların karakteristik geçiş matrisi ve M_j , n_2 kırılma indisli ortamların karakteristik geçiş matrisidir.

Denklem 2.13 ve Denklem 2.14'ten yararlanılarak yansıma şiddeti,

$$R = \left[\frac{n_0 M_{11} + n_0 n_s M_{12} - M_{21} + n_s M_{22}}{n_0 M_{11} + n_0 n_s M_{12} + M_{21} + n_s M_{22}} \right]^2 \quad (2.16)$$

şeklinde elde edilmektedir.

2.3. FOTODEDEKTÖR PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Fotodedektörler günümüzde kullandığımız birçok teknoloji içerisinde kullanılmaktadır. (Optik Haberleşme Sistemleri, Uzay Teknolojileri, Savunma Sanayi, Otomasyon Sistemleri vb.) Kullanılan tüm yarıiletken tabanlı fotodedektörlerin çalışma prensipleri birbirlerine benzer olsa da amacına uygun parametreler ışığında farklı yapıda fotodedektör üretilmektedir. Fotodedektörün karakteristiğini yansıtan bu parametreler; absorpsiyon, duyarlılık ve kuantum verimliliği, bant genişliği ve cevap süresi, gürültü başlıkları altında toplanabilir.

2.3.1. Absorpsiyon

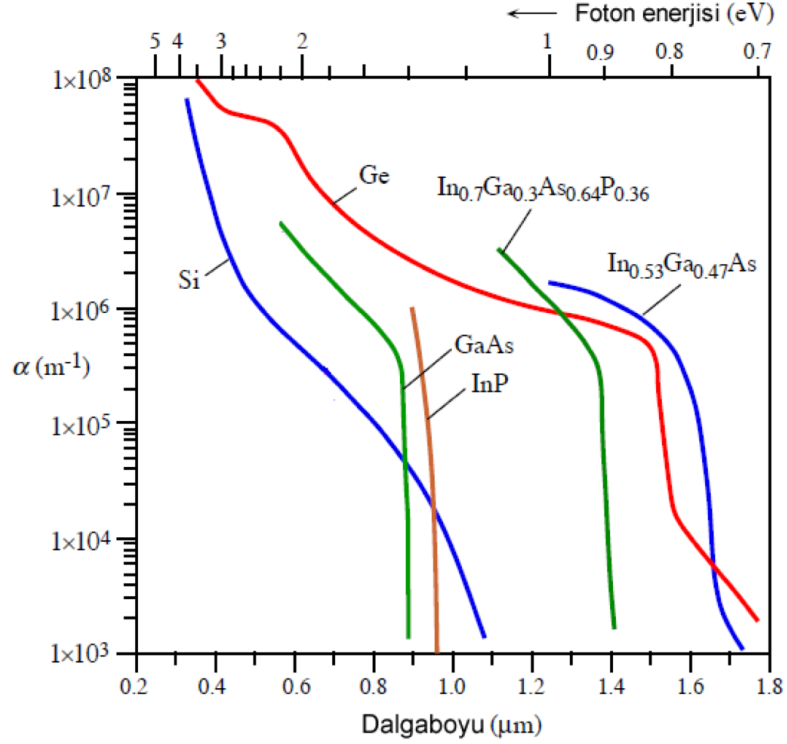
Absorpsiyon, basitçe maddenin üzerine düşen enerjiyi soğurabilme kabiliyeti olarak açıklanır. Yarıiletken malzemelerde absorpsiyonun olabilmesi için yarıiletkenin üzerine düşen foton enerjisinin bu malzemenin bant aralığına denk veya daha fazla olması gerekir. Bu durumun oluşması sonucu valans bandında bulunan elektron iletkenlik bandına geçer. Valans bandından arda kalan yerin boşalması, elektronun olmaması, boşluk olarak addedilir ve bunun sonucunda elektron - boşluk çifti oluşur. Yarıiletken $p-n$ eklem tabanlı fotodedektörlerde eklem bölgesi civarında oluşan iç elektrik alandan yararlanılarak oluşan elektron ve boşluk çiftleri birbirinden ayrılır, bunun sonucunda fotoakım oluşur ve fotodedektörün üzerine düşen optik güce bağlı olarak değişir. Fotoakım,

$$I_{ph} = \frac{P_0(1-r)}{h\nu} (1 - e^{-\alpha d}) \quad (2.17)$$

ifadesi ile açıklanır. P_0 gelen elektromanyetik dalganın optik gücünü, h Planck sabitini, ν foton frekansını, r hava ve yarıiletken arasındaki Fresnel yansıma katsayısını, α absorpsiyon katsayısını ve d absorpsiyon bölgesinin kalınlığını temsil etmektedir. Denklem 2.17’de görüldüğü gibi fotoakım, dedektör üzerine düşen optik güce, fotonun dalgaboyuna ve fotodedektörün malzemesinin absorpsiyon katsayısına bağlı olarak değişir.

Fotodedektör üretiminde malzeme seçimi için en önemli parametrelerden biri malzemenin absorpsiyon katsayısıdır, malzeme belirlenirken fotodedektörlerin duyarlı olacağı dalgaboyu aralığında en yüksek absorpsiyon katsayısına sahip malzeme tercih edilir. Şekil 2.8’de teknolojide kullanılan bazı yarıiletken malzemelerin absorpsiyon katsayılarının dalgaboyuna bağlı olarak değişimi verilmiştir.

Şekil 2.8’de görüldüğü gibi absorpsiyon katsayısı yarıiletkenin bant aralığına bağlıdır. Kısa dalgalırlarına gidildikçe absorpsiyon katsayısı artar.



Şekil 2.8: Bazı yarıiletkenlerin dalgalırlına bağılı absorpsiyon katsayısı değışimi (Kasap, 2013).

Ayrıca direk bant aralıklı yarıiletkenlerde genelde soğurma katsayısı daha büyük olduğundan mümkünse fotodedektör tasarımında direk bant aralıklı yarıiletkenler tercih edilir (Kasap, 2013).

2.3.2. Duyarlılık ve Kuantum Verimliliğı

Fotodedektör üzerinde oluşan fotoakımın, dedektörün üzerine düşen optik güce oranına duyarlılık denir. Duyarlılık,

$$R = \frac{I_{ph}}{P_0} \quad (2.18)$$

ifadesi ile verilmektedir. R duyarlılığı (Response), P_0 optik gücü, I_{ph} fotodedektörde oluşan fotoakımı temsil etmektedir.

Dedektörde soğurulan her foton başına oluşan elektron - boşluk çifti sayısına iç kuantum verimliliği, foton başına kontaklara ulaşan elektron - boşluk çifti sayısına da dış kuantum verimliliği denir. Fotodedektörün kuantum verimliliğinden bahsedildiğinde kontaklara ulaşan elektron - boşluk çifti sayısı olarak ifade edildiğinden dış kuantum verimi yerine kuantum verimi olarak kullanılır. Kuantum verimi,

$$\eta = R \frac{hv}{e} = \frac{I_{ph}/e}{P_0/hv} \quad (2.19)$$

olarak ifade edilir.

Kuantum verimi, Denklem 2.17 ve Denklem 2.19 dikkate alındığında absorpsiyon katsayısına, soğurmanın gerçekleşeceği tabaka kalınlığı ve dalgaboyuna bağlıdır. Yüksek absorpsiyon katsayısına sahip malzemeler seçmenin yanında, tabaka kalınlığını da artırmak verimi belirli oranda artırabilir. Fakat bu tabaka kalınlığı artışı, oluşan elektron - boşluk çiftlerinin kontaklara ulaşmadan tekrardan birleşmelerine (rekombinasyon) neden olacak, fotodedektörün de verimliliğini düşüreceğinden tabaka kalınlıklarının belirlenmesinde rekombinasyon zamanı gözetilerek optimum bir tasarım yapılmalıdır.

2.3.3. Bant Genişliği ve Cevap Süresi

Fotodedektörler için, bant genişliği ve cevap süresi önemli diğer parametrelerdir. Fotodedektöre ışık düşürülmesi sonucu oluşan elektron - boşluk çiftinin, arınmış bölge sınırlarına kadar ulaşması için geçen süre, cevap süresi olarak tanımlanır. Bant genişliği ise fotodedektörün birim zamanda ne kadar sinyali işleyebildiğinin bir ölçüsüdür. Cevap süresi,

$$\tau = \tau_{tr} + \tau_{R_sC} \quad (2.20)$$

ifade edilir. τ cevap süresi, τ_{tr} geçiş zamanı ve τ_{R_sC} ise RC zaman sabiti olup aşağıdakiler gibi ifade edilirler;

$$\tau_{tr} = \frac{W_{dep}}{v_s} \quad (2.21)$$

ve

$$\tau_{R_sC} = R_s \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{W_{dep}} \quad (2.22)$$

Bu ifadelerde W_{dep} p - n eklemının arınmış bölge genişliği, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, ϵ_r yarıiletkenin dielektrik sabiti, R_s malzemenin direnci ve A fotodedektörün aktif alanını ifade etmektedir.

Bant genişliği,

$$BW = \frac{1}{2\pi(\tau_{tr} + \tau_{R_s C})} \quad (2.23)$$

şeklinde ifade edilir. Bant genişliği fotodedektörün cevap süresi ile ters orantılıdır.

2.3.4. Gürültü

Gürültü, fotodedektörlerin dedekte edebilirliğini etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. İyi çalışan bir dedektörde sinyal/gürültü oranının yüksek olması beklenir. Fotodedektör üzerinde oluşan gürültü, dedektörün ölçebileceği en küçük optik gücün limitini belirler. Fotodedektör karakterizasyonu yapılırken, optik gücün oluşturduğu elektrik sinyaline etki eden gürültü toplamı gürültüye eşdeğer güç (Noise Equivalent Power, NEP) ile ifade edilir. NEP,

$$NEP = \frac{P_{min}}{\sqrt{BW}} \quad (2.24)$$

şeklinde ifade edilir. P_{min} minimum optik güç ve BW fotodedektörün bant genişliğini temsil eder.

Bir fotodedektörün dedekte edebilirliği ne kadar iyi ise yüksek teknolojide o kadar kullanım imkanı bulur. Dedekte edebilirliği belirlenirken, fotodedektörün bant genişliği, duyarlılığı ve karanlık akımı bilinmelidir. Karanlık akım, fotodedektöre optik güç uygulanmadığı halde fotodedektörden okunan akım değeridir, I_d olarak gösterilir.

Normalize edilmiş dedekte edilebilirlik,

$$D^* = \frac{R}{I_d} \sqrt{A \cdot BW} \quad (2.25)$$

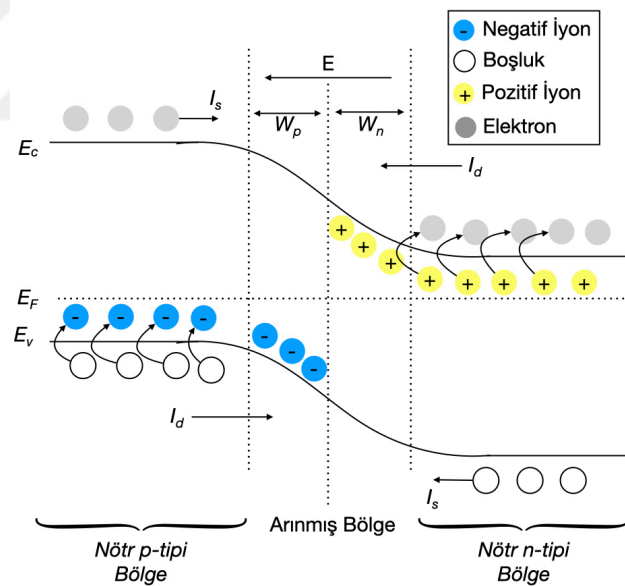
şeklinde ifade edilir.

2.4. FOTODEDEKTÖRLER VE ÇALIŞMA PRENSİPLERİ

Yarıiletken teknolojisine dayalı üretilen fotodedektörler genellikle eklem bölgesine sahip yapılardır. Bu çalışma kapsamında $p-i-n$ yapıdaki ve iç kazançlı olacak şekilde tasarlanmış GaInNAs/Ga(N)As tabanlı dedektörlerin üretimi ve karakterizasyonu çalışılmıştır. Bu nedenle, bu bölümde $p-n$, $p-i-n$ ve $p-i-n$ eklem çıkış fotodedektörlerin çalışma prensiplerine değinilecektir.

2.4.1. $p-n$ ve $p-i-n$ Eklem Fotodedektörler

Optoelektronik aygıtlar genel olarak $p-n$ eklem diyoduna dayanmaktadır. p -tipi veya n -tipi yarıiletkenler, sırasıyla yarıiletkene donör ve akseptör atomu katkılama ile oluşturulur. Çoğunluk taşıyıcı elektron olduğunda n -tipi, çoğunluk taşıyıcı boşluk olduğunda ise p -tipi yarıiletken olarak adlandırılırlar. Bir $p-n$ eklem yapısal olarak; iyon implantasyonu, difüzyon veya epitaksiyel büyütme yöntemi kullanılarak oluşturulur.

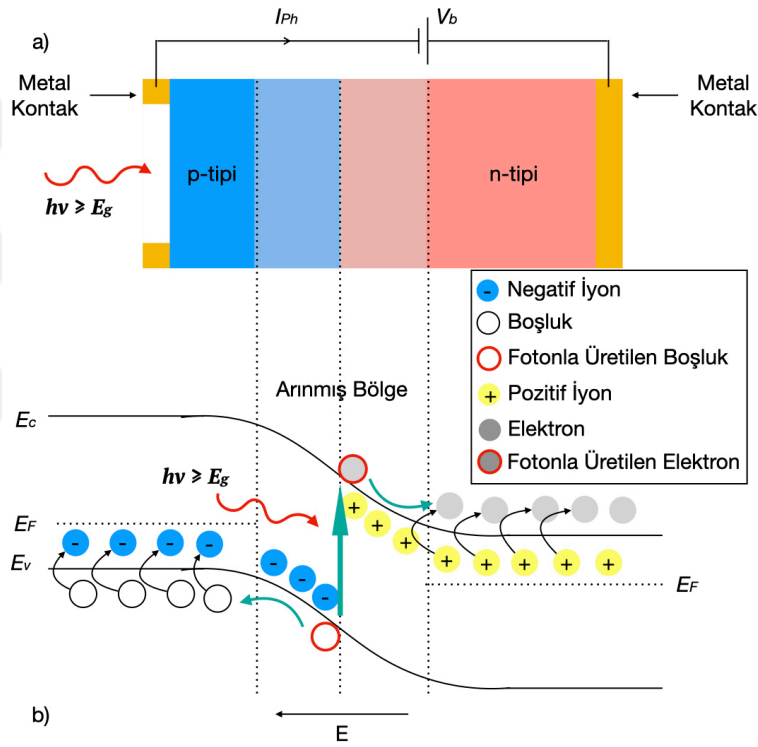


Şekil 2.9: $p-n$ eklemin denge durumundaki bant diyagramı.

Denge durumundaki bir $p-n$ ekleminde (Şekil 2.9) Fermi seviyesi, eklem boyunca sabittir. Denge durumundaki bir $p-n$ eklemi daha iyi anlayabilmek için $p-n$ eklemine; Nötr p bölgesi, arınmış bölge ve nötr n bölgesi olarak üç bölgeye ayırarak inceleyebiliriz.

Nötr p-tipi bölgede bantlar düzdür. Akseptör atomlarının tamamı iyonize olmuştur. Bu nedenle akseptör atomlarının yoğunluğu ve serbest boşluk yoğunluğu birbirine eşittir.

Termal uyarımla uyarılmış olan düşük yoğunlukta azınlık elektronlar iletkenlik bandında bulunmaktadır. Eklem bölgesi civarında ise bantlar bükülmüştür ve bu bölge civarında neredeyse hiç serbest taşıyıcı bulunmaz, bu bölgeye arınmış bölge denir. Arınmış bölge yaklaşımına göre bu bölge içerisinde yalnızca pozitif ve negatif yüklü iyonize olmuş katkı atomları vardır, bu nedenle bir iç elektrik alan vardır. Nötr n-tipi bölgede de bantlar düzdür. Hareketsiz donörlerin yoğunluğu ile serbest elektronların yoğunluğu birbirine eşittir. Termal uyarımla uyarılmış olan düşük yoğunlukta azınlık boşluk valans bandında bulunmaktadır. Termal dengedeki $p-n$ eklemine net akım sıfırdır.



Şekil 2.10: $p-n$ eklem fotodedektörün a) basitleştirilmiş dedektör tabaka yapısı ve b) geri besleme durumundaki bant diyagramı.

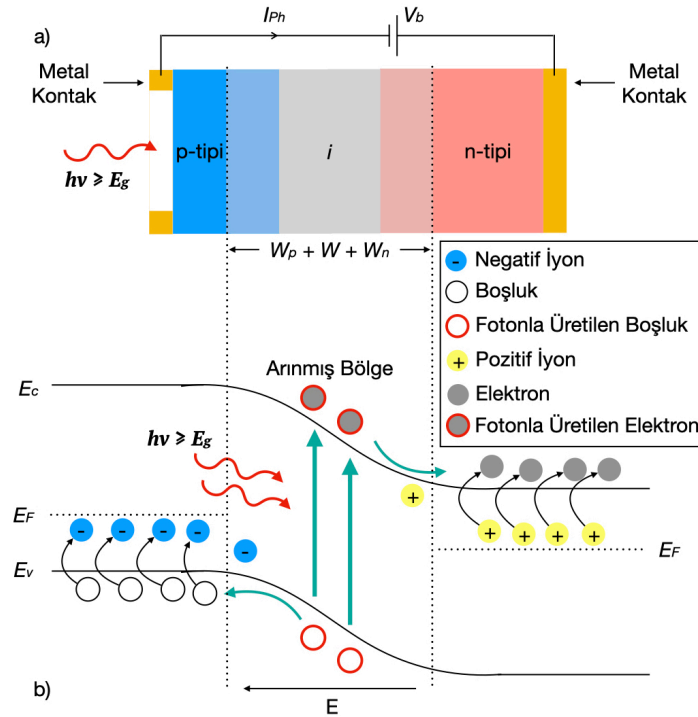
Şekil 2.10'da basitçe $p-n$ eklemine dayalı bir fotodiyodun yapısı gösterilmiştir. Fotodedektöre ışık girişi için üst kontakta pencere bulunmakta ve alt kontak tamamen metal ile kaplanmaktadır. Fotodedektörler genel olarak arınmış bölgenin daha geniş olması, iç elektrik alanının daha büyük olması ve diyot akımının düşük olması için geri yönde beslenmektedir. Bant aralığında veya daha yüksek enerjili fotonlar böyle bir ekleme soğurulduğunda, valans bandında bulunan elektronları uyararak iletkenlik bandına çıkmasını sağlar. Arınmış bölge civarında oluşan bu elektron - boşluk çiftleri iç elektrik alan sayesinde kontaklara süpürülerek fotoakım oluştururlar, oluşan bu akım $p-n$ eklemineki akıma zıt yöndedir. Böylece optik sinyal elektrik sinyaline dönüşmüş olur.

p - n eklem geri besleme voltajı uygulandığında uzaysal olarak arınmış bölgenin genişlediği ve iç elektrik alan arttığından bu daha geniş bir bölgede elektron - boşluk çifti iç elektrik alanla süpürülerek fotoakıma katkı sağlar. p - n eklemde oluşan toplam akım,

$$I_T = I_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{k_B T} \right) - 1 \right] - I_{ph} \quad (2.26)$$

ifadesi ile verilir. I_0 sızıntı akımı, V besleme voltajı, k_B Boltzmann sabiti, T sıcaklık ve I_{ph} fotoakımdır.

Bir p - n eklemde, eklem bölgesi civarında ya da difüzyonla eklem bölgesi civarına ulaşabilecek mesafede oluşan elektron - boşluk çiftleri fotoakıma katkı sağlar. p - n eklem geri besleme voltajı uygulandığında arınmış bölge genişliği artacaktır. Bu da absorpsiyon ve fotoakımı artırmaktadır. Geri besleme voltajını daha fazla artırmak arınmış bölgeyi genişletir fakat bir noktadan sonra dedektör yapısının ısınmasına hatta yanmasına neden olacaktır. p - n eklemde arınmış bölgeyi genişletmenin bir başka yolu da p - n eklemine arasına asal (intrinsic, i) bir yarıiletken eklemektir. Böylece arınmış bölge genişliği artacağından fotodedektörün verimi de artar. Bu yapıdaki fotodedektörlere p - i - n eklem fotodedektör denir (Şekil 2.11).



Şekil 2.11: p - i - n eklem fotodedektörün a) basitleştirilmiş dedektör tabaka yapısı ve b) geri besleme durumundaki bant diyagramı.

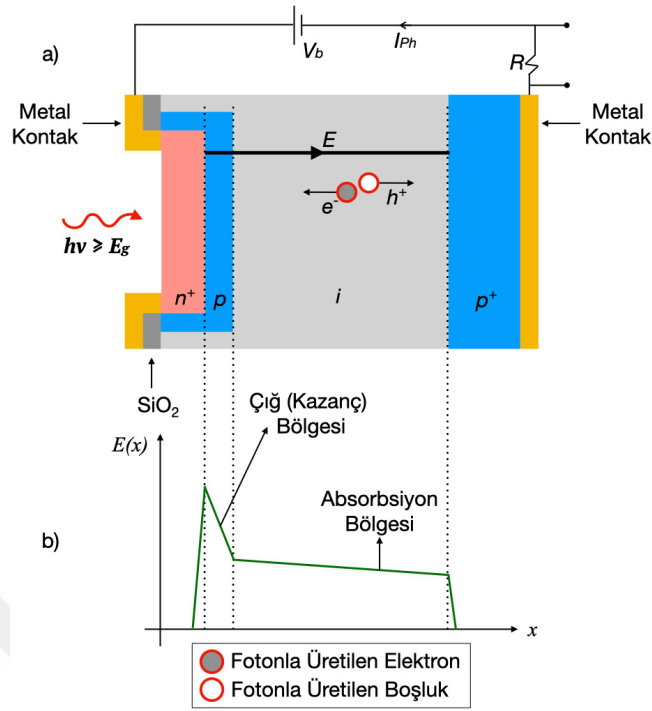
Fotodedektörlerde fotonlar, fotodedektör yapısı boyunca dalgaboylarına (enerjilerine) bağlı olarak farklı bölgelerde soğurulurlar. Kısa dalgaboylu fotonlar fotodedektör yapısında yüzeye daha yakın bölgede soğurulurken, uzun dalgaboylu fotonlar ise fotodedektör yapısında daha derin bir bölgede soğurulacaktır. Kısaca kısa dalgaboyuna sahip fotonların soğurulup, oluşan elektron - boşluk çiftinin kontaklara süpürülmesi için iç elektrik alanının olduğu arınmış bölge yüzeyine yakın olarak yayılmalıdır. Diğer bir deyişle yüzeye çok yakın bir bölgede soğurulmuş olan fotonların yaratacağı elektron - boşluk çiftinin difüzyon uzunluğu arınmış bölgeye erişebilecek mertebede olmalıdır ki kısa dalgaboylu fotonlar da soğurulabilsin. Kısa dalgaboylu fotonların soğurulmasında kayıplar çoktur. Fakat arınmış bölgeyi genişletmek fotodedektörün kapasitansını ve zaman sabitini düşürecek, cevap süresini de azaltırken, geçiş zamanını (transit time) artıracaktır, sonuç olarak fotodedektörün performansı düşecektir (Erol, 2013).

Tüm bunlar göz önüne alınarak yapıya eklenecek olan asal bölgenin genişliği, fotodedektörün kapasitansını ve zaman sabitini düşürmeyecek ancak soğurmaya da maksimum düzeye çekecek, en optimal genişlikte ayarlanmalıdır.

2.4.2. *p-i-n* Eklem Çığ Fotodedektörler

p-i-n eklem yapısına sahip fotodedektörler yüksek hıza ve düşük karanlık akıma sahip olmalarına rağmen, hassas ve hızlı dedekte edebilme gerekli olduğu noktalarda, çok düşük optik güçleri algılama kabiliyetine sahip olmayabilirler. Çünkü *p-n* ve *p-i-n* eklem fotodedektörler iç kazanç mekanizmasına sahip değildir. Ancak iç kazanç mekanizması geliştirilebilir. İç kazanç mekanizması ile birlikte geliştirilmiş bir *p-i-n* eklem yapısına "*p-i-n* Eklem Çığ Fotodedektör" denir. *p-i-n* eklem çığ fotodedektörlerin çalışma mekanizması taşıyıcıların impakt iyonizasyonuna dayalıdır.

Şekil 2.12'de üst kısımda *n*-tipi bölge daha yüksek katkı yoğunluğuna, dolayısıyla daha dar arınmış bölgeye sahiptir. Bu nedenle n^+-p eklemi ve $i-p^+$ ekleminde iç elektrik alan $p-i-p^+$ kısmındakinden daha yüksektir. $p-i-p^+$ bölgede üretilen elektron - boşluk çiftleri iç elektrik alanla ayrılır ve yüksek iç elektrik alan bölgesine sürüklenirler ve bu bölgede impakt iyonizasyonla çoğullanırlar.

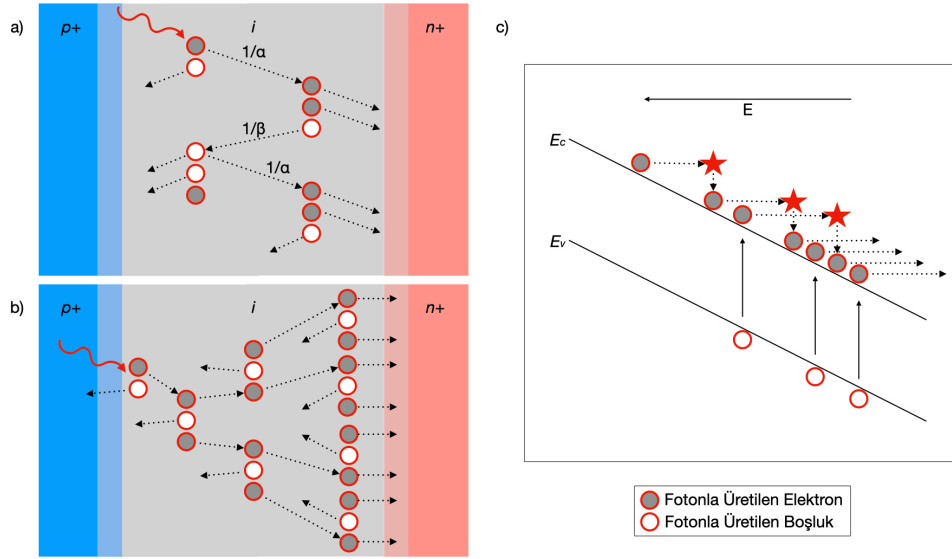


Şekil 2.12: *p-i-n* eklem çığ fotodedektörünün a) basitleştirilmiş dedektör tabaka yapısı ve b) konuma bağlı olarak iç elektrik alan değişimi.

Bu bölümde impakt iyonizasyon ve gürültü mekanizmalarına değinilecektir. Ayrıca tez kapsamında incelenen örneklerde rezonans kavitesi bulunmasından dolayı, rezonans kavitesi de bu başlık altında anlatılacaktır.

2.4.2.1. İmpakt İyonizasyon

p-i-n eklem çığ fotodedektörler, Zener kırılma voltajına (breakdown voltage) yakın geri besleme altında çalışan ve foton absorpsiyonu sonucu oluşan taşıyıcılar da satürasyon hızlarında (GaAs tabanlı fotodedektörlerde elektrik alan $>10^5$ V/cm büyüklüğüne ulaştığı zaman) çalışan aygıtlardır. Soğurulan foton sonucu absorpsiyon bölgesinde oluşan yüksek enerjili taşıyıcı, elektrik alan altında kontaklara doğru ilerlerken, fazla enerjisini yapıdaki atomlara vererek valans bandından bir elektronu iletkenlik bandına çıkararak fazladan bir elektron - boşluk çifti oluşturur. Bu mekanizmaya impakt iyonizasyon ve oluşan bu taşıyıcılara ise ikincil taşıyıcılar denir. Foton ile oluşturulan birincil taşıyıcılar ve birincil taşıyıcılar ile oluşturulan ikincil taşıyıcılar yüksek iç elektrik alan altında yeteri kadar enerji (E_i) kazanarak hızlanabilirlerse yeni taşıyıcılar oluşabilmektedir. Böylece taşıyıcı çoğullanması (multiplication) gerçekleşir (Şekil 2.13).



Şekil 2.13: *p-i-n* eklem çığ fotodedektörlerde a) $\alpha_e = \beta_h$ b) $\alpha_e \gg \beta_h$ için ve c) bant diyagramı üzerinde impakt iyonizasyon mekanizması.

İmpakt iyonizasyonu tetiklemek için gerekli olan elektrik alanı, besleme voltajı ile sağlayabiliriz. Fakat besleme voltajını artırarak Zener kırılma noktasına ulaşılabilceği için, bu şartlara varıncaya kadar impakt iyonizasyon mekanizması tetiklenmeyebilir ya da örgü sıcaklığının artmasından dolayı yine verim düşebilir. Bu nedenle *p-i-n* çığ fotodedektörlerde iç elektrik alanı artırarak bu sınırlamadan kurtulabiliriz. Bunu da yüksek katkılı ($N_a, N_d > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) p^+ ve n^+ tipi tabakaları yapıya ekleyerek sağlayabiliriz.

p-i-n eklem çığ fotodedektörlerde, impakt iyonizasyon hızı, elektronların ve boşlukların iyonizasyon katsayısına bağlıdır. α_e elektronların ve β_h boşlukların iyonizasyon katsayısını temsil eder, elektrik alan doğrultusunda elektronların veya boşlukların yeni taşıyıcı çiftleri oluşturana kadar ilerlediği ortalama mesafedir. α_e ve β_h 'ın elektrik alan ile ilişkileri,

$$\alpha_e(E) = a_e \exp \left[- \left(\frac{b_e}{E} \right)^{m_e} \right] \quad (2.27)$$

ve

$$\beta_h(E) = a_h \exp \left[- \left(\frac{b_h}{E} \right)^{m_h} \right] \quad (2.28)$$

ifade edilir. a_e, a_h, b_e, b_h malzeme parametreleri, m_e ve m_h ise; elektron ve boşluğun etkin kütlelerini temsil eder.

α_e ve β_h iyonizasyon katsayılarının kıyaslanması, fotodedektörde hangi taşıyıcı tipinin impakt iyonizasyonunda baskın olduğunu göstermektedir. Örneğin; Şekil 2.13 a'da $\alpha_e = \beta_h$ olduğunda; fotodedektörde kazanca elektron ve boşlukların katkısı eşittir. Şekil 2.13 b'de ise $\alpha_e \gg \beta_h$ olduğunda; bu yapıdaki bir fotodedektör için en büyük katkının, elektronların impakt iyonizasyonundan geldiğini ifade eder (David *ve diğ.*, 2008).

2.4.2.2. Çıg Fotodedektörlerde Gürültü

Çıg fotodedektörlerde iç kazanç sayesinde taşıyıcı çoğullanması gerçekleşirken, aynı zamanda gürültünün artmasına neden olunmaktadır.

Çıg fotodedektörlerde gürültü çoğalması "yerel alan teorisi" (Local Field Theory) ile açıklanır (Yuan *ve diğ.*, 1999). Yerel alan teorisi; gürültü artmasının sadece elektrik alana bağlı olduğunu varsayarak, gürültünün impakt iyonizasyon mekanizmasından ve başlangıç koşullarındaki taşıyıcı sayısından bağımsız olduğunu öne sürer. Bu yaklaşımla çıg fotodedektörlerde kazanç - gürültü ilişkisi "aşırı gürültü faktörü" ile,

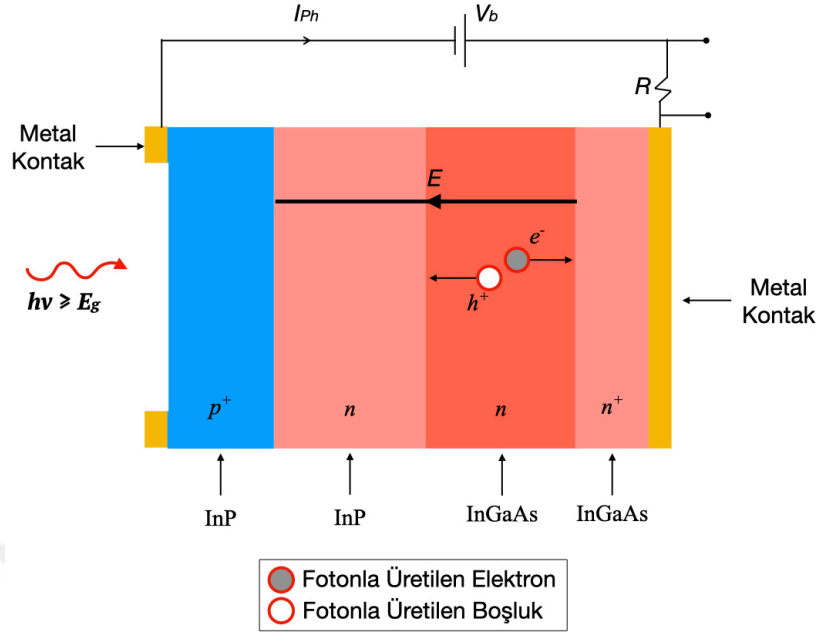
$$F(M) = M - M(1 - k) \left(\frac{M - 1}{M} \right)^2 \quad (2.29)$$

ifade edilir. M kazanç, k iyonizasyon katsayısı olarak tanımlanır. Baskın taşıyıcının boşluk olduğu sistemde $k = \beta_h / \alpha_e$ iken baskın taşıyıcının elektron olduğu sistemde $k = \alpha_e / \beta_h$ olarak kullanılır (Diadiuk *ve diğ.*, 1980).

İmpakt iyonizasyonun, $\alpha_e = \beta_h$ olduğu durumda $k=1$ iken Denklem 2.29'dan da görüleceği üzere, kazanç arttıkça aşırı gürültü faktörünün kazanca eşit olacağı açıktır. Ancak $\alpha_e \gg \beta_h$ ya da $\alpha_e \ll \beta_h$ çoğalmanın tek tip taşıyıcı üzerinde artırıldığı sistemlerde, taşıyıcı sayısı artarken gürültü oranının da çok fazla etkilenmediği görülür (Campbell *ve diğ.*, 1989).

2.4.2.3. Ayrılmış Absorpsiyon ve Kazanç Bölgesi $p-i-n$ Fotodedektörler

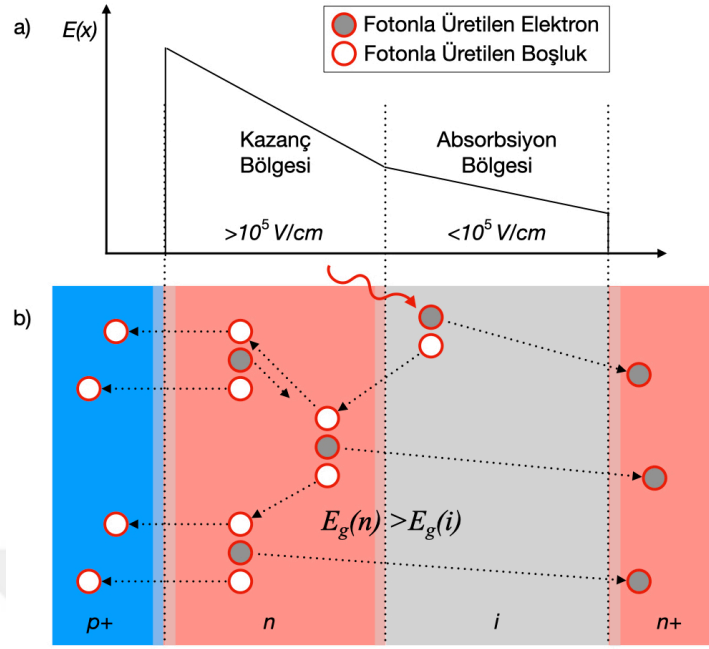
Bazı fotodedektör yapılarında tek tip taşıyıcı çoğalması kendiliğinden gerçekleşir ya da tasarıma yapılan ekler ile tek tip taşıyıcı çoğullanması sağlanabilir. Şekil 2.14'te verilen fotodedektör yapısında, absorpsiyon bölgesinde oluşan elektron - boşluk çiftlerinin ayrı bir kazanç bölgesi ile çoğullamanın yapıldığı görülmektedir. Bu yapılara "ayrılmış absorpsiyon ve kazanç bölgesi" (Separated Absorption-Multiplication, SAM) $p-i-n$ fotodedektörler denir (Ma *ve diğ.*, 1995).



Şekil 2.14: SAM $p-i-n$ eklem çığ fotodedektörünün basitleştirilmiş dedektör tabaka yapısı gösterimi.

SAM $p-i-n$ fotodedektörlerde absorpsiyon bölgesinde oluşan elektron - boşluk çiftinden, taşıyıcı tipinden biri kontağa hızlıca ulaşırken diğer taşıyıcı tipi de absorpsiyon bölgesine kıyasla daha büyük yasak bant aralığına sahip yarıiletkenlerden oluşan daha yüksek iç elektrik alana sahip eklem bölgesinden ilerleyerek daha fazla taşıyıcı çoğullanması sonrasında diğer kontağa ulaşır.

Şekil 2.15'teki SAM fotodedektöre bakıldığında n ile n^+ tabakaları arasındaki asal bölgede gerçekleşen absorpsiyon sonucu oluşan elektron - boşluk çifti absorpsiyon bölgesinin iç elektrik alanı ile süpürülür, elektronlar n^+ tabakası üzerinden kontağa hemen ulaşırken, boşluklar yüksek iç elektrik alana sahip n ile p^+ tabakaları boyunca ilerlerken çoğullanan taşıyıcı kazancı sağladıktan sonra diğer kontağa ulaşır.



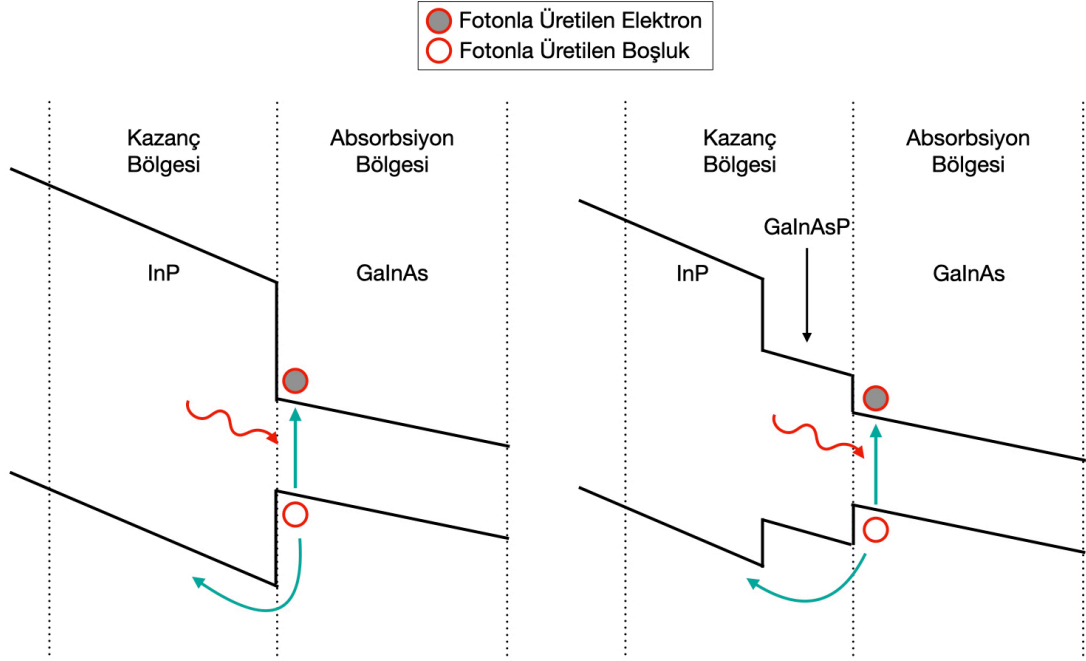
Şekil 2.15: SAM p - i - n eklem çığ fotodedektörlerde a) konuma bağlı olarak iç elektrik alan değişimi b) $\beta_h \gg \alpha_e$.

Tez kapsamında incelenen fotodedektörlerin aktif bölgesini oluşturan GaInNAs/Ga(N)As kuantum kuyusu sistemi tek tip taşıyıcının çoğullanması için avantajlıdır.

GaInNAs alaşımlı fotodedektör yapısında oluşan boşluğun valans bandında karşılaştığı bariyerin yüksekliği, GaInAsP alaşımlı fotodedektör yapısında valans bandında karşılaştığı bariyer yüksekliğinden çok daha alçak olduğundan, boşluklar GaInNAs/Ga(N)As kuantum kuyusu sisteminde valans bandındaki kuyudan termiyonik emisyon süreciyle kaçabilmektedir, geride kalan elektronlar çoğullanmaktadır. Bu nedenle bu malzeme sistemi yapısal olarak tek tip taşıyıcı çoğullanması için avantajlıdır.

2.4.2.4. Kademeli Ayrılmış Absorpsiyon ve Kazanç Bölgesi $p-i-n$ Fotodedektörler

GaInAsP alaşımının, GaInAs/InP alaşımlı fotodedektör yapısının arasında büyütülmesi sonucu oluşan sistemde ise valans bant süreksizliği azalacağından boşluklar kontağa daha hızlı ulaşacaktır.



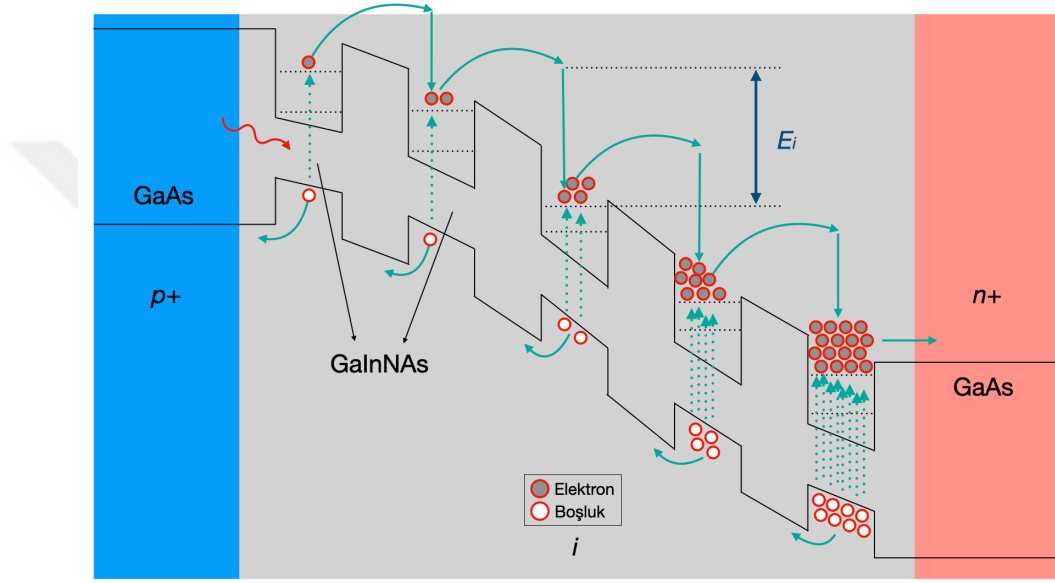
Şekil 2.16: a) SAM GaInAs/InP ve b) SAGM GaInAs/GaInAsP/InP $p-i-n$ eklem fotodedektör sistemi bant diyagramı.

Bu tip yapılar literatürde, "kademeli ayrılmış absorpsiyon ve kazanç bölgesi" (Separated Absorption Graded Multiplication, SAGM) $p-i-n$ çığ fotodedektör olarak adlandırılırlar (Campbell ve diğ., 1985, 1987). SAGM yapısında kademeli olarak değişen valans ve iletkenlik bantı yükseklikleri sayesinde foton absorpsiyonuyla oluşan elektron ve boşluklar minimum enerji düzeyine inerken fazla enerjileri yeni elektron ve boşluk yaratılmasına harcanır.

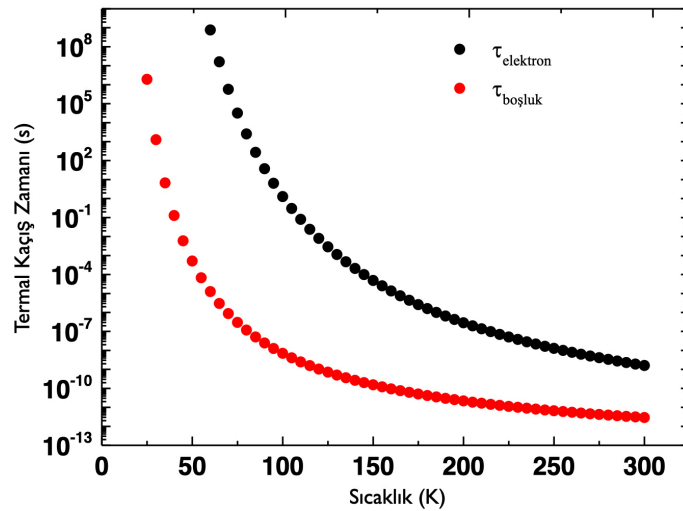
SAGM $p-i-n$ fotodedektör yapılarına örnek olarak GaInAs/InP ve GaInAsP/InP alaşımlı fotodedektör yapıları gösterilebilir (Campbell ve diğ., 1987; Kagawa ve diğ., 1992; Li ve diğ., 2003; Nie ve diğ., 1997). Şekil 2.16'ya bakıldığında SAM ve SAGM $p-i-n$ çığ fotodedektör yapılarının bant profili farkı göze çarpmaktadır.

2.4.2.5. Çoklu Kuantum Kuyulu $p-i-n$ Eklem Çığ Fotodedektörler

Kuantum verimliliği daha da artırılmak istendiğinde absorpsiyon bölgesindeki iç kazancı artırabilmek için yapıya çoklu kuantum kuyuları eklenebilir. Şekil 2.17’de gösterildiği gibi geri besleme altında GaInNAs/GaAs çoklu kuantum kuyulu $p-i-n$ eklem fotodedektör yapıda iletkenlik bandı bant süreksizliği ile valans bandı bant süreksizliği arasında (Şekil 2.18) fark olmasından dolayı Şekil 2.17’deki gibi elektronların çoğalmasını sağlamak mümkündür.



Şekil 2.17: Geri besleme altında GaInNAs/GaAs çoklu kuantum kuyulu $p-i-n$ ışıf fotodedektör.



Şekil 2.18: GaInNAs/GaAs çoklu kuantum kuyulu $p-i-n$ ışıf fotodedektörde sıcaklığa bağılı kaçış zamanı (Khalil ve Balkan, 2014).

GaInNAs/GaAs çoklu kuantum kuyulu yapı yukarıda bahsedilen sisteme literatürde verilebilecek en iyi örneklerden biridir. GaInNAs/GaAs çoklu kuantum kuyulu sistemlerde konsantrasyon oranına bağlı olarak valans bandı ile iletkenlik bandı süreksizliği arasında yaklaşık 3 kat fark olduğu görülmektedir (Donmez ve diğ., 2014; Khalil ve Balkan, 2014).

Şekil 2.18’de görüldüğü gibi, oda sıcaklığında GaInNAs/GaAs çoklu kuantum kuyulu yapıda oluşan boşluklar elektronlara oranla 10^3 kat daha hızlı kuyudan kaçmakta ve impakt iyonizasyon mekanizmasının tetiklenmesi için gerekli olan ($>10^5$ V/cm) elektrik alana ulaşıldığında; kuantum kuyuları boyunca sadece elektron çoğalması gerçekleşebilmektedir ($\alpha_e \gg \beta_h$) (Sarcan, 2018).

Taşıyıcıların kuantum kuyusundan kaçış süreleri,

$$\tau_{th} = \left[\frac{1}{L_w} \sqrt{\frac{k_B T}{2\pi m_w^*}} \exp\left(-\frac{E_b}{k_B T}\right) \right]^{-1} \quad (2.30)$$

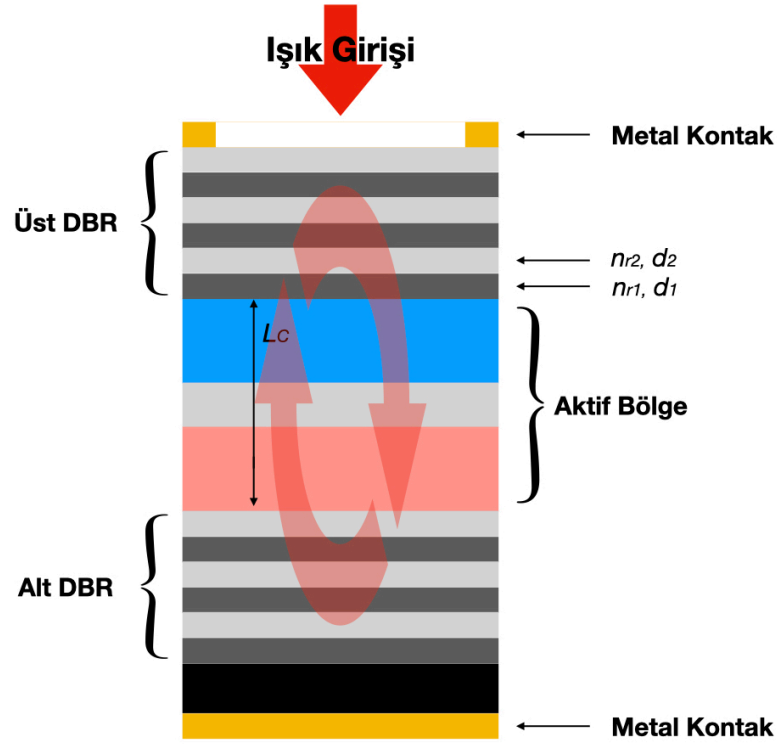
şeklinde ifade edilir. L_w kuantum kuyusu genişliği, m_w^* kuantum kuyusundaki taşıyıcının etkin kütlesi, E_b taşıyıcının karşılaştığı bariyer enerjisi olarak tanımlanır.

GaInNAs/GaAs çoklu kuantum kuyulu yapılar tek tip taşıyıcı kazancının sağlandığı, yüksek verimlilikte çalışan ve yüksek bant genişliğine sahip *p-i-n* çığ fotodedektör olarak bilinirler.

2.4.2.6. Rezonans Kavitesi

Rezonans kavitesi basit olarak fotodedektöre dalgaboyu seçiciliği sağlayan yapıdır. Fabry-Pérot kavitesi, absorpsiyon bölgesinin duyarlı olduğu dalgaboyu civarına ayarlandığından, fotodedektörün duyarlı olduğu dalgaboyunda geçirgen, diğer dalgaboylarında ise yansıtıcı olarak çalışacaktır.

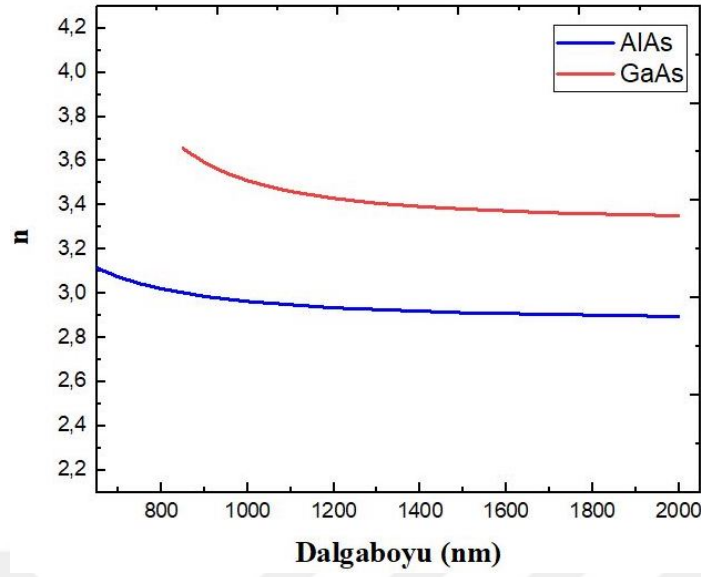
Rezonans kavitesinin dalgaboyu seçiciliği dışında bir diğer katkısı da absorpsiyon bölgesine gönderilen fotonların kavite aynaları arasında bir çevrime sokularak, soğurulma olasılıklarını artırmasıdır. Bu sayede etkin absorpsiyon uzunluğu artar.



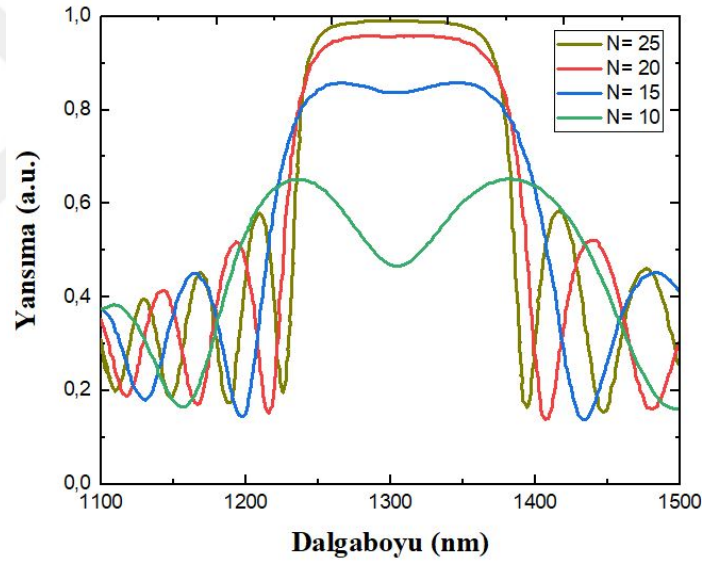
Şekil 2.19: Fabry-Pérot kaviteli *p-i-n* eklem fotodedektör.

Bölüm 2.2.4'te değinildiği gibi, rezonans kavitesinde yüksek yansıtıcılığa ulaşmak için yüksek yansıtıcılı alt ve üst aynalar (Distributed Bragg Reflectors, DBRs) kullanılır. Bu sayede, periyodik dizilmiş alt ve üst aynaların yüksek yansıtıcılığı absorpsiyon oranını yükseltecek, yüksek absorpsiyon oranı ise de fotodedektörün yüksek kuantum verimliliklerine ulaşmasını sağlayacaktır.

Tez kapsamında çalışılan rezonans kaviteli fotodedektör yapılarının, alt ve üst DBR tabakaları GaAs/AlAs'ten oluşmaktadır. AlAs ve GaAs için dalgaboyuna bağlı kırılma indisi değişimi Şekil 2.20'de verilmektedir. Her bir dalgaboyu için hesaplanan matris çarpanlarının değeri ve kırılma indisi değeri Denklem 2.16'da çözümlenerek istenilen dalgaboyu aralığında yansıma spektrumu elde edilmektedir. Değişik periyotta DBR çiftinin teorik yansıma spektrumları Şekil 2.21'de verilmektedir. DBR çifti sayısı arttıkça yansıtıcılığın maksimuma ulaştığı daha önce de ifade edilmiştir. Fakat basit ve maliyeti düşük yapılar tasarlamak ve aygıtın direncinin düşük olması için optimal DBR çifti sayısı seçilmesi önemlidir.



Şekil 2.20: AlAs ve GaAs yarıiletkenin dalgaboyuna bağlı kırılma indisleri.



Şekil 2.21: AlAs/GaAs DBR çiftlerinin farklı periyotlar için hesaplanan dalgaboyuna bağlı teorik yansıma spektrumu.

Elektromanyetik dalga absorpsiyon bölgesinde rezonansa girdiğinde birden fazla tur attığı için kuantum verimi ifadesi de alt ve üst yansıtıcı aynaların ifadesi de eklenerek modifiye edilmelidir. Rezonans kaviteli fotodedektörlerde merkez dalgaboyunda kuantum verimi,

$$\eta_{pik} = \left\{ \frac{(1 + R_2 e^{-\alpha d})}{(1 - \sqrt{R_1 R_2} e^{-\alpha d})^2} \right\} (1 - R_1) (1 - e^{-\alpha d}) \quad (2.31)$$

ifadesi ile verilmektedir. Dar absorpsiyon bölgesine sahip ($\alpha d \ll 1$) rezonans kaviteli

fotodedektörler için bu ifade,

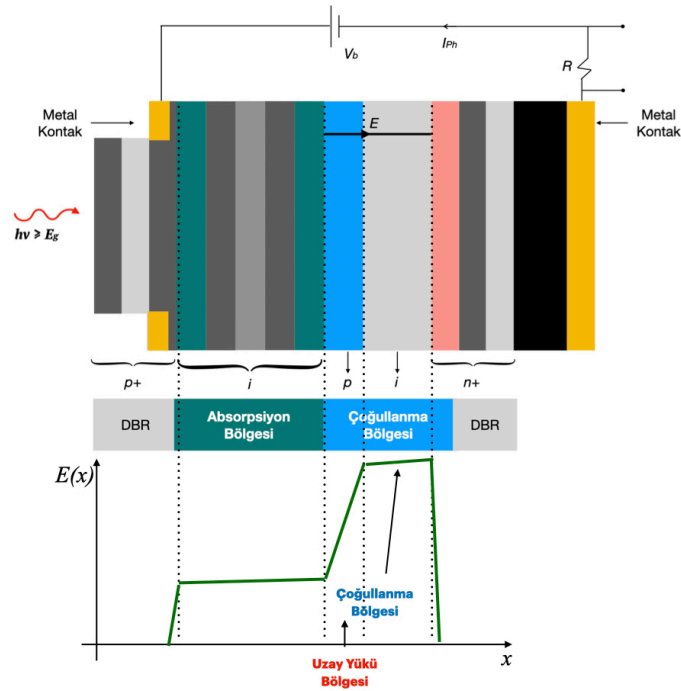
$$\eta_{pik} \simeq \left\{ \frac{(1 + R_2(1 - \alpha d))}{(1 - \sqrt{R_1 R_2}(1 - \alpha d))^2} \right\} (1 - R_1) \alpha d \quad (2.32)$$

şeklinde düzenlenebilir (Ünlü ve diğ., 1995).

Basitçe, rezonans kavitesi arasına yerleştirilen iç kazançlı kuantum kuyulu $p-i-n$ eklem çığ fotodedektörler ile yüksek bant genişliğine ve yüksek kuantum verimine, düşük gürültü ve düşük karanlık akıma ulaşılabilir.

2.4.2.7. Ayrılmış Çoğalma, Yük ve Absorpsiyon Bölgesi Fotodedektörler

SACM yapısı olarak tasarlanan; GaInNAs-tabanlı rezonans kaviteli fotodedektör yapısına eklenen yük çoğullayıcı ikinci bir eklem yapısı ile bu tasarımda iki adet $p-i-n$ yapısı oluşturulmaktadır. Birinci $p-i-n$ (p^+-i-p) yapısı absorpsiyonu, ikinci $p-i-n$ ($p-i-n^+$) yapısı ise gelen elektronların impakt iyonizasyonu için yüksek iç elektrik alanı sağlayacaktır. SACM fotodedektörün, basitleştirilmiş dedektör tabaka yapısı ve konuma bağılı olarak iç elektrik alan değişimi Şekil 2.22’de gösterilmektedir. Bu çalışmada GaInNAs-tabanlı SACM yapılar çalışılmıştır.



Şekil 2.22: SACM fotodedektörün a) basitleştirilmiş dedektör tabaka yapısı ve b) konuma bağılı olarak iç elektrik alan değişimi.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde; fotodedektör yapılarının tasarımları, fabrikasyon süreçleri ve kullanılan karakterizasyon teknikleri ile ilgili bilgiler verilmiştir.

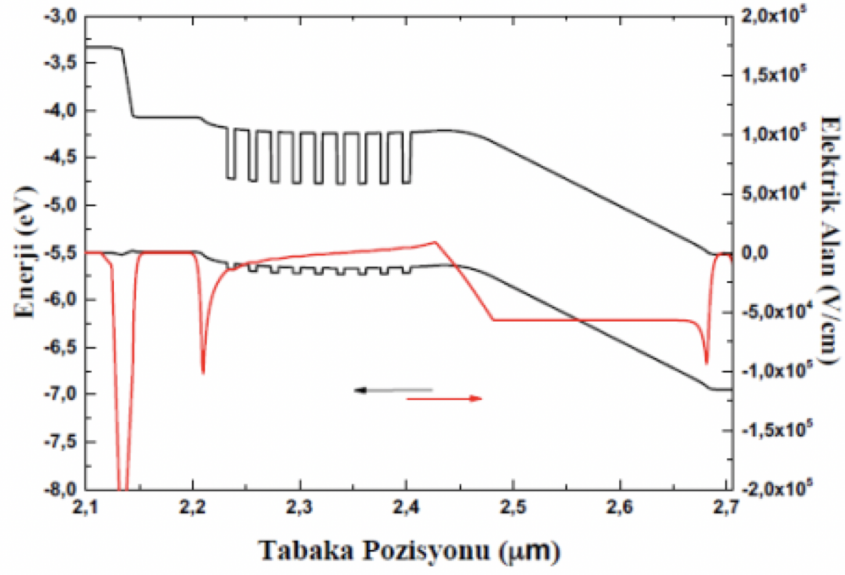
3.1. ÖRNEK YAPILARI VE TASARIMLARI

GaInNAs/Ga(N)As çoklu kuantum kuyulu iki fotodedektör yapısı çalışılmıştır. Bu fotodedektör yapılarının aktif bölgesini oluşturan GaInNAs/Ga(N)As tabakalarının alaşım konsantrasyonları, tabaka kalınlıkları ve kuyu sayıları Tablo 3.1’de verilmiştir. Örnekler MBE yöntemi kullanılarak Tampere Teknik Üniversitesi bünyesindeki Optoelektronik Araştırma Merkezi tarafından büyütülmüştür.

Tablo 3.1: Fotodedektör yapılarının aktif bölgelerinin özellikleri.

<i>Kuyu Sayı</i>	<i>Kuyu Malzemesi</i>	<i>Kalınlık (nm)</i>	<i>Bariyer Malzemesi</i>	<i>Kalınlık (nm)</i>
9	$Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}$	7	$GaAs$	13.5
9	$Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}$	7	$GaN_{0.035}As_{0.965}$	13.5

Absorpsiyon dalga boyu $\sim 1.3 \mu m$ olacak şekilde GaInNAs dörtlü alaşım yapısında N ve In konsantrasyonları, sonlu kuantum kuyusu yaklaşıklığı ve kuantum kuyusu genişlikleri de gözönüne alınarak tasarım yapılmıştır. Fotodedektörlerin iç elektrik alan dağılımları SimWindows programıyla hesaplanmıştır. SimWindows programı, kapalı kaynak kodlu çalışan bir programdır ve GaAs/AlAs hetero-eklem örnekler için tasarlanmıştır. Kod üzerinde değişikliğe izin vermez. Bu sebeple, bu çalışmada kullanılan GaInNAs tabanlı yapılara göre ayarlanamayacağından bu program kullanılarak hesaplanan bant süreksizliği dağılımı gerçeği yansıtmayacaktır. Ancak program ile elde edilen denge durumu için iç elektrik alan dağılımı gerçeği yansıtmaktadır.



Şekil 3.1: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM fotodedektörünün SimWindows kullanılarak hesaplanan denge durumu bant yapıları ve iç elektrik alan dağılımları.

SimWindows programı kullanılarak alaşımdaki katkı konsantrasyonları için denge durumunda $>10^5$ V/cm iç elektrik alan büyüklüğüne ulaşılacağı teorik olarak hesaplanmıştır (Sarcan, 2018).

Tabakasal yapıda örgü uyumu önemli bir aygıt tasarım parametresidir. Çalışmada kuantum kuyusunu kuşatacak bariyer malzemeleri olarak GaAs ve GaNAs tercih edilmiştir. Her iki bariyer malzemesinin avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. GaAs, yapıdaki In ve N oranından dolayı tabakalararasında gerilmeye (strain) neden olacaktır. GaNAs ise bu gerilmeyi kompanse edici özelliğe sahiptir. Yapıdaki gerilme azaltılarak örgü uyumu sağlanabilmektedir. a_S alt tabakaların örgü sabitini ve a_L üst tabakaların örgü sabitini temsil etmektedir. Tabakalararası gerilme $(a_S - a_L)/a_L$ bağıntısı ile hesaplanır.

$Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ örnek için; her bir kuyu ve bariyer arasındaki gerilme (compressive strain) 0.0209'dur ve $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ örnek için; her bir kuyu ve bariyer arasındaki gerilme (compressive strain) 0.0185 olarak hesaplanmıştır.

GaNAs bariyer malzemesi için örgü uyumu olumlu bir sonuçtur. Ancak GaNAs'nin GaAs bariyer malzemesine göre bant aralığı daha küçüktür. Bu yüzden bariyerin sınırlama etkisi GaAs'e göre daha küçük olacaktır. Taşıyıcılar kuyuda tutulmadan kaçabileceklerdir. Bu da fotodedektör için bir dezavantajdır.

Fotodedektör yapısına ayarlanan $1.3 \mu m$ dalgaboyu dışında tam yansıma olacak şekilde DBR tabakaları yerleştirilmiştir. DBR tabakaları, bu çalışmada rezonans kavitesini oluşturmak ve seçici geçirgenliği sağlamak amacıyla, alt ve üst DBR'lar olarak yapıda bulunmaktadır. DBR tabakaları, absorpsiyon bölgesi ile örgü uyumluluğu olan GaAs/AlAs yarıiletken çiftlerinden oluşmaktadır.

Fotodedektör yapılarının tasarımları "Giriş" bölümünde anlatılan Denklem 2.3 ve Denklem 2.5'te verilen BAC modeli ve Vegard yasası kullanılarak tasarlanmış ve absorpsiyon bölgesinin altında ve üzerinde bulunan DBR tabakalarının kalınlıkları ve periyotları, bölüm 2.2.4. alt başlığında anlatılan TMM kullanılarak tasarlanmıştır.

İstanbul Üniversitesi Nano ve Optoelektronik Araştırma Grubu olarak absorpsiyon bölgesi GaInNAs kuantum kuyulu, GaAs ve GaNAs bariyerli RCEPD yapılar üretilmiş ve literatürde yüksek verimlilikli fotodedektör yapıları olarak kayda geçmiştir (Sarcan, 2018; Sarcan ve diğ., 2020). Bu tasarımlarda; valans bandı süreksizliğinin küçük oluşundan yararlanılarak, boşluklar, termiyonik emisyonla bariyerden kaçarken; elektronlar ise elektrik alan altında bükülen bant yapısında iletkenlik bandındaki kuyunun bariyer yüksekliği daha fazla olduğundan, kontağa doğru ilerlerken diğer kuyuya geçişte fazla enerjisini impakt iyonizasyon için harcayarak çoğullanmakta ve iç kazanç elde edilmektedir.

Her ne kadar iç kazanç elde edilmiş olsa da çoğullanmanın çoğunlukla tek tip taşıyıcı ile olduğunu söylemek doğru olmayacaktır. Kontrollü bir şekilde tek tip taşıyıcıyı çoğullamak ve iç kazancı daha fazla artırmak amacıyla bu yapılara yük çoğullayıcı ikinci bir eklem yapısı ekleyerek SACM yapısı tasarlanmıştır. Bu şekilde InGaAs/InP tabanlı yapılarda başarılı sonuçlar elde eden bu mekanizma uygulanmak istenmiştir (Liu ve diğ., 2007) ve literatürde uygulanmaya çalışılan GaInNAs tabanlı ilk SACM tasarımlarından biridir.

SACM yapısı olarak tasarlanan; GaInNAs-tabanlı rezonans kaviteli fotodedektör yapısına eklenen yük çoğullayıcı ikinci bir eklem yapısı ile bu tasarımda iki adet $p-i-n$ yapısı oluşturulmaktadır. Örnek olarak Şekil 3.2’de yukarıdan aşağıya doğru p^+-i-p ve $p-i-n^+$ şeklindedir. Birinci $p-i-n$ (p^+-i-p) yapısı absorpsiyonu, ikinci $p-i-n$ ($p-i-n^+$) yapısı ise gelen elektronların impakt iyonizasyonu için yüksek iç elektrik alanı sağlayacaktır. Bu nedenle bu tabakaların katkı miktarlarının ve çoğullanma tabakasının kalınlık parametrelerinin hesaplanması çok önemlidir.

Çoğullanma tabakasının kalınlığı için çeşitli kalınlıklarda I-V simülasyonlarına bakılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre bu tabaka ne çok dar ne de çok geniş olmalıdır. Çoğullanma bölgesi kalınlığı idealden daha dar olduğunda çoğullanmanın gerçekleşeceği voltaj değeri azalmakta ve kontrolsüz bir çoğullanma bölgesi gözlenmektedir. Çoğullanma bölgesi idealden daha kalın olduğunda ise çoğullanmanın gerçekleşmesi için daha yüksek elektrik alana ihtiyaç duyulduğu görülmüştür. İdeal kalınlık değeri olarak 200 nm civarında olması gerektiği hesaplanmıştır.

Bütün tasarımlar 113F277 numaralı TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında Sarcan F. ve Erol A. tarafından tasarlanmıştır.

p^+	GaAs	95.85 nm	Be = $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	10x DBR
	AlAs	112.46 nm	Be = $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
	GaAs	65 nm	Be = $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
i	GaAs	10 nm		9x Kuantum Kuyusu
	GaAs	13.5 nm		
	$\text{Ga}_{0.66}\text{In}_{0.34}\text{N}_{0.018}\text{As}_{0.982}(\text{Sb})$	7 nm		
	GaAs	13.5 nm		
	GaAs	10 nm		
p	GaAs	55 nm	Be = $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	
i	GaAs	200 nm		
n^+	GaAs	30 nm	Si = $3.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	15x DBR
	AlAs	110.87 nm	Si = $3.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
	GaAs	94.67 nm	Si = $3.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
	GaAs	350 μm	Alttaş	Si = $3.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

Şekil 3.2: Tasarlanan Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $\text{Ga}_{0.66}\text{In}_{0.34}\text{N}_{0.018}\text{As}_{0.982}/\text{GaAs}$ SACM Fotodedektör Yapısı.

p^+	GaAs	92.2 nm	Be = $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	10x DBR
	AlAs	109.39 nm	Be = $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
	GaAs	65 nm	Be = $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
i	GaAs	10 nm		9x Kuantum Kuyusu
	GaAs	13.5 nm		
	$\text{Ga}_{0.733}\text{In}_{0.267}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975} \text{ (Sb)}$	7 nm		
	GaAs	13.5 nm		
p	GaAs	10 nm		
	GaAs	55 nm	Be = $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	
i	GaAs	200 nm		
n^+	GaAs	30 nm	Si = $2.9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	15x DBR
	AlAs	107.86 nm	Si = $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
	GaAs	98.01 nm	Si = $7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
	GaAs	350 μm	Altaş	Si = $3.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

Şekil 3.3: Tasarlanan Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $\text{Ga}_{0.733}\text{In}_{0.267}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975}/\text{GaAs}$ SACM Fotodetektör Yapısı.

Ancak büyütme sürecinde yanlışlıkla Şekil 3.2'deki ilk yapı için p katkılı olması istenen tabaka p^+ olarak büyütülmüş, N'un yapıya katılmasında ve kaliteli yapıların büyütülmesinde önemli rolü olan Sb akışı altında büyütme de yapılmamıştır. Bu hata sonucunda büyütücüden ikinci bir büyütme talep edilmiş yapı Sb akışı altında büyütülmüş ancak yine aynı katkı konsantrasyonu hatası yapılmış ve yapı GaAs bariyerli istenmesine rağmen GaNAs bariyerli olarak büyütülmüştür (Şekil 3.3). Sonuç olarak Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'teki yapılar büyütülmüş ve bu tez çalışması kapsamında incelenmiştir.

$p+$	GaAs	95.85 nm	Be = $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	10x DBR
	AlAs	112.46 nm	Be = $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
	GaAs	65 nm	Be = $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
i	GaAs	10 nm		9x Kuantum Kuyusu
	GaAs	13.5 nm		
	$\text{Ga}_{0.66}\text{In}_{0.34}\text{N}_{0.018}\text{As}_{0.982}$	7 nm		
	GaAs	13.5 nm		
$p+$	GaAs	55 nm	Be = $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	
i	GaAs	200 nm		
$n+$	GaAs	30 nm	Si = $3.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	15x DBR
	AlAs	110.87 nm	Si = $3.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
	GaAs	94.67 nm	Si = $3.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
	GaAs	350 μm	Alttaş	Si = $3.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

Şekil 3.4: Büyütülen Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $\text{Ga}_{0.66}\text{In}_{0.34}\text{N}_{0.018}\text{As}_{0.982}/\text{GaAs}$ SACM Fotodedektör Yapısı.

$p+$	GaAs	92.2 nm	Be = $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	10x DBR
	AlAs	109.39 nm	Be = $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
	GaAs	65 nm	Be = $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
i	GaAs	10 nm		9x Kuantum Kuyusu
	$\text{GaN}_{0.035}\text{As}_{0.965}$	13.5 nm		
	$\text{Ga}_{0.733}\text{In}_{0.267}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975}(\text{Sb})$	7 nm		
	$\text{GaN}_{0.035}\text{As}_{0.965}$	13.5 nm		
$p+$	GaAs	55 nm	Be = $6.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	
i	GaAs	200 nm		
$n+$	GaAs	30 nm	Si = $2.9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	15x DBR
	AlAs	107.86 nm	Si = $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
	GaAs	98.01 nm	Si = $7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	
	GaAs	350 μm	Alttaş	Si = $3.1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

Şekil 3.5: Büyütülen Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $\text{Ga}_{0.733}\text{In}_{0.267}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975}/\text{GaN}_{0.035}\text{As}_{0.965}$ SACM Fotodedektör Yapısı.

3.2. FOTODEDEKTÖR FABRİKASYONU

Bir fotodedektör yapısının tasarımı ve büyütülmesi ne denli önemli ise, örnek fabrikasyonu da aygıtın tam anlamıyla tasarlandığı gibi çalışabilmesi açısından önemlidir. Fabrikasyon süreçleri, el becerisi ile birlikte kullanılan cihazlara hakimiyet gerektirir ve fabrikasyonu yapılan fotodedektör yapısının aygıt olarak kalitesini etkileyen bir unsur olarak gösterilebilir.

Günümüzde teknolojinin gelişmesi ile beraber birçok teknik gelişmiştir. Bu çalışmada kullanılan ıslak aşındırma tekniği, mikro-nano yapıların fabrikasyonunda kullanılan en temel teknik olduğu söylenebilir.

Basitçe fotolitografi, yarıiletken malzeme üzerine tasarlanan desenin işlenmesidir. Bu çalışmada üretilen aygıtların fabrikasyon süreçleri; Kristal kesme, Temizleme, Fotodirenç kaplama, Kimyasal aşındırma ve Lift-Off işlemi 10 sınıfı sarıda koşullarında, Maske ve Maske hizalayıcı 100 sınıfı sarıda koşullarında ve Metalizasyon ile Tel bağlama işlemi 1000 sınıfı temizoda koşullarında yapılmış ve alt başlıklarda ayrıntılı şekilde anlatılmaktadır.

3.2.1. Kristal Kesme

Fotodedektör yapıları epitaksiyel büyütme yöntemleri ile çeşitli boyutlarda yongalar (wafer; 2,3inç vb) üretilirler. Bu üretilen yongaların aygıt halinde üretimi için istenilen boyutlarda kristal parçaları kesilmesi gerekmektedir. Kristaller, fiziksel yapıları gereği örgü periyodikliğine sahip olduklarından, büyütme doğrultularından yararlanılarak kristali istenilen boyutlarda küçük parçalara ayırmak mümkün olmaktadır.

Bu çalışma AR-GE çalışması olmasından dolayı seri üretimde kullanılan tekniklerin aksine el ile kesme işlemi uygulanmıştır.

Kristal parçanın büyütme doğrultusuna paralel bir çizgi çizmek ya da yine büyütme doğrultusuna paralel olacak şekilde parçanın kenarından bir çentik atmak el ile kesme işlemi için kullanılacak iki yöntemdir. Kristal parça hafifçe uygulanan bası sayesinde çizgi boyunca ya da çentik doğrultusunda parçanın kolayca bölündüğü görülecektir.

Bu çalışmada 2 inç çaplı GaInNAs/Ga(N)As örnekten 0.6x0.6 cm boyutlarında parçalar kesilerek kullanılmıştır.

3.2.2. Temizleme

Kristal yüzeyinin temizliği optoelektronik aygıtlar için önemlidir. Malzeme yüzeyi kimyasal ya da çevresel nedenlerden dolayı kirlenmiş olabilir. Bu kirlenme optoelektronik aygıtın optik kalitesini düşürür, bu nedenle kristal yüzeyleri çeşitli işlemler ile temizlenir.

Aseton, alkol ve saf su üçlüsü; organik bazlı kirlilikleri gidemek için kullanılır. Genellikle aseton ve alkolün kaynama noktalarına yakın sıcaklıklarda belirli süre ayrı ayrı bekletilen örnek, ultra saf su ile yıkanıp, yüksek saflıkta Azot gazı ile kurutularak temizlik işlemi gerçekleştirilir. Kullanılan aseton, alkol ve ultra saf suyun III - V grubu yarıiletken için aşındırıcı bir özelliği olmadığından, bu temizleme işlemi yüzey temiz oluncaya kadar tekrarlanabilir.

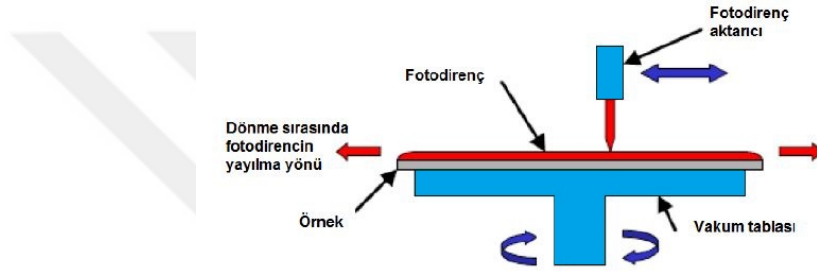
Zaman içerisinde kimyasal tepkime sonucu yüzeyde oluşan oksidasyon tabakasını kaldırmak için aşındırıcı özelliği bulunan çözeltiler kullanılır. Bu temizleme işleminde malzeme yapısına uygun çözeltiler kullanılır, Örneğin; GaAs-tabanlı yarıiletken malzemeler için literatürde hidroklorik asit çözeltisi kullanıldığı görülür.

Bu çalışmada 1:1 oranında hidroklorik asit - su çözeltisi kullanılmıştır (Baca ve diğ., 2009). Yüzey üzerinde oluşan oksit tabakasının kalınlığına bağlı olarak uygulama süresi değişmektedir. Bu işlem adım adım kontrollü olarak gerçekleştirilir ve yüzeyde gerekli temizlik sağlanır.

3.2.3. Fotodirenç Kaplama

Maske üzerindeki desenin yarıiletken üzerinde oluşturulabilmesi için maske hizalayıcıda maruz kaldığı UV ışık altında zincir yapısı bozunabilen bir polimer ile kaplanması gerekmektedir, bu malzemeye pozitif fotodirenç denir.

Fotodirenç, uygun koşullarda (sarıoda ortamı) yüksek devir hızına sahip dönerek kaplama cihazı sayesinde yüzeye istenilen kalınlıkta ve homojen olarak kaplanır.



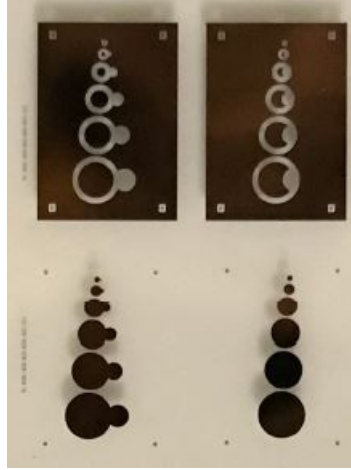
Şekil 3.6: Kaplama mekanizmasının şematik gösterimi.

Bu çalışmada AZ 5214E fotodirenci tercih edilmiştir ve kaplama cihazının şematik gösterimi de Şekil 3.6'da verilmiştir.

Ayrıca çalışmada developer olarak, AZ 5214E fotodirenci ile uyumlu olan AZ 400K tercih edilmiştir.

3.2.4. Maske ve Maske Hizalayıcı

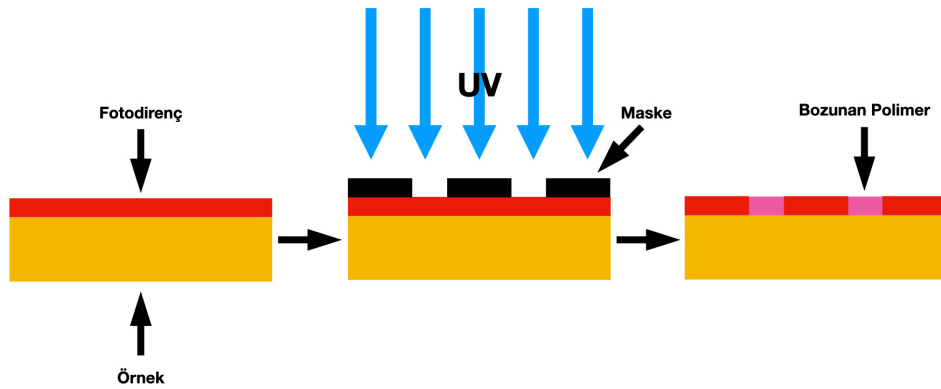
Maske, yarıiletken malzeme üzerine işlenmek istenen desenin bulunduğu, maske hizalama cihazına yerleştirilerek cihaz tarafından üzerinden geçen UV ışığın maske yüzeyindeki krom kaplı bölgeden geçişini engelleyen ve krom kaplama bulunmayan açıklık bölgelerinden UV ışığın geçmesine izin veren temel bileşendir.



Şekil 3.7: Fotolitografide kullanılan maske.

Halka kontak olarak adlandırılan mesa yapıların üretiminde kullanılan maske Şekil 3.7’de verilmiştir. Üretilen aygıt boyutları $125 - 650 \mu m$ olduğundan, bu boyutların üretimine uygun 365 nm dalgaboylu cıva lambası tercih edilmiştir.

Bu çalışmada, SÜSS marka MJB4 model bir maske hizalayıcı kullanılmıştır. Maske hizalayıcı adından da anlaşılacağı gibi kullanılan maske ile yarıiletken malzemenin birkaç tekrarlı işlem gerektiren aşamalarında, maske ile malzemeyi hep aynı noktaya hassas bir şekilde hizalayabilmemizi sağlar. Üretilen aygıtın kalitesi bu hizalamaların hassasiyeti ile değişebilmektedir. Bu sebeple önemli bir fabrikasyon aşamasıdır.



Şekil 3.8: Fotodirenç kaplanmış yüzeyin UV ışına maruz bırakılması.

Bu çalışma iki aşamalı bir fabrikasyon süreci içerdiğinden, aygıt üretiminde maske hizalayıcıya iki kez ihtiyaç duyulmaktadır; İlk maske hizalama, litografi safhasında anlatılacak olan desenin malzeme yüzeyine basılıp aşındırma işlemi için yapılmaktadır, ikinci maske ise metalizasyon maskesi olarak kullanılır.

3.2.5. Kimyasal Aşındırma

Polimer kaplı örnek yüzeyine uygulanan desenin oluşturulması için aşındırmaya ihtiyaç duyulur. Örnek seçilen aşındırıcı içerisinde belirli sürelerde tutularak kontrollü şekilde aşındırma sağlanır.

Tablo 3.2: III-V grubu alaşımlar için belirlenmiş aşındırma çözeltileri.

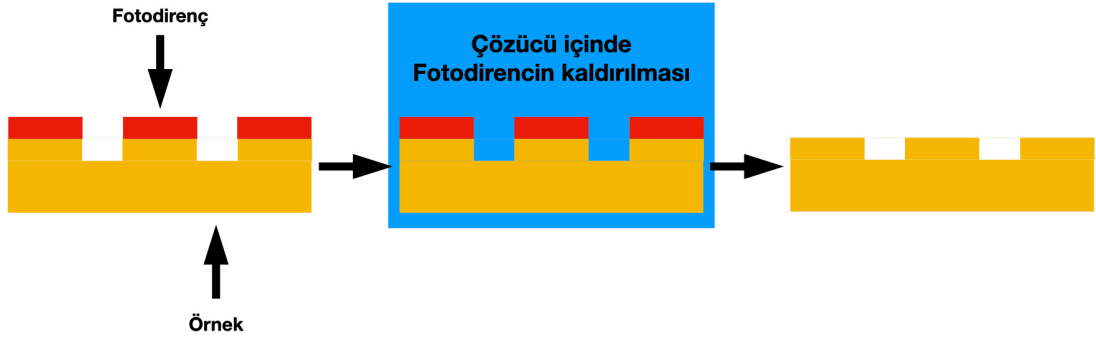
<i>Kimyasal Çözelti</i>	<i>GaAs</i>	<i>InP</i>	<i>GaInAs</i>	<i>AlGaAs</i>	<i>GaInNAs</i>
$HCl : H_2O_2 : H_2O$	A	A			
$HCl : HNO_3 : H_2O$	A	A			
$H_3PO_4 : H_2O_2 : H_2O$	A	S	A		
$H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O$	A	A	S	A	A
A: Aşınır, S: Seçici veya Durdurucu					

Kimyasal aşındırma yönteminde yarıiletkenlere uygun aşındırıcı seçimi önemlidir. Literatürde GaAs-tabanlı ve InP-tabanlı III - V grubu yarıiletkenler alaşımlar için belirlenmiş aşındırıcılar mevcuttur. Bu aşındırıcılar Tablo 3.2’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu çalışmada, Tablo 3.2’de de görüldüğü üzere en uygun aşındırıcı $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O$ çözeltisidir. Aşındırıcı çözeltisinin içerisine her bir bileşenin katkı oranı, kullanım amacına bağlı olarak literatürdeki çalışmalardan görülmektedir. Bu parametreler Tablo 3.3’te verilmiştir (Chung, 2005).

Tablo 3.3: $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O$ çözeltisi için belirli oranlar.

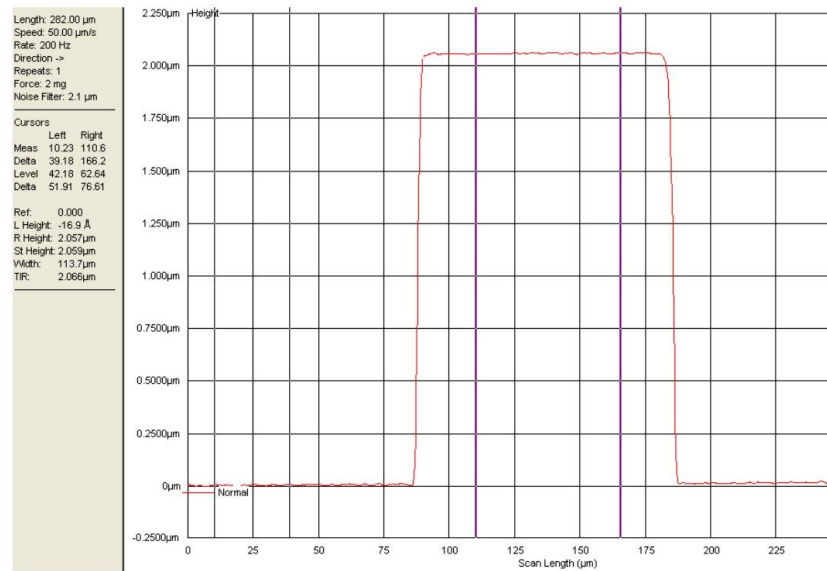
<i>Kimyasal Çözelti</i>	<i>Karışım Oranı</i>	<i>Açıklama</i>	<i>Aşındırma Hızı ($\mu m/d$)</i>
$H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O$	8:1:1	F ve Au ile etkileşmez	1
	8:1:3	Düz aşınma sağlar	1.2
	8:1:10	F ve Au ile etkileşmez	1.8
	8:1:30	F ve Au ile etkileşmez	0.5
	1:8:1	Derin aşındırma	2.4
	1:8:80	Sığ aşındırma	0.5
	1:8:80	GaAs/AlAs	1.3*
* Tablodaki son değer bu çalışmada elde edilen değerdir.			

Aşındırma sürecinin kontrollü ilerlemesi adına toplam süreç parçalara bölünerek yapılmaktadır. Her iki aşındırma süreci arasında kalınlık ölçümü gerçekleştirilerek aşındırma miktarı gözönüne alınarak istenilen aşındırma miktarı elde edilinceye kadar tekrarlanır.



Şekil 3.9: Fotolitografi adımları sonrasında üretilen örneğin kesiti.

Aşındırılan kalınlığın belirlenmesi KLA Tencor P-6 cihazı ile yapılmıştır. Örnek olarak bir profilmetre ölçüm çıktısı Şekil 3.10'da verilmiştir.

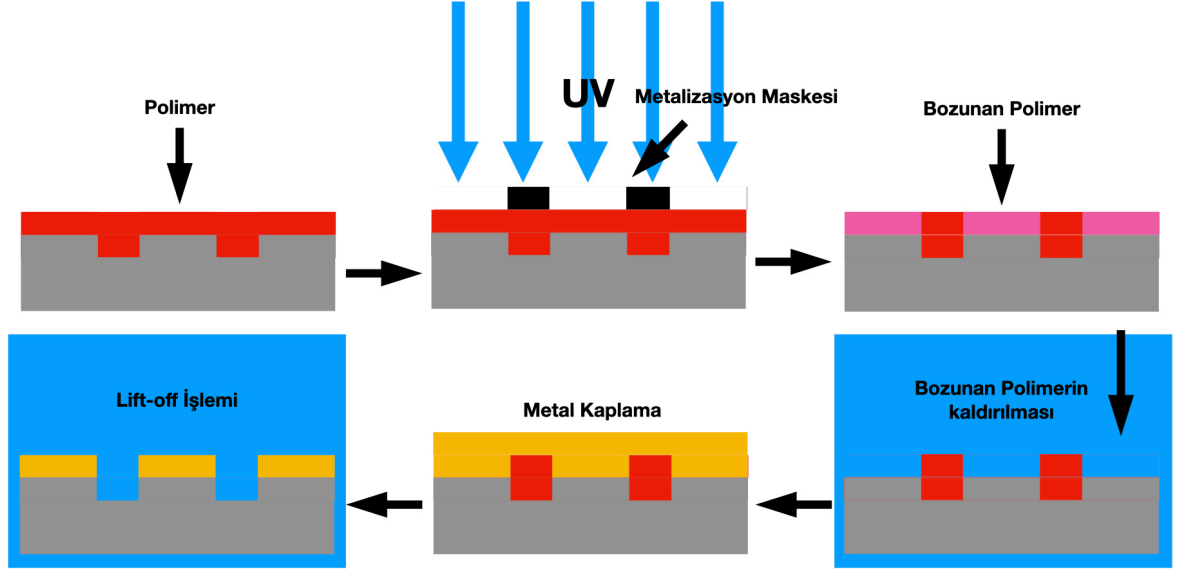


Şekil 3.10: Profilmetre ölçümünden örnek bir çıktı.

3.2.6. Metalizasyon

Optoelektronik aygıtların ölçüm cihazlarıyla bağlantı kurup, ölçüm yapılabilmesi için metal kontaklara ihtiyaç duyulur. Bu metal kontaklar yarıiletken - iletken geçişini sağlarken fotodedektörün çalışmasını etkilememesi gerekmektedir. Bu yüzden kontakların omik olması istenir.

Bu çalışmada kullanılan III - V grubu yarıiletkenler yüksek taşıyıcı konsantrasyonlarına sahip olduklarından ($> 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) ısıtma işlemi ihtiyaç duyulmadan omik davranış göstermektedir (Baca ve diğ., 1997; Balkan ve diğ., 2015; Sarcan ve diğ., 2017).



Şekil 3.11: Metalizasyon maskesinin uygulanması ve Lift-off işleminin şematik gösterimi.

GaAs-tabanlı alaşımlar için kontak malzemesi seçimi literatürden elde edilen değerler *n*-tipi ve *p*-tipi olarak Tablo 3.4 ve Tablo 3.5'te sırasıyla verilmiştir.

Tablo 3.4: *n*-tipi GaAs-tabanlı mazleme için metalizasyon malzemeleri.

<i>Malzeme</i>	<i>Isıl İşlem</i>
Al/Ni/Gr	Evet
Ge/Ag/Ni	Evet
Ge/Au/Ni	Evet
Au/Ti	Hayır
Au/Cr	Hayır

Tablo 3.5: *p*-tipi GaAs-tabanlı mazleme için metalizasyon malzemeleri.

<i>Malzeme</i>	<i>Isıl İşlem</i>
Au/Az/Au	Evet/Hayır
Pt/Ti	Hayır
Au/Pt	Hayır
Au/Ti	Hayır

Bu çalışmada kontak metallerinin kaplanması için Vaksis marka termal evaporatör kullanılmıştır ve tüm örnek yapılarına Au/Cr : 100/10 nm kaplama yapılmıştır.

3.2.7. Lift-Off (Kaldırma) İşlemi

Örnek yüzeyinde kontak bölgeleri dışında kalan metal kaplı bölgelerin kaldırılması işlemine Lift-Off denilir.

Kontak bölgeleri dışındaki alanlarda, yarıiletken malzeme ile metal kaplama arasında bozunmamış fotodirenç bulunmaktadır. Bu bölgeler aseton içerisinde bekledikleri zaman istenmeyen metal tabakanın kalktığı görülecektir. Bir süre aseton içerisinde bekletilen örneğin fotodirençle kaplı bulunan tüm bölgelerindeki metalin lift-off olduğu görülür.

Lift-Off işlemi Asetonun kaynama sıcaklığına yakın değerlerde (56°C 'de) yapılır.



Şekil 3.12: Lift-Off safhası ve sonrası.

3.2.8. Tel Bağlama

Fotodedektör yapısına uygulanan litografi ve metalizasyon işlemi sonucunda üretilen aygıtın deneysel ölçümlerini yapabilmek için makro kontaklara ihtiyaç duyulmaktadır. Aygıt yüzeyindeki kontak alanından, örneğin yapıştırıldığı seramik pedin kontak bölgesine $25\ \mu\text{m}$ çapa sahip altın teller ile bağlantı, tel bağlama cihazı kullanılarak yapılır. Bu işlem için Kulicke Soffa 4524 A cihazı kullanılmıştır.

Bu cihazın uç noktasında bulunan altın telin ucunda yüksek elektrik arkı ile oluşturulan topçuk, ısıtılmış tabla üzerinde duran aygıtın kontak yüzeyine ultrasonik titreşim ve mekanik baskı uygulanarak oturtulur. Cihaz altın topcuğu oturttuğu hizadan belirli bir boşluk bırakarak yay çizer. Seramik ped üzerinde bulunan kontak noktasına da dokunarak sıcaklık ve mekanik baskı etkisi ile tel bağlama işlemi tamamlanmış olur.



Şekil 3.13: Tel bağlama işlemi sonrası örnek görünümü.

3.2.9. Fabrikasyon Süreci ve Uygulama Parametreleri

Fotodedektör yapılarının fabrikasyon aşamaları maddeler halinde sıralanmıştır. Adım adım aşamalar ve uygulama parametre ayrıntıları verilerek, yöntem ayrıntılarına bu anlatımdan hemen önce değinilmiştir. Çalışma sürecinde aygıt üretimi için iki fabrikasyon reçetesi uygulanmıştır.

İlk fabrikasyon reçetesi uygulamasıyla, SACM yapıda bulunan absorpsiyon bölgesi üzerinden üst DBR'ler aşındırılarak üst kontak alınmış, alt kontak ise yapının alt kısmı gümüş pasta sürülerek bakır alt taban üzerine yapıştırılarak alınmıştır. Bu sayede yapıda bulunan her iki $p-i-n$ eklemin çalıştıracak kontak kompozisyonu oluşturulmuştur.

İkinci fabrikasyon reçetesi, yukarıda bahsedildiği gibi büyütücünün istenilen parametrelerde yapıyı büyütmemesi sonucu hatalı yük çoğullanma tabakası yapıda büyütülmüştür. Yük çoğullanma tabakasını pasif hale getirmek ve çoğullanma bölgesinin etkisi olmadan fotodedektörün performansı incelenmek istenmiştir. Bunun için; üst DBR'lar aşındırılarak üst kontak alınmış, alt kontak ise ilk $p-i-n$ (p^+-i-p^+) eklemin bittiği, ikinci $p-i-n$ (p^+-i-n^+) eklemin başladığı 55 nm kalınlığındaki p^+ tabakadan alınmıştır. Bu sayede yapıda absorpsiyon bölgesi olarak bulunan $p-i-n$ (p^+-i-p^+) eklemi çalıştıracak kontak kompozisyonu oluşturulmuştur.

3.2.9.1. Rezonans Kaviteli GaInNAs SACM Fotodedektörlerin Fabrikasyonu

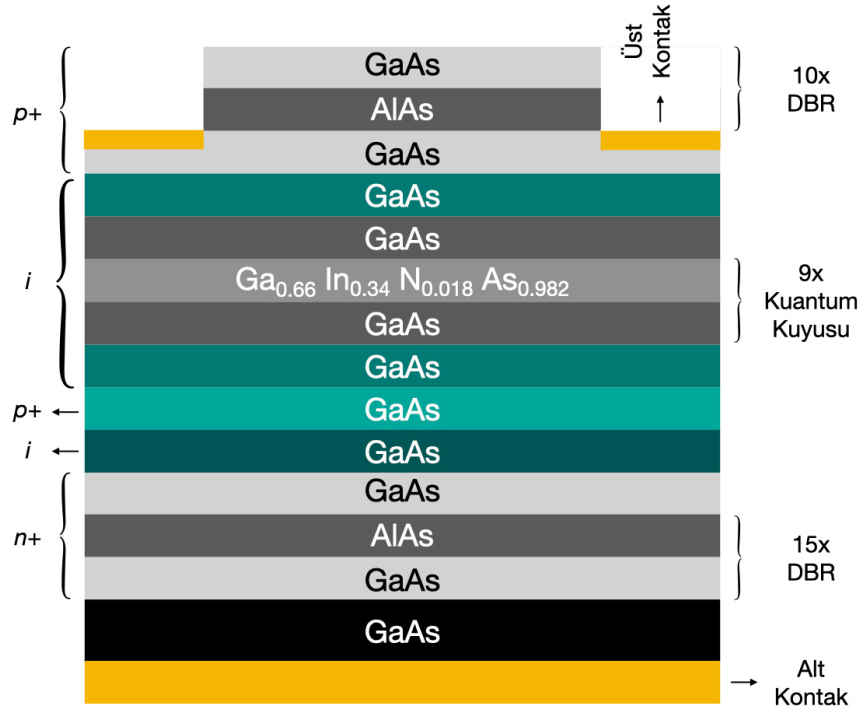
Rezonans Kaviteli 9 kuantum kuyulu GaInNAs/GaAs ve GaInNAs/GaNAs SACM fotodedektör yapıları için fabrikasyon reçetesi aşağıdaki gibi uygulandı;

- Kristal yongalar el ile kesme yöntemi kullanılarak 0.6 x 0.6 cm boyutlarında kesildi.
- 60 °C'de asetonda 1 d bekletildi. DI su ile yıkandı. 80 °C'de izopropil alkolde 1 d bekletildi. DI su ile yıkandı. Azot gazı ile kurutuldu. 100 °C'de 1 d ısıtıldı.
- Yüzey temizliğinden emin olmak için optik mikroskop ile kontrol edildi.
- Kaplama cihazı ile (6000 rpm, 1 d) AZ 5214E kodlu fotodirenç örnek yüzeyine kaplandı.

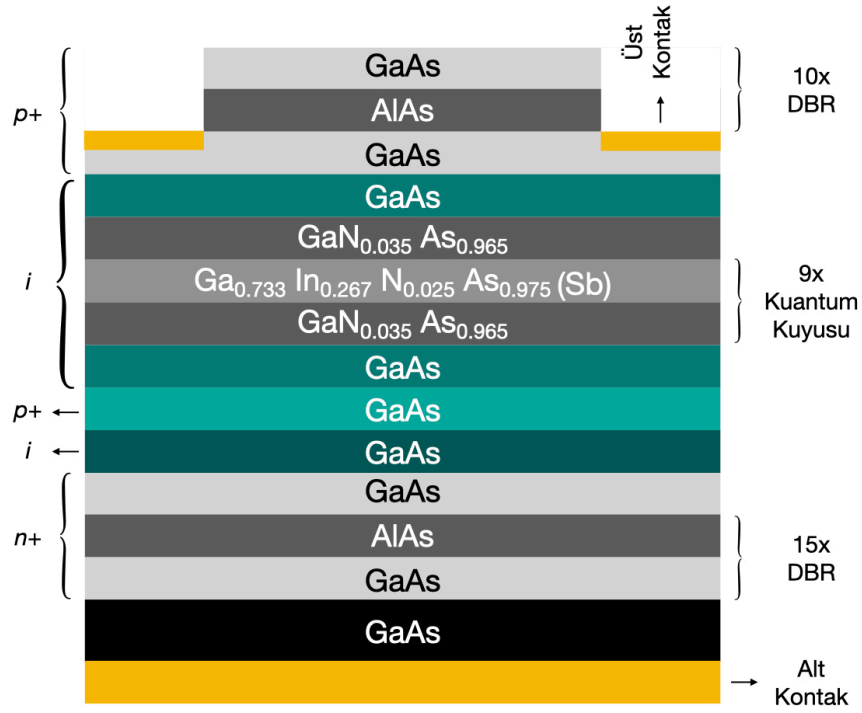
- Fotodirenç kaplı kristal 100 °C'de 30 s ısıtıldı.
- Mesa yapısı içeren maske ile maske hizalayıcı kullanılarak örneğe hizalama yapıldı ve fotodirenç kaplı örnek 40 s UV ışığa maruz bırakıldı.
- 100 °C'de 15 s ısıtıldı.
- AZ400K kodlu çözücüde UV ışık altında bozunan fotodirenç kısımları kaldırıldı. (AZ400K : H_2O ; 1 : 3)
- DI su ile yıkandı. 100 °C'de 1 d ısıtıldı.
- Kalınlık ölçümü yapıldı.
- H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O ; 1 : 8 : 80 oranındaki çözeltide kontrollü şekilde aşındırma yapıldı. (1'er dakikalık periyotlarda)
- DI su ile yıkandı. 100 °C'de 1 d ısıtıldı.
- Kalınlık ölçümü yapıldı.
- Aşınma miktarı 2750 nm oluncaya kadar son üç aşama tekrarlandı.
- 60 °C'de asetonda 1 d bekletildi. DI su ile yıkandı. 80 °C'de izopropil alkolde 1 d bekletildi. DI su ile yıkandı. Azot gazı ile kurutuldu. 100 °C'de 1 d ısıtıldı.
- Metalizasyon maskesi için fotodirenç kaplaması (6000 rpm, 1 d) yapıldı.
- Fotodirenç kaplı kristal 100 °C'de 30 s ısıtıldı.
- Metalizasyon maskesi maske hizalayıcıyla bir önce kullanılan maske ile şekillendirilen aynı noktaya hizalandı ve fotodirenç kaplı örnek 40 s UV ışığa maruz bırakıldı.
- 100 °C'de 15 s ısıtıldı.
- UV ışık altında bozunan fotodirenç kısımları kaldırıldı.
- DI su ile yıkandı. 100 °C'de 1 d ısıtıldı.
- Fotodirenç kalınlığı ölçümü yapıldı.
- 2090 nm aşındırma yapıldı.

- DI su ile yıkandı. Azot gazı ile kurutuldu. 100 °C’de 1 d ısıtıldı.
- Termal buharlaştırma sistemi ile sırayla önce 10 nm Cr, ardından 100 nm Au metal kaplamaları yapıldı.
- 60 °C’de asetonda örnek tamamen lift-off oluncaya kadar bekletildi.
- DI su ile yıkandı. 80 °C’de izopropil alkolde 1 d bekletildi. DI su ile yıkandı. Azot gazı ile kurutuldu. 100 °C’de 1 d ısıtıldı.
- Üretilen Örnekler 1.5 x 1.5 cm boyutlarında kesilen bakır plakalara gümüş pasta ile yapıştırıldı. Örnek etrafına yüzeyinden alınacak kontaklar için yüzeyi Au kaplı seramik tabanlı parçalar konumlandırıldı.
- Fotodedektör yüzeyinden wire bonder cihazı ile altın teller ile makro kontaklara bağlantısı yapıldı.
- Bakır plakadan da alt kontak alınarak örnek aygıt halini almıştır.

Fabrikasyon sonucu kontak görünümü Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’te verilmiştir.



Şekil 3.14: Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM Fotodedektör.



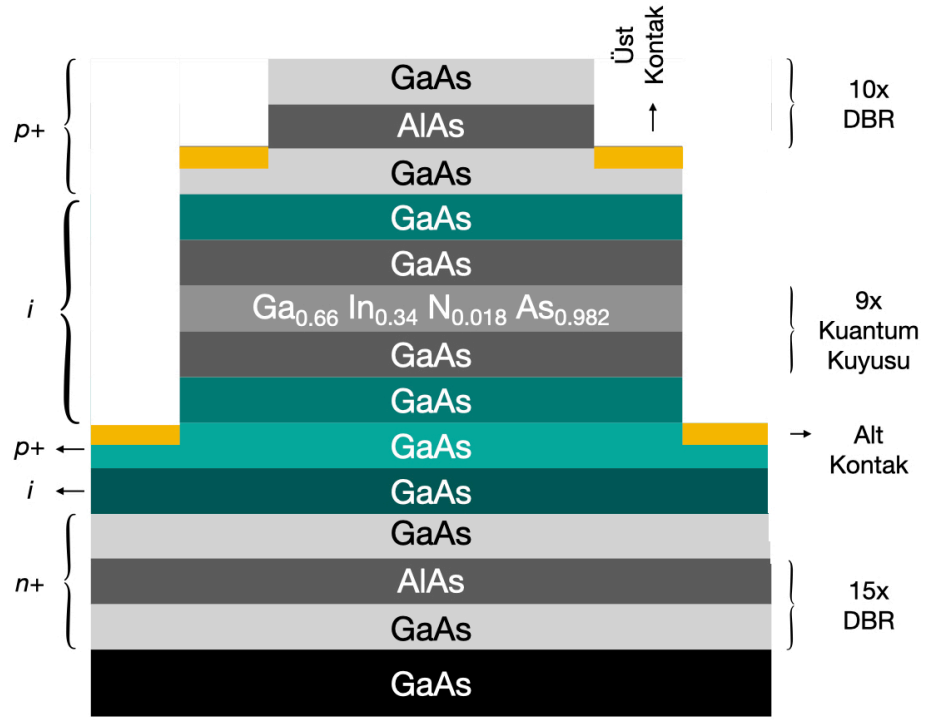
Şekil 3.15: Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/Ga_{0.035}As_{0.965}$ SACM Fotodedektör.

3.2.9.2. Rezonans Kaviteli GaInNAs p-i-n Çığ Fotodedektörlerin Fabrikasyonu

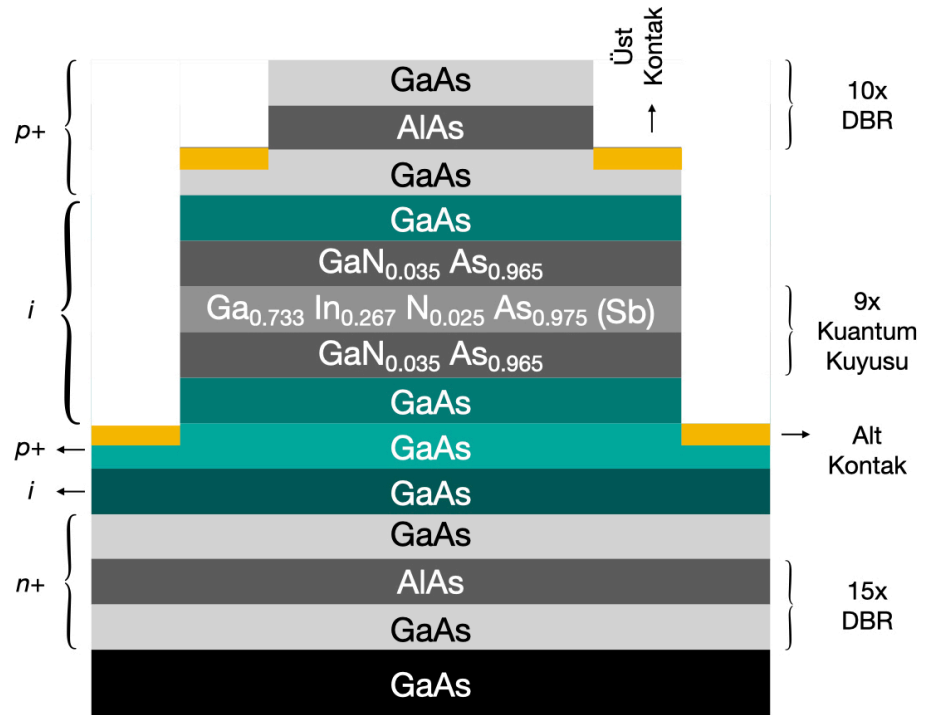
Rezonans Kaviteli 9 kuantum kuyulu GaInNAs/GaAs ve GaInNAs/GaNAs p-i-n çığ fotodedektör yapıları için fabrikasyon reçetesi aşağıdaki gibi uygulandı;

- İlk fabrikasyonda uygulanan reçete ilk aşındırma adımı hariç aynı şekilde uygulandı.
- İlk fabrikasyonda 2750 nm aşındırılmıştı, bu fabrikasyon sürecinde ise 2375 nm aşındırıldı.
- Üretilen örnekler bu sefer iletken olmayan bir malzeme ile üzerinde kontak bölgeleri olan seramik plakalara yapıştırıldı.
- Üst kontak 2090 nm den alındı. Alt kontak ise 2375 nm örnek yüzeyinden alındı.

Bu süreç ile SACM fotodedektör yapısından p-i-n çığ fotodedektörler üretilmiştir ve bu fabrikasyon ile üretilen aygıtlar tezde p-i-n çığ fotodedektör olarak adlandırılacaktır. Fabrikasyon sonucu kontak görünümü Şekil 3.16 ve Şekil 3.17’de verilmiştir.



Şekil 3.16: Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ p-i-n Çığ Fotodedektör.



Şekil 3.17: Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ p-i-n Çığ Fotodedektör.

3.3. KARAKTERİZASYON TEKNİKLERİ

Fotodedektörlerin karakterizasyonu için; akım - voltaj, yansıma, fotoluminesans ve spektral fotoakım ölçümleri kullanılmıştır.

Tüm karakterizasyon ölçümleri İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü bünyesinde bulunan Nano ve Optoelektronik Araştırma Laboratuvarları imkanları kullanılarak yapılmıştır.

3.3.1. Akım – Voltaj

Akım - voltaj ölçümü, fotodedektör tasarımı ağıta dönüştürülen yapının elektriksel davranış biçimini öğrenmemiz açısından temel deneysel bir tekniktir. İdeal bir $p-n$ ekleme dayalı optoelektronik ağıtın, direnç gibi omik davranış göstermesi istenmez. İleri besleme voltajı ile ekspanansiyel artan akım, geri besleme voltajı ile düşük sızıntı akımı istenen ideal bir $p-n$ ekleme dayalı optoelektronik ağıt karakteristiğidir.

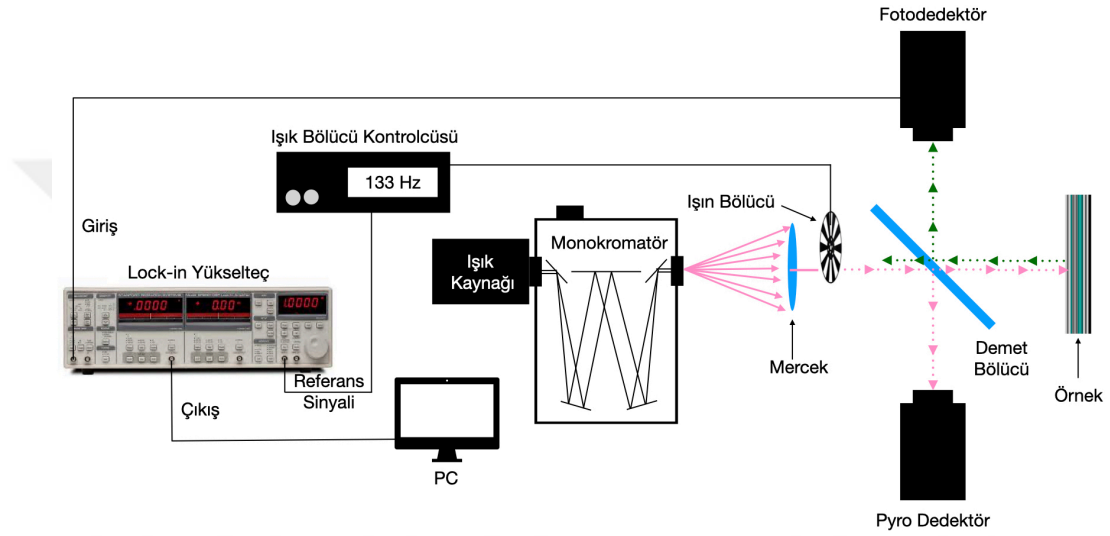


Şekil 3.18: Akım-Voltaj ölçüm düzeneği.

Tez kapsamında $p-i-n$ eklem fotodedektör yapıları incelenmektedir. Fotodedektör karakterize edilirken ışık altında da akım - voltaj karakteristiğine bakılması önemlidir. Akım - voltaj ölçümü; karanlık ve fotodedektörün duyarlı olduğu merkezi dalgaboyuna yakın ışık altında yapılarak geri beslemede karanlık akım ölçülebilmektedir.

3.3.2. Yansımaya Ölçümü

Fotodedektörler gelen elektromanyetik dalganın tamamını ya da bir kısmını ya yansıtırlar ya absorplarlar ya da geçirirler. Bu sebeple bir fotodedektörün elektromanyetik dalganın dalgaboyuna bağlı yansımaya spektrumunun elde edilmesi çok önemlidir. Dalgaboyuna bağlı yansımaya ölçümleri Şekil 3.19’da verilen deney düzeneği yardımı ile yapılmıştır.



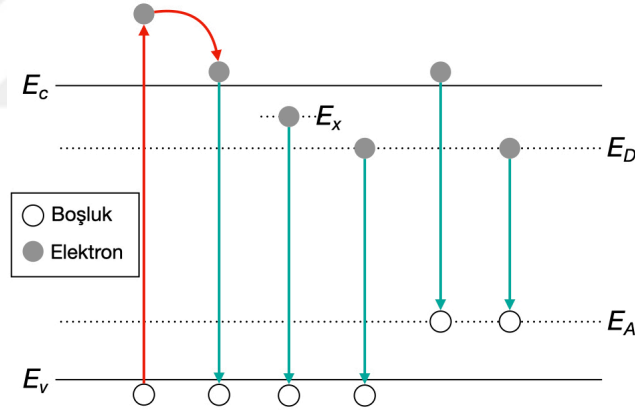
Şekil 3.19: Dalgaboyuna bağlı yansımaya ölçüm düzeneği.

Şekil 3.19’da beyaz ışık kaynağı monokromatör (Acton 2500i) yardımıyla dalgalılarına ayrılır. Ayrılan farklı dalgaboyundaki bileşenler ışık bölücünden (chopper) ve belirlenen frekansta demet bölücünden (beam splitter) geçerek, demet bölücünün özelliğine göre farklı oranlarda, ikiye ayrılır. Ayrılan ışık demetinin bir bölümü elde edilecek $R(\lambda)$ spektrumunu normalize edebilmek için dalgaboyundan bağımsız çalışan pyro dedektöre gönderilirken diğer bir kısmı da örnek üzerine dik bir şekilde gönderilir. Örnek yüzeyine dik düşürülen elektromanyetik dalgadan geçemeyen ışık demeti örnek yüzeyinden dik yansımaya yapar ve ışık bölücü ile fotodedektöre gönderilir. Fotodedektörde elde edilen elektrik sinyali Lock-in Yükselteç’e (Stanford Research Systems SR530) gönderilir ve lock-in yükselteç sayesinde sadece ışık bölücüye aynı frekansta sahip sinyaller yükseltilerek bilgisayara kaydedilir. Gerekli normalizasyon işlemi sonucunda dalgaboyuna bağlı yansımaya spektrumu çizdirilir. Ayrıca dalgaboyuna bağlı yansımaya katsayısı da deneysel olarak bu veriler ile hesaplanır.

3.3.3. Fotolüminesans

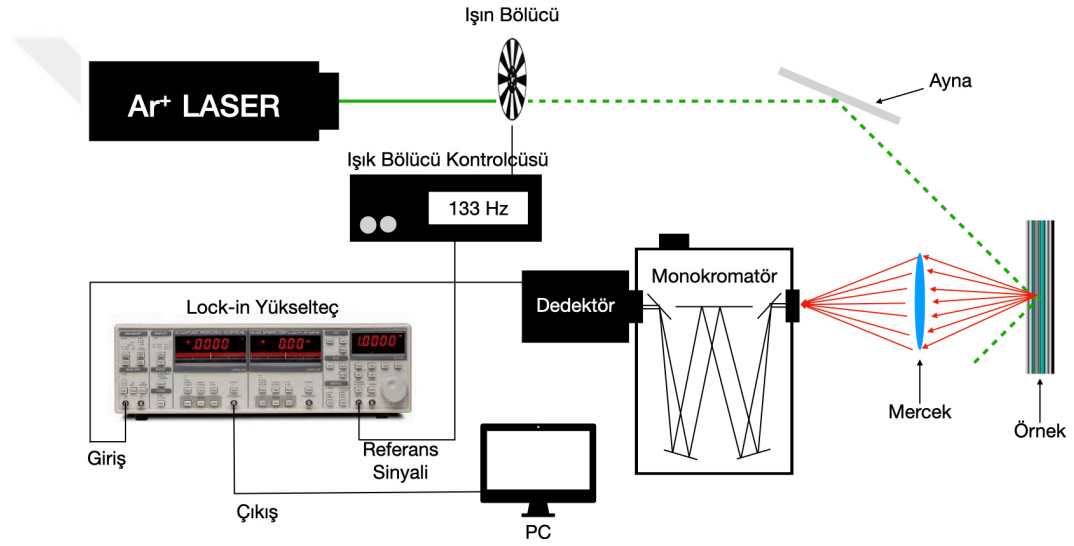
Fotolüminesans ölçümü, fotodedektör yapısının aktif bölgesinin etkin bant aralığı ve ışımalı tuzak seviyelerinin enerjileri hakkında bilgi vermektedir. Fotolüminesans ölçümü yapılabilmesi için aygıt üzerine gönderilen fotonların dalgaboyunun ($h\nu$) fotodedektörün aktif bölgesindeki yarıiletkenin bant aralığından büyük olması gerekir.

Aygıt üzerine gönderilen yeteri kadar enerjili fotonlar valans bandından bir elektronu iletkenlik bandında üst seviyelere çıkartır. Elektron enerjisini fonon etkileşimi ile beraber yapıya aktararak mümkün ve işgal edilebilir en uygun bant kenarı seviyeye yerleşir. Bir müddet sonra enerjisini kaybeden elektron iletkenlik bandından valans bandına geri döner, bu dönüş sırasında ışımalı veya ışımasız geçiş yapma olasılığı bulunmaktadır. Işımalı geçiş yaptığı durumda, bu ışıma ile oluşan fotonun enerjisi fotodedektörün etkin bant aralığına denk gelir. Optoelektronik aygıtlarda izinli tüm optik geçişler Şekil 3.20’de verilmiştir.



Şekil 3.20: Olası optik geçişler.

Fotoluminesans deney düzeneği Şekil 3.21’de verilmiştir. Bu düzenekte Coherent Inova 70 marka Argon İyon Laser kullanılarak 514 nm dalgaboyundaki laser ışınları uygun frekansta ışık bölücü ile modüle edilerek aygıt yüzeyine gönderilir. Aygıt yüzeyinde soğurulan bu fotonların oluşturduğu farklı doğrultularda ve farklı dalgaboylarındaki fotonlar ince kenarlı mercek ile toplanarak monokromatör girişine odaklanır. Monokromatöre ulaşan fotonlar dalgaboylarına ayrıştırılarak dedektöre yönlendirilir. (Newport 71893) Kalibreli dedektörde okunan sinyaller lock-in yükseltici ile yükseltilir ve bilgisayar yardımıyla her bir dalgaboyuna karşılık gelen veri eşzamanlı olarak kaydedilir. Bu çalışmada fotoluminesans ölçümü oda sıcaklığında yapılmıştır.

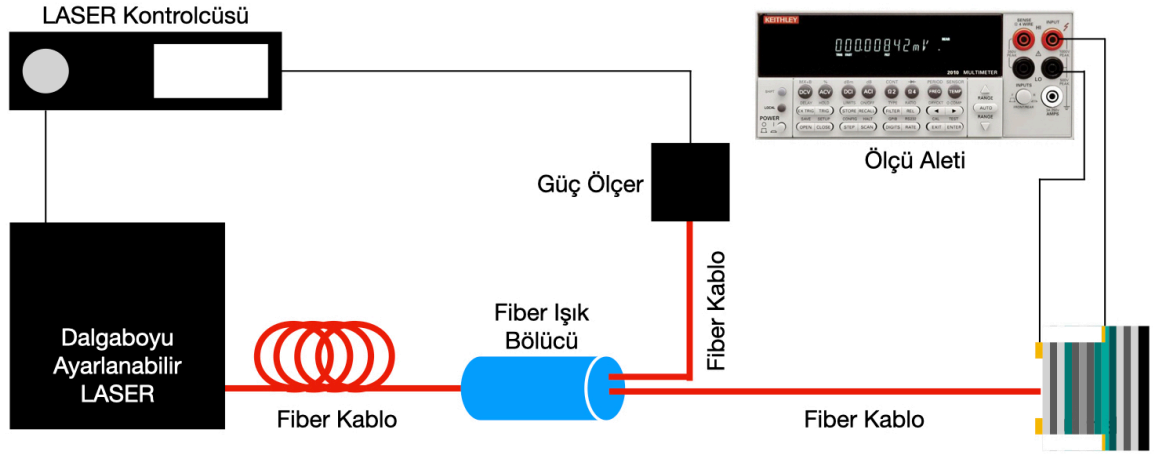


Şekil 3.21: Fotoluminesans ölçüm düzeneği.

3.3.4. Spektral Fotoakım

Optoelektronik aygıt karakterizasyonu yaparken en önemli parametrelerden birkaçı fotodedektörün duyarlı olduğu merkezi dalgaboyunun belirlenmesi, merkezi dalgaboyu etrafındaki duyarlılığı ve ölçülen bu sonuçlara bağlı olarak kuantum veriminin hesaplanmasıdır.

Şekil 3.22’de görüldüğü gibi dalgaboyu ayarlanabilir laser ışığı, aygıtın aktif bölgesine dik konumlandırılan fiber optik kablo vasıtası ile örnek yüzeyine gönderilir. Her bir deney döngüsünde farklı geri besleme voltajları altında, her bir dalgaboyuna karşılık akım değeri kaydedilir.



Şekil 3.22: Spektral fotoakım ölçüm düzeneği.

Bu ölçüm ile elde edilen değerler, geri besleme voltajı uygulandığı süreçte oluşan karanlık akımın çıkarılması ile spektral fotoakım elde edilir, Denklem 2.18 ve Denklem 2.19 kullanılarak duyarlılık ve kuantum verimliliği hesaplanır ve hesaplanan değerler bilgisayar vasıtası ile işlenerek, dalgaboyuna karşılık duyarlılık ya da kuantum verimliliği grafikleri elde edilir.

4. BULGULAR

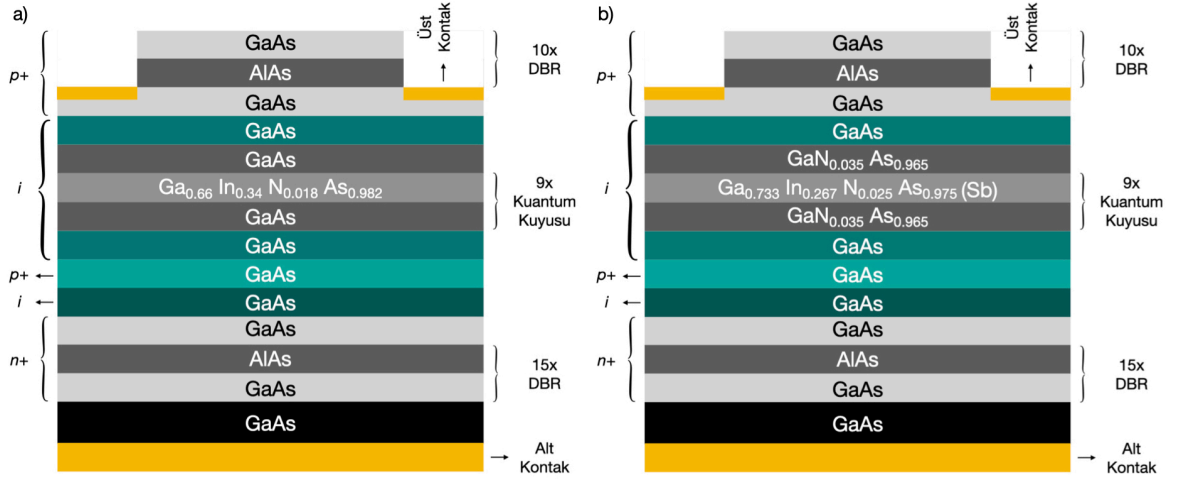
Bu tez çalışması kapsamında iki farklı yapıdaki fotodedektör tasarımının, fabrikasyonu ve karakterizasyonu yapılmıştır. Aktif bölge konsantrasyon oranı ve bariyer malzemesi farklı iki tasarım incelenmiştir. İki fotodedektör yapısından dört aygıt hazırlanarak, Bölüm 3.3'teki karakterizasyon teknikleriyle elde edilen sonuçlar bu bölüm altında verilmiştir.

4.1. REZONANS KAVİTELİ SACM FOTODEDEKTÖRLER

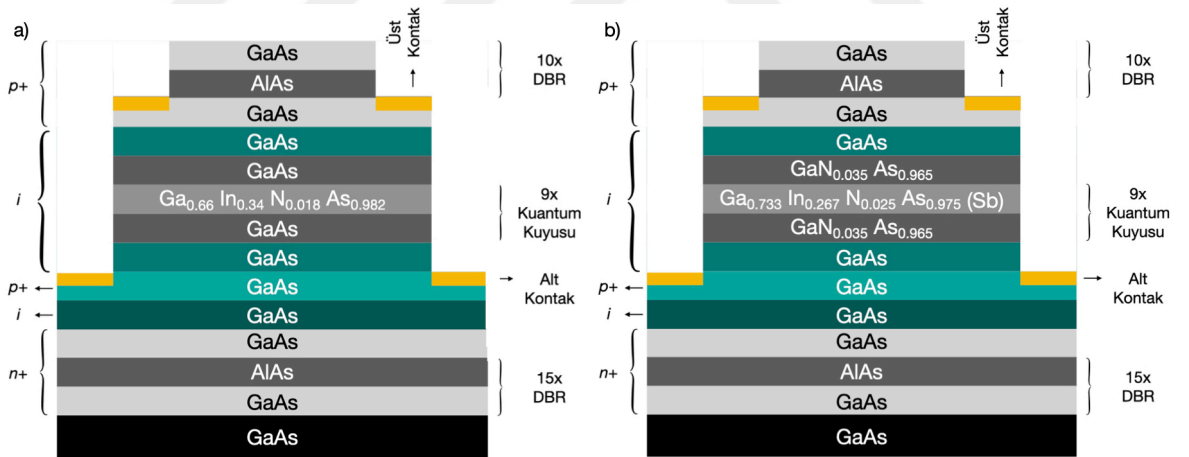
Tez çalışması kapsamında kullanılan örnekler Rezonans Kaviteli ve SACM yapıdadır. Bu sebeple fotodedektör yapılarını üç bölümde inceleyebiliriz. GaInNAs-tabanlı rezonans kaviteli fotodedektör yapısına eklenen yük çoğaltıcı ikinci bir eklem yapısı ile bu tasarımda iki adet $p-i-n$ yapısı oluşturulmaktadır. Birinci $p-i-n$ (p^+-i-p) yapısı absorpsiyonu, ikinci $p-i-n$ ($p-i-n^+$) yapısı ise gelen elektronların impakt iyonizasyonu için yüksek iç elektrik alanı sağlamak ve bu iki $p-i-n$ yapısını saran DBR yansıtıcılar ile oluşan tasarım olarak da söyleyebiliriz. Nano ve Optoelektronik Araştırma Grubunda yapılan daha önceki çalışmalar ile bu tez kapsamında kullanılan örneklerin temelleri atılmıştır; GaInNAn/GaNAs RCEPD'ler ilk tasarlanan örnekler olarak çalışma grubumuzda I. nesil (Sarcan ve diğ., 2018, 2017) ve GaInNAs/GaAs RCEPD'ler ise II. nesil olarak adlandırılır (Balkan ve diğ., 2015). I. nesil fotodiyotlarda kullanılan bariyerin bant süreksizliği küçük olduğundan; II. nesil RCEPD'ler için bariyer malzemesi olarak GaAs seçilmiştir.

Tez çalışması kapsamında kullanılan SACM tasarımları II. nesil RCEPD'lere dayanmaktadır ve tasarıma eklenen çoğullanma bölgesiyle fotodedektör yapısı SACM olarak modifiye edilmiştir. Fakat önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi büyütme koşullarında yaşanan problemler sonucu büyütülen iki örnek yapısı da hatalı olmuştur. Sonuç olarak tez çalışmasında $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ ve $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM yapıları kullanılmıştır.

$Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ ve $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/Ga_{0.035}As_{0.965}$ SACM fotodetektör yapıları ile üretilen aygıtlar konu bütünlüğünü sağlamak için tekrar Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.1: a) Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM Fotodetektör, b) Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/Ga_{0.035}As_{0.965}$ SACM Fotodetektör.



Şekil 4.2: a) Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ p-i-n Çığ Fotodetektör, b) Rezonans Kaviteli 9 Kuantum Kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/Ga_{0.035}As_{0.965}$ p-i-n Çığ Fotodetektör.

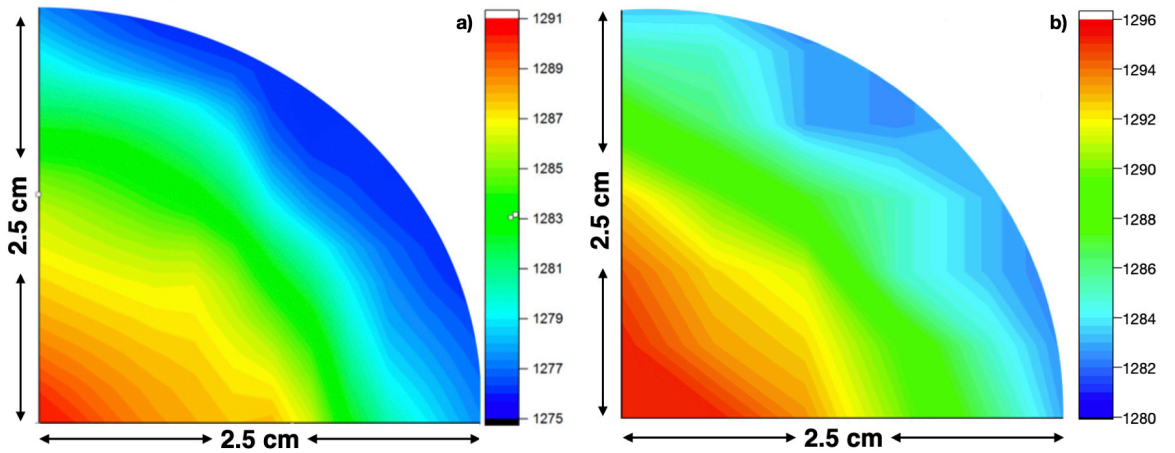
Fotodetektörlerde absorpsiyon bölgesi olarak tasarlanan aktif bölgede GaInNAs/Ga(N)As çoklu kuantum kuyusu sistemi için; 2. Bölümde söz edildiği gibi bant aralığı BAC modeli (Denklem 2.3) ve Vegard Yasası (Denklem 2.5) kullanılarak hesaplanmıştır. Tasarlanan fotodetektör yapılarında bariyer malzemesi olarak GaAs belirlenmiştir. Fakat büyütücü istenen örnek tasarımı yerine bir önceki tasarımı gözönünde bulundurmuş ve bir örneği GaNAs bariyerli olarak büyütmüştür. GaNAs bariyer, GaAs bariyere oranla

GaInNAs alaşımı için daha iyi örgü uyumuna sahiptir. Ancak GaNAs'nin GaAs bariyer malzemesine göre bant aralığı daha küçüktür. Bu yüzden bariyerin sınırlama etkisi GaAs'e göre daha küçük olacaktır. Taşıyıcılar kuyuda tutulamadan kaçabileceklerdir. Bu da GaNAs bariyer malzemesi için bir dezavantajdır. $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ rnek için; her bir kuyu ve bariyer arasındaki gerilme (compressive strain) 0.0209'dur ve $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/Ga_{0.035}As_{0.965}$ rnek için; her bir kuyu ve bariyer arasındaki gerilme (compressive strain) 0.0185 olarak hesaplanmıştır.

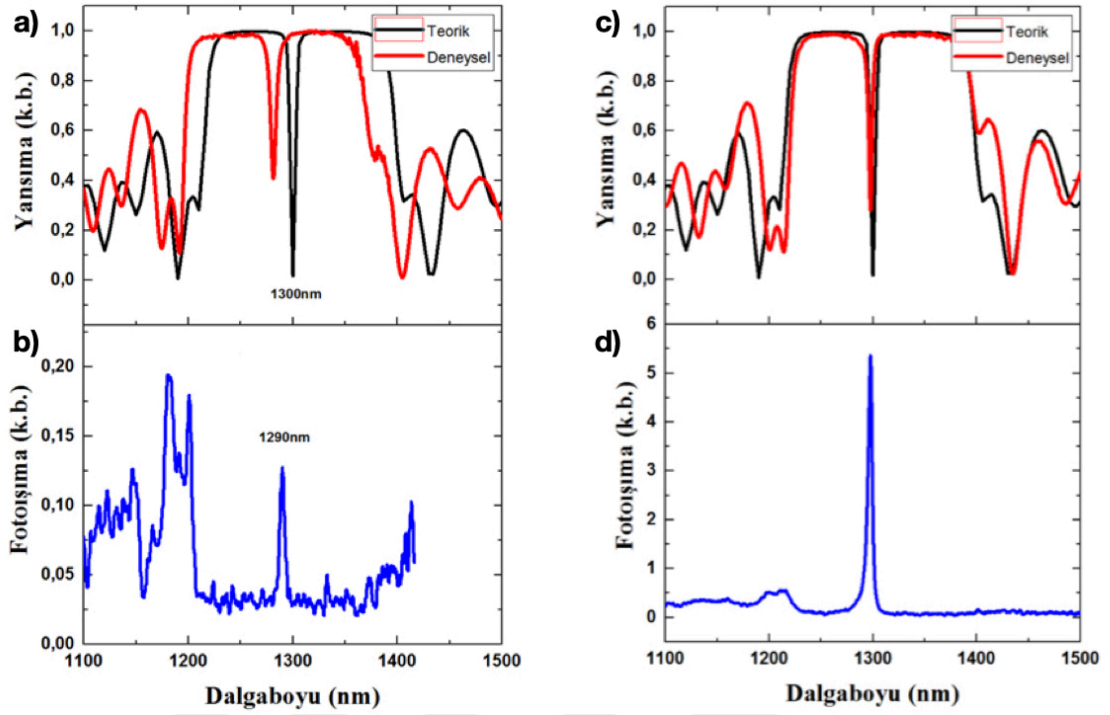
Fotodedektörde yk çoğullayıcı bölge olarak kullanılan ikinci *p-i-n* eklem için; GaAs-tabanlı oğullama malzemesi seçilerek, fotodedektör için impakt iyonizasyon parametreleri olan α_e , β_e ve M kullanılarak fotodedektörün iç elektrik alanına bağlı olarak elektronların çoğalma miktarı ve çoğullanma bölgesinin kalınlığı hesap edilmiştir. GaAs'in uzun yıllar çalışılan bir malzeme olması, bütün malzeme parametrelerinin bilinmesi ve impakt iyonizasyon için i elektrik alan değerinin bilinmesi, çoğullanma bölgesinin GaAs-tabanlı olmasının nedenleri olarak gösterilebilir. Ayrıca GaAs'in bant aralığının absorpsiyon bölgesinin bant aralığına oranla daha büyük olduğundan, 1.3 μm dalgaboyuna ayarlı fotodedektör yapısı için soğurmaya katkısı ihmal edilebilir düzeyde olacağından, tercih sebebidir. *n*-tipi ve *p*-tipi tabakaların katkı konsantrasyonları da termiyonik emisyon, tünelleme akımlarını hesaba katıldığı, Fermi-Dirac istatistiğinin çözümlerini içeren "Sürüklenme-Difüzyon Modeli" SimWindows programı kullanılarak belirlenmiştir (Winston, 1996). SimWindows programı, alaşımdaki katkı konsantrasyonları için denge durumunda impakt iyonizasyon için gerekli i elektrik alan büyüklüğüne ulaşılıp ulaşılamayacağının simülasyonu yapıldığı için önemlidir. oğullanma tabakasının kalınlığı için çeşitli kalınlıklarda I-V simülasyonlarına bakılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre bu tabaka ne çok dar ne de çok geniş olmalıdır. oğullanma bölgesi kalınlığı idealden daha dar olduğunda çoğullanmanın gerçekleşeceği voltaj değeri azalmakta ve kontrolsüz bir çoğullanma bölgesi gözlenmektedir. oğullanma bölgesi idealden daha kalın olduğunda ise çoğullanmanın gerçekleşmesi için daha yüksek elektrik alana ihtiyaç duyulduğu grlmştir. İdeal kalınlık değeri olarak 200 nm civarında olması gerektiği hesaplanmıştır. Yukarıda yer verilen hesaplama metodları ve simülasyon sonuçları ışığında şekil 3.2 ve şekil 3.3'te verilen tasarımların verimli bir şekilde çalışacağı grlmştir.

Absorpsiyon bölgesinin üzerinde ve çoğullanma bölgesinin altında bulunan DBR tabakalarının kalınlıkları ve periyotları bölüm 2.2.4'te anlatılan TMM kullanılarak tasarlanmıştır. Fotodedektör yapısı ayarlanan $1.3 \mu\text{m}$ dalgaboyu dışında tam yansıma olacak şekilde DBR tabakaları yerleştirilmiştir. DBR tabakaları, bu çalışmada rezonans kavitesini oluşturmak ve seçici geçirgenliği sağlamak amacıyla, alt ve üst DBR'lar olarak yapıda bulunmaktadır. DBR tabakaları, absorpsiyon bölgesi ile örgü uyumluluğu olan GaAs/AlAs yarıiletken çiftlerinden oluşmaktadır. İki yapıda da rezonans kavitesini oluşturmak adına GaAs/AlAs 10 adet üst ve 15 adet alt DBR tabakaları bulunmaktadır. Fotodedektör yapısını aktif bölgesi etrafında büyütülen DBR tabakaları ile absorpsiyon dalgaboyu etrafında 5 nm FWHM olmuş ve fotodedektör yapıları $1.3 \mu\text{m}$ dalgaboyu civarına set edilmiştir.

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.66}\text{In}_{0.34}\text{N}_{0.018}\text{As}_{0.982}/\text{GaAs}$ SACM fotodedektörün ve rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.733}\text{In}_{0.267}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975}/\text{GaN}_{0.035}\text{As}_{0.965}$ SACM fotodedektörün, 300°K sıcaklıkta dalgaboyu homojenliğinin belirlenmesi amacıyla 5 mm aralıklarla çeyrek disk üzerinde fotoluminesans ölçümleri Şekil 4.3'te sunulmuştur. Ölçülen her bir nokta için, ölçüm sonucunun merkezi pik dalgaboyu alınarak, çeyrek disk üzerinde uzaysal dalgaboyu değişimi elde edilmiştir.



Şekil 4.3: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.66}\text{In}_{0.34}\text{N}_{0.018}\text{As}_{0.982}/\text{GaAs}$ SACM fotodedektörün ve b) rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.733}\text{In}_{0.267}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975}/\text{GaN}_{0.035}\text{As}_{0.965}$ SACM fotodedektörün fotoluminesans dalgaboyunun konumsal değişimi.



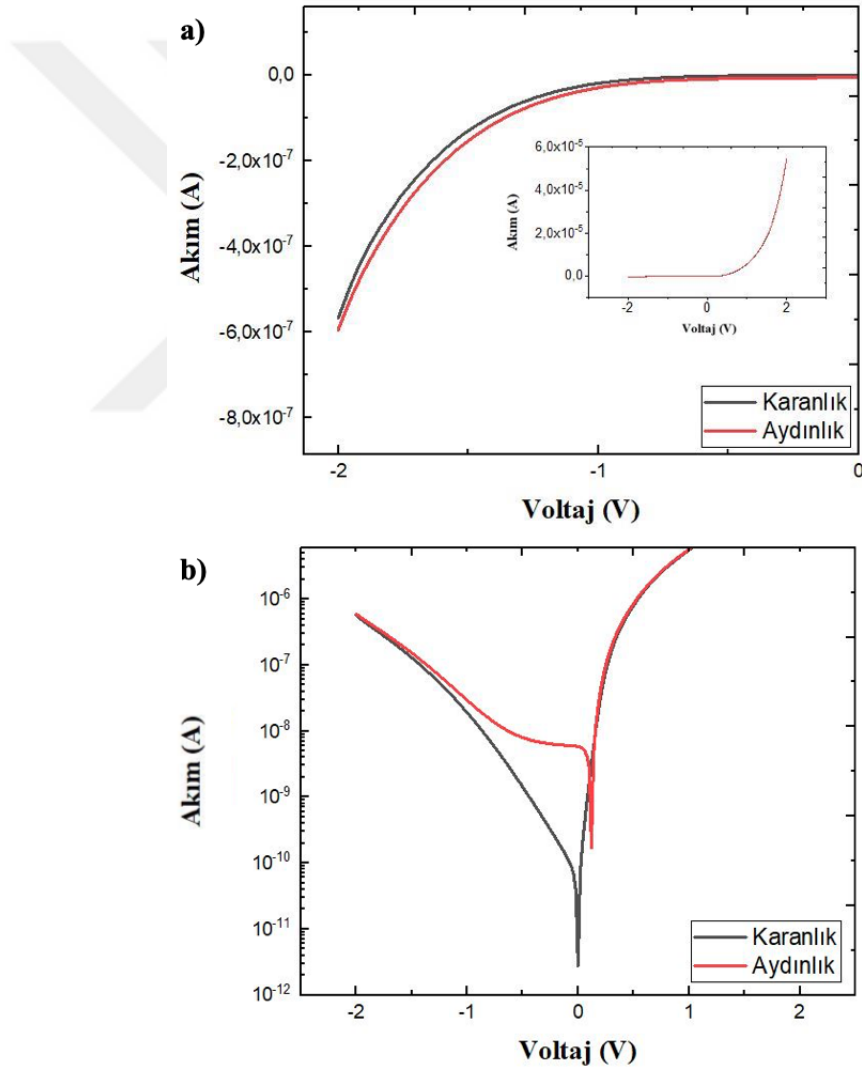
Şekil 4.4: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM fotodedektörün a) yansıma ve b) fotolüminesans spektrumu. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM fotodedektörün c) yansıma ve d) fotolüminesans spektrumu.

1.3 μm dalgaboyuna ayarlı sadece bu dalgaboyunu geçiren ve rezonans kavitesi yaratmak amacıyla tasarlanan DBR tabakalarının, Şekil 4.4 a'da ayarlandığı dalgaboyu ile uyumlu olmadığı ancak Şekil 4.4 b'de ise son derece uyumlu olduğu görülmektedir. Bu sonuç hem TMM'nin başarısı hem de büyütme sistemlerinde geline teknik gelişmenin ve parametre ayrıntılarının ne kadar önemli olduğunun bir göstergesidir.

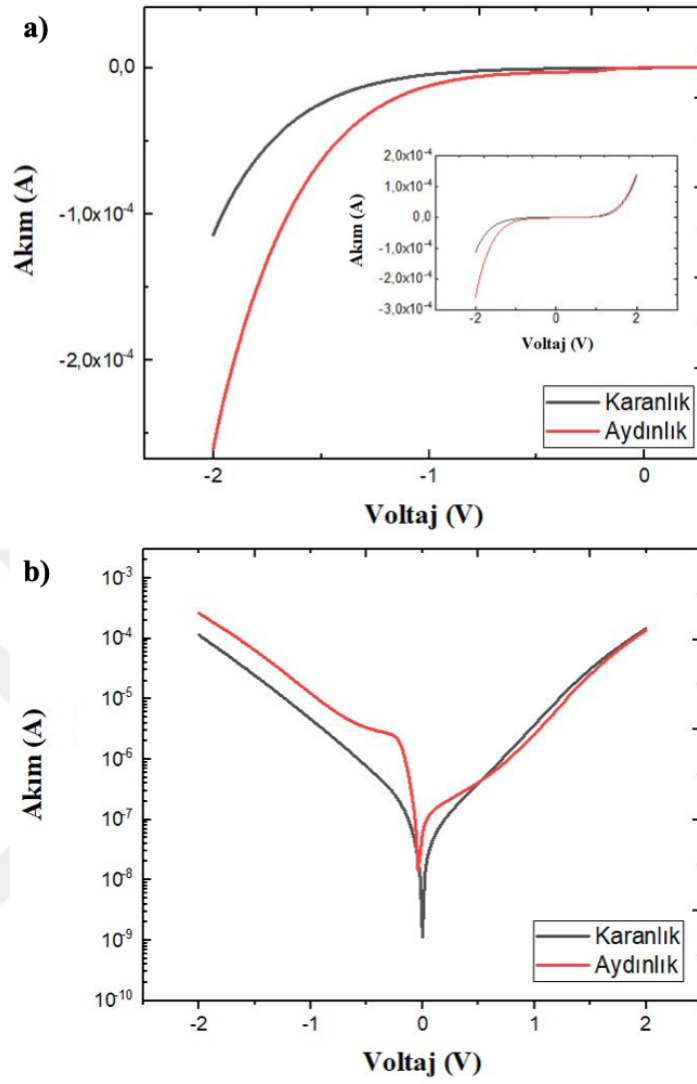
Fotodedektör yapılarının absorpsiyon penceresi fiber optik iletişimde kullanılmak amacıyla 1.3 μm dalgaboyu olması istenmiştir. Şekil 4.4'e bakıldığında rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM fotodedektör yapısının; absorpsiyon ve rezonans penceresinin dalgaboyunun çakışmadığı görülmektedir ki bu durum teori ile büyütme şartlarının uyumsuzluğu sonucunda ~ 10 nm'lik bir kaymaya neden olmuştur. Şekil 4.4c ve Şekil 4.4d'ye bakıldığında rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM fotodedektör yapısının; absorpsiyon ve rezonans penceresinin dalgaboyunun çakıştığı görülmektedir.

4.1.1. Akım - Voltaj Ölçüm Sonuçları

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ ve $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/Ga_{0.035}As_{0.965}$ SACM fotodedektörü yapılarından birer örnek ve Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/Ga_{0.035}As_{0.965}$ $p-i-n$ eklem çığ fotodedektörü yapısından bir örnek için; akım - voltaj ölçümleri sırasıyla Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de verilmiştir. Akım - voltaj ölçümleri oda sıcaklığında yapılmıştır.

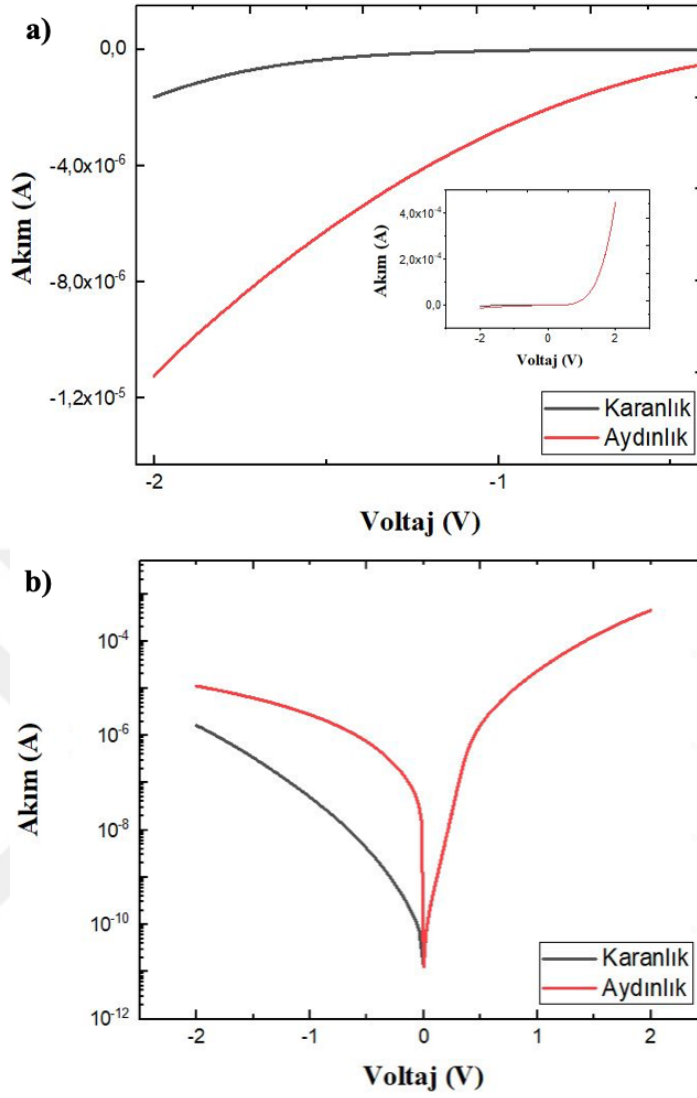


Şekil 4.5: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM fotodedektörün a) karanlık ve aydınlık altında alınan akım-voltaj ölçüm sonuçları b) yarı logaritmik skalada gösterimi.



Şekil 4.6: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM fotodedektörün a) karanlık ve aydınlık altında alınan akım-voltaj ölçüm sonuçları b) yarı logaritmik skalada gösterimi.

Şekil 4.5 a ve Şekil 4.6 a'daki iç profildeki akım voltaj karakteristiklerine bakıldığında ileri yönde akım çok daha büyük ve eksponansiyel artarken, geri yönde oldukça küçüktür. Fotodedektör yapıları diyot karakteristiği sergilemektedir. Şekil 4.5'teki dedektör yapısı GaAs bariyere sahip iken Şekil 4.6'daki fotodedektör yapısı GaNAs bariyere sahiptir. Her iki fotodedektör yapısında elektronların iletkenlik bandı kenarında görecekları bariyer sırasıyla 300 ve 80 meV'dir. GaNAs bariyere sahip fotodedektör yapısının iletkenlik bandı kenarında göreceği bariyer daha az olduğundan geri besleme voltajı arttıkça karanlık akımın da GaAs bariyere oranla daha hızlı arttığı görülmektedir. Bu durum sonucunda geri beslemede elektronlar kuyudan kolayca kaçabileceklerdir. Sonucunda da impakt iyonizasyonun tetiklenmesi mümkün olmayacaktır.

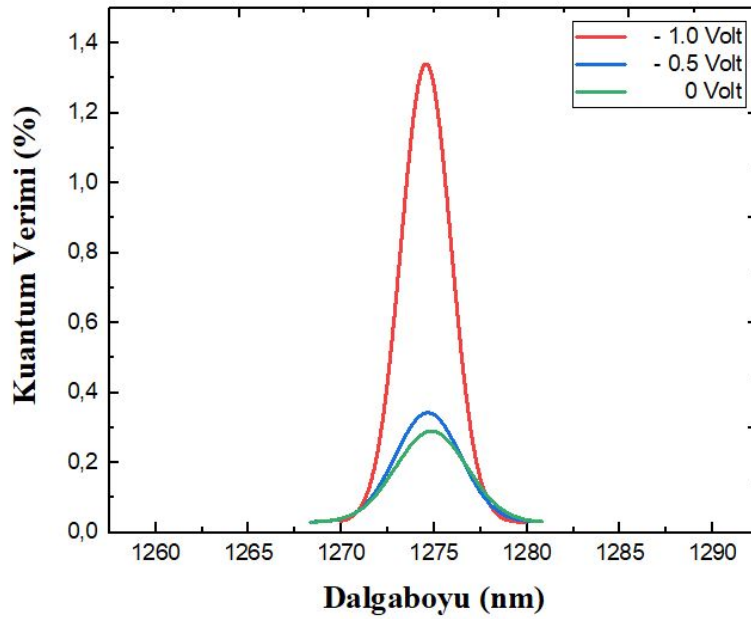


Şekil 4.7: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/Ga_{0.035}As_{0.965}$ p-i-n çığ fotodedektörün a) karanlık ve aydınlık altında alınan akım-voltaj ölçüm sonuçları b) yarı logaritmik skalada gösterimi.

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ p-i-n eklem çığ fotodedektör yapısında üretilen örnekte bulunan hiçbir aygıt diyot karakteristiği göstermediğinden sonuçlarına değinilmemiştir. Ayrıca bu örnek yapısından fabrikasyonu yapılmamış parça bulunmadığı için de yeni örnek fabrikasyonu yapılamamıştır.

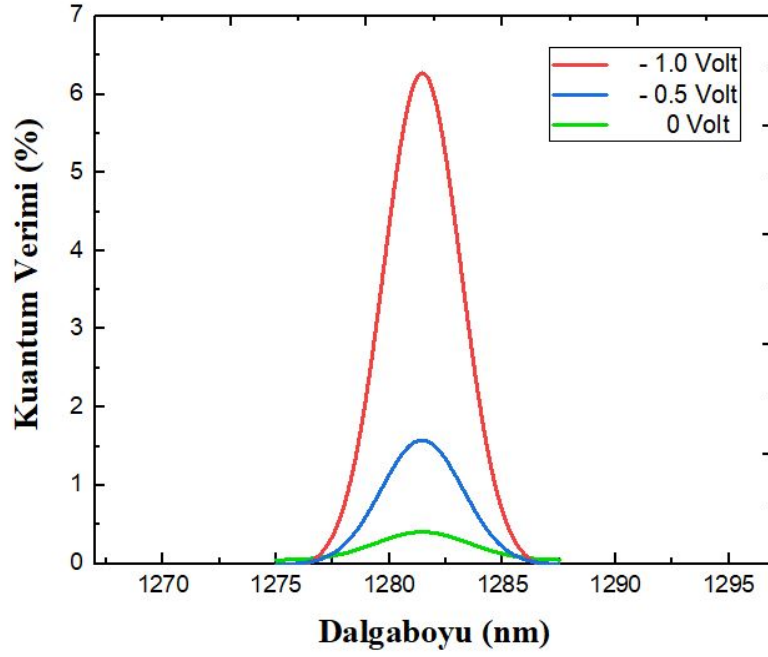
4.1.2. Spektral Fotoakım Ölçüm Sonuçları

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ ve $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM fotodedektörü yapılarından birer örnek ve Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* eklem çıkış fotodedektörü yapısından bir örnek için; geri besleme voltajına bağlı spektral fotoakım ölçümleri yapılmıştır. Spektral fotoakım ölçümleriyle duyarlılık ve kuantum verimlilikleri hesaplanmıştır. Tüm ölçümler ayarlanabilir laser kaynağı ile 1270 - 1340 nm dalgaboyu aralığında ve 20 μW optik güç altında ölçülmüştür. Spektral fotoakım ölçümleri oda sıcaklığında yapılmıştır. Farklı geri besleme voltajlarında maksimum dalgaboyu için elde edilen duyarlılık ve kuantum verimlilikleri Tablo 4.1 ve Tablo 4.2’de verilmiştir.



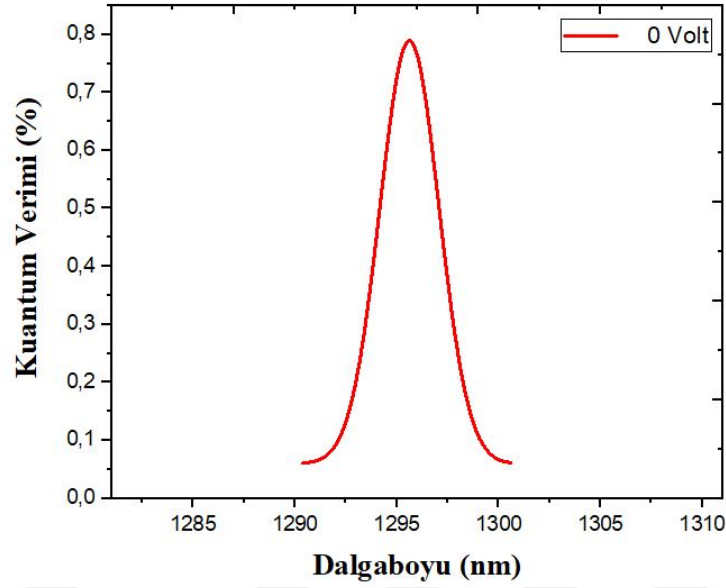
Şekil 4.8: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM fotodedektörünün geri besleme altında spektral kuantum verimi sonuçları.

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM fotodedektör için kuantum verimi 1274 nm’de maksimum değerini almıştır. Duyarlılık ise 13 mA/W olarak hesaplanmıştır. Dalgaboyu değişimine karşılık spektral kuantum verimi sonuçları Şekil 4.8’de verilmiş olup, FWHM 5 nm olarak belirlenmiştir. Kuantum verimliliği maksimum dalgaboyunda ve -1 V geri besleme altında %1,34 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.9: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM fotodedektörün geri besleme altında spektral kuantum verimi sonuçları.

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM fotodedektör için kuantum verimi 1282 nm’de maksimum değerini almıştır. Duyarlılık ise 64 mA/W olarak hesaplanmıştır. Dalgaboyu değişimine karşılık spektral kuantum verimi sonuçları Şekil 4.9’da verilmiş olup, FWHM 5 nm olarak belirlenmiştir. Kuantum verimliliği maksimum dalgaboyunda ve -1 V geri besleme altında %6,27 olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.10: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* eklem çığ fotodedektörün spektral kuantum verimi sonucu.

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* eklem çığ fotodedektör için kuantum verimi 1296 nm’de maksimum değerini almıştır. Duyarlılık ise 8 mA/W olarak hesaplanmıştır. Dalgaboyu değişimine karşılık spektral kuantum verimi sonuçları Şekil 4.10’da verilmiş olup, FWHM 5 nm olarak belirlenmiştir. Kuantum verimliliği maksimum dalgaboyunda ve 0 V geri besleme altında %0,79 olarak elde edilmiştir. Örnek, farklı geri besleme voltajları uygulanırken diyot karakteristiğini kaybetmiştir. Bu sebeple sadece 0 V geri besleme altında yapılan ölçüm sonuçları verilmiştir.

Tablo 4.1: Fotodedektör yapılarının farklı geri besleme altındaki duyarlılıkları.

Örnek	R (A/W) 0V	R (A/W) -0,5V	R (A/W) -1V
$Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM	0,002	0,003	0,013
$Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM	0,004	0,016	0,064
$Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ <i>p-i-n</i>	0,008	-	-

Tablo 4.2: Fotodedektör yapılarının farklı geri besleme altındaki kuantum verimleri.

Örnek	QE (%) 0V	QE (%) -0,5V	QE (%) -1V
$Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM	0,29	0,34	1,34
$Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM	0,4	1,58	6,27
$Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ <i>p-i-n</i>	0,79	-	-

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada farklı Azot alaşım konsantrasyonlarında ve farklı bariyer malzemelerine sahip rezonans kaviteli GaInNAs/Ga(N)As çoklu kuantum kuyulu fotodedektör yapılarının; fabrikasyonu, elektriksel karakterizasyonu yapılarak, üretilen aygıtların çalışma parametreleri belirlenmiştir. Çalışmada iki ayrı fabrikasyon süreci ile farklı konsantrasyon oranı ve bariyer malzemesine sahip iki örnek yapısından, 125 - 650 μm çaplarda değişen mesa yapıları oluşturulmuştur ve toplamda dört aygıt üretilmiştir. Sonuç olarak rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.66}\text{In}_{0.34}\text{N}_{0.018}\text{As}_{0.982}/\text{GaAs}$ SACM fotodedektör, rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.733}\text{In}_{0.267}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975}/\text{GaN}_{0.035}\text{As}_{0.965}$ SACM fotodedektör ve rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.733}\text{In}_{0.267}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975}/\text{GaN}_{0.035}\text{As}_{0.965}$ *p-i-n* eklem çığ fotodedektör olmak üzere toplam üç örnek üzerinde üretilen aygıtlar tez çalışmasında kullanılmıştır.

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.66}\text{In}_{0.34}\text{N}_{0.018}\text{As}_{0.982}/\text{GaAs}$ SACM fotodedektör ile rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.733}\text{In}_{0.267}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975}/\text{GaN}_{0.035}\text{As}_{0.965}$ SACM fotodedektörün I-V ölçümlerinde karanlık akım değerlerine bakıldığında; Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.66}\text{In}_{0.34}\text{N}_{0.018}\text{As}_{0.982}/\text{GaAs}$ SACM fotodedektörde -2 V geri beslemede 10^{-7} A ve rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.733}\text{In}_{0.267}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975}/\text{GaN}_{0.035}\text{As}_{0.965}$ SACM fotodedektöründe ise -2 V geri beslemede 10^{-4} A civarında olduğu görülür. Bu değerler oldukça yüksektir. Fotodedektör karanlıkta dahi yüksek akım üretmekte ve ısınmaktadır, karanlık akım responsu düşürücü etkisi olduğundan, örneğin verimli çalışmasını engellemektedir.

SACM yapısında olan örneklerde iki *p-i-n* dedektör yapısı bulunmaktadır ve impakt iyonizasyonun tetiklenmesi için yüksek iç elektrik alana sahip olmalıdır. Bu nedenle büyütme sırasında yapılan büyütücü kaynaklı katkı konsantrasyonu hatası sonucu tasarımlar hesaplandığı şekliyle üretilenmemiştir. Bu hata sonucu çoğullanmanın başlaması için gerekli yüksek iç elektrik alan sağlanamadığından, geri besleme voltajında artırıma ihtiyaç duyulduğu gözlenmiştir. Fakat yüksek geri besleme voltajı uygulamak da örneği aşırı ısıtarak verim kaybına veya örnek kaybına neden olacaktır. Bu nedenle SACM yapıdaki yük çoğullayıcı bölgenin bu şartlar altında çalışmayacağı anlaşılmaktadır.

Çalışmada kullanılan tüm fotodedektör yapıları fiber optik iletişimde kullanılan 1.3 μm dalgaboyu penceresine uygun olarak $\sim 1.3 \mu\text{m}$ çalışacak şekilde bant aralığı enerjileri BAC modeli ve Vegard yasası kullanılarak hesaplanmış ve II. nesil fotodedektör tasarımları örnek alınarak SACM olarak çalışacak şekilde modifiye edilmiştir. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.66}\text{In}_{0.34}\text{N}_{0.018}\text{As}_{0.982}/\text{GaAs}$ SACM fotodedektör ile rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.733}\text{In}_{0.267}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975}/\text{GaN}_{0.035}\text{As}_{0.965}$ SACM fotodedektörün kuantum verimlilikleri kıyaslandığında rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.66}\text{In}_{0.34}\text{N}_{0.018}\text{As}_{0.982}/\text{GaAs}$ SACM fotodedektör için kuantum verimi 1274 nm’de maksimum değerini almış, duyarlılık ise 13 mA/W olarak hesaplanmıştır. FWHM 5 nm olarak belirlenmiştir. Kuantum verimliliği maksimum dalgaboyunda ve -1 V geri besleme altında %1,34 olarak elde edilmiştir. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.733}\text{In}_{0.267}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975}/\text{GaN}_{0.035}\text{As}_{0.965}$ SACM fotodedektöründe ise kuantum verimi 1282 nm’de maksimum değerini almış, duyarlılık ise 64 mA/W olarak hesaplanmıştır. FWHM 5 nm olarak belirlenmiştir. Kuantum verimliliği maksimum dalgaboyunda ve -1 V geri besleme altında %6,27 olarak elde edilmiştir. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.733}\text{In}_{0.267}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975}/\text{GaN}_{0.035}\text{As}_{0.965}$ SACM fotodedektörün kuantum verimliliği -1 V geri besleme altında ~ 4.8 kat daha fazla olduğu hesaplanmıştır.

Fotodedektörlerin absorpsiyon bölgesinde bariyer malzemesi olarak GaAs ve $\text{GaN}_y\text{As}_{1-y}$ ($y = 0.035$) seçilmiştir. Seçilen bariyer malzemeleri yapıda en az gerilmeyi (strain) oluşturacak şekilde seçilmiştir. GaNAs tabakalar arası gerilmeyi kompanse edici durumdadır (Sarcan ve diğ., 2018, 2017). Ancak GaNAs’nin GaAs bariyer malzemesine göre bant aralığı daha küçüktür. Bu yüzden bariyerin sınırlama etkisi GaAs ’e göre daha küçük olacaktır. Taşıyıcılar kuyuda tutulamadan kaçabileceklerdir.

Kuantum verimlilikleri normal şartlarda rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.66}\text{In}_{0.34}\text{N}_{0.018}\text{As}_{0.982}/\text{GaAs}$ SACM fotodedektöründe daha büyük olması beklenir. Ancak rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.66}\text{In}_{0.34}\text{N}_{0.018}\text{As}_{0.982}/\text{GaAs}$ SACM fotodedektör yapısı büyütülürken Sb akışı altında büyütme yapılmamış, rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.733}\text{In}_{0.267}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975}/\text{GaN}_{0.035}\text{As}_{0.965}$ SACM fotodedektör ise Sb akışı altında büyütülmüştür. Sb akışı altında büyütme, N’un yapıya homojen katılmasını sağlar ve büyütülen tabakaların kalitesini etkiler. Şekil 4.3’e bakıldığında rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $\text{Ga}_{0.66}\text{In}_{0.34}\text{N}_{0.018}\text{As}_{0.982}/\text{GaAs}$ SACM fotodedektör yapısının örnek yüzeyinde konumsal olarak merkezi dalgaboyunun 1274 - 1291 nm aralığında

değiştirdiği ve homojenliğin sağlanamadığı görülür. Bu değişimin nedeni N'un yapıya düzgün şekilde katılamamasının sonucudur. Şekil 4.4'e bakıldığında da absorpsiyon bölgesinin maksimum dalga boyu ile rezonans kavitesi arasında ~ 10 nm'lik bir fark olduğu görülmektedir. Rezonans kavitesi bulunan fotodedektör yapılarında yüksek verime ulaşmanın başlıca kurallarından biri, absorpsiyon bölgesi ile rezonans kavitesi arasındaki uyumdur. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM fotodedektör yapısında bu uyum elde edilememiştir. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM fotodedektör yapısında ise büyütme Sb akışı altında yapıldığından merkezi dalga boyu 1281 - 1296 nm aralığında değişmekte ve fotodedektörün geçirgen olduğu optik pencereyle daha uyumludur.

Eğer Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM fotodedektör yapısı GaAs bariyerli büyütülmüş olsaydı daha yüksek kuantum verimine ve rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM fotodedektör yapısı Sb akışı altında büyütülmüş olsaydı GaNAs bariyerli yapıya oranla daha yüksek kuantum verimine sahip olacaktı. Çalışmada kullanılan rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ SACM fotodedektörü tasarımı GaInNAs tabanlı ilk SACM fotodedektörlerden biridir. Ayrıca her iki fotodedektör yapısında yük çoğullama tabakasındaki katkı konsantrasyonu hatası yapılmamış olsaydı, yüksek kazançlı SACM yapıları elde edilmiş olacaktı.

SACM fotodedektör yapılarındaki çoğullama bölgesinin sisteme katkı sağlamadığını ve duyarlılığı düşürdüğünü daha iyi görebilmek için hatalı büyütülen yük çoğullama tabakasını pasif hale getirmek ve çoğullama bölgesinin etkisi olmadan fotodedektör performansının incelenmek istediği önceki bölümlerde aktarılmıştı. Bu sebeple fotodedektör yapıları bölüm 3.2.9.2'de anlatıldığı gibi sadece $p-i-n$ (p^+-i-p^+) eklemi çalıştıracak hale getirildi. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.66}In_{0.34}N_{0.018}As_{0.982}/GaAs$ $p-i-n$ eklem çıkış fotodedektörü diyot karakteristiği sergilemediği için bu yapının $p-i-n$ eklem çıkış fotodedektör hali kıyaslanamamıştır.

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ $p-i-n$ eklem çıkış fotodedektörü için kuantum verimi 1296 nm'de maksimum değerini almış, duyarlılık ise 8 mA/W olarak hesaplanmıştır. FWHM 5 nm olarak belirlenmiştir. Kuantum verimliliği maksimum dalga boyunda ve 0 V geri besleme altında %0,79 olarak elde

edilmiştir. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ SACM fotodedektörü ile kıyaslandığında rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* eklem ışıf fotodedektörün 0 V geri besleme altında kuantum verimliliğı ~ 2 kat daha fazla olduğı hesaplanmıştır. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* eklem ışıf fotodedektörü farklı geri besleme voltajları uygulanırken diyot karakteristiğini kaybetmiştir. Bu sebeple sadece 0 V geri besleme altında yapılan ölçüm sonuçları kıyaslanabilmifitir. Sonuç olarak, sadece *p-i-n* (p^+-i-p^+) eklem yapı incelendiğinde kuantum verimliliğinin ümit verici ölçüde arttığı görölmektedir.

Sonuç olarak hesaplanan tasarımların, deney sonuçları ile oluşan hata payları gözönüne alınarak, fiber optik iletişimde kullanılan $1.3 \mu m$ dalgaboyu penceresine uygun olarak $1.3 \mu m$ 'den daha büyük bant aralığı enerjileri bulunan absorpsiyon bölgeleri tasarlanarak $\sim 1.3 \mu m$ çalışacak şekilde yeni tasarımlar yapılabileceğı düşünölmektedir. Ayrıca daha küçük çaplı örneklerin kuru aşındırma teknikleri ile üretilmesi ve örnekler üzerinde pasifizasyon yapılmasıyla bu yapıların yüksek karanlık akım oluşturmadan daha küçük geri besleme voltajlarında yüksek verimlilikte çalışabileceğı düşünölmektedir. Fakat İstanbul Üniversitesi Nano ve Optoelektronik Araştırma Laboratuvarlarında kuru aşındırma teknikleri uygulanamadığı için bu fabrikasyon yapılamamıştır. Çalışılan bu yapılar "Ayrılmış çoğalma, yük ve absorpsiyon bölgesi" (Separated Absorption, Charge and Multiplication, SACM) olan ilk GaInNAs tabanlı fotodedektör yapılarıdır.

Bu çalışmada GaInNAs tabanlı fotodedektör tasarımlarının; fabrikasyon ve karakterizasyon süreçleri gerçekleştirildi ve ideal diyot elde edilmesi için gelecek çalışmalarda yapılacak tasarımlarda hangi parametrelerin değışmesi gerektiğı ve üretim sürecinde nelere dikkat edilmesi gerektiğı öğrenilmiş oldu. Gelecekte tasarlanacak olan daha yüksek kuantum verimliliğine sahip olacak yapılar için deneyim kazanıldı. Ayrıca fotodedektör fabrikasyonu nasıl yapılacağı ve nasıl karakterize edileceğı hakkında kazanımlar elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Baca, A. G., Ren, F., Zolper, J. C., Briggs, R. D. and Pearton, S. J., 1997, A survey of ohmic contacts to III-V compound semiconductors, *Thin Solid Films* 308 (309), 599–606.
- Baca, A. G. and Ashby, C. I. H., 2009, Fabrication of GaAs Devices, *The Institution of Engineering and Technology*, ISBN 978-0863413537.
- Balkan, N., Erol, A., Sarcan, F., Al-Ghuraibawi, L. F. F. and Nordin, M. S., 2015, Dilute nitride resonant cavity enhanced photodetector with internal gain for the 1.3 μ m optical communications window, *Superlattices and Microstructures* 86, 467–471.
- Batool, Z., Hild, K., Hosea, T. J. C., Lu, X., Tiedje, T., and Sweeney, S. J., 2012, The electronic band structure of GaBiAs/GaAs layers: Influence of strain and band anti-crossing, *J. Appl. Phys.* 111 (11), 2–8.
- Campbell, J. C., Holden, W. S., Qua, G. J. and Dental, A. G., 1985, Frequency Response of InP/InGaAsP/InGaAs Avalanche Photodiodes with Separate Absorption “Grading” and Multiplication Regions, *IEEE Journal of Quantum Electronics* QE-21 (11), 1743–1746.
- Campbell, J. C., Tsang, W. T., Qua, G. J. and Bowers, J. E., 1987, InP/InGaAsP/InGaAs avalanche photodiodes with 70 GHz gain-bandwidth product, *Applied Physics Letters* 51 (18), 1454–1456.
- Campbell, J. C., Tsang, W. T., Qua, G. J., Johnson, B. C. and Chandrasekhar, S., 1989, Multiplication Noise of Wide-Bandwidth InP/InGaAsP/InGaAs Avalanche Photodiodes, *Journal of Lightwave Technology* 7 (3), 473–478.
- Chen, Y. C. ve Bhattacharya, P. K., 1993, Impact ionization coefficients for electrons and holes in strained In_{0.2}Ga_{0.8}As and In_{0.15}Ga_{0.63}Al_{0.22}As channels embedded in Al_{0.3}Ga_{0.7}As, *Journal of Applied Physics* 73 (1), 465–467.
- Chung, S. H., 2005, *Gunn Laser*, Ph.D. thesis, University of Essex.
- David, J. P. R., Member, S. and Tan, C. H., 2008, Material Considerations for Avalanche Photodiodes, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 14 (4), 998–1009.
- Diadiuk, V., Groves, S. H. and Hurwitz, C. E., 1980, Avalanche multiplication and noise characteristics of low-dark-current GaInAsP/InP avalanche photodetectors, *Applied Physics Letters* 37 (9), 807–810.
- Dönmez, O., Sarcan, F., Erol, A., Gunes, M., Arikan, M. C., Puustinen, J. And Guina, M., 2014, Magnetotransport study on as-grown and annealed n- and p-type modulation-doped GaInNAs/GaAs strained quantum well structures., *Nanoscale research letters* 9 (1), 141.

- Erol, A., 2002, *Yüzey Işıması Yapan Düşük Boyutlu Yapılarda Bragg Yansıma Olayının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi.
- Erol, A., 2008, *Dilute III-V Nitride Semiconductors and Material Systems: Physics and Technology*, Springer, ISBN 9783540745297.
- Erol, A., Akalin, E., Sarcan, F., Donmez, O., Akyuz, S., Arikan, C. M., Puustinen, J. and Guina, M., 2012, Excitation energy-dependent nature of Raman scattering spectra in GaInNAs/GaAs quantum well structures, *Nanoscale Research Letters* 7 (1), 656.
- Erol, A. ve Balkan, N., 2013, *Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları*, Seçkin Yayıncılık, ISBN 9789750222214.
- Francoeur, S., Tixier, S., Young, E., Tiedje, T., and Mascarenhas, A., 2008, Bi isoelectronic impurities in GaAs, *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.* 77 (8), 1–5.
- Gambin, V., Ha, W., Wistey, M., Kim, S., ve Harris, J. S., 2002, GaInNAs Material Properties for Long Wavelength Opto-Electronic Devices, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* 692 (H7), 1–9.
- Khalil, H. M. and Balkan N., 2014, Carrier trapping and escape times in p-i-n GaInNAs MQW structures, *Nanoscale Res. Lett.* 9, 21.
- Han, Q., Yang, X. H., Niu, Z. C., Ni, H. Q., Xu, Y. Q., Zhang, S. Y., Du, Y., Peng, L. H., Zhao, H., Tong, C. Z., Wu, R. H. and Wang, Q. M., 2005, 1.55 μ m GaInNAs resonant-cavity-enhanced photodetector grown on GaAs, *Applied Physics Letters* 87 (11), 1–4.
- Henini, M., 2005, *Dilute Nitride Semiconductors*, Elsevier Science, ISBN 9780080445021.
- Hu, S. Y., Ko, J., and Colden, L. A., 1997, Resonant-cavity InGaAs/InAlGaAs/InP photodetector arrays for wavelength demultiplexing applications, *Appl. Phys. Lett.* 70, 2347.
- Jain, V., Heurlin, M., Barrigon, E., Bosco, L., Nowzari, A., Shroff, S., Boix, V., Karimi, M., Jam, R. J., Berg, A., Samuelson, L., Borgström, M. T., Capasso, F. and Pettersson, H., 2017, InP/InAsP Nanowire-Based Spatially Separate Absorption and Multiplication Avalanche Photodetectors, *ACS Photonics* 4 (11), 2693–2698.
- Kagawa, T., Kawamura, Y. and Iwamura, H., 1992, InGaAsP-InAlAs Superlattice Avalanche Photodiode, *IEEE Journal of Quantum Electronics* 28 (6), 1419–1423.
- Kaiser, G., 2010, *Optical Fiber Communications*, Pearson Prentice Hall, ISBN 9780130326812.
- Kao, K. and Hockham, G., 1966, Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* 113 (7), 1151–1158.
- Kasap, S. O., 2013, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Pearson Prentice Hall, second edition, ISBN 9780132151498.

- Kishino, K., Ünlü, M. S., Chyi, J., Reed, J., Arsenault, L., ve Markoç, H., 1991, Resonant Cavity -Enhanced (RCE) Photodetectors, *IEEE Journal of Quantum Electronics* 27 (8), 2025–2034.
- Kent, P. R. C., Bellaiche, L., and Zunger, A., 2002, Pseudopotential theory of dilute III V nitrides, *Semicond. Sci. Technol.* 17 (8), 851–859.
- Kinsey, G. S., Campbell, J. C. and Dental, A. G., 2001, Waveguide avalanche photodiode operating at 1.55 μm with a gain-bandwidth product of 320 GHz, *IEEE Photonics Technology Letters* 13 (8), 842–844.
- Kondow, M., Uomi, K., Niwa, A., Kitatani, T., Watahiki, S., and Yazawa, Y., 1996, GaInNAs: A Novel Material for Long-Wavelength-Range Laser Diodes with Excellent High-Temperature Performance, *Jpn. J. Appl. Phys.* 35 (1-2B), 1273–1275.
- Lee, C. A., Logan, R. A., Batdorf, R. L., Kleimack, J. J. ve Wiegmann, W., 1964, Ionization rates for holes and electrons in silicon, *Physical Review* 134 (3A), 761-774.
- Levine, B. F., Bethea, C. G. and Campbell, J. C., 1985, Room-temperature 1.3 μm optical time domain reflectometer using a photon counting InGaAs/InP avalanche detector, *Applied Physics Letters* 46 (4), 333–335.
- Li, N., Sidhu, R., Li, X., Ma, F., Zheng, X., Wang, S., Karve, G., Demiguel, S., Holmes, A. L. and Campbell, J. C., 2003, InGaAs/InAlAs avalanche photodiode with undepleted absorber, *Applied Physics Letters* 82 (13), 2175–2177.
- Liu, M., Hu, C., Bai, X., Guo, X., Campbell, J. C., Pan, Z. and Tashima, M. M., 2007, High-Performance InGaAs/InP Single-Photon Avalanche Photodiode, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 13 (4), 887-894.
- Ma, C. F., 1995, *Characterization and Modelling of SAGCM InP/InGaAs Avalanche Photodiodes for Multigigabit Optical Fiber Communications*, Ph.D. thesis, Simon Fraser University.
- Mohmad, a. R., Bastiman, F., Hunter, C. J., Richards, R., Sweeney, S. J., Ng, J. S., and David, J. P. R., 2012, Effects of rapid thermal annealing on GaAs_{1-x}Bix alloys, *Appl. Phys. Lett.* 101 (1), 12106.
- Maiman, T. H., 1960, Stimulated optical radiation in Ruby, *Nature* 187 (4736), 493–494.
- Mendez, A. and Morse, T. F., 2007, *Specialty Optical Fibers Handbook Contents Page*, Elsevier Ltd, ISBN 9780123694065.
- Nie, H., Anselm, K. A., Hu, C., Murtaza, S. S., Streetman, B. G. ve Campbell, J. C., 1997, High-speed resonant-cavity separate absorption and multiplication avalanche photodiodes with 130 GHz gain-bandwidth product, *Applied Physics Letters* 70 (2), 161–163.
- Nie, H., Baklenov, O., Yuan, P., Lenox, C., Streetman, B. G. ve Campbell, J. C., 1998, Quantum-Dot Resonant-Cavity Separate Absorption, Charge, and Multiplication Avalanche Photodiode Operating at 1.06 μm , *IEEE Photonics Technology Letters* 10 (2), 161–163.

- Nutku, F., 2012, *Düşük Boyutlu Yarıiletken Sistemlerde Elektronik Transport Olaylarının İncelenmesi*, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi.
- Razeghi, M. and Member, S., 2000, Optoelectronic Devices Based on III – V Compound Semiconductors Which Have Made a Major Scientific and Technological Impact in the Past 20 Years, *Quantum* 6 (6), 1344–1354.
- Ren, M., Maddox, S. J., Woodson, M. E., Chen, Y., Bank, S. R. and Campbell, J. C., 2017, GaInAsSb separate absorption, charge, and multiplication avalanche photodiodes, *2016 IEEE Photonics Conference, IPC 2016* 191108, 258–259.
- Saleh, M. A., Hayat, M. M., Sotirelis, P. P., Holmes, A. L., Campbell, J. C., Saleh, B. E. and Teich, M. C., 2001, Impact-ionization and noise characteristics of thin III-V avalanche photodiodes, *IEEE Transactions on Electron Devices* 48 (12), 2722–2731.
- Sarcan F., 2012, *Modülasyon Katkılı GaInNAs/GaAs Kuantum Kuyusu Yapıların Optik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi.
- Sarcan, F., Donmez, O., Gunes, M., Erol, A., Arikan, M. C., Puustinen, J. and Guina, M., 2012, An analysis of Hall mobility in as-grown and annealed n- and p-type modulation-doped GaInNAs/GaAs quantum wells, *Nanoscale Research Letters* 7, 1–6.
- Sarcan, F., 2018, *Rezonans Kaviteli ve İç Kazançlı GaInNAs-Tabanlı IR Fotodedektör*, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi.
- Sarcan, F., Nutku, F., Nordin, M. S., Vickers, A. J., and Erol, A., 2018, A study on the voltage-dependent response of a GaInNAs-based pin photodetector with a quasi-cavity, *Semiconductor Science and Technology* 33 (11), 114006.
- Sarcan, F., Nordin, M. S., Kuruoğlu, F., Erol, A. and Vickers, A. J., 2017, Characterization of temperature dependent operation of a GaInNAs-based RCEPD designed for 1.3 μm , *Superlattices and Microstructures* 102, 27–34.
- Sarcan, F., Wang, Y., Krauss, T. F., Erucar, T. and Erol, A., 2020, Dilute nitride resonant-cavity light emitting diode, *Optics Laser Technology* 122, 105888.
- Shan, W., Walukiewicz, W., Ager, J. W., Haller, E. E., Geisz, J. F., Friedman, D. J., Olson, J. M., and Kurtz, S. R., 1999, Band Anticrossing in GaInNAs Alloys, *Phys. Rev. Lett.* 82 (6), 1221–1224.
- Sun, Y., Balkan, N., Aslan, M., Lisesivdin, S. B., Carrere, H., Arikan, M. C. and Marie, X., 2009, Electronic transport in n- and p-type modulation doped GaInNAs / GaAs quantum wells, *Journal of Physics: Condensed Matter* 21 (17), 174210.
- Tan, I.-h., Hu, E. L., Bowers, J. E. and Miller, B. I., 1995, Modeling and Performance of Wafer-Fused, *Quantum* 31 (10), 1863–1875.
- Ünlü, M. S. ve Strite, S., 1995, Resonant cavity enhanced photonic devices, *Journal of Applied Physics* 78 (2), 607–639.

- Vechten V., J.A. and Bergstresser, T. K., 1970, Electronic structures of semiconductor alloys, *Phys. Rev. B.* 1 (3351).
- Winston, D. W., 1996, *Physical simulation of optoelectronic semiconductor devices*, Ph.D. thesis, University of Colorado.
- Wu, J., Shan, W., Walukiewicz, W., 2002, Band anticrossing in highly mismatched III V semiconductor alloys, *Semiconductor Science and Technology*, 17 (8), 860-869.
- Xiaoguang S., Shuling Wang, Hsu, J., Sidhu, R., Zheng, X., Xiaowei Li, Campbell, J. and Holmes, A., 2002, GaInNAs: a novel material for near infrared photodetectors on GaAs substrates, *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 8 (4), 817–822.
- Xiaoguang S., Wang, S., Zheng, X., Li, X., Campbell, J. ve Holmes, A., 2003, 1.31 m GaAsSb resonant-cavity-enhanced separate absorption, charge and multiplication avalanche photodiodes with low noise, *Journal of Applied Physics* 93 (1), 774–776.
- Young, D. L., Geisz, J. F., and Coutts, T. J., 2003, Nitrogen-induced decrease of the electron effective mass in GaAs_{1-x}N_x thin films measured by thermomagnetic transport phenomena, *Appl. Phys. Lett. American Institute of Physics.* 82 (8), 1236–1238.
- Yuan, P., Anselm, K. A., Hu, C., Nie, H., Lenox, C., Holmes, A. L., Streetman, B. G., Campbell, J. C. and McIntyre, R. J., 1999, A new look at impact ionization-part II: Gain and noise in short avalanche photodiodes, *IEEE Transactions on Electron Devices* 46 (8), 1632–1639.
- Zhang, W., Pan, Z., Li, L., Zhang, R., Lin, Y., ve Wu, R., 2001, 1.3 m GaInNAs/GaAs Multiple-Quantum-Wells Resonant-Cavity-Enhanced Photodetectors, *Proceedings of the SPIE* 4580, 225-231.
- Zhang, P., 2001, GaInNAs/GaAs Multiple-Quantum Well Resonant-Cavity-Enhanced Photodetectors at 1.3 m, *Chin. Phys. Lett.* 18 (9), 1249.
- Zheng, X.G., Sun, X., Wang, S., Yuan, P., Kinsey, G.S., Holmes, A.L., Streetman, B.G. ve Campbell, J.C., 2001, Multiplication noise of AlGaAs avalanche photodiodes with high Al concentration and thin multiplication region, *Applied Physics Letters* 78 (24), 3833-3835.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Burak KAY
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
Telefon	
E-Posta Adresi	
Web Adresi	

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü
Mezuniyet Yılı	2015

Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Açık ve Uzaktan Eğitim Fakültesi
Bölümü	Tarih Bölümü
Mezuniyet Yılı	Devam ediyor

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	Fizik Anabilim Dalı
Programı	Katıhal Fiziği Programı
Mezuniyet Tarihi	2021

Makale ve Bildiriler

Makaleler

Güver, T., Mazin, B. A., O'Brien, K., Kay, B., Aliş, S., Yelkenci, F. K., Yeşilyaprak, C., Yerli, S. K., Erol, A., Keskin, O., 2016, A microwave kinetic inductance detector for the DAG telescope, *Proc. Of SPIE* Vol. 9915, 99152P

Aliş, S., Güver, T., Erol, A., Ege, E., Kay, B., Yelkenci, F. K., Yeşilyaprak, C., Keskin, O., Yerli, S. K., Sarcan, F., Fişek, S., 2020, İstanbul Üniversitesi Gözlemevi Odak Düzlemi Aygıtları Test ve Karakterizasyon Laboratuvarı, *TJAA* Cilt 1, Sayı 2, s.755–757

Bildiriler

Kay, B., Ege, E., Güver, T., Mazin, B. A., O'Brien, K., Aliş, S., Yelkenci, F. K., Yeşilyaprak, C., Yerli, S. K., Erol, A., Keskin, O., 2016, Doğu Anadolu Gözlemevi'nde Kullanılacak MKID'e Genel Bir Bakış, *National Astronomy Congress*, UAK-20, P09 INST - 002

Ege, E., Kay, B., Güver, T., Mazin, B. A., O'Brien, K., Aliş, S., Yelkenci, F. K., Yeşilyaprak, C., Yerli, S. K., Erol, A., Keskin, O., 2016, DAG Teleskobu MKID Detektörü için Bilgisayar Donanım ve Yazılım Altyapısı, *National Astronomy Congress*, UAK20, P09 INST - 001

Güver, T., Mazin, B. A., O'Brien, K., Kay, B., Aliş, S., Yelkenci, F. K., Yeşilyaprak, C., Yerli, S. K., Erol, A., Keskin, O., 2016, A microwave kinetic inductance detector for the DAG telescope (DAG-MKID), *SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation*, 9915-101