T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOKTORA TEZİ

REZONANS KAVİTELİ VE İÇ KAZANÇLI GaInNAs-TABANLI IR FOTODEDEKTÖR

Fahrettin SARCAN

Fizik Anabilim Dalı

Katıhal Fiziği Programı

DANIŞMAN
Prof. Dr. Ayşe EROL

Eylül, 2018

İSTANBUL

Bu çalışma 21.09.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği Programında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

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

Prof. Dr. Engin TIRAŞ
Eskişehir Teknik Üniversitesi
Fen Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Saffettin YILDIRIM
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Y. Gürkan ÇELEBİ
İstanbul Üniversitesi
Fen Fakültesi

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

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.

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin 53902 numaralı projesiyle ve kısmen 52331 numaralı projesiyle desteklenmiştir.

Bu çalışma 113F277 numaralı TÜBİTAK projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Lisans öğrenimimden bugüne bilgi ve tecrübeleriyle yol gösterici, her zaman hissettirdiği güven duygusuyla cesaretlendirici olan değerli hocam Prof. Dr. Ayşe EROL'a en içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Doktora çalışmalarımı sürdürdüğüm laboratuvardaki cihazların ve bilim insanlarının hemen hemen hepsinde emeği olan değerli hocam Prof. Dr. Çetin ARIKAN'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Birçok bilim insanı adayına ışık tutarak yol gösteren değerli bilim insanı Prof. Dr. Naci BALKAN'ı rahmetle anıyorum.

Sadece doktora çalışmalarımızda değil hayatımızdaki dönüm noktalarında da benzer olayları aynı dönemlerde yaşadığımız, birbirimize her zaman destek olduğumuz değerli dostlarım Araş. Gör. Selman MUTLU ve Öğr. Gör. Furkan KURUOĞLU'na sonsuz teşekkür ediyorum.

Lisans son sınıfta tanıştığım, gerek sosyal hayatta gerekse bugüne kadar gerçekleştirdiğimiz bilimsel çalışmalardaki değerli katkılarından dolayı hocam Doç. Dr. Ömer Dönmez'e ve teorik çalışmalar sırasında sıkıştıkça kapısını çaldığım hocam Doç. Dr. Ferhat NUTKU'ya teşekkür ediyorum.

Doktora çalışmam sırasında gösterdikleri güler yüz ve sağladıkları sıcak çalışma ortamı için Dr. Öğr. Üyesi. Saffetin YILDIRIM'a, Dr. Öğr. Üyesi. Kamuran KARA'ya ve Dr. Öğr. Üyesi. Barış KINACI'ya teşekkür ediyorum.

Deneysel çalışmaların sıkıntısını da eğlencesini de beraber paylaştığımız değerli arkadaşlarım Tülin ERUÇAR, Öğr. Gör. Erman ÇOKDUYUGULULAR, Araş. Gör. Çağlar ÇETİNKAYA, Burak KAY ve Agageldi MUHAMMETGULYYEV'e teşekkür ediyorum.

Yüksek lisansa başladığım ilk günden bugüne kadar Nano-Optoelektronik Araştırma Grubunun bir parçası olmuş olan herkese teşekkür ediyorum.

Tüm hayatım boyunca verdiğim kararlara saygı duyarak beni destekleyen ve bana güvenen anne ve babama sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunuyorum.

Son on yılımı güzelleştiren; hayat arkadaşım, destekçim, dostum, Kerem'imin annesi, sevili eşim Leyla SARCAN'a yaşattığı ve yaşatacağı her güzel duygu ve an için sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Hiçbir çocuğun aç kalmadığı ve ağlamadığı bir dünya olmasını diliyorum. Doktora çalışmamı oğlum Kerem SARCAN'a ithaf ediyorum.

Eylül, 2018 Fahrettin SARCAN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xi**
TABLO LİSTESİ ..... **xii**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **7**
2.1. FİBER OPTİK İLETİŞİM 7
2.1.1. Tarihsel Gelişimi 7
2.1.2. Fiber Optik İletişimin Avantajları 9
2.1.3. Fiber Optik İletişimin Fiziği, Teknolojisi ve Bileşenleri 10
2.2. FOTODEDEKTÖRLER 14
2.2.1. Fotodedektörlerin Karakterizasyonu 14
2.2.1.1. Absorpsiyon 14
2.2.1.2. Duyarlılık ve Kuantum Verimi 16
2.2.1.3. Bant Genişliği ve Cevap Süresi 16
2.2.1.4. Gürültü 18
2.2.2. *p-n* ve *p-i-n* Eklem Fotodedektörler 19
2.2.3. *p-i-n* Eklem Çığ Fotodedektörler 21
2.2.3.1. İmpakt İyonizasyon 22
2.2.3.2. Çığ Fotodedektörlerde Gürültü 23
2.2.4. Rezonans Kaviteli *p-i-n* Eklem Çığ Fotodedektörler 27
2.2.4.1. Rezonans kavitesi 27
2.2.4.2. Dağıtılmış Bragg Yansıtıcıları 28
3. MALZEME VE YÖNTEM **34**

3.1. FOTODEDEKTÖR MALZEME VE TASARIMI 34
3.2. FOTODEDEKTÖRLERİN FABRİKASYONU 37
3.2.1. Kristal Kesme 39
3.2.2. Kristal Temizleme 40
3.2.3. Litografi 41
3.2.4. Metalizasyon 45
3.3. FOTODEDEKTÖRLERİN KARAKTERİZASYONU 51
3.3.1. Yapısal Karakterizasyon 51
3.3.1.1. Taramalı Elektron Mikroskobu 51
3.3.1.2. Enerji Dispersif X-Işını Spektroskopisi 52
3.3.2. Optik Karakterizasyon 52
3.3.2.1. Yansıma 52
3.3.2.2. Fotoışıma 53
3.3.3. Elektriksel Karakterizasyon 55
3.3.3.1. Akım-Voltaj 55
3.3.4. Elektro-Optik Karakterizasyon 56
3.3.4.1. Spektral Fotoakım 56
3.3.4.2. Transiyent Fotoiletkenlik 57
4. BULGULAR 60
4.1. KUAZİ-KAVİTELİ GaInNAs-GaNAs *p-i-n* ÇIĞ FOTODEDEKTÖRLER ... 60
4.1.1. Aygıt Tasarımı 60
4.1.2. Yansıma ve Fotoışıma Ölçüm Sonuçları 62
4.1.3. Fotoakım Ölçüm Sonuçları 66
4.2. REZONANS KAVİTELİ GaInNAs-GaNAs *p-i-n* ÇIĞ FOTODEDEKTÖRLER 74
4.2.1. Aygıt Tasarımı 74
4.2.2. Yansıma ve Fotoışıma Ölçüm Sonuçları 75
4.2.3. Fotoakım Ölçüm Sonuçları 79
4.2.4. Transiyent Fotoiletkenlik Ölçüm Sonuçları 87
4.3. REZONANS KAVİTELİ GaInNAs-GaAs *p-i-n* ÇIĞ FOTODEDEKTÖRLER 89
4.3.1. Aygıt Tasarımı 89
4.3.2. Yansıma ve Fotoışıma Ölçüm Sonuçları 91

4.3.3. Fotoakım Ölçüm Sonuçları 92
4.3.4. Transiyent Fotoiletkenlik Ölçüm Sonuçları 94
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 96
KAYNAKLAR 102
ÖZGEÇMİŞ 110

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Fiber optik kabloda dalgaboyuna bağlı güç kaybı 9

Şekil 2.2: Fiber optik iletişim sistemi 11

Şekil 2.3: Elektromanyetik dalganın fiber optik kabloda ilerlemesi. 12

Şekil 2.4: Bazı yarıiletkenlerin dalgaboyuna bağlı absorpsiyon katsayısı değişimi. 15

Şekil 2.5: Geri besleme altındaki *p-n* eklem fotodedektörün **a)** şematik diyagramı **b)** eklem bölgesindeki elektrik alan dağılımı **c)** bant profili. 19

Şekil 2.6: *p-n* eklem diyotunun ışık şiddetine bağlı akım-voltaj (geri besleme) karakteristiği. 20

Şekil 2.7: Geri besleme altındaki *p-i-n* eklem fotodedektörün **a)** şematik diyagramı **b)** eklem bölgesindeki elektrik alan dağılımı **c)** bant profili. 21

Şekil 2.8: *p-i-n* eklem çığ fotodedektörlerde **a)** $\alpha_e \approx \beta_h$ **b)** $\alpha_e \gg \beta_h$ için ve **c)** bant diyagramı üzerinde impakt iyonizasyon mekanizması. 22

Şekil 2.9: SAM *p-i-n* fotodedektör sistemi. **a)** $\alpha_e \approx \beta_h$ **b)** $\alpha_e \gg \beta_h$. 24

Şekil 2.10: **a)** SAM GaInAs/InP ve **b**) SAGM GaInAs/GaInPAs/InP *p-i-n* fotodedektör sistemi bant diyagramı. 25

Şekil 2.11: Geri besleme altında GaInNAs/GaAs çoklu kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektör. 26

Şekil 2.12: Fabry-Pérot kaviteli *p-i-n* eklem fotodedektör. 28

Şekil 2.13: *d* kalınlıklı ince film tabakası 29

Şekil 2.14: Kırılma indisleri n_1 ve n_2 olan m çift, çeyrek dalgaboyu kalınlığına sahip Bragg yansıtıcıları. 31

Şekil 2.15: GaAs ve AlAs yarıiletkenlerinin dalgaboyuna bağlı kırılma indisleri. 32

Şekil 2.16: GaAs/AlAs DBR çiftinin farklı periyotlar için hesaplanan dalgaboyuna bağlı yansıma spektrumu. 32

Şekil 3.1: Kuazi-kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörlerin yapısı. 36

Şekil 3.2: Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörlerin yapısı. 36

Şekil 3.3: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün yapısı. 37

Şekil 3.4: Bazı büyüklüklerin saç telinin çapına göre kıyaslaması (*Bu çalışmada incelenen fotodedektör). 38

Şekil 3.5: Kristal kesme yöntemleri. 39

Şekil 3.6: Fotolitografi için çeşitli maske örnekleri. 41

Şekil 3.7: AZ 5214E kodlu fotodirencin **a**) dalgaboyuna bağlı absorpsiyon katsayısı **b**) devir/d sayısına bağlı fotodirenç kalınlığı. 42

Şekil 3.8: Aşındırılan kristal yonganın iki boyutlu profili. 45

Şekil 3.9: Fotodedektörün mesa şeklinde fabrikasyon süreci. 50

Şekil 3.10: **a**) Basit bir taramalı elektron mikroskobu ve **b**) Tabakasal bir fotodedektörün kesit SEM görüntüsü. 51

Şekil 3.11: **a**) Büyütme doğrultusu boyunca tabakalardaki alaşım konsantrasyonu değişimi ve **b**) GaAs/AlAs DBR çiftinin EDS spektrumu. 52

Şekil 3.12: Spektral yansıma ölçüm düzeneği. 53

Şekil 3.13: Yarıiletkenlerde olası optik geçişler. 54

Şekil 3.14: Fotoışıma ölçüm düzeneği. 54

Şekil 3.15: Bazı eklem yapılı aygıtların ve direncin akım voltaj karakteristiği. 56

Şekil 3.16: Fotoakım ölçüm düzeneği. 57

Şekil 3.17: Transiyent fotoiletkenlik ölçüm düzeneği. 58

Şekil 3.18: I_0 şiddetinde zamanla basamaksı olarak değişen bir ışık sinyaline fotodedektörün yanıtı. 59

Şekil 4.1: Kuazi-kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörlerin yapısı. 61

Şekil 4.2: Kuazi-kaviteli **a)** 9 ve **b)** 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin denge durumu bant yapıları ve iç elektrik alan dağılımları. 61

Şekil 4.3: Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin kuramsal ve deneysel yansıma spektrumu. 63

Şekil 4.4: Kuazi-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 fotodedektörün 30 ve 300 K sıcaklığındaki fotoışıma ölçüm sonuçları. 64

Şekil 4.5: Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün 30 ve 300 K sıcaklığı fotoışıma ölçüm sonuçları. 64

Şekil 4.6: Kuazi-kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin sıcaklığa bağlı fotoışıma pik enerjileri. 65

Şekil 4.7: Kuazi-kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün spektral kuantum verimi. 66

Şekil 4.8: Kuazi-kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün **a)** karanlıkta ve 1270 nm dalgaboylu ışık altında akım-voltaj grafiği, **b)** besleme voltajına bağlı kuantum verimi. .. 67

Şekil 4.9: Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün dalgaboyuna bağlı kuantum verimi. 68

Şekil 4.10: Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün karanlıkta ve 1286 nm ışık altında elde edilen akım-voltaj grafiği. 69

Şekil 4.11: Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün **a)** sıcaklığa bağlı akım-voltaj grafiği, **b)** besleme voltajına bağlı aktivasyon enerjisi değişimi. 70

Şekil 4.12: Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün duyarlılık-voltaj grafiği. 71

Şekil 4.13: Geri besleme voltajına bağlı absorpsiyon katsayısı değişimi. 72

Şekil 4.14: Kuazi-Kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün kazanç-voltaj grafiği. 73

Şekil 4.15: Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörlerin yapısı. 74

Şekil 4.16: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün SEM görüntüsü ve üst DBR tabakalarının EDS analizi. 75

Şekil 4.17: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün **a)** kuramsal ve deneysel yansıma ve **b)** deneysel fotoışıma spektrumu. 76

Şekil 4.18: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün, **a)** yansıma ve **b)** fotoışıma dalgaboyunun konumsal değişimi. 77

Şekil 4.19: Rezonans kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün **a)** yansıma ve **b)** fotoışıma dalgaboyunun konumsal değişimi. 77

Şekil 4.20: Rezonans kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün **a)** kuramsal ve deneysel yansıma ve **b)** deneysel fotoışıma spektrumu. 78

Şekil 4.21: Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin sıcaklığa bağlı fotoışıma pik enerjileri. 79

Şekil 4.22: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün **a)** besleme voltajına ve **b)** sıcaklığa bağlı spektral kuantum verimi. 80

Şekil 4.23: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün 10-40°C aralığında fotoışıma spektrumları. 81

Şekil 4.24: Kuramsal ve deneysel Kavite dalgaboyunun sıcaklığa bağlı değişimi. 83

Şekil 4.25: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün akım-voltaj ölçümü ve besleme voltajına bağlı kuantum verimi. 84

Şekil 4.26: Rezonans kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün spektral kuantum verimi. 85

Şekil 4.27: Rezonans kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün akım voltaj davranışı ve geri besleme voltajına bağlı kuantum verimi. 86

Şekil 4.28: Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin geri besleme voltajına bağlı kazanç değişimi. 87

Şekil 4.29: Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin oda sıcaklığı transiyent fotoiletkenlik ölçüm sonuçları..... 88

Şekil 4.30: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün yapısı. 89

Şekil 4.31: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün SimWindows ile hesaplanan bant yapısı ve iç elektrik alan dağılımı. 90

Şekil 4.32: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün kuramsal ve deneysel yansıma ile fotoışıma spektrumu. 91

Şekil 4.33: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün geri besleme voltajına bağlı spektral kuantum verimi..... 92

Şekil 4.34: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında akım-voltaj grafiği..... 93

Şekil 4.35: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün **a)** fotoakım-voltaj eğrisinin türevi **b)** kazanç-voltaj grafiği. 94

Şekil 4.36: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün oda sıcaklığı TPC ölçüm sonuçları 95

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Çalışmada incelenen fotodedektörlerin absorpsiyon bölgelerinin özellikleri. 34

Tablo 3.2: Temiz oda sınıflandırma standartları. 38

Tablo 3.3: Bazı kimyasal aşındırma çözeltilerinin III-V grubu alaşım yarıiletkenlere etkileri.. 44

Tablo 3.4: $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O$ çözeltisinin kimyasal oranına bağlı GaAs için aşındırma hızları. 45

Tablo 3.5: GaAs-tabanlı yarıiletkenler için literatürde kullanılan bazı metalizasyon malzemeleri. 46

Tablo 4.1: Bazı bileşik yarıiletkenlerin Debye sıcaklıkları. 65

Tablo 4.2: Hesaplamalarda kullanılan parametreler. 72

Tablo 4.3: SEM ve EDS analizlerinden ölçülen tabaka kalınlıkları. 75

Tablo 4.4: Kavite dalgaboyunun sıcaklığa bağlılığının hesaplamalarında kullanılan parametreler. 83

Tablo 5.1: İncelenen tüm rezonans kaviteli fotodedektörlerin deneysel çıktılarla karşılaştırılması. 99

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler **Açıklama**

A : Etkin fotodedektör alanı
a_S : Alt tabakanın örgü sabiti
a_L : Üst tabakanın örgü sabiti
α : Absorpsiyon katsayısı
α_e : Elektronun impakt iyonizasyon katsayısı
α_t : Termal genleşme katsayısı
β : Debye sıcaklığı
β_h : Boşluğun impakt iyonizasyon katsayısı
β_o : Bowing Parametresi
BW : Bant genişliği (Bandwidth)
C : Kapasite
C_{NM} : İletkenlik bandı ile azotun lokalize enerji seviyesi arasındaki etkileşim
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 enerjisi
E_i : İmpakt iyonizasyon enerjisi
E_M : Evsahibi yarıiletkenin iletkenlik bandı enerjisi
E_N : Azotun lokalize enerji seviyesi
E_{ph} : Fotonun enerjisi
F : Gürültü faktörü
$\boldsymbol{F}$: Elektrik alan kuvveti
$\boldsymbol{h}$: 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

NEP : Gürültünün güç karşılığı

η : Kuantum verimi

ϕ : Fit parametresi

P_0 : Gelen optik güç

P_{min} : Ölçülebilir minimum optik güç

r : Fresnel yansıma duyarlılık 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

υ_s : Taşıyıcı sürüklenme hızı

V : Besleme voltajı

Kısaltmalar	**Açıklama**
APD	: Çığ fotodedektör (Avalanche Photodetectors)
BAC	: Band Anti-Crossing Model
DBR	: Dağıtılmış Bragg Yansıtıcı (Distributed Bragg Reflector)
DUV	: Derin mor ötesi (Deep Ultraviolet)
EDS	: Enerji Dispersif X-Işını Spektroskopisi (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)
EUV	: Uç mor ötesi (Extreme Ultraviolet)
FKE	: Franz-Keldysh etkisi (Franz-Keldysh Effect)
FWHM	: Yarı maksimumdaki tam genişlik (Full Width at Half Maximum)
MBE	: Moleküler demet epitaksisi (Moleculer Beam Epitaxy)
NEP	: Gürültünün güç karşılığı (Noise Equivalent Power)
PDA	: Kısmen arınmış bölgeli fotodedektör (Partially Depleted Photodetector)
RCEPD	: Rezonans kaviteli iç kazançlı fotodedektör (Resonant Cavity Enhanced Photodetector)
RIE	: Reaktif iyonla aşındırma (Reactive Ion Etching)
SAMPD	: Ayrılmış absorpsiyon ve çoğalma bölgeli fotodedektör (Separated Absorption Multiplication Photodetector)
SACMPD	: Yüklü tabaka ile ayrılmış absorpsiyon ve kazanç bölgeli fotodedektör (Separated Absorption Multiplication Photodetector)
SAGMPD	: Kademeli ayrılmış absorpsiyon ve kazanç bölgeli fotodedektör (Separated Absorption Graded Multiplication Photodetector)
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)
TMM	: Transfer Matris Metodu (Transfer Matrix Method)
TPC	: Transiyent fotoiletkenlik (Transient Photoconductivity)
UV	: Mor ötesi (Ultraviolet)
VCSEL	: Dikey kaviteli yüzey ışıması yapan laser (Vertical Cavity Surface Emitting Laser)

ÖZET

DOKTORA TEZİ

REZONANS KAVİTELİ VE İÇ KAZANÇLI GaInNAs-TABANLI IR FOTODEDEKTÖR

Fahrettin SARCAN

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ayşe EROL

Bu çalışmada, fiber optik iletişimin 1.3 μm penceresinde kullanılma potansiyeli olan, absorpsiyon bölgesini seyreltik azotlu GaInNAs dörtlü alaşım yarıiletkeninin oluşturduğu rezonans kaviteli *p-i-n* eklem $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaN_zAs$, çoklu kuantum kuyulu fotodedektörler incelenmiştir.

Fotodedektörlerin kuantum kuyusu ve "dağıtılmış Bragg yansıtıcıları" (distributed Bragg reflectors, DBRs) sayısına, aktif bölge ve bariyer malzemelerinin alaşım konsantrasyonlarına bağlı tasarımları, fabrikasyonları, elektriksel ve optik karakterizasyonları yapılarak fotodedektör özellikleri belirlenmiştir.

Fotodedektörlerin tasarımları, Band Anti-Crossing modeli, Transfer Matris Metot'u ve Vegard Yasası'ndan yararlanılarak yapılmıştır. Tasarımlarda, absorpsiyon bölgesinin bant aralığı, tabakalararası uyum ve tabaka sayısı ile rezonans kavitesinin kalitesi olmak üzere üç temel parametre göz önüne alınmıştır.

Fotodedektörler Tampere Teknoloji Üniversitesi Optoelektronik Araştırma Merkezi tarafından Moleküler Demet Epitaksi büyütme sistemiyle büyütülmüştür. Fabrikasyonları ise İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü bünyesinde bulunan İleri Litografik Yöntemler Laboratuvarı'nın olanakları kullanılarak yapılmıştır. 2 inç çaplı daireler şeklinde büyütülen örnekler, optik ölçümlerden sonra optik litografi ve ıslak aşındırma teknikleriyle 20-200 μm pencere genişliğine sahip mesa yapı şeklinde üretilmişlerdir.

Fotodedektörlerin karakterizasyonları İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi bünyesinde bulunan Nano-Optoelectronik Araştırma Laboratuvarları'nda yapılmıştır. 30-300 K aralığında fotoışıma ve yansıma ölçümleri yapılarak fotodedektörlerin sıcaklığa bağlı çalışma dalgaboyları, absorpsiyon dalgaboyunun sıcaklığa bağlılığı ve termal genleşme katsayıları gibi parametreleri belirlenmiştir.

Oda sıcaklığı civarında (10-40^{o}C) akım-voltaj ve fotoakım ölçümleri yapılarak fotodedektörler için en önemli parametrelerden olan karanlık akım limitleri, duyarlılıkları ve kuantum verimleri belirlenmiştir.

Essex Üniversitesi'nin olanakları kullanılarak oda sıcaklığında transiyent fotoiletkenlik ölçümleri yapılmış ve fotodedektörlerin bant genişlikleri, hızları ve gürültü mertebeleri belirlenmiştir.

Elde edilen tüm bulgular kendi içlerinde, birbirleriyle ve literatürdeki benzer yapılarla kıyaslanarak değerlendirilmiştir.

Bu çalışmada -1 V gibi çok düşük beslemede %43 kuantum verimine ulaşılmış olup bilindiği kadarıyla bu değer, literatürde seyreltik azotlu rezonans kaviteli *p-i-n* eklem fotodedektörlerdeki ulaşılan en yüksek kuantum verimidir. Bu fotodedektör, Türk Patent ve Marka Kurumu tarafında 21.11.2017 tarihinde ulusal patent (TR 2015 05193 B) olarak tescillenmiştir.

Eylül 2018, 115 sayfa.

Anahtar kelimeler: Fotodedektör, Kırmızıaltı, IR fotodedektör, GaInNAs,RCEPD

SUMMARY

Ph.D. THESIS

RESONANT CAVITY ENHANCED GaInNAs-BASED IR PHOTODETECTORS WITH GAIN

Fahrettin SARCAN

Istanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Ayşe EROL

In this study, quasi-cavity and resonant cavity *p-i-n* junction $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaN_zAs$ quantum well (QW) photodetectors which have the potential to be used of at 1.3 μm window of fibre optical communication have been investigated.

Design, fabrication, electrical and optical characterization of photodetectors have been carried out depending on numbers of QWs and Distributed Bragg Reflectors (DBRs), materials of active region and barrier layer.

In the design stage of the photodetectors, Band Anti-Crossing model, Transfer Matrix Method and Vegard's law utilized. The bandgap energy of the absorption region, lattice match between the layers and the quality of the resonance cavity were taken into account as the design parameters.

The photodetectors were grown on 2 inch wafers by using Molecular Beam Epitaxy (MBE) at Optoelectronics Research Centre/Tampere University of Technology (Finland). The photodetectors were fabricated as mesa structure with a diameter of 20-200 μm by using facilities of Advanced Lithography Laboratories/Istanbul University Science Faculty Physics Department.

Electrical and optical characterization of the photodetectors were carried out at Nano-Optoelectronic Research Laboratories/Istanbul University Science Faculty.

Temperature dependency of absorption wavelengths, thermal expansion coefficients and cavity wavelength of the photodetectors were obtained by temperature-dependent photoluminescence and reflectance measurements between 30 and 300K.

Dark current, responsivity and quantum efficiencies of the photodetectors were obtained by current-voltage and photocurrent measurements. Bandwidth, detectivity and noise of photodetectors were obtained from the analysis of transient photoconductivity which were carried out at University of Essex (United Kingdom)

All obtained results are presented by comparing with the literature. All the best photodetector characteristic has been obtained for resonant cavity 9 QWs $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}$/GaAs photodetector with AlAs/AlGaAs 21 periods top and 25 periods bottom DBRs. With this photodetector structure, quantum efficiency (QE) of 43% has been achieved at a very low bias -1 V. To the best of our knowledge which is the highest QE in the dilute nitrogen resonant cavity photodetectors in the literature. This photodetector has been patented as a National Patent by Turkish Patent and Trademark Office with patent number of TR 2015 05193 B.

September 2018, 115 pages.

Keywords: Photodedector, Infrared, GaInNAs, RCEPD

1. GİRİŞ

Işığı haberleşme teknolojisinde kullanma fikri ilk olarak XIII. yy.'da Alexander Graham Bell tarafından ortaya atılmıştır [1]. Ancak ışığın haberleşmede kullanılabilmesi, 1960 yılında ilk laserin keşfine kadar bilim insanları için bir hayal olarak kalmıştır [2]. 1966 yılında "fiber optik kablonun babası" olarak bilinen Kao tarafından ilk fiber optik kablonun geliştirilmesiyle (2009 Nobel Fizik ödülü) optik iletişim, fiber optik iletişim adını alarak daha hızlı ve güvenli hale gelmiştir [3]. Düşük kayıplı, yüksek güvenlikli ve geniş bant aralıklı olması sayesinde fiber optik iletişim, hızla gelişerek dünyanın bir noktasından bir noktasına bilgi taşımada ve haberleşmede en önemli araç olmuştur.

Fiber optik iletişim sistemi; verici (laser, LED), taşıyıcı ortam (fiber optik kablo) ve alıcı (fotodedektör) olmak üzere üç temel bileşenden oluşmaktadır. Fiber optik kablolar geniş dalgaboyu aralığında optik sinyali iletebilirler. İletişimde genellikle silika (Si_2O) tabanlı fiber optik kablolar kullanılmaktadır. Uzun erimli ve yüksek hızlı iletişim için silika tabanlı fiber optik kablolarda, dispersiyonun az olduğu 1.3 μm ve kayıpların minimum olduğu 1.55 μm pencereleri tercih edilmektedir [4]. Dolayısıyla fiber optik iletişim için bu iletişim pencerelerinde çalışan yüksek verimli LED, laser ve fotodedektörlere gereksinim duyulmaktadır.

Fiber optik iletişimin son halkası olan fotodedektör, optik sinyalin elektrik sinyaline dönüştürülmesini sağlar. Bir fotodedektörü karakterize eden önemli parametreler; fotodedektörün çalışma duyarlı olduğu dalgaboyu aralığı, bant genişliği ve hızıdır. Fotodedektörün duyarlı olduğu dalgaboyu aralığı, aktif bölgesini oluşturan yarıiletken malzemenin absorpsiyon katsayısının dalgaboyuna bağlılığı ile ilişkilidir. III-V grubu alaşım yarıiletkenler kullanılarak fiber optik kablonun 1.3 μm ve 1.55 μm dalgaboyu pencereleri için fotodedektörler yapılmaktadır [1, 5]. Günümüz fiber optik iletişim teknolojisinde InP-tabanlı, alaşım konsantrasyonuna bağlı olarak çalışma dalgaboyu 1.3 μm veya 1.55 μm'ye ayarlanmış GaInAs(P) alaşım yarıiletken fotodedektörler kullanılmaktadır [6–8]. Ancak InP-tabanlı fotodedektörler; üretim aşamalarının kompleks olması, yüksek maliyetli olmaları ve çalışma voltajlarının fotodedektörün kırılma voltajına (breakdown voltage) yakın olması nedeniyle GaAs-tabanlı fotodedektörlere

göre dezavantajlıdırlar. Dahası InP-tabanlı malzemelerle örgü uyumlu "dağıtılmış Bragg yansıtıcıları"nı (distributed Bragg reflectors, DBRs) oluşturan tabakaların dielektrik sabitleri birbirine yakın olduğu için dikey kaviteli yüzey ışıması yapan laser (vertical-cavity surface-emitting lasers, VCSEL) ve rezonans kaviteli iç kazançlı fotodedektör (resonant-cavity-enhanced photodedectors, RCEPD) gibi yüksek performanslı aygıtların üretilmesi zordur. Bununla birlikte Tan ve arkadaşları, InP-tabanlı fotodedektörlerde Si/SiO_2 DBR tabakalarını kullanılarak %90 kuantum verimine ulaşıldığını göstermiştir [6, 9]. Fakat fotodedektörün fabrikasyonu aşındırma ve sonrasında Si/SiO_2 biriktirme (wafer fusing) olmak üzere iki aşamada gerçekleştiği için üretimleri GaAs-tabanlı fotodedektörlerin üretiminden daha kompleks ve maliyetlidir [6].

GaAs ve AlAs alaşım yarıiletkenleri arasındaki örgü uyumunun iyi ve dielektrik sabitleri arasındaki farkın büyük olması (>%14 [10]) sayesinde, GaAs/AlAs ikili tabaka yapısı (DBR yığını) kullanılarak yüksek yansıtıcılığa sahip aynalar nispeten daha az sayıda ikili tabaka çifti kullanılarak elde edilmektedir. Bu sayede fiber optik iletişim için yüksek performanslı VCSEL ve RCEPD gibi aygıtlar üretilmektedir.

Literatürde, aktif bölgesini GaAsSb, GaInAs ve GaInNAs gibi alaşım yarıiletkenlerin oluşturduğu ve alaşım konsantrasyonuna bağlı olarak 1.3 μm ve 1.55 μm dalgaboylarında çalışan pek çok fotodedektör bulunmaktadır. Sun ve arkadaşları, SiO_2 ile pasivasyon işlemi uygulanmış RCE GaAsSb/GaAs fotodedektörler ile 1.3 μm dalgaboyunda %36 kuantum verimine ulaşırken, daha karmaşık yapı olan "yüklü tabaka ile ayrılmış absorpsiyon ve kazanç bölgeli" (Separeted Absorption/Charge Multiplication, SACM) fotodedektör ile aynı dalgaboyunda %54 kuantum verimi elde etmişlerdir [11]. Fakat GaAsSb ve GaAs tabakaları birbirleriyle örgü uyumlu olmadıkları için tabakalararasında gerilme (compressive strain) oluşmakta ve yapı, kusurlu büyümektedir. Tabakalararası örgü uyumu zayıf olduğu için bu fotodedektörün spektral cevap eğrisinin "yarı maksimumdaki tam genişliği" (Full Width at High Maximum, FWHM) 7 nm'dir [11].

GaAs yarıiletkenine büyütme sırasında In eklenmesiyle oluşturulan GaInAs tabanlı fotodedektörlerin örgü sabiti, yapıdaki In oranına bağlı olarak artmaktadır [12]. GaInAs, GaAs üstüne büyütüldüğünde tabakalar arasında gerilme oluşmakta ve yapı, kusurlu olarak büyümektedir. Bu nedenle bu fotodedektörlerde GaAs yerine, örgü sabiti daha büyük olan InP bariyer malzemesi olarak kullanılmaktadır [13, 14]. Bu durum, yüksek

dalgaboyu seçiciliğine, yüksek kuantum verimene ve düşük güç tüketime sahip rezonans kaviteli fotodedektör üretiminde InP ile uyumlu DBR tabakası seçimini zorlaştırmaktadır.

Hem N ve In konsantrasyonlarına bağlı olarak hem absorpsiyon dalgaboyunun 1.3 μm dalgaboyu civarında ayarlanabilmesi hem de GaAs ile örgü uyumlu olması nedeniyle GaInNAs dörtlü alaşım yarıiletkenin kullanıldığı fotodedektörler InP tabanlı fotodedektörlere alternatif olarak gösterilmektedir. Buna rağmen literatürde, GaInNAs/GaAs fotodedektör sistemiyle ilgili sadece birkaç çalışma bulunmaktadır. Zhang ve arkadaşları, 22 alt ve 8 üst olmak üzere GaAs/AlAs DBR çiftlerine sahip, aktif bölgesinin 7 nm genişliğinde üç adet GaInNAs/GaAs kuantum kuyusu sisteminin oluşturduğu rezonans kavitesiyle iyileştirilmiş RCEPD ile 4 nm FWHM'a ulaşmışlardır. Fakat referansta belirtilen çalışmada fotodedektörün kuantum verimi veya cevabıyla ilgili ulaşılan değer verilmemektedir [15]. Çalışmada, yapıdaki DBR çiftlerinin fazlalığının örneğin direncini arttırdığından ve buna bağlı olarak fotodedektörün düşük cevap hızına sahip olduğundan bahsedilmektedir. Aynı grubun bir diğer çalışmasında, aktif bölgesi bir önceki [15] çalışmadaki ile aynı olan, sırasıyla üst ve alt DBR çifti sayılarının 11 ve 6 olacak şekilde azaltılan RCEPD ile 1.3 μm merkez dalgaboyunda %12 kuantum verimine ve 5.8 nm FWHM'a ulaşılmıştır [16]. Han ve arkadaşları, 25 alt ve 9 üst olmak üzere GaAs/AlAs DBR çiftine sahip, aktif bölgesinin 7 nm genişliğinde üç tane GaInNAs/GaAs kuantum kuyusu sisteminin oluşturduğu RCE fotodedektör ile 1.55 μm merkez dalgaboyunda 5V geri besleme voltajında %33 kuantum verimine ulaşmışlardır [17].

Uzun erimli fiber optik iletişimde yükselteç (amplifier) sayısının azaltılması için yüksek duyarlı fotodedektörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Yüksek bant genişliği, hız ve yüksek duyarlılık için fiber optik iletişimde iç kazanca sahip oldukları için çığ fotodedektörler (avalanche photodedector, APD) tercih edilmektedir. Bir fotodedektörün dedekte edebilirliği, kuantum verimi (quantum efficiency, QE) ve hızı ile ilgilidir. Fotodedektörün performansını sınırlandıran temel parametreler ise gürültüsü ve karanlık akımının büyüklüğüdür. APD'lerin yük çoğaltıcı tabakaları taşıyıcı yoğunluğunu arttırarak fotodedektörün iç kazançlı olmasını sağlarken, taşıyıcı yoğunluğu ile birlikte tasarıma bağlı olarak fotodedektörün gürültüsünü de arttırmaktadır. APD'lerde hangi tip taşıyıcı yoğunluğunun artacağını, taşıyıcıların impakt iyonizasyon katsayıları α_e (elektron impakt iyonizasyon katsayısı) ve β_h (boşluk impakt iyonizasyon katsayısı) belirlemektedir

[18]. Genellikle düşük gürültülü ve yüksek bant genişliğine sahip fotodedektörlerde tek tip taşıyıcı çoğullanması ($\beta_h/\alpha_e \approx 0$ ise elektron iyonizasyonu, $\alpha_e/\beta_h \approx 0$ ise boşluk iyonizasyonu) gerçekleşmektedir [18]. Tek tip taşıyıcı çoğullanmasını sağlamak için absorpsiyon bölgesinin dışına ayrı bir çoğaltıcı tabakası ilave edilmektedir [19, 20]. Foton varlığında absorpsiyon bölgesinin içerisinde veya difüzyonla absorpsiyon bölgesine ulaşabilecek mesafede oluşan elektron-boşluk (e-h) çifti, absorpsiyon bölgesindeki iç elektrik alanla birbirinden ayrılır. Tasarıma bağlı olarak, tek tip taşıyıcı kontağa ulaşmadan çoğaltıcı bölgeden geçerek yeteri kadar enerji kazanıp impakt iyonizasyon gerçekleştirir. İmpakt iyonizasyonla taşıyıcı sayısı artarak fotodedektörde kazanç meydana gelir.

Günümüz fiber optik iletişim teknolojisinde "ayrılmış absorpsiyon ve çoğalma bölgeli" (Separated Absorption and Multiplication, SAM) InP-tabanlı fotodedektörler kullanılmaktadır. Kazancın bariyer tabakası olan InP yarıiletkeninde gerçekleştiği bu yapıdaki fotodedektörlerde uygulanacak elektrik alanın büyüklüğü çok kritiktir. Bu fotodedektörler, geleneksel *p-i-n* yapıdaki fotodedektörlere göre daha yüksek iç dirence sahiptir. Bu yapılarda çalışma süresine ve uygulanan elektrik alana bağlı olarak ısı problemi ortaya çıkmakta ve harici soğutucuya ihtiyaç duyulmaktadır. GaInNAs/GaAs kuantum kuyusu sisteminde ise, sahip olduğu sıra dışı özellikleri sayesinde, tek tip taşıyıcı çoğalması absorpsiyon bölgesinde gerçekleşmektedir. Bu sayede, daha düşük elektrik alanlarda çalışan, GaAs/AlAs DBR çifti ile örgü uyumlu olan ve tek bir fabrikasyon aşamasında üretilen fotodedöktörler yapılabilmektedir.

Azot'un (N) enerji seviyesi, ev sahibi GaInAs yarıiletkeninin iletkenlik bandı civarında olup yüksek elektronegatifliğiyle iletkenlik bandını pertürbe ederek E_- ve E_+ olmak üzere ikiye ayırmaktadır [21]. Valans bandına etki etmeden bant aralığını %1 azot başına 180 meV kadar daraltmaktadır [12, 21, 22]. Bunun sonucunda, GaInNAs/GaAs kuantum kuyusu sisteminde valans bandı süreksizliği (100-120 meV) değişmez iken, elemental kompozisyona bağlı olarak iletkenlik bandı süreksizliği 300 meV civarına çıkmaktadır [23]. GaInNAs/GaAs kuantum kuyusu sisteminde elektronların gördüğü bariyer enerjisi ile boşlukların gördüğü bariyer enerjisi arasında 3 kat fark vardır. Hesaplamalara göre, GaInNAs/GaAs kuantum kuyusundaki boşluklar, kuantum kuyusundan elektronlara göre 10^3 kat daha hızlı kaçmaktadır. Çoklu kuantum kuyusu sisteminde, impakt iyonizasyon için gerekli elektrik alana ($>10^5$ V/cm) ulaşıldığında, kuantum kuyuları (absorpsiyon

bölgesi) boyunca sadece elektronların çoğalması gerçekleşir. Bu özelliği sayesinde GaInNAs/GaAs kuantum kuyulu fotodedektörler ile harici çoğalma bölgesine ihtiyaç duyulmadan iç kazanca sahip APD yapılabilmektedir [24] .

Bu çalışmada, sadece alt DBR'a sahip kuazi-kaviteli ve hem alt hem de üst DBR'a sahip rezonans kaviteli iç kazançlı GaInNAs-tabanlı kuantum kuyulu fotodedektörlerin; kuantum kuyusu ve DBR sayısına, aktif bölge ve bariyer malzemelerinin alaşım konsantrasyonlarına bağlı olarak tasarımları, elektriksel ve optik karakterizasyonları yapılarak fotodedektör özellikleri belirlenmiştir.

Bu çalışmada incelenen tüm fotodedektörlerin absorpsiyon eşik dalgaboyları, Band Anti-Crossing (BAC) modeli, Vegard yasası ve Transfer Matris Modeli (Transfer Matrix Method, TMM) kullanılarak 1.3 μm civarında olacak şekilde tasarlanmıştır. Fotodedektörler, moleküler Demet Epitaksisi (Molecular Beam Epitaxy, MBE) kullanılarak Tampere Teknoloji Üniversitesi Optoelektronik Araştırma Merkezi (Finlandiya) tarafından büyütülmüştür. İstanbul Üniversitesi İleri Litografik Yöntemler Laboratuvarı olanakları kullanılarak, 20-200 μm gibi farklı çaplarda mesa yapısı şeklinde fotolitografi ve kimyasal aşındırma teknikleri kullanılarak fabrikasyonları yapılmıştır. Optik ölçümler için yansıma ve fotoışıma ölçümleri, elektro-optik ölçümler için akım-voltaj, fotoakım ve transiyent fotoiletkenlik ölçümleri yapılmıştır.

Kuazi-kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörlerde absorpsiyon merkez dalgaboyları sırasıyla 1270 nm ve 1286 nm'dir. Merkez dalgaboyunda maksimum kuantum verimleri sırasıyla %6 (-0.5 V) ve %25 (-2 V) olarak elde edilmiştir. Sıcaklığa bağlı fotoışıma ölçümlerinin analizlerinden $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ kuantum kuyusu sisteminin birim sıcaklık başına bant aralığı enerjisindeki değişim 2.75×10^{-4} eV/K olarak elde edilmiştir. Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün voltaja bağlı duyarlılığında Franz-Keldysh Osilasyonları (FKO) gözlenmiş olup, bu osilasyonların analitik hesapları yapılmıştır. Hesaplamalara göre absorpsiyon katsayısı geri besleme voltajına bağlı olarak 2200 cm^{-1} civarında osilasyon yapmaktadır.

Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörlerin absorpsiyon merkez dalgaboyları sırasıyla 1300 nm ve 1325 nm'dir. Merkez dalgaboylarında besleme voltajına bağlı olarak ulaşılan maksimum

kuantum verimleri sırasıyla %24 (-1 V) ve %42 (-10 V) olarak elde edilmiştir. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün aktif bölgesinin absorpsiyon dalgaboyu ile fotodedektörün kavite dalgaboyunun yüksek sıcaklıklarda daha iyi eşleştiği gözlenmiş olup 40°C'de %32 kuantum verimine ulaşılmıştır. Sıcaklığa bağlı fotoışıma ölçümleri yapılarak rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörlerin rezonans kavite dalgaboyunun birim sıcaklık başına değişimi 0.08 nm/°C olarak elde edilmiştir. Rezonans kavitesinin sıcaklığa bağlı değişimi analitik olarak hesaplanarak 0.077 nm°C olarak bulunmuş olup deneysel sonuçlarla tutarlı olduğu görülmüştür. -6 V geri besleme altında yapılan transiyent fotoiletkenlik ölçümlerinin analizlerinden rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörlerin bant genişlikleri sırasıyla 130 MHz ve 40 MHz olarak elde edilmiştir.

Bant süreksizliklerini arttırarak, kuantum kuyularında taşıyıcı sınırlandırmasını arttırmak amacıyla bariyer malzemesini GaAs yarıiletkeninin oluşturduğu Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$*p-i-n* çığ fotodedektör sistemi tasarlanmıştır. Absorpsiyon dalgaboyu 1286 nm olan fotodedektörün -1 V geri besleme altında maksimum kuantum verimi %43 ve FWHM'u 5 nm'dir. Sahip olduğu iç kazanç sayesinde -2.5 V geri beslemede kuantum verimi %67 olmaktadır. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$*p-i-n* çığ fotodedektör sistemi, rezonans kaviteli GaInNAs-tabanlı fotodedektörler arasında literatürdeki en yüksek kuantum verimine ulaşılarak bu özelliği ile Ulusal Patent olarak tescillenmiştir. -6 V geri besleme altında yapılan transiyent fotoiletkenlik ölçümlerinin analizlerinden 230 MHz bant genişliği elde edilmiştir.

Tezin Genel Kısımlarında fiber optik iletişiminin temel bileşenlerinden ve fotodedektör çeşitlerinden bahsedilmektedir. Malzeme ve Yöntem kısmında fotodedektör malzemesi, fotodedektör fabrikasyon teknikleri ve fotodedektör karakterizasyonlarından bahsedilmektedir. Bulgular kısmında incelenen fotodedektör yapılarının farklı başlıklar altında deneysel ve kuramsal bulguları verilerek Tartışma ve Sonuç kısmında birbirleriyle ve literatürle kıyaslamaları yapılmaktadır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. FİBER OPTİK İLETİŞİM

İletişim, en genel anlamda bilginin bir noktadan başka bir noktaya iletilmesi olarak ifade edilebilir. İnsanoğlu modern fiziğin gelişimine kadar, yüzyıllar boyunca bilginin iletilmesinde ateş yakmak, posta güvercinleri kullanmak, mektup göndermek veya telgraf çekmek gibi farklı yöntemler kullanmıştır. Eski çağlarda olduğu gibi modern çağlarda da bilginin transferi için bir ortama ve sisteme gereksinim vardır. Modern çağda bu sistem; bilginin bir sinyale dönüştürülmesi, sinyalin bir elektromanyetik dalga üstüne modüle edilerek taşınması ve modüle edilmiş sinyal içinden elde edilmesi olarak ifade edilebilir. Modern çağda iletişim; milimetre, mikrometre ve radyo frekansları gibi uzun dalgaboylu elektromanyetik dalgalar kullanılarak yapıldığı gibi elektromanyetik dalga skalasının optik bölgesine karşılık gelen aralıkta da yapılmaktadır. Günümüzde en yaygın, hızlı ve güvenli iletişim aracı bu optik bölgeyi kullanan fiber optik iletişim teknolojisi olup, bu bölümde fiber optik iletişimin tarihsel gelişimi, bileşenleri ve fiziği hakkında genel bilgi verilmektedir.

2.1.1. Tarihsel Gelişimi

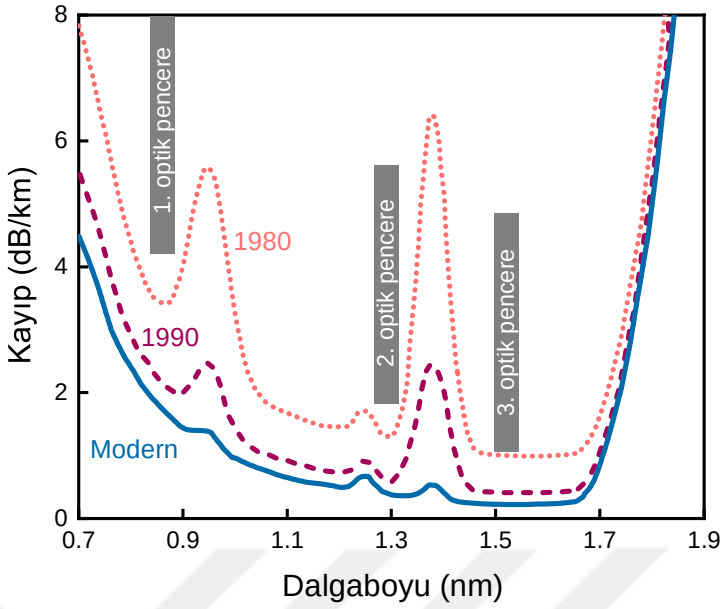
İnsanoğlu yüzyıllarca, sırasıyla ateş yakmak, yansıtıcı aynalar veya sinyal lambaları kullanmak olmak üzere çok farklı şekillerde "görünür optik bölgeyi" kullanarak iletişim (az sayıda bilgiyle) sağlamıştır. Sesin ışık ile transferi konusunda ilk bilimsel çalışma 1880 yılında, telefonu icadından tam 4 yıl sonra, Alexander Graham Bell tarafından yapılmıştır [1, 25]. Alexander Graham Bell'in fototelefon'u (Photophone); sesin bir ayna üzerine yansıması sonucu aynada (diyafram) gelen sesin titreşimi ile aynı özelliklerde titreşim oluşması, aynı anda üzerine güneş ışığı düşürülerek alıcı aynaya (diyafram) doğru yansıtılması ve yansıyan fotonların sesin özelliklerini alıcı aynaya taşıması prensibine dayanmaktadır. Bu prensiple, Alexander Graham Bell sesin bir noktadan 200 metre uzaktaki başka bir noktaya transferini sağlamıştır [1]. 20. yüzyılın ikinci yarısına kadar optik iletişim için pek çok çalışma yapılmasına rağmen uygun optiksel kaynak eksikliği

ve optik sinyalin atmosferde dağılmadan ilerleme zorluğu (kar, yağmur, kirlilik vs.) bu konudaki gelişmeleri sınırlandırmıştır. Bununla birlikte iletişim, elektromanyetik dalganın atmosferden daha az etkilenen uzun dalgaboyları kullanılarak (Radyodalgaları, Mikrodalga) yapılmıştır.

Teoriye göre aynı anda daha fazla bilginin transferi (bant genişliği) doğrudan elektromanyetik dalganın frekansıyla alakalı olduğu için elektromanyetik dalganın optik bölgesi kullanılarak, mikrodalga kullanılarak ulaşılandan 10^4 kat daha yüksek bant genişliğine ulaşılabilmektedir.

Laserin icadı ile tekrar gündeme gelen atmosferde (free-space) optik iletişim, yukarıda sözü geçen problemler nedeniyle ancak kısa erimli iletişim olarak kalmıştır. 1966 yılında Kao ve Hockman, optik iletişimin bir dielektrik ortamda veya fiber optik kabloda (dalga kılavuzları) elektromanyetik dalganın kılavuzlanmasıyla yapılabileceği fikrini ortaya atmıştır [3]. Bu bilim insanları keşiflerinden tam 50 yıl sonra, 2009 yılında bu çalışmaları ile Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülmüşlerdir. Önerdikleri fiber optik ortamın güç kaybı (1000 dB km^{-1}) mevcut bakır kablonun güç kaybından 100 kat daha kötüydü. Ancak, takip eden 10 yıl için fiber optik kabloda 0.85μm dalgaboyu için güç kaybı önce Kapron ve arkadaşları tarafından 20 dB km^{-1}'e [26], daha sonra Osanai tarafından 2 dB km^{-1}'e kadar düşürülmüştür [27].

Fiber optik dalga kılavuzlarındaki gelişmelerle birlikte, yarıiletken teknolojisindeki gelişmeler de fiber optik iletişimdeki kayıpların azalmasında ve bant genişliğinin artmasında önemli rol oynamıştır. Yarıiletken büyütme teknolojileri ile yeni alaşım yarıiletkenler elde edilmiş ve fiber optik kabloda kayıpların ve dispersiyonun daha az (Şekil 2.1) olduğu 1.3 μm ve kayıpların en az olduğu 1.5 μm dalgaboylarında çalışan, hem optik ışık kaynakları (Laser, LED) hem de fotodedektörler geliştirilmiştir. Bu gelişmelerle birlikte fiber optik kabloda kayıplar 1.3 μm ve 1.55 μm dalgaboyları için sırasıyla 0.38 dB km^{-1} ve 0.20 dB km^{-1} olacak şekilde düşürülmüştür [28, 29].



Şekil 2.1: Fiber optik kabloda dalgaboyuna bağlı güç kaybı

Fiber optik kablo ile ilk canlı telefon görüşmesi 1977 yılında 0.85 μm dalgaboyu penceresinde 6 Mb/s ile "General Telephone and Electronic" tarafından Kaliforniya'da gerçekleştirilmiştir [30]. 1987 yılında GaInAs yarıiletken laser ile 1.3 μm dalgaboyu penceresinde, 50 km'de bir yükseltici kullanılarak 1.7 Gb/s transfer hızına ulaşılmıştır [31]. GaInPAs yarıiletken laser ve fotodedektörün kullanıldığı sistemde fiber optik kablonun minimum kayba sahip olan 1.55 μm dalgaboyu penceresinde 100 km'de bir yenileyici kullanılarak 2.4 Gb/s transfer hızına ulaşılmıştır [32]. Erbium katkılı optik yükselteçler ve dalgaboyu bölmeli çoklama yöntemi (wavelength-division multiplexing) kullanılarak 2001 yılında 10 Gb/s [33] veri transfer hızına, 2006'da ise tek bir hat üzerinden 2.5 Tb/s [34] veri transfer hızına ulaşılmıştır. Hali hazırda haberleşmede kullandığımız maksimum iletişim hızı 10 Gb/s olmasına rağmen, 2018 yılında Igarashi ve arkadaşları tarafından tek bir kanalda 100 Tb/s ve toplamda 10 Pb/s (petabit/s) veri transfer hızına ulaşıldığı duyurulmuştur [35] .

2.1.2. Fiber Optik İletişimin Avantajları

Fiber optik iletişimin, radyofrekansı/mikrodalga ve metal (eşeksen, coaxiel) kablolu iletişim sistemlerine göre avantajları aşağıda verilmektedir.

- **Yüksek Bant Genişliği:** Yaygın olarak televizyon (TV) ve radyo yayınlarında

kullanılan radyofrekansı (RF) ve mikrodalgaların frekansları 10 GHz civarında iken elektromanyetik spektrumun optik bölgesinde 10^5 GHz civarındadır. Fiber optik iletişimde (10^3 GHz), RF/Mikrodalga iletişiminden (700 MHz) 10^4 kat ve metal kablolu iletişimden (20-100 MHz) ise 10^6 kat daha yüksek bant genişliğine ulaşılmaktadır. Fiber optik iletişimde 200 km'de bir yükseltece gereksinim duyulurken, metal kablolu iletişimde 5-10 km'de bir yükselteç kullanılmaktadır [1, 30] .

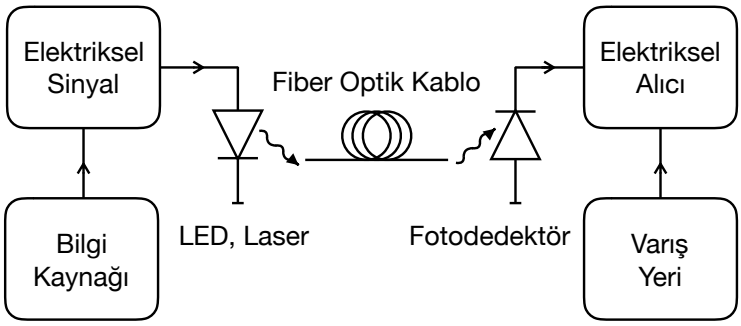
- **Güvenlik:** Fiber optik kablolar cam veya plastikten üretildikleri için elektriksel olarak izole olup, elektrik hatları ile aynı kanaldan geçmelerine rağmen elektriksel gürültüden etkilenmemektedirler. Optik sinyale dışarıdan erişim zor olduğu için fiber optik iletişim diğer iletişim sistemlerine göre daha güvenli bir iletişim şeklidir. Ayrıca teoriye göre optik sinyale yapılan herhangi bir müdahalenin kaynağı belirlenebilir ve takip edilebilirdir [1, 30].

- **Boyut ve Ağırlık:** Fiber optik iletişimde yaygın olarak kullanılan kabloların iç çapı 10-100 μm iken en dış koruyucu çapı 2.5 mm ve ağırlığı 6 kg/km'dir. Bununla birlikte metal kablolu iletişimde kullanılan kabloların dış çapı 28 mm olup ağırlığı 1110 kg/km'dir [1].

  Hem yüksek bant genişliği ve sinyal güvenliği hem de maliyet ve iş gücü göz önüne alındığında, fiber optik iletişimin kullanılması diğer iletişim sistemlerine göre daha avantajlıdır.

2.1.3. Fiber Optik İletişimin Fiziği, Teknolojisi ve Bileşenleri

Fiber optik iletişim, diğer iletişim şekilleriyle temelde aynı gereksinimlere sahiptir. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi fiber optik iletişimde, vericideki modüle edilmiş bilgi sinyali laser veya LED yardımıyla elektrik sinyalinden optik sinyale (E/O) dönüştürülür. Modüle edilmiş optik sinyal *fiber optik kablo* diye adlandırılan optik ortamda ilerler (100-200 km) ve hedeflenen noktada fotodedektör yardımıyla optik sinyal tekrar elektrik sinyaline (O/E) dönüştürülür.



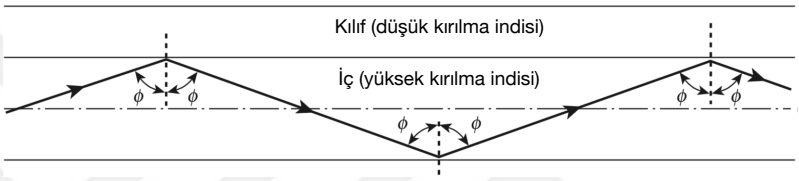
Şekil 2.2: Fiber optik iletişim sistemi

Yarıiletken teknolojisinin ve bant mühendisliğinin gelişmesiyle yarıiletken LED'ler ve laserler; çalışma dalgaboyu, küçük aygıt boyutu, yüksek verim ve düşük maliyet gibi özellikleriyle fiber optik iletişimde kullanılmaya başlanmıştır. İlk yarıiletken LED GaAs-tabanlı olup ışıma dalgaboyu 0.87 μm olduğu için fiber optik iletişim ilk olarak 0.8 ve 0.9 μm dalgaboyuları aralığında başlamıştır [36]. Daha yüksek bant genişliği ve daha uzak erimli iletişime gereksinim duyulduğu için fiber optik iletişim penceresi, GaAsP, GaInAs ve GaInPAs tapanlı yarıiletken LED'ler kullanılarak optik güç kaybının daha az olduğu 1.1 μm ve 1.6 μm dalgaboyu aralığına kaymıştır. Fiber optik kablo üretim tekniklerinin gelişmesiyle kablonun iç çapının düşürülmüş ve yapılan optimizasyonlarla tek modlu (single mode) fiber optik kablolar üretilmiştir. Bu gelişmelerle birlikte tek mod ışıma yapabilen, uzun erimli iletişim sağlayan yarıiletken laserler kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde çok modlu (multimode) fiber kablolar için LED'ler tercih edilirken tek modlu ve uzun erimli iletişim için yarıiletken laserler tercih edilmektedir.

Laser veya LED yardımıyla elektrik sinyalinden optik sinyale çevirilen bilginin ilerlediği dielektrik ortama fiber optik kablo denir. Fiber optik kablo, farklı kırılma indislerine sahip iç içe iki ortamdan oluşmaktadır. Tam iç yansımanın gerçekleşebilmesi için, iç (core) ortamın kırılma indisi (n_1), kılıfın (cladding) kırılma indisinden (n_1) büyük olmalıdır (n_1>n_2). Fiber optik kablolar saf cam (SiO_2) veya polimerlerden yapılabilir. Polimerlerden yapılanlar, ucuz olmalarıyla birlikte yüksek optik sönüme sahiptirler ve özellikle görünür bölgede kullanılırlar. Uzun erimli fiber optik iletişim için içi ve kılıfı SiO_2'den yapılmış kablolar kullanılmaktadır. İç optik ortamda yüksek dielektrik katsayısına ulaşmak için büyütme sırasında SiO_2'e katkı malzemesi olarak Germanyum (Ge) katılmaktadır [37, 38]. Kılıfta ise düşük dielektrik katsayısı elde etmek amacıyla katkı malzemesi olarak boron veya flörayt kullanılmaktadır [37]. Böylece fiber optik

kablonun dielektrik sabitleri değiştirilebilmektedir.

Fiber optik kabloda spektral güç kayıpları; düşük dalgaboylarında Rayleigh saçılmasından, yüksek dalgaboylarında fonon absorpsiyonundan, 1.244 ve 1.383 μm dalgaboylarında ise yıllar içinde şiddeti azaltılan safsızlık saçılmalarından (OH pikleri) kaynaklanmaktadır. Fiber optik kabloda minimum optik kayıpla iletişim için malzemeye bağlı sönümlerin ve dieletkrik sabiti farklarının dışında, bağlantılar (coupling), optik dalganın fibere giriş açısı gibi parametreler de önemlidir. Uygun geliş ve yansıma açısıyla (kritik açıdan büyük) optik dalga düşük kayıpla (%0.1) geliş ortamına geri yansır ve bu şekilde fiber boyunca ilerler (Şekil 2.3).



Şekil 2.3: Elektromanyetik dalganın fiber optik kabloda ilerlemesi [1].

Fiber optik iletişimin temel bileşenlerinden birisi de gelen optik sinyalin elektrik sinyaline dönüştüğü yarıiletken tabanlı optoelektronik aygıt olan fotodedektördür. Optik iletişim için geliştirilen ilk fotodedektörler *p-n* eklemine dayalı fotodedektörler olup düşük kazanca sahip oldukları için iletişimde yer bulamamışlardır. 1965 yılında, Si *p-n* eklem fotodedektörlerden daha yüksek kazanca sahip Si APD'ler keşfedilmiş ve fiber optik iletişimde kullanılmaya başlanmıştır [39]. İlk Si APD'ler 13 dB duyarlılığa sahiptir. O yıllarda, 0.8-0.95 μm dalgaboyu aralığında 2 dB/km güç kaybı olan fiberlerin kullanıldığı sistemlerde ekstra 7 km daha uzak erimli iletişim sağlamıştır. Si yarıiletkeni düşük absorpsiyon katsayısına ve indirek bant yapısına sahip olduğu için Si fotodedektörlerin hızı düşüktür. Yüksek absorpsiyon katsayısına sahip Ge ve GaAs APD'ler, Si tabanlı fotodedektörlere alternatif olarak gösterilmişlerdir. Bununla birlikte Ge tabanlı fotodedektörlerin karanlık akımı Si tabanlı fotodedektörlerin karanlık akımından 3-4 kat daha fazla olduğu için ve fotodedektörün veriminin sıcaklığa aşırı duyarlı olması nedeniyle Ge fotodektörler fiber optik iletişimde kullanılamamıştır. GaAs daha büyük bant aralığına sahip olduğu için karanlık akımı daha düşüktür. 0.8-0.95 μm dalgaboyu aralığında absorpsiyon katsayısının ve cevap hızının daha yüksek olmasına rağmen, duyarlılık konusunda Si APD ile yarışamamaktadır.

Fiber optik kabloda, yüksek dalgaboylarında optik kayıplar daha az olduğu için yüksek

dalgaboylarında çalışan fotodedektörlere ihtiyaç duyulmuştur. Yüksek dalgaboylu fiber optik iletişim için en uygun element yarıiletken fotodedektör Ge APD'lerdir. Ge APD'ler ile ilgili literatürde pek çok çalışma mevcut olup Si fotodedektörün limitlerine ulaşılmıştır. Yarıiletken büyütme teknolojisinin ve bant mühendisliğinin gelişmesiyle GaInAs, GaInPAs alaşım yarıiletken fotodedektörler üretilmiştir.

GaAs içerisine öncelikle kademeli olarak In ilave edilmesiyle 1.3 μm dalgaboyuna ve $Ga_{0.47}In_{0.53}As$/InP kuantum kuyulu APD ile hem örgü uyumu sağlanmış hem de 1670 nm kesme frekansına ulaşılmıştır [40]. Fiber optik iletişimde InP-tabanlı fotodedektörler 1980'li yıllardan günümüze kadar pek çok sistemde kullanılmaktadır [41]. Bu fotodedektör yapısında fotonlar, GaInAs alaşımında soğurulurlar. Oluşan elektronlar ve boşluklar iç elektrik alanla ayrılır ve tasarıma bağlı olarak tek tip taşıyıcılar, taşıyıcı çoğaltıldığı bölge olan geniş bant aralıklı InP yarıiletkenine sürüklenir. Ancak bu iki sürecin farklı bölgelerde gerçekleşmesi ve fotodedektörün kırılma voltajı civarında çalıştırılması, ara-yüzeylerdeki elektrik alanın çok iyi kontrolünü gerektirir [6, 9, 20]. Ayrıca InP-tabanlı fotodedektörlerin fabrikasyon süreci iki aşamalı gerçekleştiği için literatürde bu fotodedektörlere alternatif olacak fotodedektör arayışları sürmektedir [6, 9, 20].

1.3 μm ve 1.55 μm optik penceresi için fotodedektörün aktif bölgesinde kullanılabilecek ve mevcut GaAs büyütme teknolojisi ile entegre olarak büyütülebilecek en uygun yarıiletken alaşım GaInNAs'dır. Hem In hem de N miktarı değiştirilerek, GaInNAs yarıiletkeninin absorpsiyon dalgaboyu 1.3 μm ve alaşıma seyreltik oranda Sb eklenmesiyle de 1.55 μm'ye ayarlanabilmektedir [17, 24, 42] . Ayrıca GaInNAs/GaAs APD'lerde absorpsiyon ve kazanç aynı bölgede gerçekleştiği için daha düşük gürültülü ve düşük besleme voltajlarında çalışan fototdedektörler yapılabilmektedir [24, 42].

Literatürde GaInNAs fotodedektörlerle ilgili henüz birkaç çalışma mevcuttur. Zhang ve arkadaşları, 22 alt ve 8 üst olmak üzere GaAs/AlAs DBR çiftine sahip, aktif bölgesinin 7 nm genişliğinde üç tane GaInNAs/GaAs kuantum kuyusu sisteminin oluşturduğu rezonans kaviteli fotodedektör ile 4 nm FWHM'a ulaşmışlardır [15]. Bununla birlikte referansta belirtilen makalede fotodedektörün kuantum verimi veya cevabıyla ilgili bilgi verilmemektedir. Çalışmada DBR çifti sayısının fazlalığının fotodedektörün direncini arttırdığından ve düşük cevap hızına sahip olduğundan bahsedilmektedir. Aynı grubunun

bir diğer çalışmasında, aktif bölgesi bir önceki çalışmadaki ile aynı olan, sırasıyla üst ve alt DBR çifti sayılarının 11 ve 6 olacak şekilde azaltılan RCE fotodedektör ile 1.3 μm merkez dalgaboyunda %12 kuantum verimine ve 5.8nm FWHM'a ulaşmıştır [16]. Han ve arkadaşları, 25 alt ve 9 üst olmak üzere GaAs/AlAs DBR çiftine sahip, aktif bölgesinin 7 nm genişliğinde üç tane GaInNAs/GaAs kuantum kuyusu sisteminin oluşturduğu RCE fotodedektör ile 1.55 μm merkez dalgaboyunda 5V geri besleme voltajında %33 kuantum verimine ulaşmıştır [17]

Bu tez kapsamında fiber optik iletişimde kullanılma potansiyelinin yanı sıra, astronomiden sağlık sektörüne, güvenlik sistemlerinden bilimsel araştırma laboratuvarları gibi kırmızı altı fotodedektöre ihtiyaç duyulan her alanda kullanılma potansiyeline sahip GAInNAs-tabanlı RCE APD'lerin tasarımı ve karakterizasyonu incelenmektedir. Bölüm 2.2'de fotodedektörlerin fiziği, tasarımı ve karakterizasyonuyla ilgili daha ayrıntılı bilgi verilmektedir.

2.2. FOTODEDEKTÖRLER

Günümüzde fotodedektörler iletişim sistemlerinden otomasyona sağlık sektöründen savunma (güvenlik) sistemlerine kadar hemen her alanda kullanılmaktadır. Fotodedektör, üzerine düşen optik sinyali elektrik sinyaline dönüştüren optoelektronik aygıttır. Bu bölümde fotodedektörü karakterize eden parametrelerden ve yarıiletken eklem fotodedektör çeşitlerinden bahsedilmektedir.

2.2.1. Fotodedektörlerin Karakterizasyonu

Fotodedektörleri karakterize eden çalışma dalgaboyu, duyarlılık, cevap süresi, bant genişliği ve gürültü gibi temel fiziksel parametrelerin tanımlarıyla birlikte aşağıda verilmektedir.

2.2.1.1. Absorpsiyon

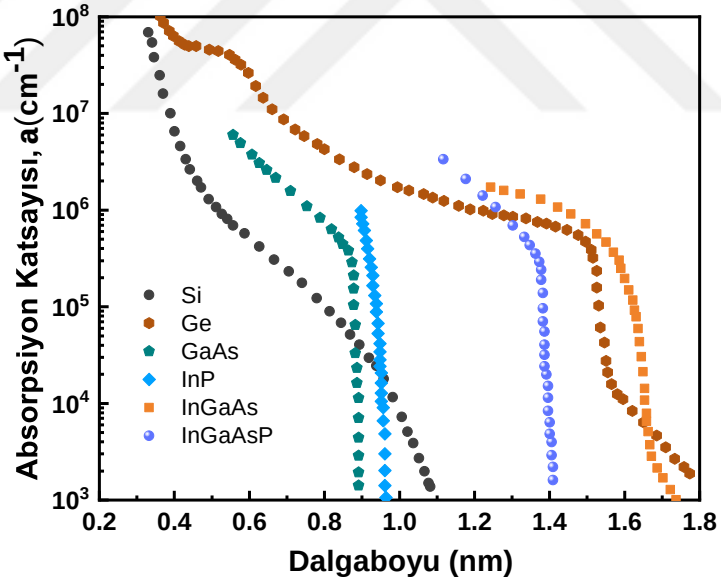
Absorpsiyon bir enerjinin bir ortamda soğurulması anlamına gelmektedir. Yarıiletken üzerine yarıiletkenin bant aralığı enerjisine eşit veya daha büyük enerjili fotonun düşmesi sonucu absorpsiyon gerçekleşir. Uyarım sonucu valans bandından bir elektron iletkenlik bandına çıkar ve gerisinde boşluk kalır. Böylece yapıda elektron-boşluk çifti oluşur.

Yarıiletken eklem fotodedektörlerde oluşan elektron-boşluk çifti iç elektrik alan ile birbirinden ayrılır ve fotoakım oluşur. Fotodedektörde gelen optik güce bağlı fotoakım,

$$I_{Ph} = \frac{P_0(1-r)}{h\nu}[(1-e^{-\alpha d}] \tag{2.1}$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada sırasıyla P_0 gelen optik gücü, r hava ve yarıiletken arasındaki Fresnel yansıma katsayısını, h Planck sabitini, ν foton frekansını, α absorpsiyon katsayısını ve d absorpsiyon bölgesinin kalınlığını temsil etmektedir. Denklem 2.1'de görüldüğü gibi fotoakım gelen optik güce, fotonun dalgaboyuna ve yarıiletken malzemenin absorpsiyon katsayısına bağlıdır.

Yarıiletkenlerde absorpsiyon katsayısı gelen fotonun dalgaboyuna bağlı olduğu için fotodedektör tasarımında, istenilen çalışma dalgaboyu aralığında en yüksek absorpsiyon katsayısına sahip yarıiletkenler tercih edilmektedir. Bazı yarıiletkenlerin dalgaboyuna bağlı absorpsiyon katsayısı değişimi Şekil 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2.4: Bazı yarıiletkenlerin dalgaboyuna bağlı absorpsiyon katsayısı değişimi [43].

Fotodedektör tasarımında bir diğer önemli parametre direk bantlı yarıiletken seçimidir. Optik geçişlerin aynı momentum vektöründe (k) gerçekleştiği yarıiletkenler direk bantlı yarıiletkenlerdir. Direk bantlı yarıiletkenlerde absorpsiyon katsayısı bant aralığı enerjisinin hemen üzerinde başlayıp hızla artarken, indirek bantlı yarıiletkenlerde daha yavaş artış göstermektedir. Ayrıca indirek bantlı yarıiletkenlerde optik geçişlerde

momentum değişimi fononlar ile gerçekleştiği için ısı açığa çıkmaktadır. Bu durum karanlık akımı arttırarak aygıtın performansını olumsuz yönde etkilenmektedir.

2.2.1.2. Duyarlılık ve Kuantum Verimi

Duyarlılık, fotonla uyarım sonucu oluşan akımın (fotoakım) gelen optik güce oranı olduğu için fotodedektörler için en temel parametrelerden biridir. Duyarlılık,

$$R = \frac{I_{ph}}{P_0} \tag{2.2}$$

ifadesiyle verilmektedir. Burada I_{ph} fotoakımı temsil etmektedir. Literatürde genellikle bir fotodedektörün optik sinyali elektrik sinyaline dönüştürebilirliği için daha nicel bir ifade olan "kuantum verimi" ifadesi kullanılmaktadır. Kuantum verimi iç ve dış kuantum verimi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İç kuantum verimi gelen foton başına oluşan elektron-boşluk çifti sayısı iken, dış kuantum verimi gelen foton başına kontaklara ulaşan elektron-boşluk çifti sayısıdır. Dış kuantum verimi sadece absorpsiyon bölgesindeki yarıiletkenin verimi değil, tüm yapının verimi olduğu için daha çok tercih edilen olgudur. Literatürde, tek başına kuantum verimi ifadesi kullanıldığında dış kuantum verimi kastedilmektedir. Kuantum verimi,

$$\eta = R\frac{h\nu}{e} = \frac{I_{ph}/e}{P_0/h\nu} \tag{2.3}$$

ifadesi ile verilmektedir. Ayrıca kuantum verimi absorpsiyon katsayısına ve absorpsiyon tabakasının genişliğine bağlıdır.

$$\eta \propto (1 - e^{-\alpha d}) \tag{2.4}$$

Denklem 2.4'te görüldüğü gibi absorpsiyon bölgesinin kalınlığı arttırılarak daha yüksek kuantum verime ulaşılabilir. Fakat kalınlığın artması fotodedektörün hızını olumsuz yönde etkilemektedir.

2.2.1.3. Bant Genişliği ve Cevap Süresi

Fotodedektör için diğer önemli parametreler ise cevap süresi ve bant genişliğidir. Fotodedektörün cevap süresi foton varlığında oluşan elektron-boşluk çiftinin ayrılarak arınmış bölge sınırlarına ulaşana kadar geçen süredir. Bant genişliği ise fotodedektörün

saniyede ne kadar bilgiyi işleyebildiğinin ölçüsüdür.

Bir fotodedektörün cevap süresi,

$$\tau = \tau_{tr} + \tau_{R_sC} \tag{2.5}$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada τ_{tr} geçiş zamanı, τ_{R_sC} RC zaman sabiti olup sırasıyla

$$\tau_{tr} = \frac{W_{dep}}{v_s} \tag{2.6}$$

ve

$$\tau_{R_sC} = R_s \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{W_{dep}} \tag{2.7}$$

ifadeleri ile verilmektedirler. Bu ifadelerde verilen W_{dep} arınmış bölge genişliğini, v_s taşıyıcı sürüklenme hızını, R_s malzemenin direncini, ε_0 ve ε_r sırasıyla boşluğun ve absorpsiyon bölgesinin dielektrik sabitini ve A etkin fotodedektör alanını temsil etmektedir.

Geçiş zamanı absorpsiyon bölgesini oluşturan yarıiletkenin bant aralığı ile ilişkili iken RC zaman sabiti paralel plaka gibi düşünülen fotodedektörün kapasitesi (C) ve devreye seri bağlanan direncin büyüklüğüyle ilgilidir.

Bant genişliği ise fotodedektörlerin cevap süresi ile ters orantılı olup

$$BW = \frac{1}{2\pi(\tau_{tr} + \tau_{R_sC})} \tag{2.8}$$

ifadesi ile verilmektedir. Yüksek hızlı uygulamalarda eklem kapasitansının küçük olması gerekmektedir. Denklem 2.6 ve 2.7'de görüldüğü gibi fotodedektörün kapasitansını küçültmek için arınmış bölge genişliğini arttırmak gerekir. Arınmış bölge genişliğini arttırmak absorpsiyonu dolayısıyla kuantum verimini ve fotodedektörün kapasitesini arttırarak R_sC zaman sabitini azaltır. Bununla birlikte geçiş zamanını arttırarak da fotodedektörün hızını azaltmaktadır. Dolayısıyla yüksek hızlı ve yüksek kuantum verimli fotodedektör tasarımda absorpsiyon bölgesinin kalınlığının optimizasyonu çok önemlidir.

2.2.1.4. Gürültü

Gürültü, fotodedektörün limitlerini ve optik sinyalin kalitesini etkileyen en önemli etkendir. Örneğin; fiber optik iletişimde yükselteç kullanımın azaltılması için Sinyal/Gürültü oranının (singal-to-noise ratio, S/N) yüksek olması istenmektedir.

Fotodedektörlerde başlıca gürültü kaynakları aşağıda verilmektedir [25, 44] :

- Fotodedektör üzerine düşen fotonların her birinin farklı bölgelerde ve derinliklerde absorplandığı ve iç kuantum veriminin "1" olduğu durumda oluşan taşıyıcıların (elektron-boşluk) her birinden akıma farklı zamanlarda ve doğrultularda katkı gelmektedir. Bu durum oluşan elektrik sinyalinde dalgalanmaya neden olmaktadır. Bu gürültü kaynağı literatürde "shot noise" olarak bilinmektedir.
- Yarıiletken kristal içerisinde termal enerji ile fononların sayısı dolayısıyla taşıyıcı-fonon çarpışma olasılığı artmaktadır. Taşıyıcı-fonon çarpışması sonucu oluşan gürültü "thermal noise" olarak bilinmektedir.
- Foton varlığında banttan banta geçiş ile oluşan elektron-boşluk çiftinin dışında, tuzak seviyelerinde elektron-boşluk çiftinin oluşması veya oluşan elektron-boşluk çiftinin tekrar birleşmesi sonucu oluşan gürültü "üretim-rekombinasyon gürültüsü" olarak bilinmektedir.
- Oluşan elektron ve boşlukların kontaklara giderken düşük enerjili potansiyel bariyerle karşılaşması sonucu oluşan ve düşük frekanslarda baskın olan gürültü tipi "$1/f$ noise" olarak bilinmektedir.

Bir fotodedektör karakterize edilirken elektrik sinyaline etki eden gürültülerin toplamı "gürültünün güç karşılığı" (Noise Equivalent Power, NEP) ile belirlenmektedir. NEP, ölçülebilir minimum optik güç olarak ifade edilebilir. NEP,

$$NEP = \frac{P_{min}}{\sqrt{BW}} \tag{2.9}$$

ifadesi ile verilmekte ve burada P_{min} minimum optik gücü ve BW fotodedektörün bant genişliğini temsil etmektedir.

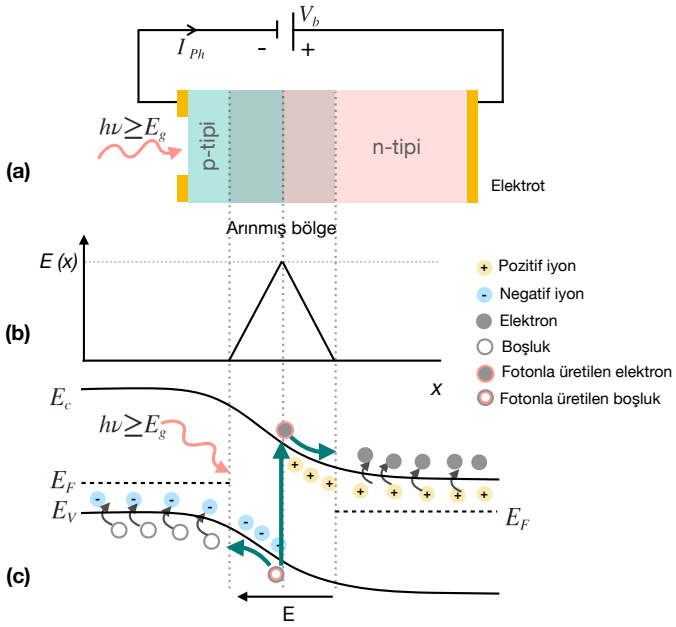
Bir fotodedektörün teknolojide kullanılabilirliğinin en önemli göstergesi onun dedekte edebilirliğidir (Dedektivity). Dedekte edebilirliğinin belirlenebilmesi için fotodedektörün bant genişliğinin, duyarlılığının ve gürültü akımının (karanlık akımı) bilinmesi gerekmektedir. Fotodedektörün dedekte edebilirliği için literatürde "normalize edilmiş dedekte edebilirlik" ifadesi kullanılmakta olup

$$D^* = \frac{R}{I_g}\sqrt{A.BW} \tag{2.10}$$

şeklinde verilmektedir.

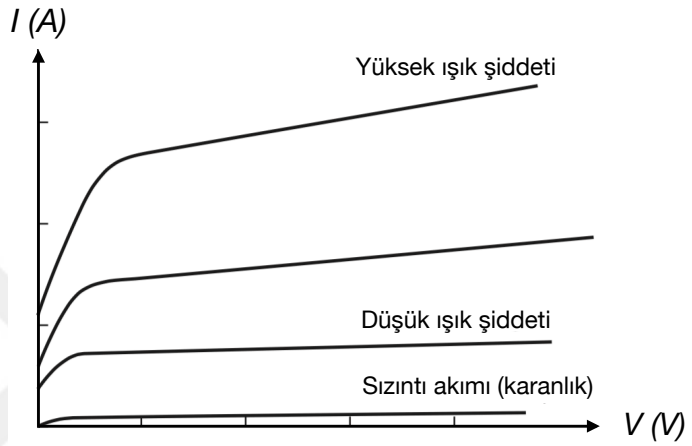
2.2.2. *p-n* ve *p-i-n* Eklem Fotodedektörler

Yarıiletken tabanlı optoelektronik aygıt teknolojisi temelde *p-n* eklemine dayanmaktadır. *p-n* eklemi boşlukların çoğunluk taşıyıcı olduğu p-tipi ve elektronların çoğunluk taşıyıcı olduğu n-tipi yarıiletkenlerin difüzyon, iyon implantasyonu veya tabakasal (epitaksiyel) büyütme teknolojileri kullanılarak bir araya getirilmesiyle oluşturulur. Denge durumunda *p-n* ekleminde, eklem bölgesi civarında serbest taşıyıcıların olmadığı (neredeyse hiç), iyonize olmuş lokalize iyonlar olduğu arınmış bölge oluşmaktadır (Şekil 2.5). Lokalize iyon korları eklem bölgesinde sürekli bir iç elektrik alan oluşturur.



Şekil 2.5: Geri besleme altındaki *p-n* eklem fotodedektörün **a)** şematik diyagramı **b)** eklem bölgesindeki elektrik alan dağılımı **c)** bant profili.

Yarıiletken üzerine düşen fotonlar ($h\nu \geq E_g$), ilerleme derinliğine bağlı olarak yapı içerisinde ilerler ve her bir foton valans bandında bağlı bulunan bir elektronu uyararak iletkenlik bandına çıkmasını sağlar. Eklem bölgesi içerisinde veya difüzyonla eklem bölgesine ulaşabilecek mesafede olan elektron ve boşluklar iç elektrik alan yardımıyla kontaklara doğru sürüklenerek akım (fotoakım) oluştururlar. Bu sayede optik sinyal elektrik sinyaline dönüşür.



Şekil 2.6: *p-n* eklem diyotunun ışık şiddetine bağlı akım-voltaj (geri besleme) karakteristiği.

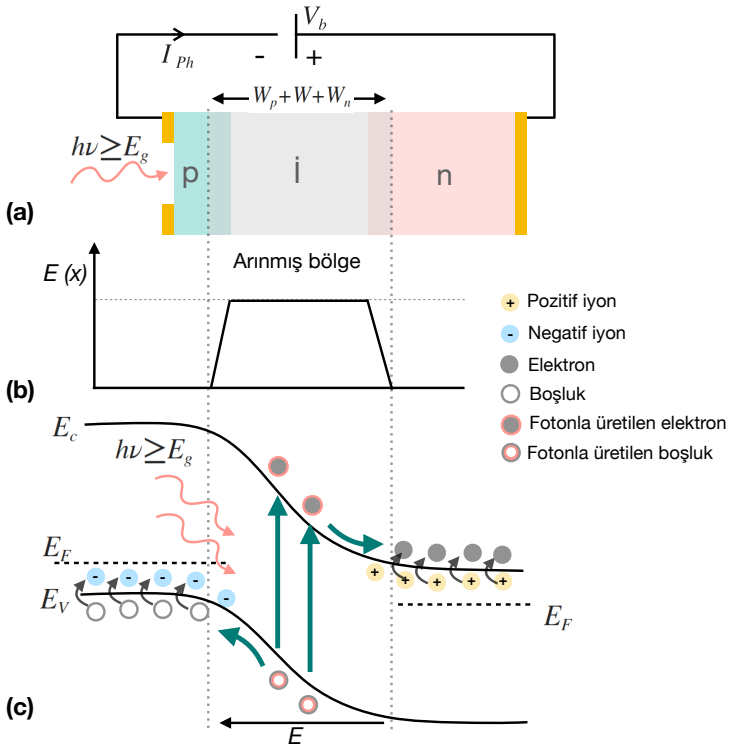
Fotonla uyarım sonucu oluşan elektron ve boşluklar azınlık taşıyıcı gibi davranır ve *p-n* ekleminde oluşan sızıntı akımını arttırırlar. *p-i-n* eklemine uygulanan geri besleme voltajı, uzaysal olarak arınmış bölge genişliğini ve iç elektrik alanı arttırdığı için daha çok elektron-boşluk çiftinin ayrılmasını sağlayarak fotoakımı arttırır. Bir *p-n* ekleminde besleme voltajına ve sıcaklığa bağlı toplam akım,

$$I_T = I_0 \left[exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right] + I_{Ph} \tag{2.11}$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada I_0 denge durumu sızıntı akımını, V besleme voltajını, k_B Boltzmann sabitini ve T kristal sıcaklığını temsil etmektedir.

Yukarıda bahsedildiği gibi arınmış bölge içerisinde veya difüzyonla arınmış bölgeye ulaşabilecek mesafede oluşan elektron-boşluk çiftleri fotoakıma katkı sağlamaktadır. Geri besleme voltajı arttıkça arınmış bölge genişliği de arttığı için absorpsiyon ve fotoakım artmaktadır. Bu durumdan yola çıkarak *p-n* ekleminin arasına asal (intrinsic, i) bir yarıiletken eklenerek arınmış bölge genişliği arttırılır. Böylece fotodedektörün verimi

artar. Bu yapıdaki fotodedektörlere *p-i-n* eklem fotodedektör denir.



Şekil 2.7: Geri besleme altındaki *p-i-n* eklem fotodedektörün **a)** şematik diyagramı **b)** eklem bölgesindeki elektrik alan dağılımı **c)** bant profili.

Kısa dalgaboylu (yüksek frekanslı) fotonlar uzaysal olarak yarıiletken yüzeyine yakın yerlerde soğurulurken, uzun dalgaboylu fotonlar dalgaboyuna bağlı olarak daha derinlerde soğurulmamaktadır. Uzun dalgaboylu fotonların kullanıldığı uygulamalarda arınmış bölgenin geniş olması önemlidir. Ayrıca arınmış bölgenin genişletilmesi fotodedektörün kapasitesini ve zaman sabitini düşürerek cevap süresini azaltırken, geçiş zamanını (transit time) arttırmaktadır [45]. Bu durumlar göz önüne alındığında hem kuantum verimini hem de aygıtın hızını arttırmak için arınmış bölge genişliğinin optimum olarak ayarlanması önemlidir.

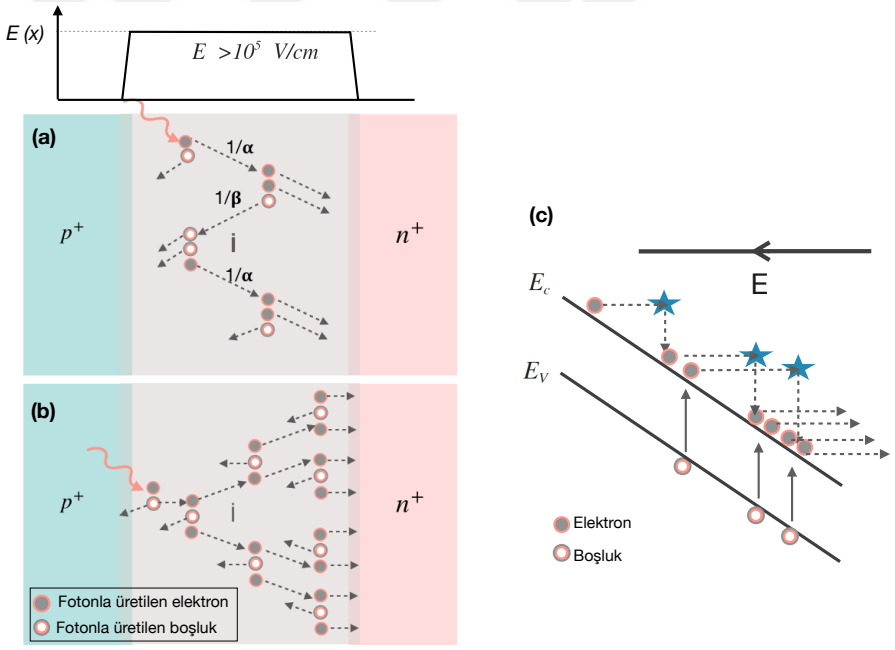
2.2.3. *p-i-n* Eklem Çığ Fotodedektörler

Yüksek cevap hızına ve düşük karanlık akıma sahip *p-i-n* fotodedektörler, fiber optik iletişimden araştırma laboratuvarlarına, sağlık sektöründen astronomiye kadar pek çok farklı alanda kullanılmaktadır. Bununla birlikte bu tip uygulamalarda çok düşük optik güçleri algılayarak yükseltmek için iç kazanca sahip *p-i-n* eklem çığ fotodedektörlere

gereksinim duyulmaktadır.

2.2.3.1. İmpakt İyonizasyon

Çığ fotodedektörler kırılma voltajına (Breakdown voltage) yakın voltajlarda geri besleme altında çalışan aygıtlardır. GaAs tabanlı fotodedektörlerde elektrik alan $> 10^5$ V/cm büyüklüğüne ulaştığında, foton varlığında oluşan taşıyıcılar satürasyon hızlarında hareket ederler. Şekil 2.8'de görüldüğü gibi absorpsiyon bölgesinden kontaklara ulaşana dek yüksek enerji kazanan taşıyıcılar, atomlarla etkileşerek fazlalık enerjilerini atomlara verip valans bandından bir elektronu iletkenlik bandına çıkırlar ve ikinci bir elektron-boşluk çifti oluştururlar. Bu olaya impakt iyonizasyon, bu taşıyıcılara ise ikincil taşıyıcılar denir. Bu şekilde foton varlığında oluşan birincil taşıyıcılar ve/veya ikincil taşıyıcılar yeteri kadar enerji (E_i) kazanarak yeni elektron-boşluk çiftleri oluşturabilirler. Böylece taşıyıcı çoğalması (multiplication) gerçekleşir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8: *p-i-n* eklem çığ fotodedektörlerde **a)** $\alpha_e \approx \beta_h$ **b)** $\alpha_e \gg \beta_h$ için ve **c)** bant diyagramı üzerinde impakt iyonizasyon mekanizması.

İmpakt iyonizasyon için gerekli olan elektrik alanın sadece besleme voltajından karşılandığı sistemlerde yüksek besleme voltajına ihtiyaç duyulur. Fakat besleme voltajı fotodedektörün kırılma voltajına ulaşmasına rağmen impakt iyonizasyon gerçekleşmeyebilir ya da aygıt aşırı ısınması sonucu performansı düşebilir. Bu nedenle

çığ fotodedektörlerde iç elektrik alanı arttırmak için yüksek katkılı ($N_a, N_d > 10^{18}\ cm^{-3}$) p^+ ve n^+-tipi yarıiletkenler tercih edilmektedir.

İmpakt iyonizasyon hızı elektron ve boşluk iyonizasyon katsayılarına bağlıdır. α_e elektronların ve β_h boşlukların iyonizasyon katsayıları olup, elektrik alan doğrultusunda elektron veya boşlukların yeni elektron-boşluk çifti oluşturana kadar ilerlediği ortalama mesafedir. α_e ve β_h elektrik alana bağlı olup,

$$\alpha_e(E) = a_e exp\left[-\left(\frac{b_e}{E}\right)^{m_e}\right] \tag{2.12}$$

ve

$$\beta_h(E) = a_h exp\left[-\left(\frac{b_h}{E}\right)^{m_h}\right] \tag{2.13}$$

ifadeleri ile verilmektedir. Burada a_e, a_h, b_e, b_h sırasıyla malzemeye ait büyüklükleri, m_e ve m_h ise sırasıyla elektron ve boşlukların etkin kütlesini temsil etmektedir.

En temel *p-i-n* eklem çığ fotodedektörlerde $\alpha_e = \beta_h$ ve $\alpha_e \gg \beta_h$ olduğu durumlar için kazanç mekanizmaları Şekil 2.8'de gösterilmektedir. Şekil 2.8a'da $\alpha_e = \beta_h$ olduğu için fotodedektörde kazanca elektronların ve boşlukların katkıları neredeyse eşit iken Şekil 2.8b'de $\alpha_e \gg \beta_h$ olduğu için iç kazanca en büyük katkı elektronların impakt iyonizasyonundan gelmektedir [46].

2.2.3.2. Çığ Fotodedektörlerde Gürültü

Çığ fotodedektörlerde taşıyıcı çoğaltılması ile iç kazanç sağlarken, aynı zamanda gürültünün artmasına neden olunmaktadır. $\alpha_e = \beta_h$ olan sistemlerde her iki taşıyıcı tipi ile de kazanç sağlanabilir ve aygıtın farklı noktalarından ve doğrultulardan fotoakıma katkı geldiği için fotoakımda dalgalanmalar olur (shot noise).

Çığ fotodedektörlerde gürültü çoğalması yerel alan teorisi (local field theory) ile açıklanmaktadır [47]. Bu teori; impakt iyonizasyonun sürekli ve başlangıçtaki taşıyıcı sayısından bağımsız olup sadece elektrik alana bağlı olduğunu varsaymaktadır. Bu yaklaşımlar altında çığ fotodedektörlerde kazançla gürültü arasındaki ilişki "aşırı gürültü

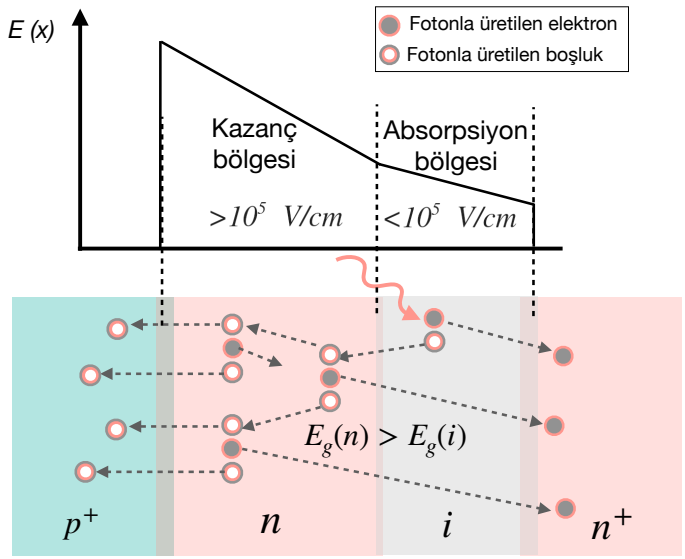
faktörü",

$$F(M) = M - M(1-k)\left(\frac{M-1}{M}\right)^2 \tag{2.14}$$

ifadesiyle verilmektedir [48]. Burada k iyonizasyon katsayıları oranı olup, elektron kazancının baskın olduğu sistemlerde β_h/α_e, boşluk kazancının baskın olduğu sistemlerde α_e/β_h olarak ifade edilmektedir [49].

Denklem 2.14'te görüldüğü gibi $\alpha_e = \beta_h$ olduğu durumda $k = 1$ iken F doğrudan kazanca (M) eşit olmaktadır. Bu nedenle, impakt iyonizasyonun tek tip taşıyıcılar tarafından gerçekleştirildiği ($\alpha_e \gg \beta_h$ veya $\beta_h \gg \alpha_e$) sistemlerde taşıyıcı sayısı arterken gürültü oranı çok fazla etkilenmemektedir [48, 49].

Bazı yarıiletkenlerde kendiliğinden tek tip taşıyıcı kazancı gerçekleşebileceği gibi uygun fotodedektör tasarımıyla da tek tip taşıyıcı çoğaltılması elde edilebilir. Şekil 2.9'da verilen fotodedektör yapısında olduğu gibi arınmış bölge ile absorpsiyon bölgesinin ayrıldığı, tek tip taşıyıcı kazancının sağlandığı sistemler literatürde "ayrılmış absorpsiyon ve kazanç" (separated absorption-multiplications, SAM) bölgeli *p-i-n* fotodedektörler olarak bilinmektedir [50].

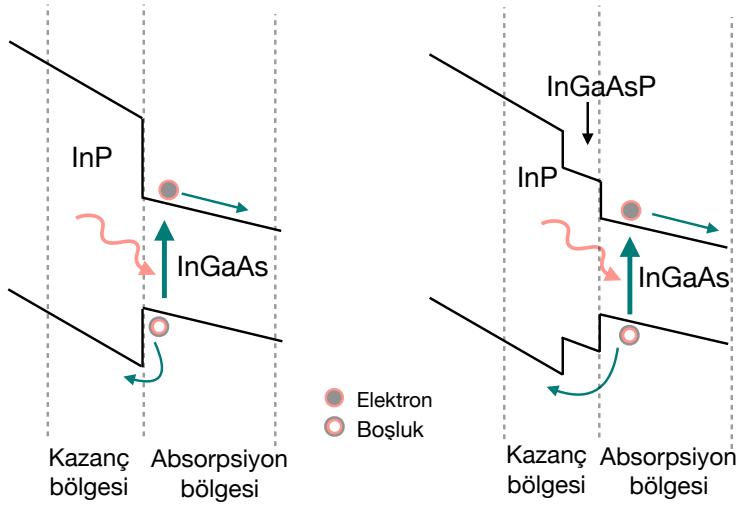


Şekil 2.9: SAM *p-i-n* fotodedektör sistemi. **a)** $\alpha_e \approx \beta_h$ **b)** $\alpha_e \gg \beta_h$.

SAM *p-i-n* fotodedektörlerde dar bant aralıklı yarıiletkende absorpsiyon sonucu oluşan elektron-boşluk çiftinden, tasarıma göre birisi doğrudan metal kontağa ulaşır. Diğer tip

taşıyıcı bant aralığı daha yüksek yarıiletkenlerden oluşan yüksek iç elektrik alanlı eklem bölgesine girerek taşıyıcı kazancı gerçekleştirirler. Şekil 2.9'da verilen SAM fotodedektör sisteminde n ile n^+ arasındaki asal tabakada absorpsiyon gerçekleşir. Oluşan elektronlar n ile n^+ arasındaki iç elektrik alan ile ayrılarak n^+ bölgesine doğru ilerlerken boşluklar p^+ ile n arasındaki yüksek elektrik alan ile çoğaltılarak taşıyıcı kazancı sağlar ve kontaklara ulaşırlar.

GaInAs/InP veya GaInPAs/InP heteroeklem çığ fotodedektörler SAM *p-i-n* yapılara örnek olarak verilebilir [51–54]. Şekil 2.10a'da GaInAs yarıiletkeninde oluşan elektron-boşluk çiftleri iç elektrik alanla ayrılırlar. Boşluklar InP tabakasına doğru yönelerek burada taşıyıcı çoğalması gerçekleştirirler. Bu yapının valans bant süreksizliği nispeten büyük olduğu için boşluklar kuyuda bir süre tuzaklanarak bariyere daha geç ulaşırlar. Böylece fotodedektörün geçiş zamanı artar ve fotodedektör daha yavaş çalışır. Bu durum, yapının absorpsiyon bölgesi ile kazanç bölgesi arasına bant aralığı enerjisi bu iki bölgedeki yarıiletkenlerin bant aralığı enerjilerinin arasında olan bir yarıiletken ilavesiyle çözülebilir. Şekil 2.10b'de verilen yapı bu tarife uyar ve "kademeli ayrılmış absorpsiyon ve kazanç bölgeli" (separated absorption graded multiplications, SAGM) *p-i-n* çığ fotodedektör olarak isimlendirilir [54, 55].

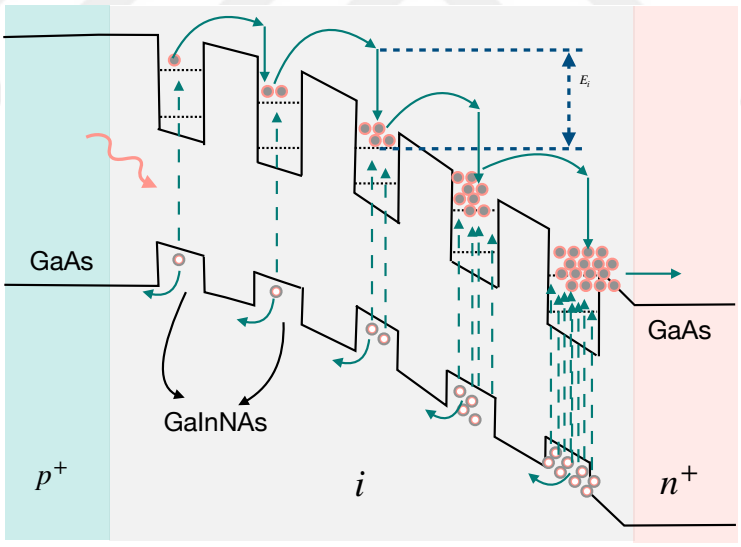


Şekil 2.10: **a)** SAM GaInAs/InP ve **b**) SAGM GaInAs/GaInPAs/InP *p-i-n* fotodedektör sistemi bant diyagramı.

Bu tasarımlar sayesinde, her ne kadar ilk oluşan elektron-boşluk çiftinin sadece biri ile taşıyıcı kazancı sağlansa da impakt iyonizasyonla oluşan ikincil taşıyıcıların her ikisinden

de kazanç gelebilir. Böylece kazançla birlikte gürültü de artabilir. Dolayısıyla tam anlamıyla tek tip taşıyıcı kazancından söz edilemez. Ayrıca yapı, absorpsiyon bölgesinin dışında bir kazanç bölgesine sahip olduğu için taşıyıcı geçiş zamanı artar, böylece bant genişliği azalır.

Fotodedektör tasarımında en önemli parametre kuantum veriminin yüksek olması olduğu için *p-i-n* fotodedektör sistemlerinde asal bölgeye çoklu kuantum kuyusu sistemi ilave edilebilir. Ayrıca çoklu kuantum kuyusu sistemi uygun bant aralığına sahip yarıiletkenlerle oluşturulup yeteri kadar elektrik alana ulaşıldığında iç kazanç da sağlamaktadır. 5-10 nm genişliğinde dar bant aralıklı yarıiletken ile 10-20 nm genişliğinde geniş bant aralıklı yarıiletkenlerin art arda büyütülmesiyle oluşan çoklu kuantum kuyusu sistemlerinin valans bandı süreksizliği iletkenlik bant süreksizliğinden daha küçüktür. Böylece absorpsiyon sonrası oluşan boşluklar elektronlara göre daha hızlı kuantum kuyusundan kaçarken, kuyular boyunca ilerleyerek yeteri kadar enerji kazanan elektronlar impakt iyonizasyonla kazanç sağlarlar.



Şekil 2.11: Geri besleme altında GaInNAs/GaAs çoklu kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektör.

Literatürde bu yapılara verilebilecek en iyi örnek GaInNAs/GaAs kuantum kuyusu sistemidir. GaInNAs/GaAs kuantum kuyusu sisteminde alaşım konsantrasyonuna bağlı olarak valans bandı süreksizliği 100-120 meV iken iletkenlik bant süreksizliği 300 meV civarındadır. GaInNAs/GaAs kuantum kuyusu sisteminde elektronların gördüğü bariyer enerjisi ile boşlukların gördüğü bariyer enerjisi arasında 3 kat fark vardır [23, 56].

Taşıyıcıların kuantum kuyularından termal kaçış zamanları;

$$\tau_{th} = \left[\frac{1}{L_w} \sqrt{\frac{k_B T}{2\pi m_w^*}} exp\left(-\frac{E_b}{k_B T} \right) \right]^{-1} \tag{2.15}$$

ifadesiyle hesaplanır. Burada L_w kuantum kuyu genişliğini, m_w^* kuantum kuyusundaki etkin taşıyıcı kütlesini ve E_b taşıyıcıların gördüğü bariyer enerjisini temsil etmektedir. Hesaplamalara göre, oda sıcaklığında GaInNAs/GaAs kuantum kuyusunda oluşan boşluklar kuantum kuyusundan elektronlara göre 10^3 kat daha hızlı kaçmaktadır. Böylece impakt iyonizasyon için gerekli elektrik alana ($>10^5\ V/cm$) ulaşıldığında, kuantum kuyular boyunca sadece elektronların çoğalması gerçekleşmektedir. Bu özelliği sayesinde GaInNAs/GaAs kuantum kuyulu fotodedektörler ile yüksek bant genişliğine ve yüksek kuantum verimine sahip, tek tip taşıyıcı kazancı gerçekleştiği için düşük gürültülü *p-i-n* çığ fotodedektörler elde edilmektedir [16, 17, 24, 42].

2.2.4. Rezonans Kaviteli *p-i-n* Eklem Çığ Fotodedektörler

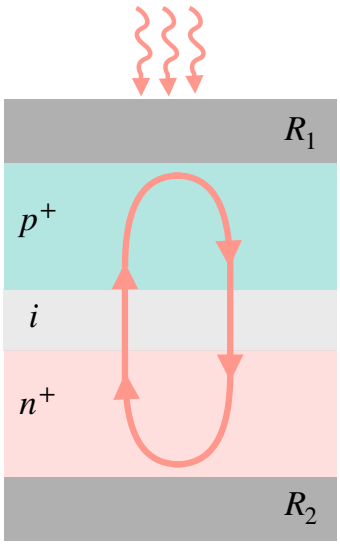
Özellikle uzun erimli fiber optik iletişimde daha az yükselteç kullanmak için yüksek kuantum verimi ve yüksek bant genişliğine sahip fotodedektörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Çığ fotodedektörlerde iç kazanç sayesinde kuantum verimi artmasına rağmen taşıyıcı geçiş hızı azaldığı için bant genişliği azalmaktadır. Yani kuantum verimi ile bant genişliği rekabet içerisindedir. Bu rekabet, absorpsiyon bölgesinin kalınlığı azaltılarak Fabry-Pérot rezonans kavitesi içerisine yerleştirilmesiyle çözülebilir [57, 58] .

2.2.4.1. Rezonans kavitesi

Fabry-Pérot rezonans kavitesi basit olarak belli dalgaboylarında yüksek yansıtıcılığa sahip iki ayna ile oluşturulan dalgaboyu seçici sistemdir. R_1 ve R_2 yansıma katsayısına sahip aynalarla oluşturulan Fabry-Pérot rezonans kaviteli *p-i-n* eklem fotodedektör Şekil 2.12'de gösterilmektedir. Fabry-Pérot rezonans kavitesinin, rezonans dalgaboyu penceresi fotodedektörün absorpsiyon dalgaboyu civarına göre ayarlanmaktadır.

Rezonans kavitesi, tasarlanan dalgaboyu aralığındaki fotonları absorpsiyon bölgesine göndererek diğer dalgaboylarındaki fotonları yansıtmaktadır. Absorpsiyon bölgesinden ilk geçişte absorplanamayan fotonlar alt ayna yardımı ile absorpsiyon bölgesine geri gönderilir. Alt ve üst aynalar arasında yansıyan fotonlar birkaç kez absorpsiyon

bölgesinden geçer ve etkin absorpsiyon uzunluğu artar. Rezonans kavitesi sayesinde dar absorpsiyon bölgesine sahip fotodedektörlerde hem yüksek kuantum verimine hem de yüksek bant genişliğine ulaşılmaktadır [17, 24, 58].



Şekil 2.12: Fabry-Pérot kaviteli *p-i-n* eklem fotodedektör.

Rezonans kaviteli fotodedektörlerde, yüksek kuantum verimine ulaşmak için yüksek absorpsiyon oranına ve yüksek absorpsiyon oranı için de yüksek yansıtıcılığa sahip aynalara ihtiyaç duyulmaktadır. Alt ve üst aynalarda yüksek yansıtıcılığa ulaşmak için (Distributed Bragg Reflectors, DBRs) kullanılır [58–60].

2.2.4.2. Dağıtılmış Bragg Yansıtıcıları

DBR'lar art arda yüksek ve alçak kırılma indisine sahip malzemelerin kullanılmasıyla oluşturulan dielektrik ayna yığınlarıdır. Her bir tabakanın kalınlığının kavite dalgaboyunun çeyreğine göre ayarlandığı, yüksek ve alçak kırılma indisine sahip tabaka çifti "çeyrek dalga DBR çifti" olarak isimlendirilir. DBR tabakalarının kalınlıklarının elde edilmesinde Bragg Yasası kullanılmakta olup,

$$n_1 d_1 + n_2 d_2 = \lambda/2 \tag{2.16}$$

ifadesiyle verilmektedir.

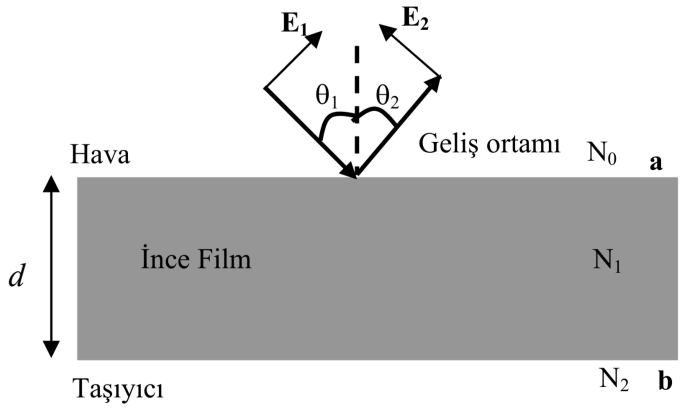
DBR çiftlerinin normaline paralel gelen bir elektromanyetik dalga varlığında toplam

yansıtıcılık,

$$R = \left[\frac{\frac{n_0}{n_s} - \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^{2m}}{\frac{n_0}{n_s} + \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^{2m}} \right]^2 \tag{2.17}$$

ifadesiyle verilmektedir [59]. Burada n_0 ve n_s sırasıyla havanın ve aktif bölgenin, n_L ve n_H sırasıyla alçak ve yüksek kırılma indisli tabakaların kırılma indislerini, m ise DBR çifti sayısını temsil etmektedir. Denklem 2.17'den anlaşılacağı gibi yüksek yansıtıcılık için DBR çifti sayısı çok olması ve/veya DBR çiftini oluşturan tabakalararasındaki kırılma indisi farkının ($n_H/n_L > 1$) bir'den büyük olması gerekmektedir. Örneğin 1.3 μm rezonans dalgaboyu için, DBR tabakaları farklı kırılma indisine sahip Si/SiO_2 (3.5/1.5) veya $ZnSe/MgF_2$ (2.47/1.37) gibi dielektrik çiftleri kullanılabilir. Bununla birlikte, özellikle GaAs tabanlı III-V grubu alaşım yarıiletkenlerle oluşturulan rezonans kaviteli fotodedektörlerde kırılma indisleri farkının yanı sıra tabakalar arası örgü uyumu da arandığı için GaAs/AlAs (3.41/2.91) DBR çifti tercih edilmektedir [17, 42] .

DBR çiftlerinin ve tasarlanan yapının kuramsal yansıma spektrumunun hesaplanması için çok tabakalı periyodik film sistemlerinin yansıma katsayılarını hesaplamakta kullanılan "Transfer Matris Metodu"ndan (Transfer Matrix Method, TMM) yararlanılabilir [59]. Kalınlığı d olan hava ve alttaş arasında sınırlandırılmış ince film tabakası Şekil 2.13'te verilmektedir. Gelen elektromanyetik dalganın bu ince film tabakası içerisindeki davranışı incelenerek ortamın yansıma katsayısı bulunmaktadır.



Şekil 2.13: *d* kalınlıklı ince film tabakası [59].

Gelen elektromanyetik dalganın geliş ortamındaki kompleks kırılma indisi $N_0 = n_0 + ik_0$,

ince film ortamının ve alttaşın komplex kırılma indisleri sırasıyla $N_1 = n_1 + ik_1$ ve $N_2 = n_2 + ik_2$'dir. Bağıntılardaki $n_{0,1,2}$ ortamların kırılma gerçek indislerini $k_{0,1,2}$ ise ortamların sönüm katsayılarını ifade etmektedir. Şekil 2.13'te verilen ince film sistemide elektromanyetik dalganın soğurulmadığı durumda karakteristik matrisi,

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Cos\delta_1 & (iSin\delta_1)/n_1 \\ in_1 Sin\delta_1 & Cos\delta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ n_2 \end{pmatrix} \tag{2.18}$$

ifadesiyle verilmektedir. Burada δ_1 ince film tabakasında oluşan faz farkını temsil etmekte olup,

$$\delta_1 = \frac{2\pi n_1}{\lambda} dCos\theta_1 \tag{2.19}$$

ifadesiyle verilmektedir. Bu ince film sisteminin karmaşık kırılma indisi ve yansıma katsayısı sırasıyla,

$$Y = B/C \tag{2.20}$$

ve

$$r = \frac{n_0 - Y}{n_0 + Y} \tag{2.21}$$

ifadeleriyle bulunur.

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

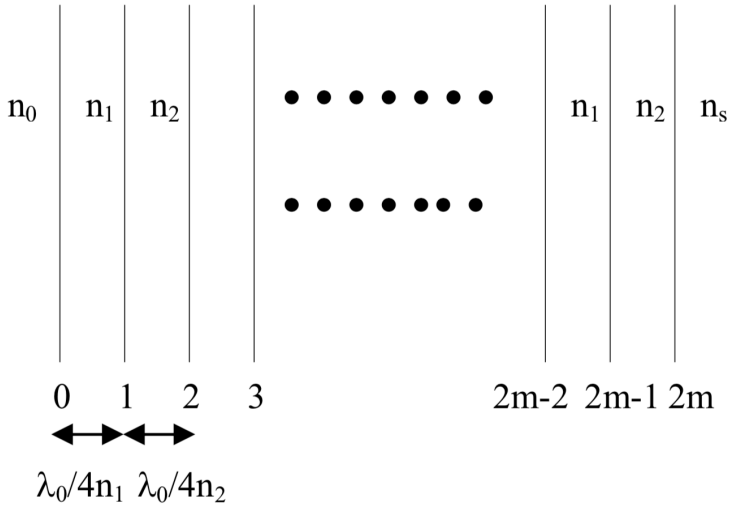
$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \prod_r^n \begin{pmatrix} Cos\delta_1 & (iSin\delta_1)/n_1 \\ in_1 Sin\delta_1 & Cos\delta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ n_2 \end{pmatrix} = \prod_r^n M_i \begin{pmatrix} 1 \\ n_{n+1} \end{pmatrix} \tag{2.22}$$

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

$$\delta_1 = \frac{2\pi n_1}{\lambda} dCos\theta_1 \tag{2.23}$$

ifadesiyle verilmektedir.

Yukarıda bahsedildiği gibi her bir tabakası çeyrek dalgaboyu kalınlığa sahip sırasıyla



Şekil 2.14: Kırılma indisleri n_1 ve n_2 olan m çift, periyodik çeyrek dalgaboyu kalınlığına sahip Bragg yansıtıcıları [59].

kırılma indisleri n_1 ve n_2 olan m çift DBR tabakasının (Şekil 2.14) yansıtıcılığı için transfer matrisi,

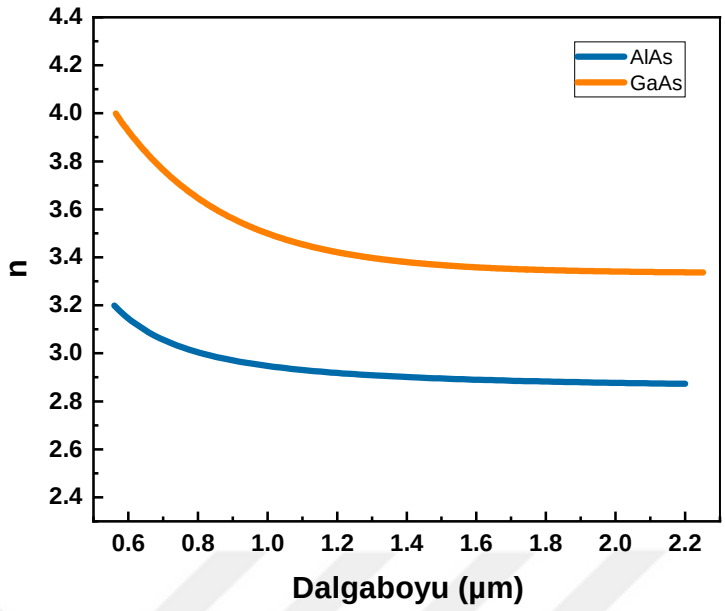
$$M = \prod_{i,j=1}^{m} \left(M_i M_j\right) = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \tag{2.24}$$

ifadesiyle verilmektedir. Burada M_i ve M_j sırasıyla n_1 ve n_2 kırılma indisli ortamların karakteristik geçiş matrisleridir. Denklem 2.21 ve 2.22'den yararlanarak yansıma şiddeti,

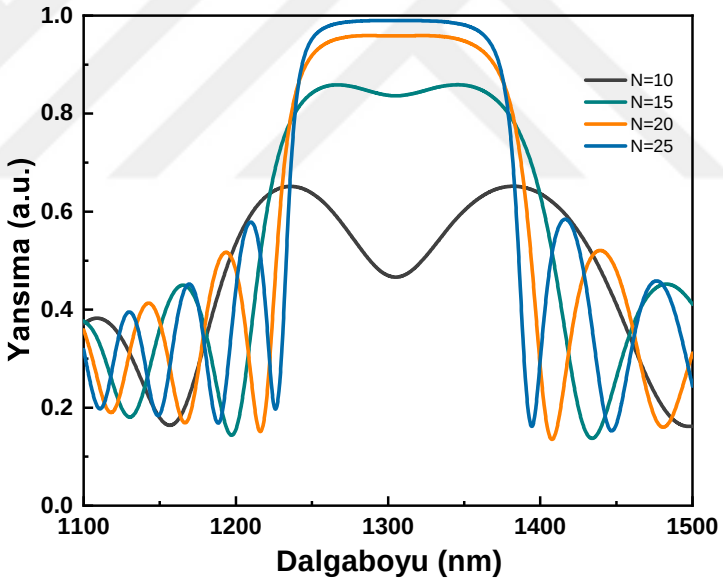
$$R = \left[\frac{n_0 M_{11} + n_0 n_s M_{12} - M_{21} + n_s M_{22}}{n_0 M_{11} + n_0 n_s M_{12} + M_{21} + n_s M_{22}}\right]^2 \tag{2.25}$$

şeklinde elde edilir.

Tez kapsamında incelenen rezonans kaviteli fotodedektörlerin alt ve üst aynaları GaAs/AlAs DBR tabaklarından oluşmaktadır. GaAs ve AlAs için dalgaboyuna bağlı kırılma indisi değişimi Şekil 2.15'te verilmektedir. Her bir dalgaboyu için kırılma indisi değeri ve hesaplanan matris çarpanlarının değeri Denklem 2.25'e yerleştirilerek istenilen dalgaboyu aralığında yansıma spektrumu elde edilir. Farklı periyotta GaAs/AlAs DBR çiftlerinin kuramsal yansıma spektrumları Şekil 2.16'da verilmektedir. DBR çifti sayısı arttıkça yansıtıcılığın maksimuma ulaşmasına rağmen daha basit ve maliyeti düşük fotodedektör tasarlamak için optimum DBR çifti sayısının seçilmesi önemlidir.



Şekil 2.15: GaAs ve AlAs yarıiletkenlerinin dalgaboyuna bağlı kırılma indisleri [61, 62].



Şekil 2.16: GaAs/AlAs DBR çiftinin farklı periyotlar için hesaplanan dalgaboyuna bağlı yansıma spektrumu.

Yukarıda rezonans kaviteli fotodedektörlerde absorpsiyon bölgesi kalınlığından ziyade etkin absorpsiyon bölgesi kalınlığından bahsedildi. Elektromanyetik dalga absorpsiyon bölgesinde birçok tur attığı için kuantum verimi ifadesine üst ve alt aynaların yansıtıcılığının da eklenmesi gerekmektedir. Rezonans kaviteli fotodedektörlerde merkez

dalgaboyunda kuantum verimi,

$$\eta_{pik} = \left\{ \frac{(1+R_2 e^{-\alpha d})}{(1-\sqrt{R_1 R_2} e^{-\alpha d})^2} \right\} (1-R_1)(1-e^{-\alpha d}) \tag{2.26}$$

ifadesi ile verilmektedir. Dar absorpsiyon bölgesine sahip $(\alpha d \ll 1)$ rezonans kaviteli fotodedektörler için bu ifade,

$$\eta_{pik} \simeq \left\{ \frac{(1+R_2(1-\alpha d))}{(1-\sqrt{R_1 R_2}(1-\alpha d))^2} \right\} (1-R_1)\alpha d \tag{2.27}$$

şekline indirgenebilir [57].

Literatürde, rezonans kavitesi arasına yerleştirilen iç kazancın kuantum kuyulu sistemlerde gerçekleştiği *p-i-n* eklem çığ fotodedektörler ile yüksek bant genişliğine ve yüksek kuantum verimine, düşük gürültü ve düşük karanlık akıma ulaşılabilmektedir.

3. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde tez çalışması kapsamında; incelenen örneklerin tasarımları, fabrikasyon aşamaları ve fotodedektör karakterizasyon teknikleriyle birlikte bu tekniklerde kullanılan deney düzenekleri hakkında bilgi verilmektedir.

3.1. FOTODEDEKTÖR MALZEME VE TASARIMI

Tez kapsamında incelenen fotodedektörlerin tasarımı, absorpsiyon bölgesinin ve rezonans kavitesinin tasarımı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İncelenen fotodedektörlerin absorpsiyon bölgeleri alaşım konsantrasyonuna ve kuantum kuyusu sayısına bağlı olarak değişmektedir. Aygıtların absorpsiyon bölgelerinin özellikleri ve bu özellikleriyle ilişkilendirilen adlandırmaları Tablo 3.1'de verilmektedir.

Tablo 3.1: Çalışmada incelenen fotodedektörlerin absorpsiyon bölgelerinin özellikleri.

Kuantum Kuyusu				**Bariyer**	
Sayı	**Malzeme**	**Kalınlık(nm)**	**Sb akışı(torr)**	**Malzeme**	**Kalınlık(nm)**
9	$Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}$	7	1.1×10^{-8}	$GaN_{0.035}As_{0.965}$	13.5
20	$Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}$	7	1.1×10^{-8}	$GaN_{0.036}As_{0.964}$	13.5
9	$Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}$	7	1.1×10^{-8}	$GaN_{0.035}As_{0.965}$	13.5
20	$Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}$	7	1.1×10^{-8}	$GaN_{0.036}As_{0.964}$	13.5
9	$Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}$	7	—-	GaAs	20

Yüksek lisans çalışmamızın konusu, seyreltik azotlu GaInNAs alaşım yarıiletken sisteminin, alaşımdaki N konsantrasyonuna, katkı tipine ve ısıl işlem süresine bağlı olarak optik ve elektriksek özelliklerinin incelenmesidir [21]. Dolayısıyla bu malzemenin pek çok karakteristik özelliği yüksek lisans tezimizde ve yıllar içerisinde yayınlanan makalelerimizde tartışılmaktadır [12, 22, 56, 63–65]. Bu nedenle, bu çalışmada aygıta dönüştürülen GaInNAs alaşım yarıiletkeni hakkında nispeten özet bilgi verilmektedir.

Büyütme sırasında GaInAs yarıiletkeni içerisine seyreltik oranda ilave edilen V. grup elementi olan N, evsahibi örgüde V. grup atomlarının yerine yerleşerek dörtlü alaşım yarıiletken sistemini oluşturur. N'un lokalize enerji seviyesi evsahibi yarıiletkenin iletkenlik bandı civarına yerleşmektedir. Yüksek elektronegatifliğe sahip olan N, evsahibi

yarıiletkenin iletkenlik bandını pertürbe ederek iki farklı enerji seviyesine (E_-, E_+) ayırır [21]. Teorik olarak bu enerji seviyeleri BAC modelinin çıktısı olan,

$$E_\pm = \frac{(E_N + E_M) \pm \sqrt{(E_N - E_M)^2 + 4V_{NM}^2}}{2} \tag{3.1}$$

ifade ile elde edilir. Burada E_- yeni iletkenlik bandı enerjisini, E_N N'un lokalize enerji seviyesini, V_{NM} matris elementi çiftlenimini ve E_M evsahibi yarıiletkenin iletkenlik bandı enerjisini temsil etmektedir. Burada evsahibi yarıiletken üçlü alaşım GaInAs yarıiletkeni olduğu için kompozisyona bağlı olarak bant aralığı enerjisi,

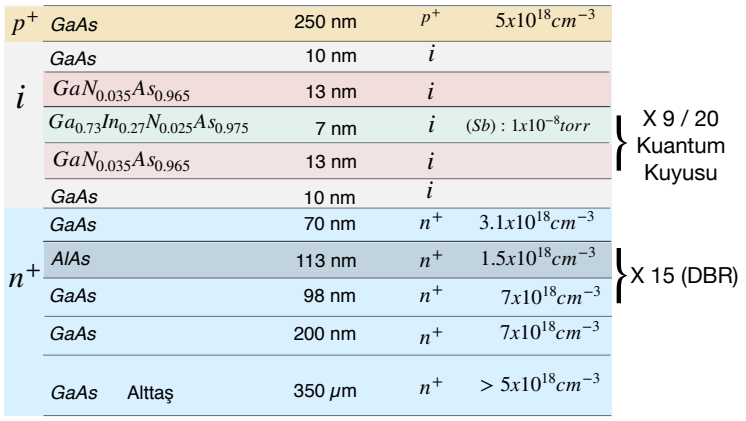
$$E_g(In_xGa_{1-x}As) = (x)E_g(InAs) + (1-x)E_g(GaAs) + (x)(1-x)\beta_o \tag{3.2}$$

ifadesi ile hesaplanmaktadır. Burada β_o (bowing), bant aralığı enerjisinin elemental kompozisyona bağlı olarak sanal kristal yaklaşıklığından sapmasını temsil eder. Bu değer GaInAs için 0.477 eV'dur [66].

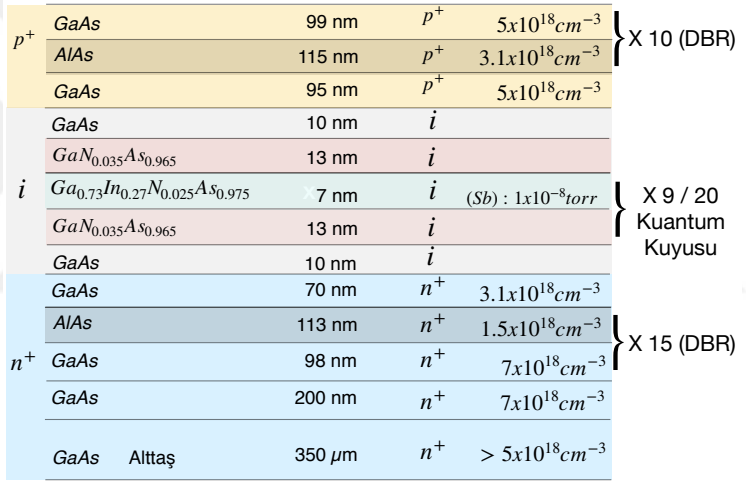
Denklem 3.2'de verilen Vegard yasası ve BAC modeli kullanılarak, GaInNAs alaşım yarıiletkenin absorpsiyon dalgaboyu 1.3 μm olacak şekilde N ve In konsantrasyonları ve sonlu kuantum kuyusu yaklaşıklığıyla kuantum kuyusu genişliği göz önüne alınarak tasarlanmıştır. Absorpsiyon bölgesinde bariyer malzemesi olarak GaInNAs ile hem örgü uyumlu olması hem de bant aralığı enerjileri farkı nedeniyle GaAs ve $GaN_{0.035}As_{0.965}$ tercih edilmiştir.

Örneklere rezonans kavitesi olarak alt ve üst DBR'ları eklemeden önce, rezonans kaviteli örneklerle aynı absorpsiyon bölgesine ve aynı alt DBR'lara sahip üst DBR'ları olmayan *p-i-n* çığ fotodedektörler tasarlanıp, büyütülerek karekterizasyonları yapılmıştır.

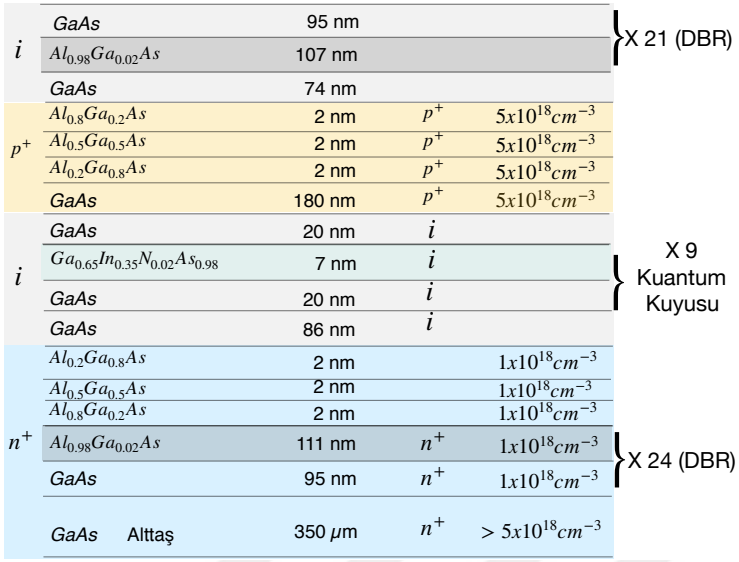
Fotodedektörlerin DBR tabakaları, absorpsiyon bölgesi ile örgü uyumlu olan farklı sayılarda ve kompozisyonlarda olmak üzere $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ yarıiletken çiftinden oluşmaktadır. Tabakların sayıları ve kalınlıkları TMM yöntemi kullanılarak 1.3 μm dalgaboyu dışında yansıması maksimum olacak şekilde tasarlanmıştır. Tez çalışması kapsamında incelenen alt DBR'lı örnekler Şekil 3.1'de, rezonans kaviteli örnekler ise Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te verilmektedir.



Şekil 3.1: Kuazi-kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörlerin yapısı.



Şekil 3.2: Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörlerin yapısı.



Şekil 3.3: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün yapısı.

Tasarımları yapılan fotodedektörler, Tampere Teknoloji Üniversitesi'nde MBE kullanılarak büyütülmüştür. 2 inç çaplı daire şeklinde büyütülen fotodedektörlerin fabrikasyonları İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü bünyesinde bulunan İleri Litografik Yöntemler Araştırma Laboratuvarı'nın olanakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

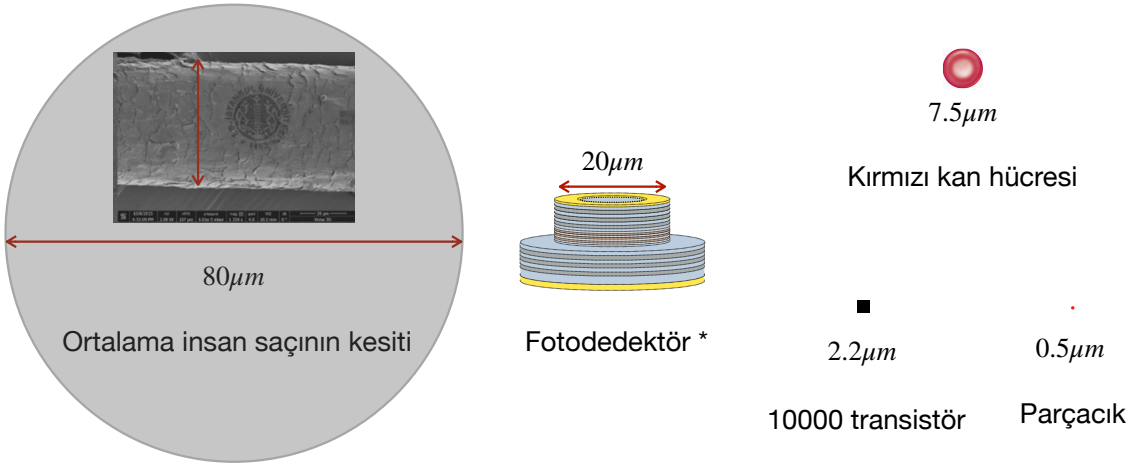
3.2. FOTODEDEKTÖRLERİN FABRİKASYONU

Tasarımı yapılan ve büyütülen yarıiletken tabanlı tüm elektronik veya optoelektronik aygıtlar, kullanım alanlarına veya gereksinimlerine bağlı olarak farklı tekniklerle farklı geometrilerde şekillendirilmektedirler. Büyütülen fotodedektörlerin ölçülebilir veya kullanılabilir şekle getirilmesi sürecine fabrikasyon denir. Tüm elektronik ve optoelektronik aygıtlar temiz oda diye adlandırılan ve parçacık/hacim oranına göre sınıflandırılan, belli ölçüde tozdan ve parçacıklardan arındırılmış ortamlarda yapılmaktadır.

Tablo 3.2: Temiz oda sınıflandırma standartları.

FED STD 209E	maksimum parçacık sayısı/ft^3					ISO Karşılığı
	0.1 μm	0.2 μm	0.3 μm	0.5 μm	5 μm	
1	35	7.5	3	1	0.007	**ISO 3**
10	350	75	30	10	0.07	**ISO 4**
100	3500	750	300	100	0.7	**ISO 5**
1000	35000	7500	3000	1000	7	**ISO 6**
10000	350000	75000	30000	10000	70	**ISO 7**
100000	3.5×10^5	750000	300000	100000	700	**ISO 8**

ISO 14644-1 ve FED-STD-209E standartlarında temiz oda sınıflandırması Tablo 3.2'de verilmektedir. Temiz odaların FED-STD-209E standartlarındaki isimlendirmeleri, parçacık sayıcılarla ölçülebilen en küçük boyut olan 0.5 μm boyutundaki parçacıkların 1 ft^3 hacmindeki sayısına göre yapılmaktadır. Bazı büyüklüklerin saç telinin çapına göre kıyaslaması Şekil 3.4'te verilmektedir.



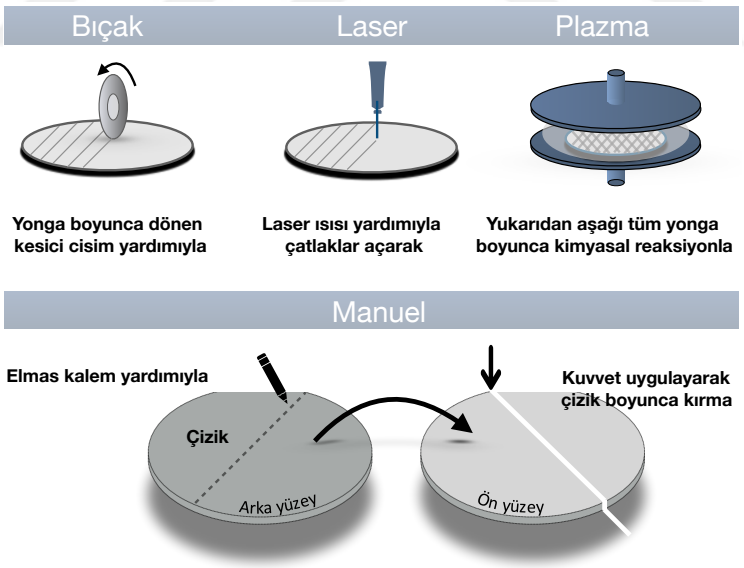
Şekil 3.4: Bazı büyüklüklerin saç telinin çapına göre kıyaslaması (*Bu çalışmada incelenen fotodedektör).

Bu çalışmada incelenen fotodedektörlerin üretildiği İstanbul Üniversitesi İleri Litografik Yöntemler Laboratuvarı 10, 100 ve 1000 sınıfı temiz oda bölümlerinden oluşmaktadır. Fabrikasyon sırasında, kristal yongaların temizliği, fotodirenç kaplaması ve kimyasal aşındırmaları 10 sınıfı, UV uygulama işlemi 100 sınıfı ve metalizasyon işlemleri 1000

sınıfı bölümlerde gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde yarıiletken aygıtların fabrikasyon süreçleri hakkında bilgi verilecektir.

3.2.1. Kristal Kesme

Farklı boyutlarda (2,3,4 vb. inç) epitaksiyel olarak büyütülen kristal yongalardan küçük boyutta (nm, μm, mm) ayıtlar yapabilmek için kristal yongaların kesilmesi gerekmektedir. Belirli büyütme doğrultularına sahip kristal yongaların mekanik olarak dönen bıçak yardımıyla, laser yardımıyla veya plazma aşındırma yardımıyla kesilebilmesinin yanı sıra atomik yönelim doğrultusunda elmas kesiciyle manuel olarak da kesilebilmektedir (Şekil 3.5). Dönen bıçak yardımıyla kesim işleminde saniyede 10 mm civarında ve laser yardımıyla kesim işleminde saniyede 1000 mm civarında kesim yapılabilirken plazma aşındırma ile aynı anda tüm yonga kesilebilmektedir. Bu çalışmada her seferinde bir kristal yongadan tek bir fotodedektörü fabrikasyonu gerçekleştirildiği için seri üretimde kullanılan kesme işlemlerinin aksine manuel kesme yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 3.5: Kristal kesme yöntemleri.

Manuel kesme işlemi iki şekilde yapılabilir. Kristal yonganın arkasına büyütme doğrultusuna paralel olarak boydan boya düz çizik atılarak yapılabileceği gibi tek bir kenarından küçük bir çentik atılarak da yapılabilir. Çizik veya çentik işleminin ardından kristal yonganın ön yüzeyinden çizilen veya çentik atılan noktaya küçük bir baskı

uygulanması sonucu kristal yonga ikiye ayrılır. Bu çalışmada incelenen fotodedektörler 2 inç çaplı kristal yongadan manuel kesme yöntemi ile 1×1 cm^2 boyutlarında kesilmiştir.

3.2.2. Kristal Temizleme

Aygıtlar temiz oda sayesinde bir ölçüde ortam ile ilgili kirliliklerden korunabilseler de fabrikasyon sürecinde de kullanılan kimyasallarla kirlenme veya atmosfere maruz kalan bölgelerinde oksitlenme gibi kirlilikler oluşabilmektedir. Bu kirliliklerden bazıları aseton, alkol gibi çözücülerle temizlenebilirken bazıları için daha kuvvetli çözücüler gerekmektedir. Bu nedenle temizlik aşamasını hafif temizlik (soft cleaning) ve sert temizlik (hard cleaning) olarak ikiye ayrılmaktadır.

Örnek yüzeylerinde oluşan tortular, organik ve bazı kimyasal kalıntılar için öncelikle aseton temizliği uygulanır. Örnekler, basit kirlilikler için aseton içerisinde oda sıcaklığında belirli bir süre bekletilebileceği gibi daha zorlu kirlilikler için asetonun kaynama noktasına yakın sıcaklıklara da (56 $^\circ$C) çıkartılarak örneklere kimyasal temizlik uygulanabilir. Uygulama sonrasında aseton kristal üzerine iz yaparak tutunmaktadır. Bu nedenle fabrikasyonun herhangi bir aşamasında aseton uygulandıktan sonra örnek sırasıyla izopropanol alkol ve bol deiyonize su ile temizlenerek kuru azot gazıyla kurutulur. Ardından yüzeyde tutunan su moleküllerinin buharlaşması için örnekler yaklaşık 1 dk boyunca 100-140 ^{o}C aralığında ısıtılarak kurutulur. Temizlik aşamalarında kimyasal uygulama süreleri önceden belirlenemez. Ancak temizlik sonrası örnek yüzeyi mikroskop yardımı ile kontrol edilir ve yeteri kadar temiz olup olmamasına bağlı olarak karar verilir. Hafif temizlik süreci, III-V grubu yarıiletken örneklere zarar vermediği için yeteri kadar temiz olduğuna karar verilene kadar tekrar tekrar uygulanabilir.

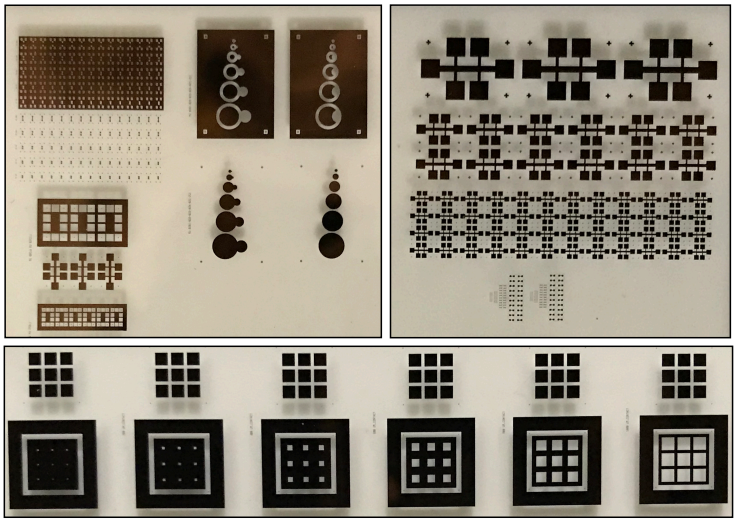
Örneklerin yüzeylerinde oluşan oksidasyon veye metal kalıntılarının temizliği için daha güçlü bir temizlik reçetesi izlenir. Literatürde, GaAs-tabanlı ve InAs-tabanlı alaşım yarıiletkenler için, hidroklorik asitli kimyasal çözeltiler $HCl : H_2O$ $(1 : 1)$ kullanılmaktadır [67]. Örnek üzerindeki oksit kalınlığına ve uygulama süresine bağlı olarak çözeltideki kimyasal oranları değişebilir [68, 69].

Bu çalışmada incelenen fotodedektörler yeni büyütülen kristal yongalar üzerine oluşturulduğu için hafif temizlik işlemleri uygulanmıştır. Sırasıyla kaynama sıcaklıklarında aseton ve alkol içerisinde 1 d bekletilerek bol su ile temizlenip azot

ile kurutulmuşlardır. Her kimyasal uygulama sonrasında bol su ile yıkanarak bir önceki kimyasal kalıntılarından kurtulmaya çalışılmıştır. Mikroskop yardımıyla temiz olup olmadıkları kontrol edilen kristal yonga parçalarına yeteri kadar temiz olmadığı durumda tekrar aynı işlemler uygulanmıştır.

3.2.3. Litografi

Litografi, aygıtların kullanım alanına veya uygulanacak karakterizasyon tekniğine bağlı olarak belirli desenlerin yüzey üzerinde oluşturulmasıdır. İstenen aygıt boyutlarına bağlı olarak kullanılacak litografi tekniği değişiklik göstermektedir. Dalgaboyuna bağlı olarak litografi teknikleri; elektron demeti, iyon demeti, X-ışınları (0.2-0.5 nm), uç mor ötesi (extreme ultraviolet, EUV) (<200 nm), derin mor ötesi (deep ultraviolet, DUV) (193-260 nm) ve mor ötesi (ultraviolet, UV) (365-410 nm)'dir [70]. Bu tekniklerle ulaşılabilinen boyut limitleri kullanılan elektromanyetik dalgaların veya elektronların/atomların difraksiyon limitlerine bağlıdır. Bir diğer sınırlandırma ise uygun direnç (resist) teminidir. Bu çalışmada incelenen fotodedektörlerin boyutlarının 20-400 μm civarında olması hedeflendiği için UV (365 nm ve 410 nm) dalgaboyunda fotolitografi tercih edilmektedir [71].



Şekil 3.6: Fotolitografi için çeşitli maske örnekleri.

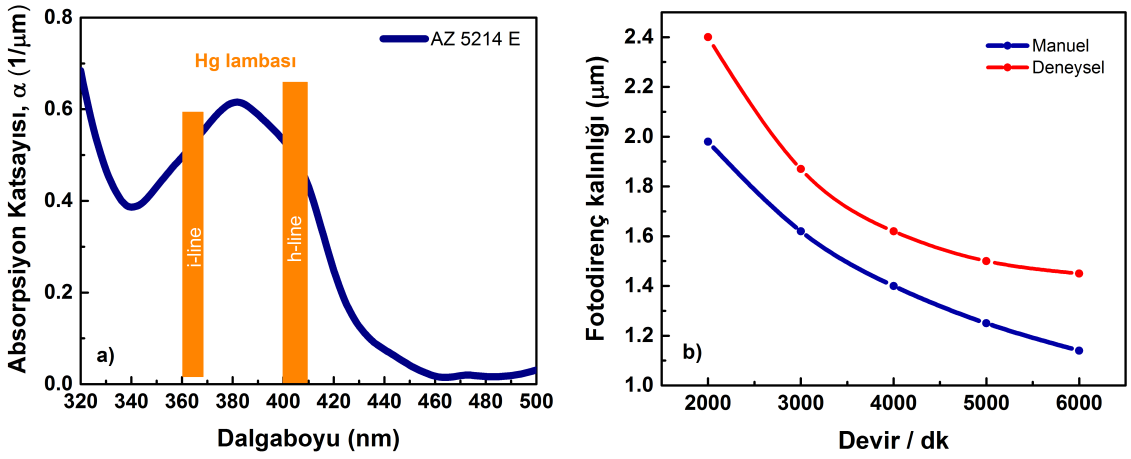
Fotolitografi maskeli ve maskesiz (maskless) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Maskeli litografide maske üzerindeki desenler tümüyle örnek üzerine aktarılırken, maskesiz litografide bilgisayar ortamında çizilen desenler bilgisayar kontröllü UV laserin

hareketiyle kademeli olarak örnek üzerine aktarılabilmektedir. Maskesiz litografi az sayıda örnek için pratik olmasına rağmen çok sayıda örnek ve seri üretim için maskeli litografi tercih edilmektedir. Bu çalışmada ise maskeli litografi kullanılmıştır. Krom kaplı kuvartz üzerinde şekilendirilen çeşitli maske örnekleri Şekil 3.6'da verilmektedir.

Bu bölümden sonra anlatılacak tüm süreçler fotolitografi ile ilgilidir.

İstenen şekilleri kristal yonga parçası yüzeyinde oluşturmak için öncelikle kristal yonga parçası yüzeyine fotodirenç kaplanmaktadır. Döndürerek kaplama, sprey kaplama ve daldırarak kaplama olmak üzere üç farklı fotodirenç kaplama tekniği bulunmaktadır [71]. Her bir teknik diğerlerine göre avantaj/dezavantajlara sahiptir. Bu tez çalışmasında döndürme ile kaplama tekniği tercih kullanılmıştır.

Kullanılacak fotodirenç kaplama tekniğine ve istenilen aygıt/örnek boyutlarına bağlı olarak fotodirenç seçimi farklılık göstermektedir. Pozitif ve negatif fotodirenç olmak üzere iki tip fotodirenç vardır. Pozitif fotodirenç üzerine UV ışık düşürüldüğünde fotodirencin bağları zayıflarken, negatif fotodirenç üzerine UV ışık düşürüldüğünde bağları güçlenmektedir. Bu çalışmada istenilen aygıt derinliği yaklaşık 2-3 μm olduğu ve kaplama tekniği olarak döndürme ile kaplama tercih edildiği için kullanılan UV ışığın pik dalgaboylarında yüksek absorpsiyon katsayısına sahip, literatürde "AZ 5214E" olarak bilinen pozitif fotodirenç kullanılmaktadır.



Şekil 3.7: AZ 5214E kodlu fotodirencin **a**) dalgaboyuna bağlı absorpsiyon katsayısı **b**) devir/d sayısına bağlı fotodirenç kalınlığı.

"AZ 5214E" kodlu fotodirencin dalgaboyuna bağlı absorpsiyon spektrumu ve döndürerek

kaplama sistemenin dönme hızına bağlı fotodirencin kalınlık değişimi Şekil 3.7'de verilmektedir. Belli sınırlar içerisinde, istenen fotodirenç kalınlığına döndürerek kaplama sisteminin devir/d oranı değiştirilerek ulaşılabilmektedir.

İstenilen kalınlıkta kaplanan fotodirencin içerisindeki su moleküllerinin buharlaşmasını ve fotodirencin örnek yüzeyine daha iyi tutunmasını sağlamak için kaplama sonrası örnekler 120 - 140°C'de yaklaşık 1-2 d süreyle ısıtılırlar. Örnekler, belirli bölgeleri krom kaplı maskeyle maskelenir ve maske-hizalayıcı (Mask aligner) yardımıyla UV ışığa maruz bırakılır. UV ışığın uygulama süresi fotodirenç kalınlığına ve UV ışığın şiddetine bağlıdır. Krom kaplı olmayan bölgelerdeki fotodirencin (pozitif) bağ yapısı bozulurken krom kaplı bölgelerdeki fotodirencin yapısı aynı kalır. UV ışığa maruz bırakılan örnekler H_2O ile seyreltilmiş developer çözeltisi içerisinde bekletilir. Böylece, sadece UV ışığa maruz kalarak bağları zayıflayan bölgelerdeki fotodirençler örnek yüzeyinden kalkar ve istenen şekil örnek yüzeyinde oluşturulmuş olur.

Fotodirenç seçimi gibi "developer" seçimi de önemlidir. Developer seçimi kullanılan fotodirencin kimyasal özelliklerine bağlı olup fotodirenç temin edilen firmalardan fotodirençle uyumlu developer da temin edilebilmektedir. Bu çalışmada kullanılan "AZ 5214E" kodlu fotodirençle uyumlu olan "AZ 400K" kodlu developer kullanılmıştır.

Birkaç inç çapında ve genelde 350 μm kalınlığında büyütülen kristal yongadan (wafer) birkaç mikrometre (μm) veya nanometre (nm) boyutunda aygıtlar/örnekler oluşturulmak istendiğinde yongaların belirli bölgelerinin aşındırılarak üzerine yapılacak herbir aygıtın birbirinden ayrılması gerekmektedir. Kristal aşındırma işlemi kimyasallarla yapılan ıslak aşındırmayla (wet etching) gerçekleştirilebilineceği gibi hızlandırılmış iyonlar veya plazma kullanılarak yapılan kuru aşındırmayla (dry etching) da gerçekleştirilebilir [67]. Islak ve kuru aşındırma tekniklerinin belli başlı avantajları-dezavantajları maddeler halinde aşağıda verilmektedir [72, 73].

- Islak aşındırmada daha basit ekipmanlar kullanılırken kuru aşındırma işlemi için daha kompleks ve maliyetli aygıtlara ihtiyaç duyulmaktadır.
- Islak aşındırma daha yüksek aşındırma hızına sahiptir. Ancak kuru aşındırmaya göre daha isotropik olduğu için fotodirençle maskelenmiş bölgelerin altının da aşınmasına neden olabilmektedir. Bununla birlikte, kuru aşındırma teknikleri

arasında da isotropiklik-anisotripiklik farkı bulunmaktadır.

- Islak aşındırmada 1 μm'nin altına ulaşılamazken, kuru aşındırmada çok daha küçük boyutlara ($<$ 100 nm) ulaşılabilmektedir.
- Islak aşındırmada kullanılan kimyasallar bazı tabakaları aşındırırken bazı tabakaları aşındıramayabilir. Bu nedenle ıslak aşındırma kuru aşındırmaya göre seçicidir.
- Islak aşındırmada, aşındırma hızının sabit tutulması için kullanılan kimyasallar sürekli yenilenmektedir. Böylece kuru aşındırmaya göre daha fazla sarf malzeme tüketimine neden olmaktadır.

Bu iki aşındırma tekniğinin yukarıda bahsedilen farklılıkları dışında pek çok farklılıkları bulunmaktadır. Fabrikasyon sürecinde hangi tekniğin kullanılacağına, sahip olunan olanaklara, istenilen aygıt boyutlarına-tasarımına vs. bağlı olarak karar verilmektedir. Bu çalışmada bazı aygıtlar için ıslak aşındırma tercih edilirken bazı aygıtlar için de kuru aşındırma tekniklerinden biri olan "Reaktif İyon Aşındırma" (Reactive Ion Etcher, RIE) tekniği kullanılmıştır.

Tablo 3.3: Bazı kimyasal aşındırma çözeltilerinin III-V grubu alaşım yarıiletkenlere etkileri.

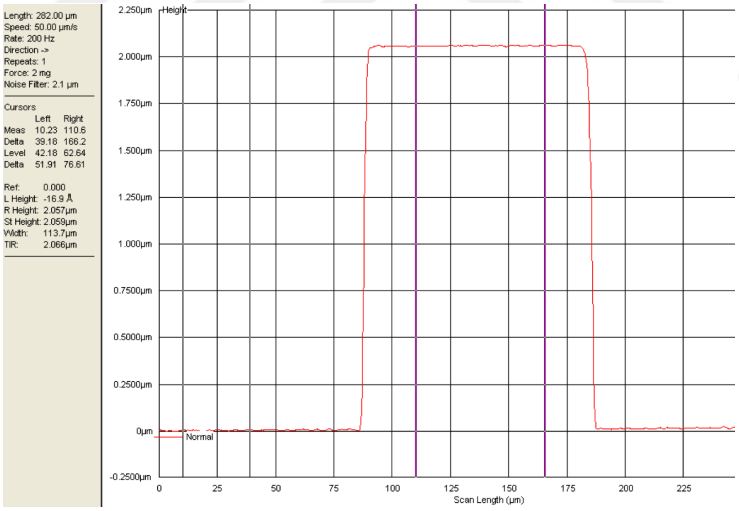
Kimyasal Çözelti	**III-V grubu Yarıiletken Alaşımlar**				
	GaAs	InP	GaInAs	AlGaAs	GaInNAs
$HCl : H_2O_2 : H_2O$	A[74]	A[74]			
$H_3PO_4 : H_2O_2 : H_2O$	A[67]	S[67]	A[67]		
$HCl : HNO_3 : H_2O$	A[75]	A[75]			
$H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O$	A[67]	A[74]	S[74]	A*	A*
A: Aşınır, S: Seçici/Durdurucu, *:Bu çalışmada kullanılan.					

Bazı III-V gurubu alaşım yarıiletkenler için kullanılan kimyasal çözeltiler Tablo 3.3'de verilmektedir. Her bir kimyasal çözeltinin aşındırma hızı çözelti içerisinde bulunan her bir kimyasalın çözelti içerisindeki yüzdesine bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada ıslak aşındırma için $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O$ çözeltisi kullanılmıştır. Kullanılan çözeltinin içerisindeki bileşenlerinin yüzdesine bağlı olarak Chung tarafından elde edilen aşındırma hızları Tablo 3.4'te verilmektedir [76]. Bu çalışmada $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O = 1 : 8 : 80$ oranı kullanılarak AlAs/GaAs DBR sisteminde 0.9 μm/d aşındırma hızı elde edilmiştir.

Tablo 3.4: $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O$ çözeltisinin kimyasal oranına bağlı GaAs için aşındırma hızları.

Aşındırıcı Karışım	**Karışım Oranı**	**Açıklama**	**Aşındırma Hızı** (μm/d)
$H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O$	8 : 1 : 1	Fotodirenç ve Au film ile etkileşmez.	1
	8: 1 : 3	Düz aşınma yüzeyi sağlar	1.2
	8 : 1 : 10	Fotodirenç ve Au film ile etkileşmez.	1.8
	8 : 1 : 30	Fotodirenç ve Au film ile etkileşmez.	0.5
	1 : 8 : 1	Derin aşındırmada kullanılır.	2.4
	1 : 8 : 80	Sığ aşındırma işleminde kullanılır.	0.5
	1 : 8 : 80	GaAs/AlAs DBR tabakasını aşındırır.	0.9*
*Bu çalışmada elde edilen.			

Bu çalışmada aşındırma hızı ve toplam aşındırma derinliği her bir dakikada bir profilmetre (KLA Tenchor P-6) yardımıyla kalınlık ölçülerek belirlenmiştir. Örnek profilmetre çıktısı Şekil 3.8'de verilmektedir.



Şekil 3.8: Aşındırılan kristal yonganın iki boyutlu profili.

3.2.4. Metalizasyon

Yarıiletken tabanlı elektronik/optoelektronik aygıtların, bulundukları devreye entegre edilebilmesi için metal kontağa ihtiyaç duyulmaktadır. Aygıtların performansının etkilenmemesi için kontak metali/yarıiletken arayüzey arasında omik kontak sağlanması gerekmektedir. Omik davranış için literatürde kabul gören maksimum kontak özdirenci

10^{-5} Ωcm^2' mertebeleridir [67, 77].

Yarıiletken/metal arayüzeyinde omik kontak olup olmadığını anlamak için her iki malzemenin iş fonksiyonları kıyaslanır. n-tipi yarıiletken/metal için $\phi_m > \phi_s$ ve p-tipi yarıiletken/metal için $\phi_m < \phi_s$ olmalıdır. Düşük taşıyıcı konsantrasyonuna sahip yarıiletken üzerine tek bir cins metal kaplandığında omik kontak sağlayacak uygun bir metal malzeme yoktur. III-V grubu malzemeler için düşük taşıyıcı konsantrasyonuna sahip ($< 1 \times 10^{17}$ cm^{-3}) III-V grubu yarıiletkenlerde 2-3 farklı malzeme üst üste kaplanır ve kaplama sonrası yapıya ısıl işlem uygulanır [77]. Isıl işlem sayesinde difüzyon uzunluğuna bağlı olarak yapı içerisine difüz olan malzemeler alaşım oluşturarak omik davranış gösterirler [78]. Örneğin n-GaAs için Au ve Ni metalleri ile birlikte Ge da metalizasyon için kullanılır. Ge IV-grup elementi olup, As ile bağ yapma eğilimindedir. Bu sayede yarıiletkene ekstra elektron sağlayarak n-GaAs ile Au arasındaki Schottky eklemin genişliğini darltır ve taşıyıcılar Schottky bariyerinde tünelleyebilir, yapı omik olur.

Yüksek taşıyıcı konsantrasyonuna sahip ($> 1 \times 10^{17} cm^{-3}$) III-V grubu yarıiletkenlerde ise ısıl işleme ihtiyaç duyulmadan omik kontak oluşturulabilmektedir [24, 42, 77]. n- ve p-tipi GaAs tabanlı sistemler için literatürde kullanılan bazı metalizasyon malzemeleri Tablo 3.5'te verilmektedir. Bu çalışmada incelenen aygıtların katkı konsantrasyonu yüksek olduğu için tüm örneklerde termal buharlaştırma sistemi yardımıyla Au/Ti : 150 nm /20 nm kaplama yapılmıştır.

Tablo 3.5: GaAs-tabanlı yarıiletkenler için literatürde kullanılan bazı metalizasyon malzemeleri.

n-tipi			**p-tipi**		
Malzeme	**Isıl İşlem**	**Referans**	**Malzeme**	**Isıl İşlem**	**Referans**
Al/Ni/Ge	Evet	[79]	Au/Zn/Au	Evet/Hayır	[80]
Ge/Ag/Ni	Evet	[81]	Pt/Ti	Hayır	[82]
Ge/Au/Ni	Evet	[83]	Au/Pt	Hayır	[82]
Au/Ti	Hayır	[83]	Au/Ti	Hayır	[82]

Metalizasyonu yapılan fotodedektörler aseton içerisinde bırakılarak fotodirenç kalıntılarından kurtulunur. Literatürde bu aşamaya "lift-off" aşaması denir. Lift-off aşaması ultrasonik titreşici yardımıyla da yapılabilir. Lift-off sonrası fotodedektör

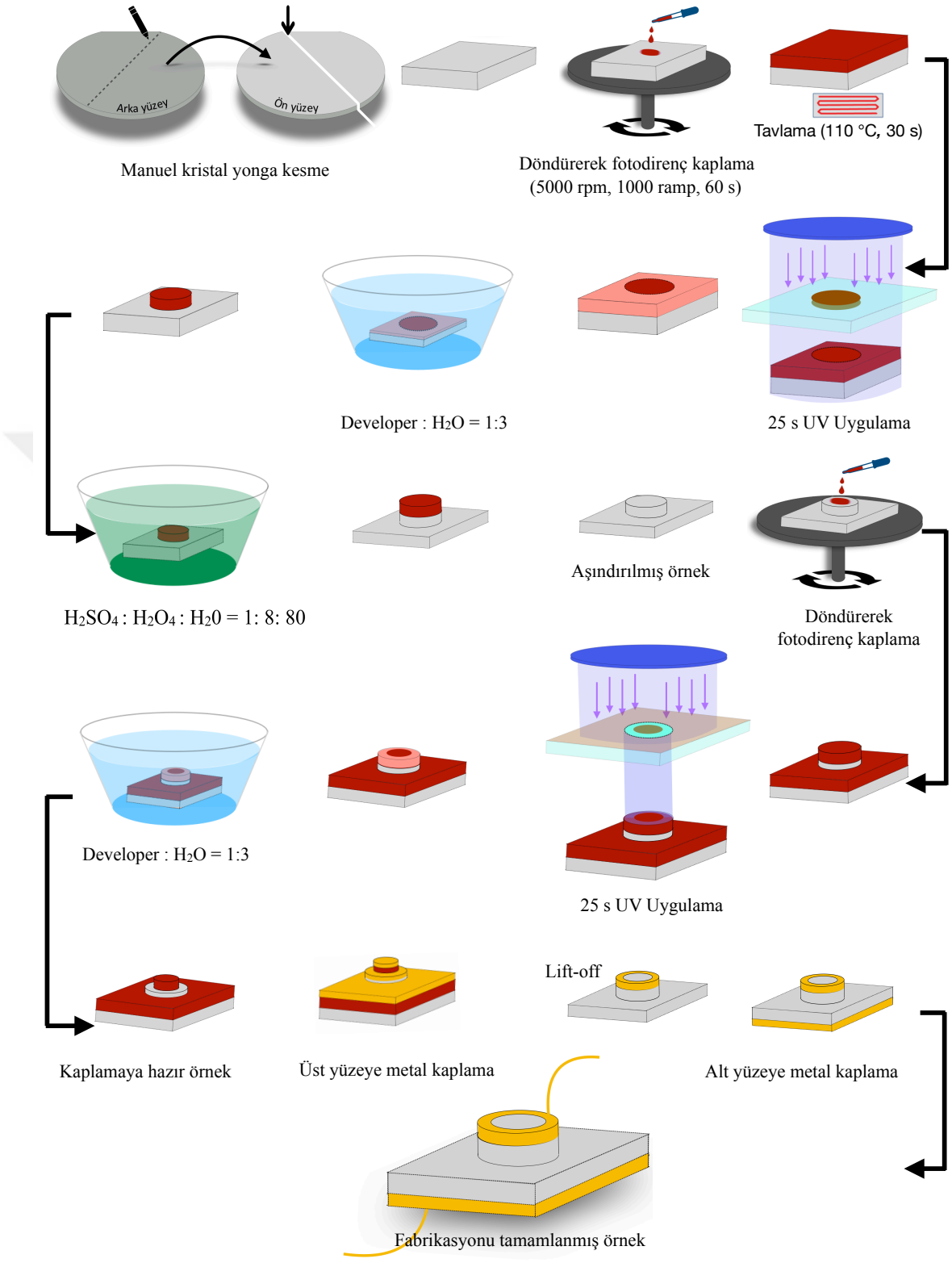
üzerinde fotodirenç kalıntısı kalması durumunda, 50-60 °C'de belirli bir süre "Dimethyl sulfoksit" (DMSO) uygulaması yardımıyla fotodirenç kalıntıları tamamen temizlenebilir.

Bu çalışmada izlenen fabrikasyon basamakları maddeler halinde aşağıda verilmektedir (Şekil 3.9).

- Kristal yongalar manuel kesim tekniği ile 1×1 cm^2 boyutlarında kesildi.
- 50 °C aseton içerisinde 1 d bekletildi.
- Deiyonize su ile temizlendi.
- 60 °C izopropil alkol içerisinde 1 d bekletildi.
- Deiyonize su ile temizlendi.
- Kuru azot gazı ile kurutuldu.
- 110 °C'de 60 s ısıtıldı.
- Optik mikroskop yardımıyla yüzey temizliği kontrol edildi.
- Döndürme ile kaplama (5000 rpm, 1000 ram, 60 s) yöntemiyle AZ5214E kodlu fotodirenç kaplandı.
- Fotodirenç kaplı kristal yongalar 110 °C'de 30 s ısıtıldı.
- Isıtılarak nemi atılan, fotodirenç kaplı kristal yongalar farklı büyüklüklerde mesa desenlerine sahip maske altında, Maske-hizalayıcı (Suss Microtech MJB4) yardımıyla 25 s UV ışığa maruz bırakıldı.
- 110 °C'de 10 s ısıtıldı.
- UV uygulama sonrasında kristal yonga üzerinde sadece istenen şekiller belirgin olana kadar Developer (AZ400K) : H_2O= 1 : 3 karşımında bekletildi.
- Deiyonize su ile temizlendi.
- 110 °C'de 60 s ısıtıldı.
- Profilmetre yardımıyla fotodirenç kalınlığı ölçüldü.

- $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O = 1 : 8 : 80$ çözelti içerisinde 60 s periyotlarla bekletildi.
- Deiyonize su ile temizlendi.
- 110 °C'de 30 s ısıtıldı.
- Profilmetre yardımıyla toplam derinlik ölçüldü kalınlığı ölçüldü.
- İstenen derinliğe ulaşılana kadar son üç işlem tekrarlandı.
- 50 °C aseton içerisinde 1 d bekletildi.
- Deiyonize su ile temizlendi.
- 60 °C izopropil alkol içerisinde 1 d bekletildi.
- Deiyonize su ile temizlendi.
- Kuru azot gazı ile kurutuldu.
- 110 °C'de 60 s ısıtıldı.
- Belirli şekiller üzerinde oluşturulmuş kristal yonga parçası üzerine metalizasyon maskesi için döndürme ile kaplama (5000 rpm, 1000 ram, 60 s) yöntemiyle AZ5214E kodlu fotodirenç kaplandı.
- Fotodirenç kaplı kristal yongalar 110 °C'de 30 s ısıtıldı.
- Isıtılarak nemi atılan, fotodirenç kaplı kristal yongalar metalizasyon maskesi altında, Maske-hizalayıcı yardımıyla 25 s UV ışığa maruz bırakıldı.
- 110 °C'de 10 s ısıtıldı.
- UV uygulama sonrasında kristal yonga üzerinde sadece istenen şekiller belirgin olana kadar Developer : H_2O= 1 : 3 karşımında bekletildi.
- Deiyonize su ile temizlendi.
- 110 °C'de 60 s ısıtıldı.
- Profilmetre yardımıyla fotodirenç kalınlığı ölçüldü.
- Termal buharlaştırma sistemi yardımıyla sırasıyla 20 nm Ti ve 120 nm Au kaplandı.

- 50 °C aseton içerisinde tamamen lift-off olana kadar bekletildi.
- Deiyonize su ile temizlendi.
- 60 °C izopropil alkol içerisinde 1 d bekletildi.
- Deiyonize su ile temizlendi.
- Kuru azot gazı ile kurutuldu.
- 110 °C'de 60 s ısıtıldı.
- Metalizasyonu tamamlanan fotodedektörler, gümüş pasta yardımıyla seramik örnek taşıyıcı üzerine yerleştirildi.
- Fotodedektör üzerindeki metal kaplama üzerinden kablo bağlayıcı sistem yardımıyla seramik üzerindeki Au pede Au tel bağları yapılarak fotodedektör fabrikasyonu tamamlandı. Bu süreçler şematik olarak Şekil 3.9'da verilmektedir.



Şekil 3.9: Fotodedektörün mesa şeklinde fabrikasyon süreci.

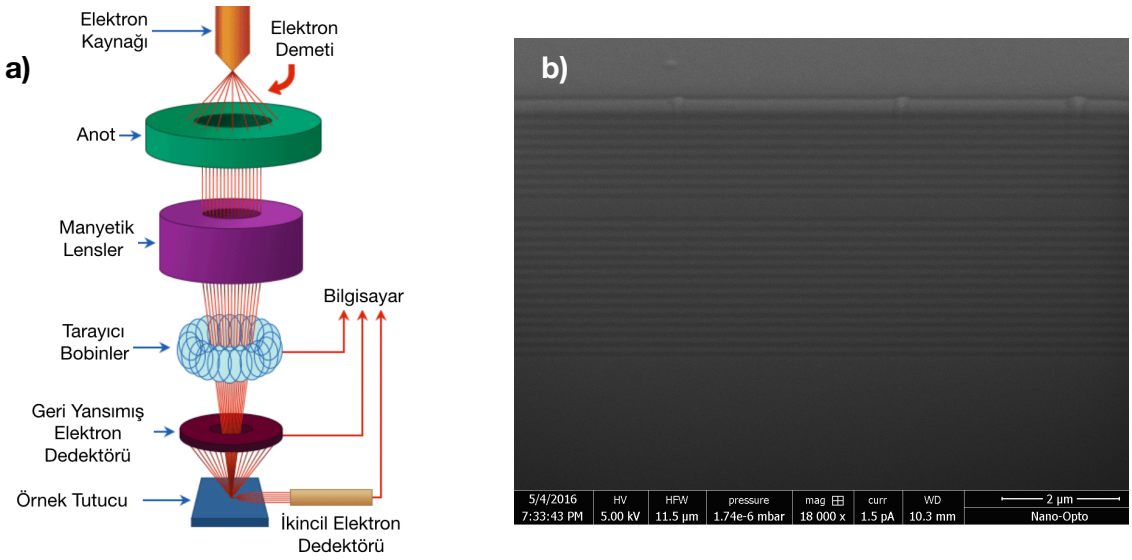
3.3. FOTODEDEKTÖRLERİN KARAKTERİZASYONU

Fotodedektörlerin transiyet fotoiletkenlik ölçümleri İngiltere Essex Üniversitesi'nin, diğer tüm karakterizasyon aşamaları ise İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Nano-Optoelektronik Araştırma Laboratuvarları'nın olanakları kullanılarak yapıldı. Bu bölümde fotodedektörlerin yapısal, optik ve elektro-optik karakterizasyonları için kullanılan teknikler verilmektedir.

3.3.1. Yapısal Karakterizasyon

3.3.1.1. Taramalı Elektron Mikroskobu

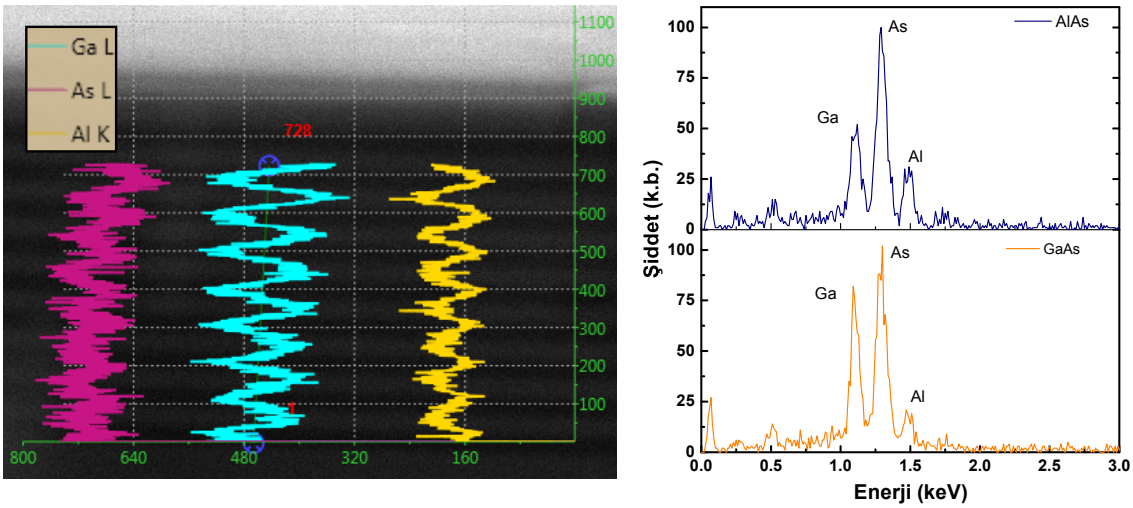
Optik mikroskoplardan farklı olarak elektronların kullanıldığı "Taramalı Elektron Mikroskobu" (Scanning Electron Microscopy, SEM), yoğunlaştırılmış elektron demetinin örnek yüzeyine gönderilmesiyle yüzey görüntüsü almaya yarayan alettir. Gönderilen elektronların enerjisine bağlı olarak, örnek ile etkileşimi sonucu örnekten çıkan sinyaller yardımıyla yüzey topolojisi çıkartılır. Malzeme içerisindeki kimyasal kompozisyona bağlı olarak renklendirilmiş görüntüler elde edilir. Yüksek çözünürlük ve yüksek büyütme özelliği sayesinde sanayiden sağlık sektörüne, pek çok alanda ve bilimsel araştırmada kullanılmaktadır. Basit bir taramalı elektron mikroskobu ve bu çalışmada incelenen aygıtlardan birinin kesit SEM görüntüsü Şekil 3.10'da verilmektedir.



Şekil 3.10: **a**) Basit bir taramalı elektron mikroskobu ve **b**) Tabakasal bir fotodedektörün kesit SEM görüntüsü.

3.3.1.2. Enerji Dispersif X-Işını Spektroskopisi

Taramalı Elektron Mikroskobu ile kompozisyona bağlı kontrast elde edilirken Enerji Seçici X-Işını Spektroskopisi (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS) ile taranan alanda belirli derinlikteki elemental kompozisyonu ve uygun yazılımlar yardımıyla göreceli olarak yüzdesini veren yapısal karakterizasyon tekniknidir. Elemental kompozisyon, elektron-örnek etkileşimi sonucu ortaya çıkan, enerjiye bağlı karakteristik X-ışınları grafiğinde elde edilen piklerin analizinden belirlenmektedir. Bu çalışmada incelenen fotodedektörlerden birinin DBR tabakalarının EDS analizi Şekil 3.11'de verilmektedir.

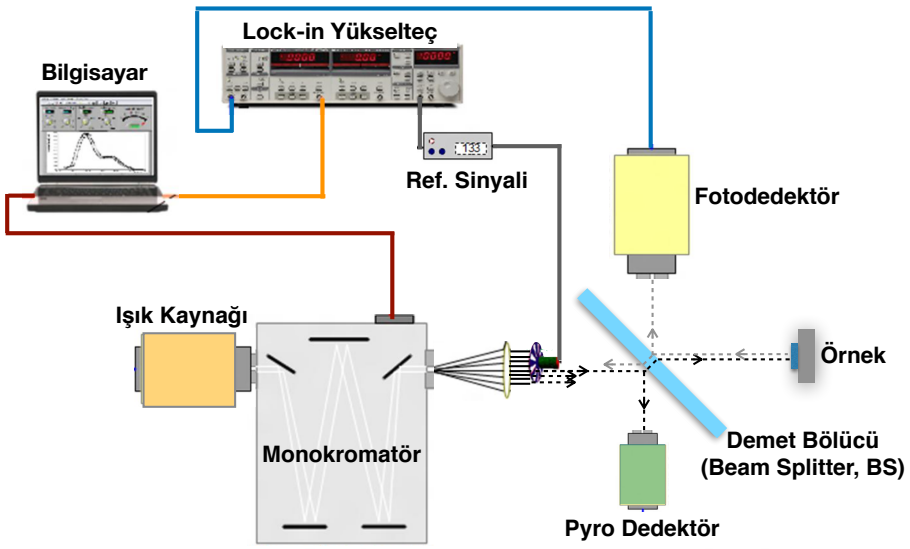


Şekil 3.11: **a**) Büyütme doğrultusu boyunca tabakalardaki alaşım konsantrasyonu değişimi ve **b**) GaAs/AlAs DBR çiftinin EDS spektrumu.

3.3.2. Optik Karakterizasyon

3.3.2.1. Yansıma

Doğadaki tüm malzemeler gelen elektromanyetik dalganın bir kısmını ya da tamamını ya yansıtırlar ya absorplarlar ya da geçirirler. Dolayısıyla optik veya optoelektronik tüm aygıtların elektromanyetik dalganın dalgaboyuna bağlı yansıma spektrumlarının belirlenmesi çok önemlidir. Dalgaboyuna bağlı yansıma katsayısı Şekil 3.12'de verilen yansıma deney düzeneği yardımıyla belirlenebilir.



Şekil 3.12: Spektral yansıma ölçüm düzeneği.

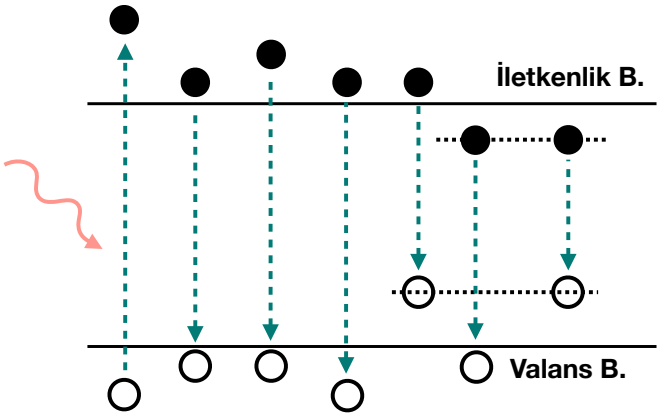
Şekil 3.12'de monokromatör (Acton 2500i) yardımıyla dalgaboylarına ayrılan beyaz ışık bileşenleri sırasıyla, ışın bölücü (chooper) ve demet bölücüden (Beam Splitter) geçerek ikiye ayrılır. Gelen elektromanyetik dalganın bir kısmı, kuazi beyaz ışığın spektrumunu alıp elde edilen R(λ) spektrumunu normalize etmek için kullanılan dalgaboyundan bağımsız fotodedektör olan Pyro dedektöre gönderilirken bir kısmı da örnek yüzeyine dik bir şekilde düşürülür. Gelen fotonlarla aynı açıyla yansıyan fotonlar tekrar aynı ışın bölücüden geçirilerek ışın bölücünün boşta kalan kısmında bulunan fotodedektöre gönderilir. Fotodedektörden çıkan elektrik sinyali Lock-in Yükselteci'ne (Stanford Research Systems SR530, LIA) gönderilir. LIA'da ışın bölücünün frekansı ile aynı frekansa sahip sinyaller yükseltilir ve bilgisayara gönderilir.

3.3.2.2. Fotoışıma

Fotoışıma olayı, yarıiletkenlerin etkin bant aralığı ve ışımalı tuzak seviyelerinin enerjileri hakkında bilgi vermektedir. Fotoışıma olayının gözlenebilmesi için örnek üzerine gönderilen elektromanyetik dalganın enerjisi ($h\nu$), örneğin bant aralığı enerjine (E_g) eşit ya da bant aralığı enerjinsinden daha büyük olmalıdır.

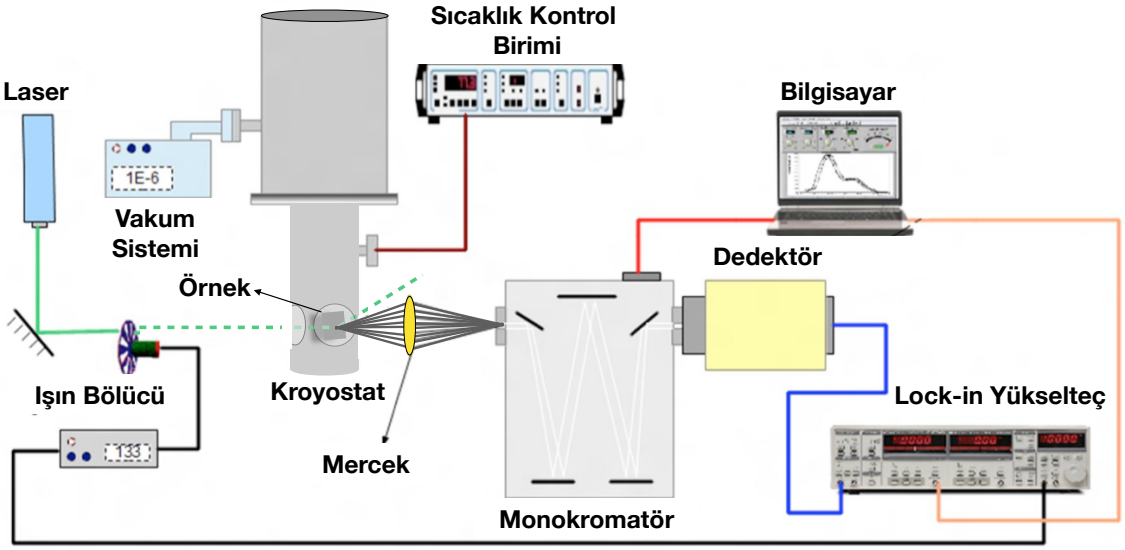
Yarıiletken üzerine gönderilen yeteri kadar enerjiye sahip fotonlar yarıiletkenin valans bandında bağlı bulunan bir elektronu gelen fotonun enerjisine bağlı olarak iletkenlik bandının üst seviyelerine çıkartır. Üst seviyelere çıkan elektron sahip olduğu fazla enerjisini fononlarla etkileşim sonucu örgüye aktararak iletkenlik bandının işgal edilebilir

en alt seviyesine iner. Elektron ışımalı ya da ışımasız olarak iletkenlik bandından valans bandına iner. Bu ışımalı geçişe fotoışıma denir. Fotoışıma enerjisi örneğin bant aralığına karşılık gelmektedir.



Şekil 3.13: Yarıiletkenlerde olası optik geçişler.

Yarıiletkenlerde optik geçişler banttan banda olabileceği gibi, iletkenlik bandındaki seviyelerden akseptör seviyesine veya derin tuzak seviyelerine, derin tuzak seviyelerinden veya donör seviyesinden valans bandına ışımalı ya da ışımasız olarak gerçekleşebilir (Şekil 3.13).



Şekil 3.14: Fotoışıma ölçüm düzeneği.

Fotoışıma deney düzeneği Şekil 3.14'da verilmektedir. 514 nm'de ışıma yapan Argon Ion laserden (Coherent Inova 70) çıkan fotonlar ışın bölücü yardımıyla belirli bir

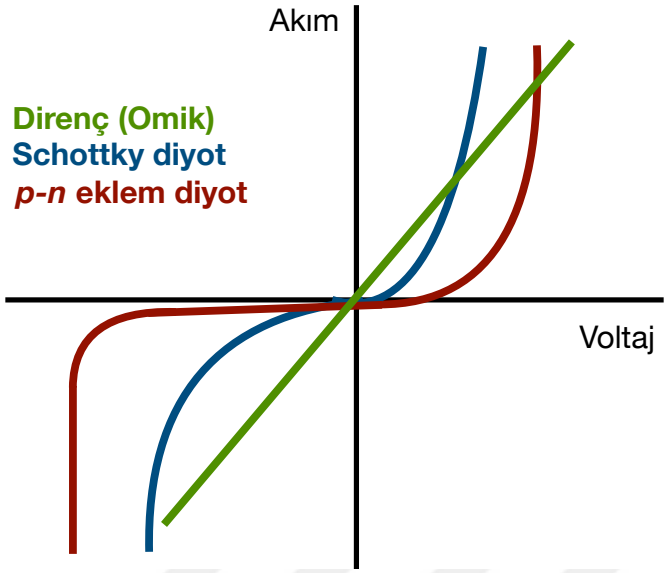
frekansta modüle edilir. Modüle edilen laser tam yansıma yapacak şekilde kroyostat içerisinde bulunan örnek üzerine gönderilir. Örnekten farklı yönlerde ve farklı dalgaboylarında çıkan fotonlar mercekler yardımıyla monokromatörün giriş bölmesine gönderilir. Monokromatör yardımıyla ışıma dalgaboyları taranarak monokromatörün çıkış bölmesinden fotodedektöre (Newport 71893, GaInAs) gönderilir. Fotoedektörde elde edilen elektrik sinyali, ışın bölücünün frekansına kitlenen LIA'ya gönderilir. LIA'da referans frekansındaki sinyaller yükseltilerek bilgisayara gönderilir. Monokromatörde belirlenen her bir dalgaboyu adımına karşı elde edilen sinyal, bilgisayar programları (Labview, Matlab vb.) yardımıyla eş zamanlı olarak elde edilir.

3.3.3. Elektriksel Karakterizasyon

3.3.3.1. Akım-Voltaj

Elektronik veya optoelektronik bir aygıt için çalışma elektrik alan aralığının ve bu elektrik alana karşı gösterdiği davranış şeklinin (omik, doğrultucu vb.) belirlenmesi önemlidir. Bu nedenle elektriksel kontaklara sahip tüm aygıtlara uygulanan en temel deneysel teknik akım-voltaj ölçümüdür.

Direnç gibi elektronik aygıtların davranışının omik olması beklenirken *p-n* eklem veya metal-yarıiletken eklem aygıtlarda uygulanma elektrik alanın yönüne bağlı olarak farklı davranış göstermektedir. İleri besleme altındaki *p-n* ekleminin arınmış bölgesi daralır, taşıyıcıların gördüğü potansiyel azalır ve akım eksponansiyel olarak artar. Geri besleme durumda ise arınmış bölgesi genişler, taşıyıcıların gördüğü potansiyel artar ve ideal durumda akım geçmemesi beklenir. Buna rağmen *p-n* veya metal-yarıiletken eklemler (Schottky diyot) geri besleme altında besleme voltajına bağlı olarak çok küçük sızıntı akımı geçer.



Şekil 3.15: Bazı eklem yapılı aygıtların ve direncin akım voltaj karakteristiği.

Bu çalışma kapsamında *p-i-n* eklem fotodedektörler incelenmektedir. Bir fotodedektör karakterize edilirken karanlık akım-voltaj davranışının yanı sıra ışık altındaki akım-voltaj davranışının da belirlenmesi önemlidir (Şekil 2.6). Fotodedektör üzerine düşürülen ışığın dalgaboyu ise örneğin merkez çalışma dalgaboyu civarında olmalıdır. Fotodedektörlerin besleme voltajına bağlı fotoakımı, her bir voltaj değerindeki ışık altındaki akımdan karanlık akım çıkartılarak belirlenir. Ayrıca sızıntı akımının çok büyük olması fotoakımı perdeleyeceği için fotodedektörlerin geri besleme altında sızıntı akımlarının ideale yakın ve besleme voltajından bağımsız olması istenmektektedir.

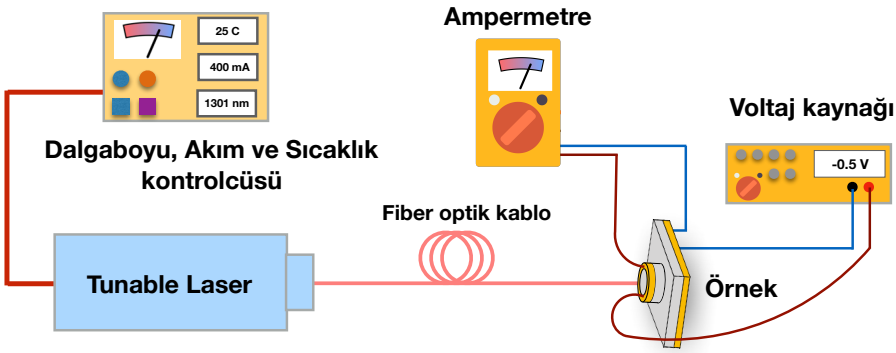
3.3.4. Elektro-Optik Karakterizasyon

3.3.4.1. Spektral Fotoakım

Fotodedektörü karakterize eden en önemli parametre, basit hesaplamalar yardımıyla, fotodedektörün hangi dalgaboyu aralığında hangi verimde çalıştığı bilgisine ulaşılan spektral fotoakım karakteristiğidir. Bir fotodedektörde spektral fotoakım, belirli bir geri besleme altında dalgaboyuna bağlı fotoakım değişimden aynı besleme voltajında ölçülen karanlık akım çıkartılarak elde edilir. Bu ölçümlerden elde edilen ham veriler Denklem 2.3 ve Denklem 2.4'te kullanılarak sırasıyla spektral duyarlılık ve spektral kuantum verimi elde edilir.

Spektral fotoakım ölçüm düzeneği Şekil 3.16'da verilmektedir. Işıma şiddeti ve

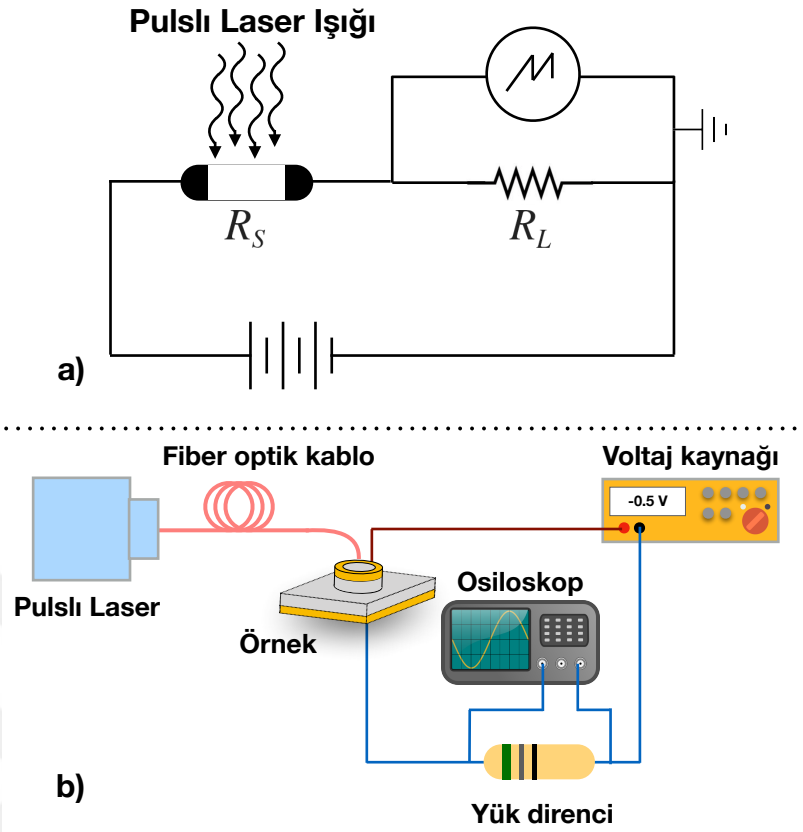
dalgaboyu ayarlanabilen laser ışığı doğrudan veya fiber optik kablo yardımıyla örnek üzerine dik olacak şekilde gönderilir. Belirli bir geri besleme voltaj değeri altında dalgaboyu değiştirilerek her bir dalgaboyu aralığında ampermetre yardımıyla akım ölçülür. Geniş aralıkta sıcaklığa bağlı ölçümler için optik penceresi veya fiber optik girişi olan kroyostatlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada oda sıcaklığı civarında (10-40 ^{o}C) spektral fotoakım ölçümleri yapıldığı için örneğin sıcaklığı örnek altına yerleştirilen soğutucu yardımıyla ayarlanmıştır.



Şekil 3.16: Fotoakım ölçüm düzeneği.

3.3.4.2. Transiyent Fotoiletkenlik

Transiyent fotoiletkenlik ölçümlerinden yararlanılarak fotodedektörün tepki zamanı, bant genişliği ve gürültüsüne ilişkin parametrelere ulaşılmaktadır. Bunun için fotodedektörün aktif bölgesinin bant aralığı enerjisinden daha büyük enerjili, pulse genişliği örneğin yanıt süresinden daha kısa olan laser ve yüksek hızlı osiloskoba ihtiyaç duyulmaktadır. Transiyent fotoiletkenlik ölçüm düzeneği ve elektronik devresi Şekil 3.17'de verilmektedir.



Şekil 3.17: Transiyent fotoiletkenlik ölçüm düzeneği.

Şekil 3.17'de görüldüğü gibi laser ışığı tercihe bağlı olarak doğrudan açık optik olarak veya fiber optik kablo yardımıyla örnek üzerine düşürülür. Birbirine seri bağlı örnek ve yük direncinden oluşan devreye geri besleme voltajı uygulanır. Örnek üzerine ışık düştüğü zaman elektron-boşluk çifti oluşur. Böylece, osiloskop yardımıyla yük direnci üzerinden ölçülen voltaj artar. Laser ışığı kapandığı zaman yük direnci üzerinden ölçülen voltajın genliği eksponansiyel olarak azalır (Şekil 3.18). Fotodedektöre seri bağlı yük direnci üzerinde oluşan potansiyel fark (çıkış voltajı),

$$V_D = V(1 - e^{-t/\tau}) \tag{3.3}$$

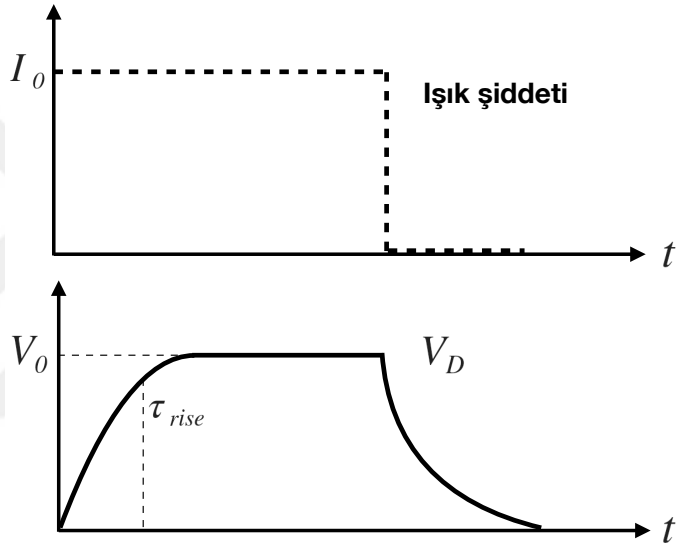
ifadesi ile verilmektedir. Burada V geri besleme voltajını, t zamanı ve τ zaman sabitini ifade etmektedir. τ zaman sabiti ise RC zaman sabiti ($\tau_{RC} = RC$) ve taşıyıcıların oluştukları yerden kontaklara gidende kadar geçen sürenin ($\tau_{tr} = W/v_s$) toplamıdır.

$$\tau = \tau_{RC} + \tau_{tr} \tag{3.4}$$

Fotodedektörün yanıt zamanı eğrisinin %10 ve %90 değeri farkından elde edilen yükselme zamanından (rise time) yararlanılarak fotodedektörün tepki hızı (rise time, τ_{rise}) elde edilir.

$$\tau_{rise} = (\ln 9)\tau_{RC} + \tau_{tr} \tag{3.5}$$

Bölüm 2.2.1.3'te bahsedildiği gibi fotodedektörün hızının belirlenmesinin ardından sırasıyla Denklem 2.8, Denklem 2.9 ve Denklem 2.10 kullanılarak fotodedektörün bant genişliği, gürültüsü ve dedektivitesi belirlenebilir.



Şekil 3.18: I_0 şiddetinde zamanla basamaksı değişen bir ışık sinyaline fotodedektörün yanıtı [45].

4. BULGULAR

Bu tez çalışması kapsamında beş farklı yapıdaki fotodedektör örneklerin tasarımı, fabrikasyonu ve karakterizasyonu yapılmıştır. Bu yapılar ayrıca kendi içlerinde aktif bölgesindeki kuantum kuyusu sayısına ve DBR sayısına bağlı olarak incelenmektedir. Elde edilen tüm analitik ve deneysel sonuçlar, bu bölümde örnek isimlerinin altında karakterizasyon tekniklerine bağlı olarak ayrı ayrı verilerek tartışılmaktadır.

4.1. KUAZİ-KAVİTELİ GaInNAs-GaNAs *p-i-n* ÇIĞ FOTODEDEKTÖRLER

4.1.1. Aygıt Tasarımı

3. Bölüm'de söz edildiği gibi fotodedektörlerin aktif bölgesinin bant aralığı enerjisi BAC modeli (Denklem 3.1) ve tabakalararası gerilme Vegard Yasası (Denklem 3.2) kullanılarak hesaplanmıştır. *n*- ve *p*-tipi tabakaların katkı konsantrasyonları, "sürüklenme-difüzyon modeli"ne termiyonik emisyon ve tünelleme akımlarının hesaba katıldığı Fermi-Dirac istatistiğinin çözümlerini içeren yarıiletken tabanlı aygıt simülasyon programı SimWindows kullanılarak belirlendi [84]. Uygun yansıtıcılığın belirlenmesi için DBR tabaklarının kalınlık ve periyodu ise TMM kullanılarak hesaplanmıştır. 3. Bölüm'de verilen fotodedektör yapıları, Şekil 4.2a ve Şekil 4.2b'deki yapıların kıyaslanabilir olarak sunulması amacıyla bu bölümde tekrar verilmektedir (Şekil 4.1).

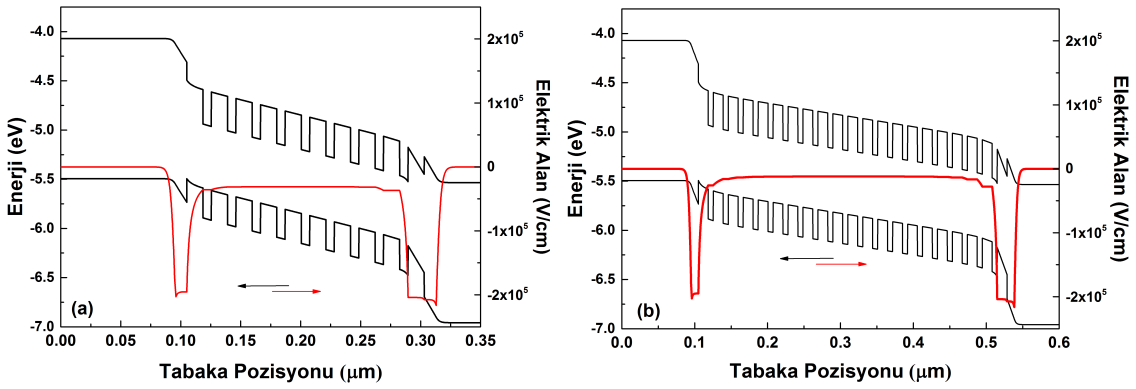
p^+	$GaAs$		250 nm	p^+	$5x10^{18}cm^{-3}$
i	$GaAs$		10 nm	i	
	$GaN_{0.035}As_{0.965}$		13 nm	i	
	$Ga_{0.73}In_{0.27}N_{0.025}As_{0.975}$		7 nm	i	$(Sb) : 1x10^{-8}torr$
	$GaN_{0.035}As_{0.965}$		13 nm	i	
	$GaAs$		10 nm	i	
n^+	$GaAs$		70 nm	n^+	$3.1x10^{18}cm^{-3}$
	$AlAs$		113 nm	n^+	$1.5x10^{18}cm^{-3}$
	$GaAs$		98 nm	n^+	$7x10^{18}cm^{-3}$
	$GaAs$		200 nm	n^+	$7x10^{18}cm^{-3}$
	$GaAs$	Alttaş	350 μm	n^+	$> 5x10^{18}cm^{-3}$

X 9 / 20 Kuantum Kuyusu

X 15 (DBR)

Şekil 4.1: Kuazi-kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörlerin yapısı.

9 ve 20 kuantum kuyulu fotodedektörlerin SimWindows ile hesaplanan bant diyagramları ve denge durumunda iç elektrik alan dağılımları Şekil 4.2'de verilmektedir. SimWindows programı GaAs/AlGaAs hetero-eklem örnekler için tasarlanmış olup bant süreksizlik dağılımı da bu malzemelere göre hesaplanmaktadır. Kapalı kaynak program olan SimWindows'un bant süreksizlik dağılımı $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaN_zAs_{1-z}$ tabanlı yapılara göre ayarlanamadığı için Şekil 4.2'de verilen bant süreksizlikleri nicel olarak gerçek durumu yansıtmamaktadır. Ancak elektrik alan dağılımı gerçeği yansıtmaktadır. SimWindows programından yararlanılarak elde edilen sonuçlardan sadece denge durumunda iç elektrik alan dağılımları dikkate alınmıştır. Hesaplamalara göre katkı konsantrasyonuna bağlı olarak denge durumunda 1×10^5 V/cm iç elektrik alan büyüklüğüne ulaşılmaktadır.



Şekil 4.2: Kuazi-kaviteli **a)** 9 ve **b)** 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin denge durumu bant yapıları ve iç elektrik alan dağılımları.

Tabakasal yapıda aygıt tasarımında bir diğer önemli parametre de tabakalararası örgü

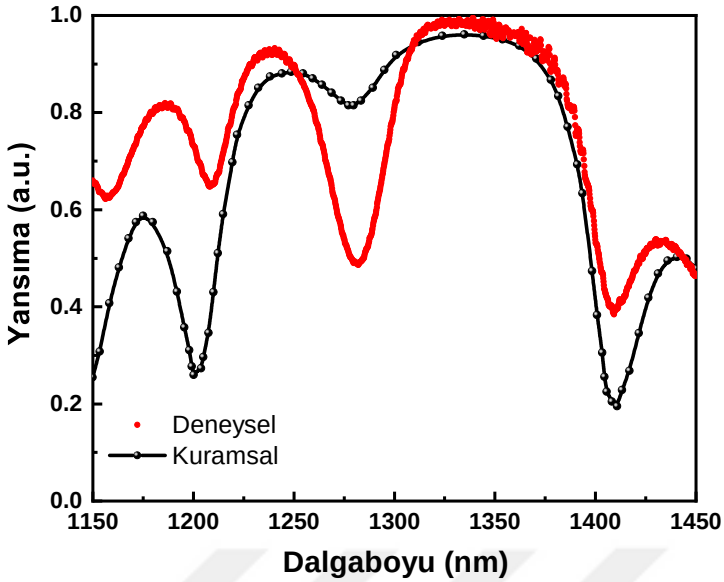
uyumudur. Alaşımı oluşturan elementlerin yüzdece konsantrasyonları değiştirilerek tabakalararasındaki gerilmenin (strain) belirli öçülerde azaltılması sonucu örgü uyumu sağlanabilir. a_S ve a_L sırasıyla alt ve üst tabakaların örgü sabiti temsil ettiği durumda, tabakalararası gerilme $(a_S - a_L)/a_L$ bağıntısıyla belirlenmektedir. Bu örneklerin aktif bölgesi $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ kuantum kuyusu sistemlerinden oluşmaktadır. Her bir kuyu ve bariyer arasındaki gerilme (compressive strain) 0.0185 olarak hesaplanmıştır. Bu gerilmenin büyüklüğü literatürdeki tabakasal yapıdaki fotodedektörlerle kıyaslandığında oldukça düşüktür.

Bu çalışmanın anafikrini rezonans kaviteli fotodedektörlerin tasarımı, fabrikasyonu ve karakterizasyonu oluşturmaktadır. Rezonans kavitesinin etkilerinin incelenmesi için öncelikle sadece alt DBR ve aktif bölgeden oluşan fotodedektörlerin özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle 15 alt GaAs/AlAs (113 nm / 98 nm) DBR çiftine ve rezonans kaviteli fotodedektörlerle aynı absorpsiyon bölgesine sahip fotodedektörler incelenmiştir.

4.1.2. Yansıma ve Fotoışıma Ölçüm Sonuçları

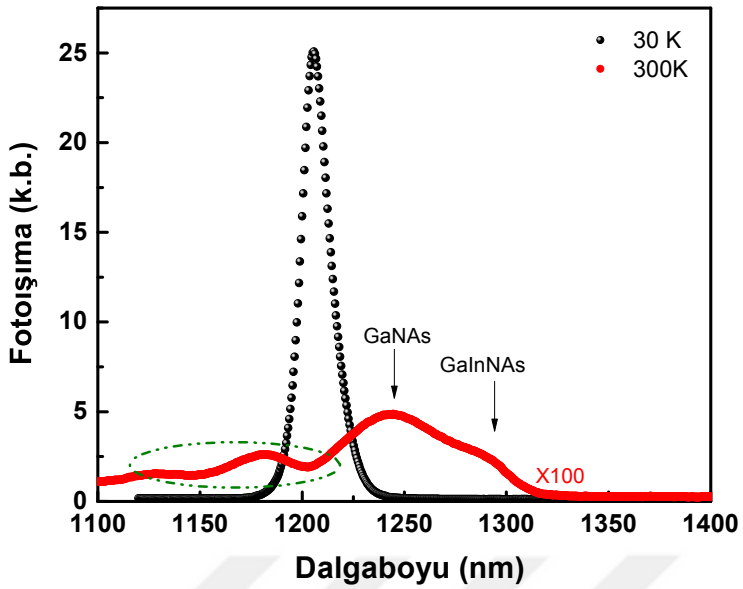
Kuazi-kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörlerin oda sıcaklığında yansıma ve sıcaklığa bağlı (30-300 K) fotoışıma ölçümleri yapılmıştır. TMM kullanılarak yapılan dalgaboyuna bağlı kuramsal ve oda sıcaklığında ölçülen deneysel yansıma spektrumu Şekil 4.3'te verilmektedir. Şekil 4.3'te verilen yansıma spektrumunda kırmızı renkle gösterilen deneysel yansıma spektrumu iken siyah renkle gösterilen kuramsal yansıma spektrumudur.

Tez kapsamında çalışılan fotodedektörlerin 1.3 μm'de absorpsiyon penceresi olması istenmiştir. Ancak bu tasarım alt ve üst DBR tabakasına sahip rezonans kavitesi göz önüne alınarak yapıldığı için absorpsiyon rezonans penceresi 1.3 μm 'in biraz dışarısında gözlenmiştir.



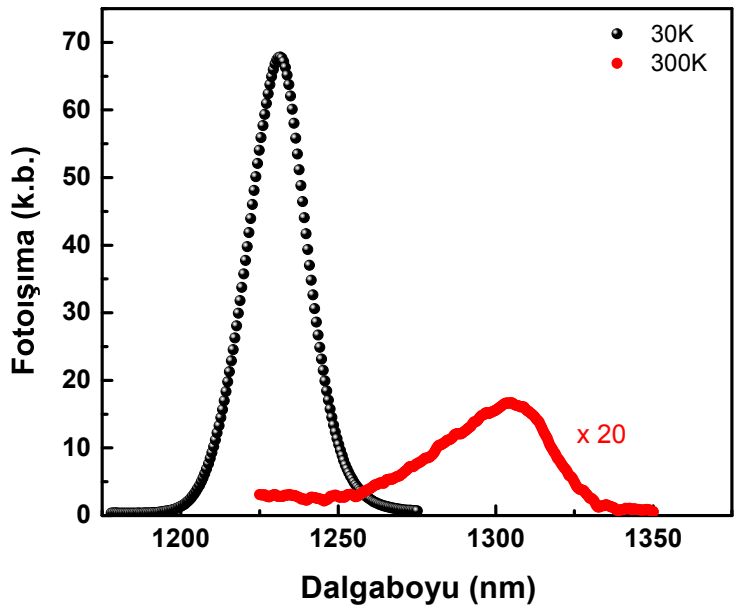
Şekil 4.3: Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin kuramsal ve deneysel yansıma spektrumu.

Kuazi-kaviteli 9 kuantum kuyulu fotodedektörün 30 ve 300 K fotoışıma ölçüm sonuçları Şekil 4.4'te verilmektedir. Siyah renk 30 K sonuçlarını, kırmızı renk 300 K sonuçlarını temsil etmektedir. 300 K sıcaklığı ölçümlerinde oklarla gösterilen pikler BAC hesaplamalarıyla kıyaslandığında sırasıyla $GaN_{0.035}As_{0.965}$'ın ve $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}$'ın banttan banda geçişine karşılık geldiği anlaşılmaktadır. Düşük sıcaklıklarda kuantum kuyusundaki optik geçişler baskın iken $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ kuantum kuyusu sisteminin bant süreksizlikleri ($\Delta E_c = 65$ meV, $\Delta E_v = 18$ meV) küçük olduğu için oda sıcaklığına gidildikçe bariyerdeki optik geçişlerin daha baskın olduğu gözlenmektedir. Ayrıca oda sıcaklığı sonuçlarında gözlenen, düşük dalgaboylarında gözlenen osilasyonların alt DBR'ların yansıma değişiminin etkisidir. Düşük sıcaklıklarda kuantum kuyusundan gelen fotoışıma şiddeti daha baskın olduğu için bu osilasyonlar gözlenmemektedir.



Şekil 4.4: Kuazi-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 fotodedektörün 30 ve 300 K sıcaklığındaki fotoışıma ölçüm sonuçları.

Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün 30 ve 300 K sıcaklığı fotoışıma ölçüm sonuçları Şekil 4.5'te verilmektedir. Şekil 4.4'te ve Şekil 4.5'te görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça örgü titreşimlerinin (fonon yoğunluğunun) artmasına ve kusurlara bağlı ışımalı geçiş hızının azalması nedeniyle fotoışıma şiddeti azalmaktadır.

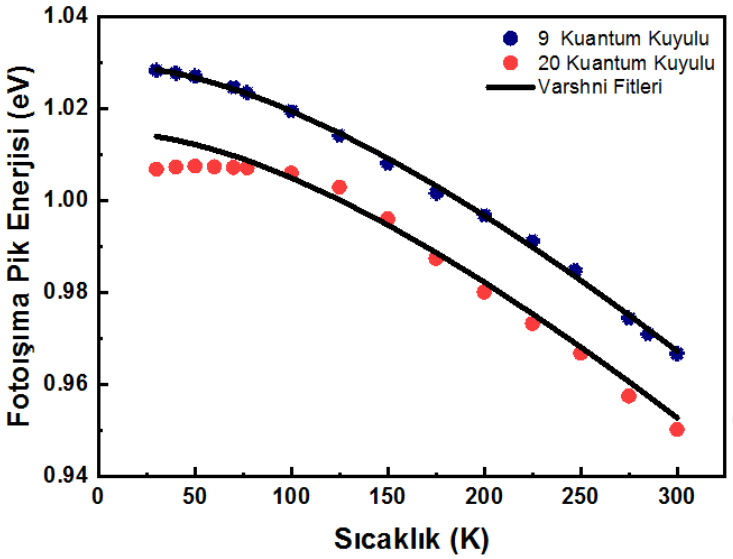


Şekil 4.5: Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün 30 ve 300 K sıcaklığı fotoışıma ölçüm sonuçları.

Kuazi-Kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu çığ fotodedektörlerin belirli sıcaklık aralıklarında fotoışıma pik enerjileri belirlenerek, yarıiletkenlerin bant aralığının sıcaklığa bağlılığının modellemesi olan "Varshni bağıntısı" ile fit edilerek Debye sıcaklığı ve termal genleşme katsayısı belirlenmiştir. Varshni bağıntısı [85],

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha_t T^2}{\beta_0 + T} \tag{4.1}$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada $E_g(0)$ 0 K'deki bant aralığı enerjisini, α_t termal genleşme katsayısını, β_0 Debye sıcaklığını ve T kristal (örgü) sıcaklığını temsil etmektedir.



Şekil 4.6: Kuazi-kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin sıcaklığa bağlı fotoışıma pik enerjileri.

Yarıiletken bileşikler için Tablo 4.1'de verilen Debye sıcaklıkları kullanılarak "Vegard yasası" yardımıyla $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}$ için Debye sıcaklığı hesaplanırken termal genleşme katsayısı fit parametresi olarak alınmıştır.

Tablo 4.1: Bazı ikili bileşik yarıiletkenlerin Debye sıcaklıkları [86].

Bileşik	**GaAs**	**InAs**	**GaN**	**InN**
Debye sıcaklığı (K)	360	262	870	700

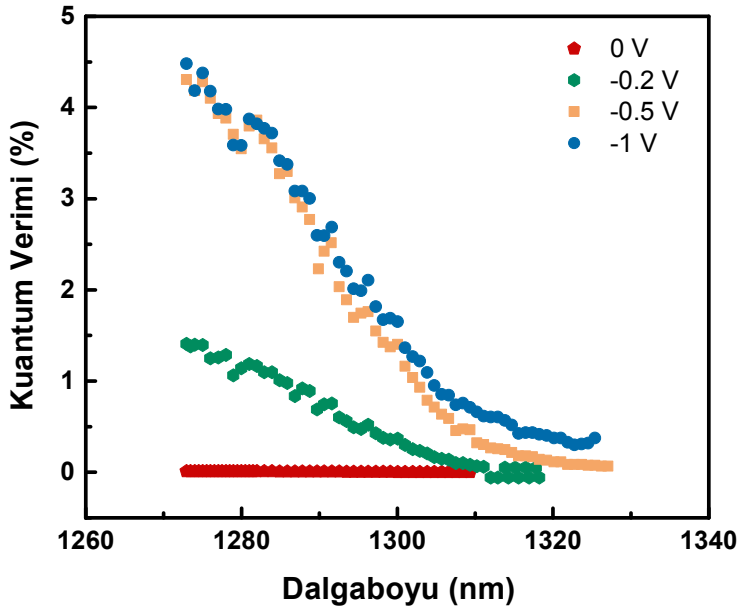
Bu iki örnek arasındaki tek fark kuantum kuyusu sayısı olduğu için Debye sıcaklığı ve termal genleşme katsayısı aynı olup sırasıyla, 346 K ve 4.43×10^{-4} eV/K'dir.

Sıcaklığa bağlı davranışları aynı olan iki örneğin her bir sıcaklıktaki fotoışıma pik enerjileri arasında 20 meV enerji farkı gözlenmektedir. Bu fark, kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu çığ fotodedektörün tasarımı sırasında alt DBR tabaka kalınlıklarının yanlış hesaplanmasından kaynaklamaktadır. Her iki fotodedektörün de birim sıcaklık başına bant aralığı enerjisindeki değişim 2.75×10^{-4} eV/K olarak elde edilmektedir.

4.1.3. Fotoakım Ölçüm Sonuçları

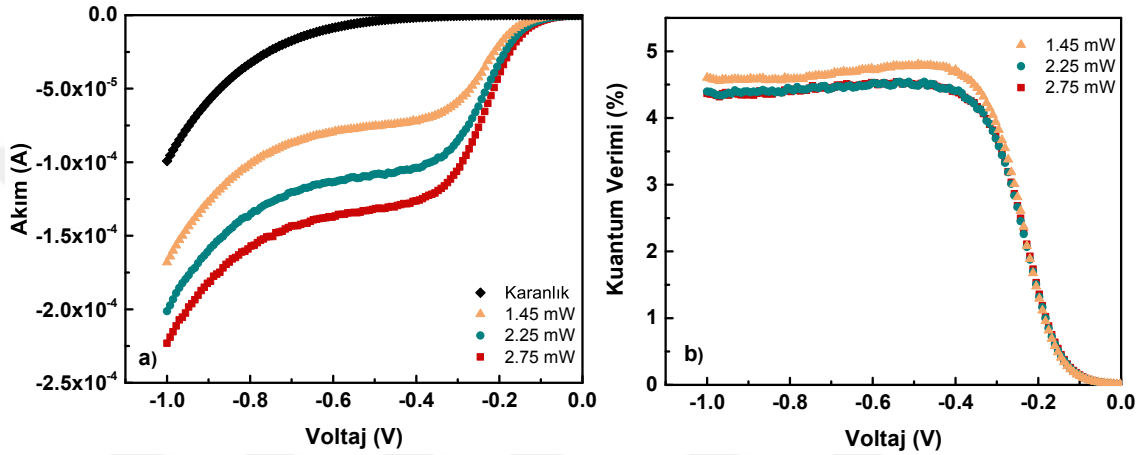
Kuazi-kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu çığ fotodedektörlerin oda sıcaklığında dalgaboyuna ve geri besleme voltajına bağlı fotoakım ölçümleri yapılarak her iki örneğin spektral duyarlılıkları ve kuantum verimleri belirlendi.

Kuazi-kaviteli 9 kuantum kuyulu çığ fotodedektörün 500 μW laser ışığı altında alınan spektral fotoakım spektrumu Şekil 4.7'de verilmektedir. İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Nano-Optoelektronik Araştırma Laboratuvarları bünyesinde bulunan dalgaboyu değiştirilebilir laserin çalışma dalgaboyu aralığı 1270-1340 nm arasında olduğu için kuazi-kaviteli 9 kuantum kuyulu çığ fotodedektörün fotoakım spektrumu yarım kalmıştır. 400 W'lık beyaz ışık kaynağı dispers edilerek bu deney yapılmaya çalışılmış olup dispersiyon sonucu dalgaboyu başına optik güç çok düştüğü için bu ölçümler yapılamamıştır.



Şekil 4.7: Kuazi-kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün spektral kuantum verimi.

Aygıt eksikliği nedeniyle spektrum tamamlanamasa da geri beseleme voltajına bağlı olarak her bir dalgaboyunda kuantum verimleri karşılaştırılabilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında incelenen tüm örneklerde iç kazanca ulaşmak hedeflenmektedir. Şekil 4.7'de verilen sonuçlara göre kuazi-kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün kuantum verimi 0.5 V geri besleme voltajına kadar artarken 0.5 V 'tan sonra değişmemektedir. Bu davranışın daha detaylı incelenmesi için maksimum kuantum verimine ulaşılan dalgaboyunda geri besleme voltajına bağlı fotoakım ölçümlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

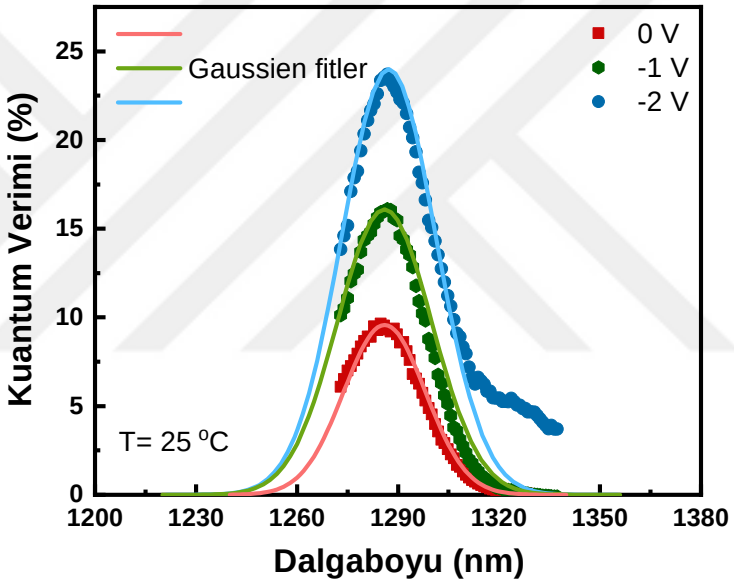


Şekil 4.8: Kuazi-kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün **a)** karanlıkta ve 1270 nm dalgaboylu ışık altında akım-voltaj grafiği, **b)** besleme voltajına bağlı kuantum verimi.

Şekil 4.8a'da verilen akım-voltaj grafiğinde görüldüğü gibi ışık altında 0.4 V geri besleme voltajına kadar akım hızla armaktadır. -0.8 V geri besleme voltajından sonra aygıtın sıcaklığı arttığı için fotoakım karanlık akım davranışını izlemektedir. Besleme voltajına ve laser gücüne bağlı maksimum kuantum veriminin belirlenmesi için voltaja bağlı kuantum verimleri hesaplanmıştır (Şekil 4.8b). Şekil 4.8b'de 0-0.5 geri besleme voltaj aralığında kuantum veriminde eksponansiyel artış gözlenirken 0.5-0.8 geri besleme voltaj aralığında uygulanan voltajdan bağımsız hale gelmektedir. 0-0.5 geri besleme voltaj aralığında eksponansiyel artışın kaynağının, yasak bant aralığındaki tuzaklardaki taşıyıcıların iyonize olarak akıma katkı sağlaması olduğu düşünülmektedir.

Seyreltik azotlu GaNAs, GaInNAs gibi aşırı uyumsuz yapılar GaAs veya GaInAs için belirlenen ideal büyütme sıcaklığının altında düşük sıcaklıklarda (<500 °C büyütülmektedir [87, 88]. Bu durumun sonucu olarak düşük sıcaklıkta büyütülen GaAs içerinde enerjisi GaAs'in enerji bant aralığın ortalarında (0.7 eV) As_{Ga} (As atomunun

Ga atomlarının yerine oturması sonucu oluşan nokta kusur) kusurları ve seyreltik azotlu yapılarda gözlenen N-N, N-As, V_{Ga} vs. kusurlar oluşmaktadır [89]. Kuazi-kaviteli 9 kuantum kuyulu çığ fotodedektörün hem kuantum kuyusu hem de bariyer malzemesi düşük büyütme sıcaklığında büyütüldüğü için yapı içerisinde bu kusurların olması beklenmektedir [89, 90]. Kuazi-kaviteli 9 kuantum kuyulu çığ fotodedektörün bant aralığı enerjisi yaklaşık olarak 0.97 eV olduğu için olası As_{Ga} kusurları yaklaşık 0.4-0.5 eV civarındadır [87, 88]. Akım-voltaj grafiğindeki satürasyona başlama aralığı bu enerji değerlerine karşılık gelmektedir. Ayrıca literatürde kontrollü olarak As_{Ga} kusurların oluşturulduğu düşük sıcaklıkta büyütülen GaAs tabanlı örneklerde As_{Ga} kusurlarından kaynaklı bant-kusur seviyesi geçişine dayalı çalışan aygıtlar bulunmaktadır [87, 88].

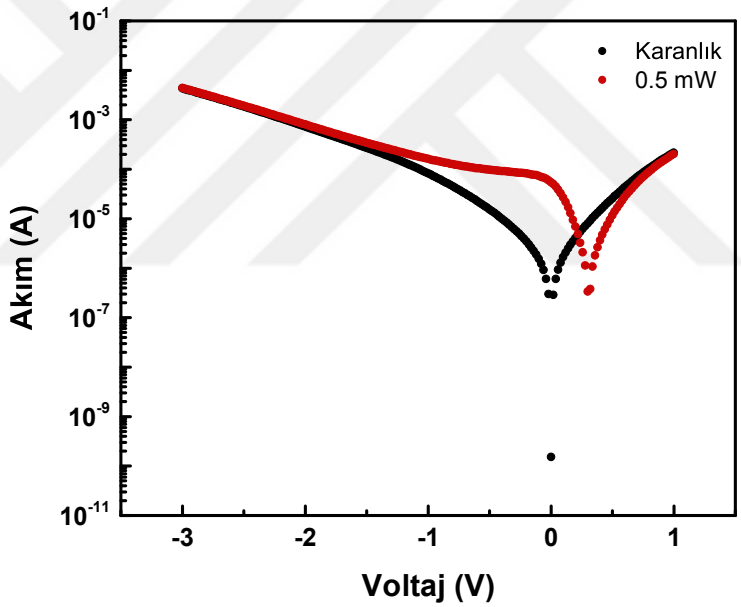


Şekil 4.9: Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün dalgaboyuna bağlı kuantum verimi.

Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu çığ fotodedektörün 1 mW gücünde laser altında alınan dalgaboyuna bağlı kuantum verimi Şekil 4.9'da verilmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi laserin çalışma dalgaboyu aralığı, bu örneğin karakteristiğine uygun olmadığı için dalgaboyuna bağlı fotoakım ölçümleri yarım kalmaktadır. Besleme voltajına bağlı olarak elde edilen spektrumların merkez dalgaboyları ve FWHM değerleri belirlenebildiği için Gaussien fit yapılabilmiştir. Grafikte noktalar deneysel datayı, çizgiler ise Gaussian fitleri temsil etmektedir. Bu fotodedektörde 2 V geri besleme voltajında %25 kuantum verimine ulaşılmaktadır. Bu ölçümlerin alındığı örnek çapı 200 μm'dir. Örnek boyutları nispeten

büyük olduğu için ve pasivizasyon işlemi uygulanamadığı için yüksek geri besleme voltajlarında, örneklerde ısınma problemi açığa çıkmaktadır. Şekil 4.12'de görüldüğü gibi 3 V geri besleme altında daha yüksek duyarlılığa ulaşılmaktadır. Daha düşük boyutlarda ısınma problemini azaltarak daha yüksek elektrik alan uygulanabileceği için daha yüksek kuantum verimlerine çıkılabileceği öngörülmektedir.

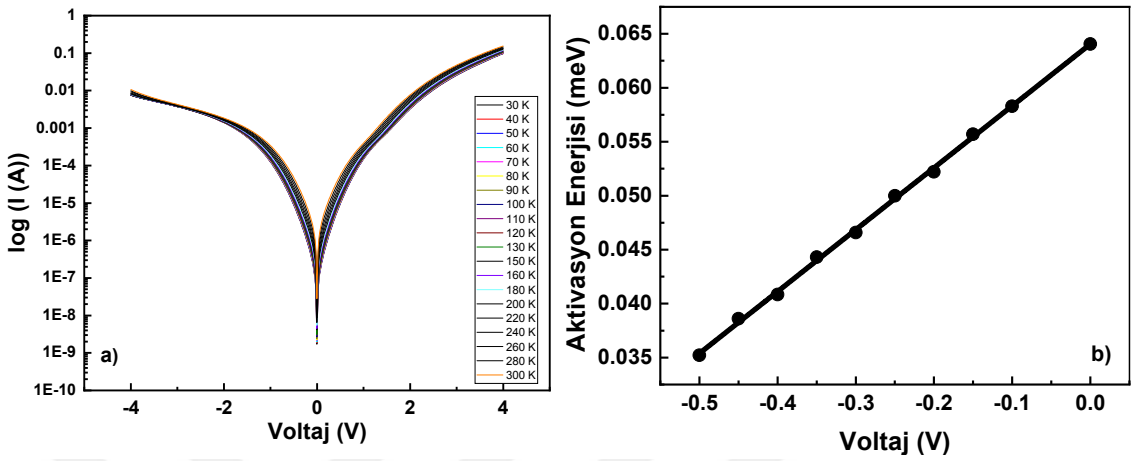
Karanlıkta ve ışık altında ölçülen akım-voltaj sonuçları Şekil 4.10'da verilmektedir. Karanlık akım 0 V'ta -0.15 nA iken $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ kuantum kuyusu sisteminin iletkenlik ve valans bant süreksizlikleri düşük olduğu için hızla artarak 3 V geri beslemede -4.3 mA'e ulaşmaktadır. 1284 nm dalgaboylu ışık altında (0.5 mW) ölçülen akım-voltaj sonuçlarından elde edilen fotoakım 0 V'ta -54 μA iken, 3 V'ta -95 μA'dir.



Şekil 4.10: Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün karanlıkta ve 1286 nm ışık altında elde edilen akım-voltaj grafiği.

Fotoakım-voltaj grafiğinden elde edilen duyarlılık-voltaj grafiği Şekil 4.12'de verilmektedir. Fotodedektörlerin duyarlılığı dalgaboyuna bağlı olarak değiştiği gibi besleme voltajına bağlı olarak da değişmektedir. Şekil 4.12'de verilen duyarlılık-voltaj grafiğinde 0.5 V geri besleme voltajına kadar ve 2.5 V geri beslemeden sonra hızlı artış gözlenmektedir. Hesaplamalara göre 3 V geri beslemede arınmış bölgeye 40 kV/cm elektrik alan düşmektedir. Bu elektrik alanın büyüklüğü GaInNAs-tabanlı sistemlerde

impakt iyonizasyon gerçekleşmesi için yeterlidir. 0.5 V geri besleme voltajına kadar ve 2.5 V geri beslemeden sonra gözlenen hızlı artışın impakt iyonizasyondan kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.11: Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün **a)** sıcaklığa bağlı akım-voltaj grafiği, **b)** besleme voltajına bağlı aktivasyon enerjisi değişimi.

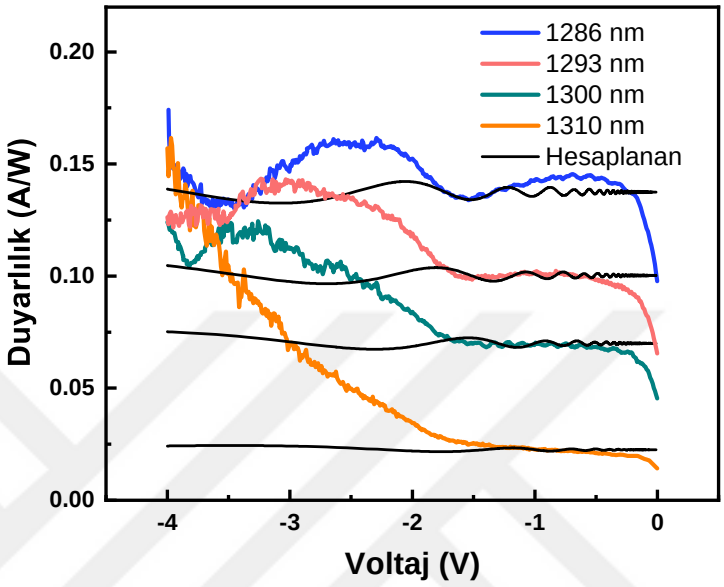
Şekil 4.11a'da verilen sıcaklığa bağlı akım-voltaj grafiğinin analizlerinden taşıyıcıların aktivasyon enerjileri belirlenmektedir. Deneysel ln(I/T) ifadesi ve aktivasyon enerjisi arasındaki ilişkisi,

$$ln\left(\frac{I}{T}\right) \propto \left(-\frac{E_a}{k_B T}\right) \tag{4.2}$$

ifadesiyle verilemektedir. Burada T örgü sıcaklığını, E_a aktivasyon enerjisini temsil etmektedir. Aktivasyon enerjisi sabit besleme voltajında ln(I/T)-1/T grafiğinin eğiminden belirlenmektedir. Hesaplanan aktivasyon enerjilerinin besleme voltajına bağlı değişimi Şekil 4.11b'de verilmektedir. 0 ve 0.5 volt geri besleme değerlerinden aktivasyon enerjileri sırasıyla 64 meV ve 35 meV'dur. Düşük bant süreksizlikleri ve düşük aktivasyon enerjileri sayesinden termiyonik emisyonun baskın olduğu ve buna bağlı olarak da hem kuantum kuyusunda hem de bariyerde impakt iyonizasyonun gerçekleştiği düşünülmektedir.

0.5 V geri beslemeden sonra aygıtın duyarlılığında elektrik alana bağlı osilasyonlar gözlenmektedir. -0.5 ve -2.5 V aralığındaki bu osilasyonların Franz-Keldysh osilasyonları (FKO) olduğu düşünülmektedir. FKO foton dalgaboyuna ve/veya besleme elektrik

alanına bağlı olarak elektronların ve/veya boşlukların dalga fonksiyonlarının bant içine tünellemesi sonucu absorpsiyon katsayısının değişmesi şeklinde açıklanmaktadır [91, 92]. Literatürde, FKE osilasyonları yüksek akımda çalışan "kısmen arınmış bölgeli fotodedektörler" (partially depleted photodetectors, PDAs)'de gözlenmektedir [93–95].



Şekil 4.12: Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün duyarlılık-voltaj grafiği.

Absorpsiyon dalgaboyunda gözlenen besleme voltajına bağlı osilasyonlar "Lambert modeli [96]" ile hesaplanarak, geri besleme voltajına bağlı duyarlılık değişimine fit edilmiştir. Gelen fotonun enerjisine ve elektrik alana bağlı absorpsiyon katsayısının değişimi;

$$\alpha(\omega,E)=\pi\phi\hbar\sum_{i=1,2}\frac{2\omega_i\beta^{1/3}}{(2\mu_1)^{3/2}+(2\mu_2)^{3/2}}(Ai'(y_0)^2-y_0Ai(y_0)^2) \tag{4.3}$$

ifadesi ile verilmektedir [96–98]. Burada β, μ_1, μ_2 ve y_0 sırasıyla,

$$\beta=\frac{2\mu E}{\hbar^2} \tag{4.4}$$

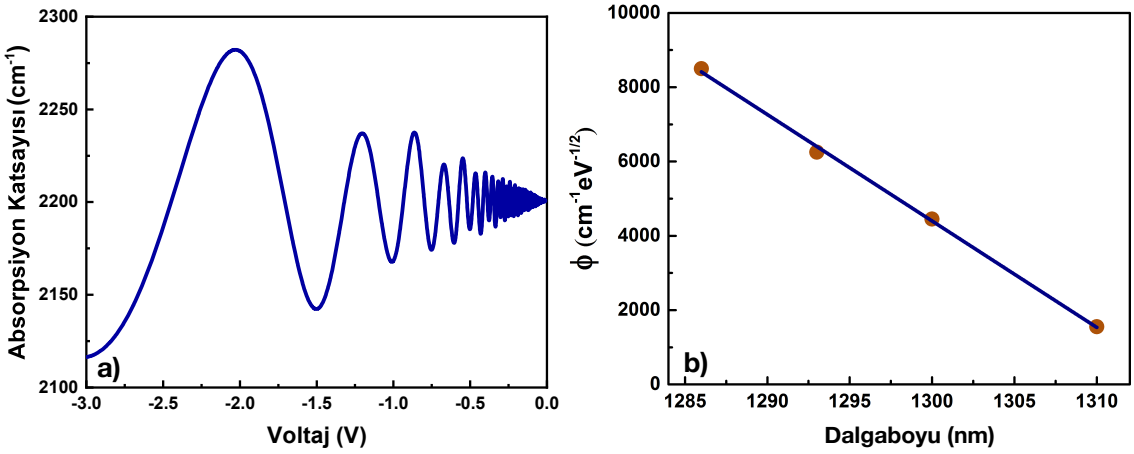
$$\mu_1=\left[\frac{1}{\mu_e{}^*}+\frac{1}{\mu_{hh}{}^*}\right]^{-1} \tag{4.5}$$

$$\mu_2=\left[\frac{1}{\mu_e{}^*}+\frac{1}{\mu_{lh}{}^*}\right]^{-1} \tag{4.6}$$

$$y_0 = \frac{2\mu}{\hbar^2 \beta^{3/2}}(E_g - \hbar\omega) \tag{4.7}$$

deklemleriyle verilmektedir. Denklemlerde E uygulanan elektrik alanı, F elektrik alan kuvvetini, ω gelen fotonun frekansını, μ indirgenmiş kütleyi, m_e^* elektron etkin kütlesini, m_{hh}^* ağır boşlukların etkin kütlesini, m_{lh}^* hafif boşlukların etkin kütlesini ve ϕ fit parametresini temsil etmektedir. ϕ fiziksel anlam olarak, banttan banda geçişte elektron-foton etkileşiminin matris elemanı ile ilişkilidir.

Hesaplamalarda kullanılan tüm parametreler Tablo 4.2'de verilmektedir. Denklem 4.3'ü kullanarak elde edilen geri besleme voltajına bağlı absorpsiyon katsayısı değişimi Şekil 4.13'de verilmektedir. Hesaplamalara göre absorpsiyon katsayısı geri besleme voltajına bağlı olarak 2200 cm^{-1} civarında osilasyon yapmaktadır. Bu değer literatürde verilen deneysel sonuçlarla uyumludur [99].



Şekil 4.13: Geri besleme voltajına bağlı absorpsiyon katsayısı değişimi.

Tablo 4.2: Hesaplamalarda kullanılan parametreler.

Parametre	Büyüklüğü	Birimi
m_0	5.686×10^{-12}	eVs^2/m^2
$\mu_e{}^*$	$0.1m_0$	eVs^2/m^2
$\mu_{hh}{}^*$	$0.65m_0$	eVs^2/m^2
$\mu_{lh}{}^*$	$0.02m_0$	eVs^2/m^2
ϕ	0.925×10^4	$cm^{-1}eV^{-1/2}$

Denklem 4.3'de hesaplanan absorpsiyon değişimi,

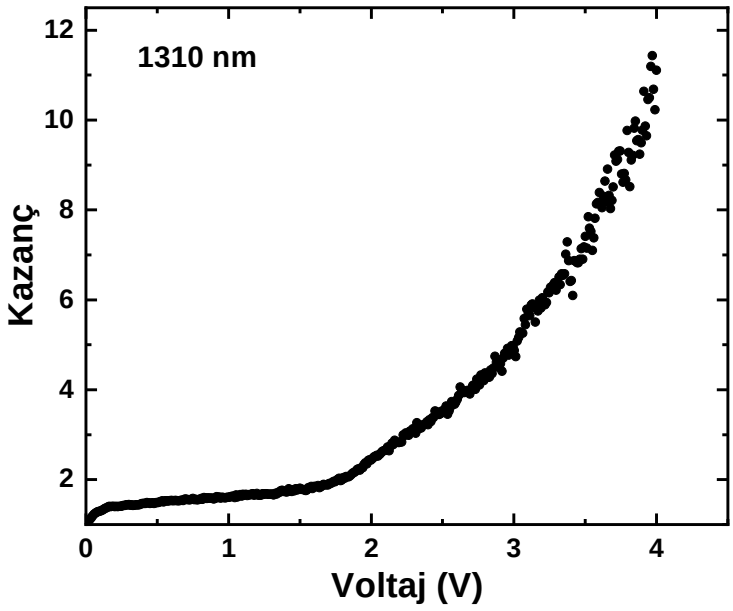
$$R = \frac{\eta e}{\hbar\omega}\left(1 - e^{-\alpha(\omega,E)d}\right) \tag{4.8}$$

ifadesi kullanılarak elektrik alana bağlı duyarlılık değişimi elde edilmektedir [95]. Geri besleme voltajına bağlı duyarlılık grafiğinde sadece absorpsiyon katsayısı değişiminin görülebilmesi için kuantum verimi %100 olacak şekilde Denklem 4.3'te $\eta = 1$ alınmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.12'de deneysel sonuçlarla birlikte verilmektedir.

Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu çığ fotodedektörde impakt iyonizasyonun fotoakıma katkısının gösterilerek fotodedektörün kazancının belirlenmesi için kazanç faktörü (multiplication factor, M),

$$M(V) = \left(I_T - I_D\right)/I_u \tag{4.9}$$

ifadesiyle hesaplanmaktadır. Burada I_T toplam akımı, I_D karanlık akımı ve I_u kazancın gözlenmediği besleme voltajı değerindeki akımı temsil etmektedir. Fotodedektörün FKO'larından etkilenmediği dalgaboyu olan 1310 nm dalgaboyundaki fotoakım ölçümlerinden elde edilen kazanç grafiği Şekil 4.14'te verilmektedir. 4 V geri beslemede 12 kat kazanç elde edilmesine rağmen FKO'ları olmasaydı merkez dalgaboyunda daha yüksek kazanç elde edileceği düşünülmektedir.

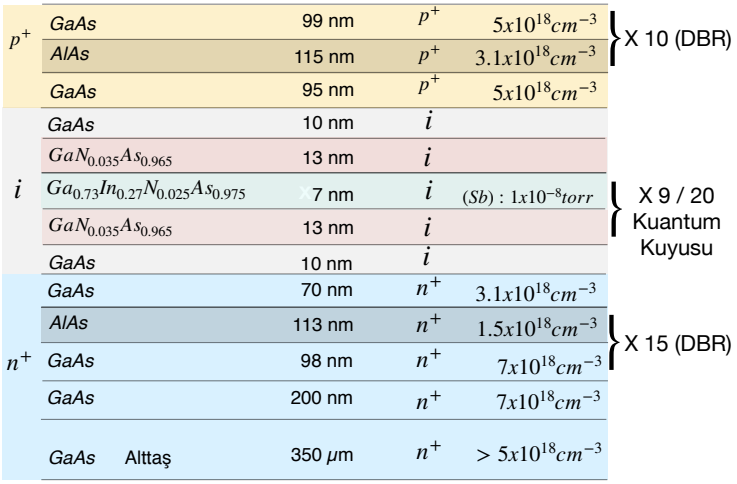


Şekil 4.14: Kuazi-Kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün kazanç-voltaj grafiği.

4.2. REZONANS KAVİTELİ GaInNAs-GaNAs *p-i-n* ÇIĞ FOTODEDEKTÖRLER

4.2.1. Aygıt Tasarımı

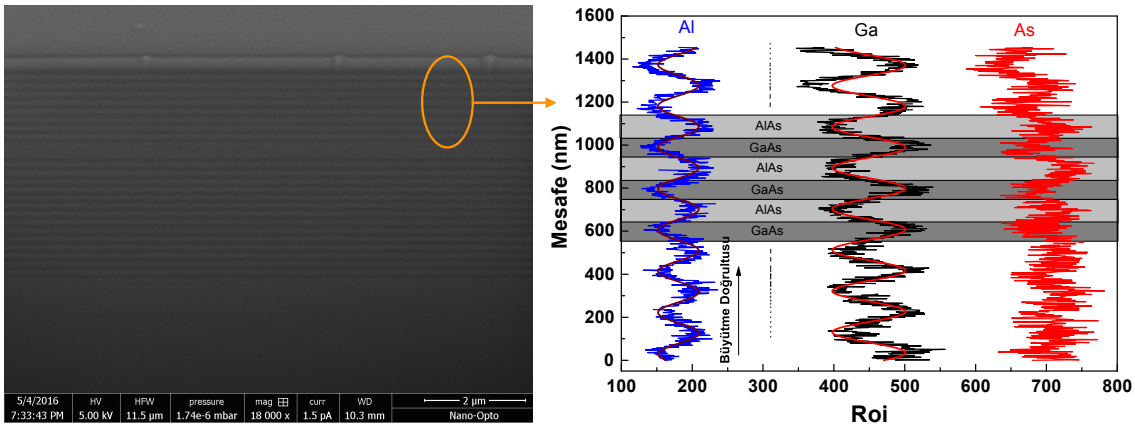
Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörlerin tasarımı bir önceki bölümde verilen kuazi-kaviteli $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörlerin tasarımıyla aynıdır. Bu fotodedektörlerde, kuazi-kaviteli $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörlere 10 adet AlAs/GaAs üst DBR tabakları eklenerek rezonans kavitesi oluşturulmuştur. 3. Bölüm'de verilen fotodedektör yapıları anımsatmak ve izlenebilirliği arttırmak için bu bölümde tekrar verilmektedir (Şekil 4.15). Rezonans kavitesi absorpsiyon dalgaboyuna göre (FWHM: 3-5 nm) set edilmiş olup 1.3 μm'dir. Böylece absorpsiyon dalgaboyu civarındaki dalgaboylarındaki fotonlar yapı içerisine girerken dışında kalan dalgaboylarındaki fotonlar geri yansımaktadır.



Şekil 4.15: Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörlerin yapısı.

Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin yapısal karakterizasyonu için fotodedektörlerin büyütme doğrultusu boyunca kesitinin SEM görüntüsü alındı. Rezonans kaviteli fotodedektörün üst DBR'larından seçilen bir bölgede büyütme doğrultusu boyunca EDS ölçümleri yapılarak tabakaların elemental analizleri yapıldı. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin SEM ve EDS

görüntüsü Şekil 4.16'da verilmektedir. Hem SEM ölçümlerinden hem de EDS analizinden elde edilen üst DBR tabakalarının kalınlıkları Tablo 4.3'te verilmektedir. Tablo 4.3'te görüldüğü gibi DBR tabakalarının kalınlıkları tasarımda istenen kalınlıklarla uyumludur.



Şekil 4.16: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün SEM görüntüsü ve üst DBR tabakalarının EDS analizi.

Tablo 4.3: SEM ve EDS analizlerinden ölçülen tabaka kalınlıkları.

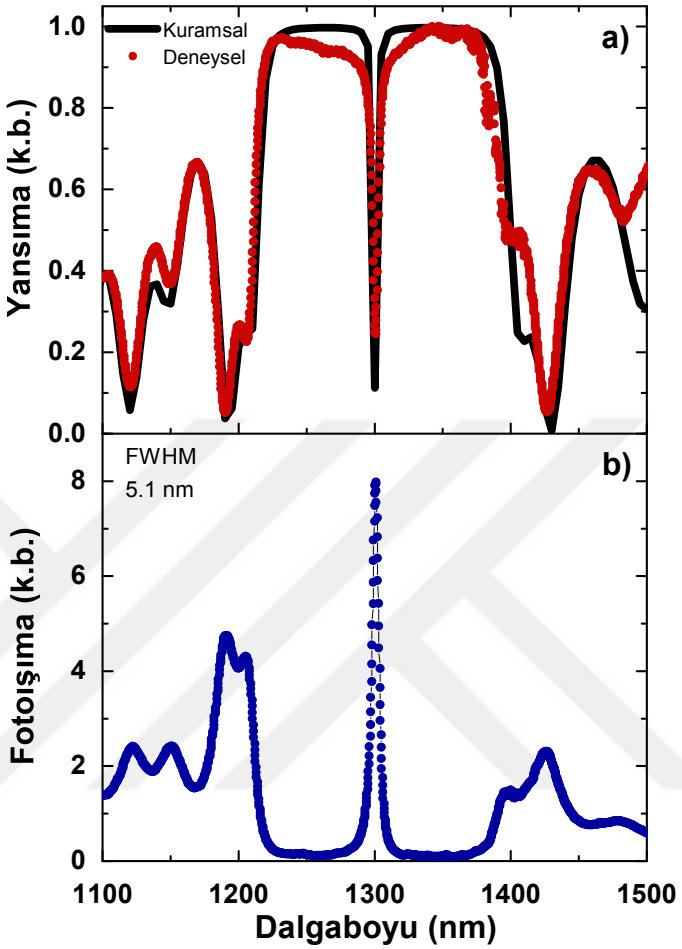
	Nominal	**SEM**	**EDS**
GaAs	99.2	97.5	95.4 ($\pm$ 0.16)
AlAs	115	114.3	114.1 ($\pm$ 0.19)

Kuramsal yansıma spektrumları deneysel yansıma spektrumları ile birlikte rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu çığ fotodedektörler için sırasıyla Şekil 4.17 ve Şekil 4.20'de verilmektedir.

4.2.2. Yansıma ve Fotoışıma Ölçüm Sonuçları

Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörlerin oda sıcaklığında yansıma ve fotoışıma ölçümleri yapılmıştır. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün kuramsal ve deneysel yansıma ve deneysel fotoışıma spektrumu Şekil 4.17'de verilmektedir. Şekil 4.17'de görüldüğü gibi Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün kuramsal ve deneysel yansıma spektrumlarının birbirleriyle uyumu ve yansıma bölgesinin %100'e

yakın olması, hem TMM'nin başarısını hem de büyütme teknolojisinin ve büyütücülerin seyreltik azotlu örnekleri büyütme konusunda geldiği noktayı göstermektedir.

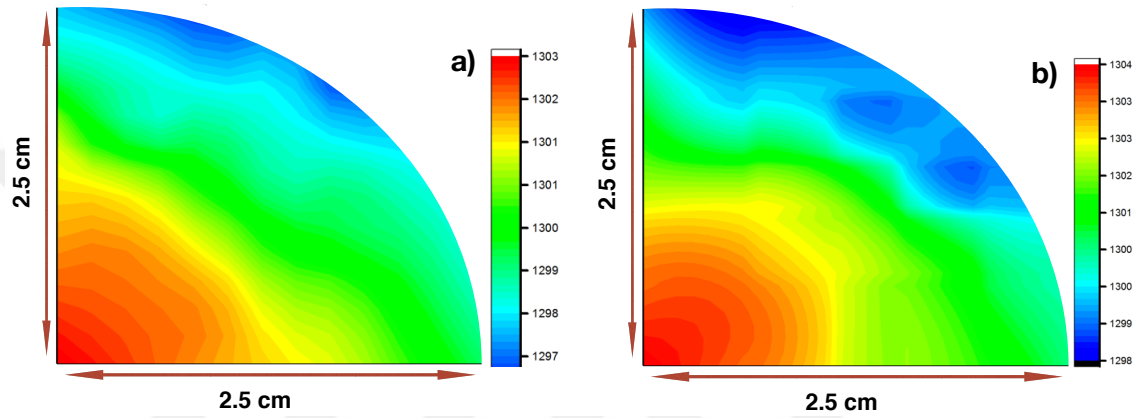


Şekil 4.17: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün **a)** kuramsal ve deneysel yansıma ve **b)** deneysel fotoışıma spektrumu.

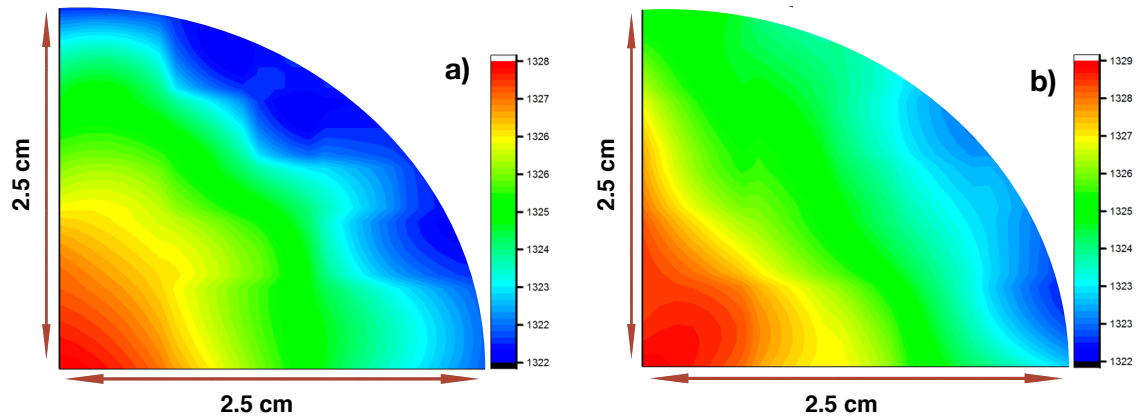
Şekil 4.17b'de verilen fotoışıma spektrumunun FWHM değeri 5.1 nm olarak elde edilmiştir. Fotodedektörün aktif bölgesiyle benzer kompozisyona sahip malzemelerin oda sıcaklığındaki fotoışıma FWHM değerleri 60-100 nm civarındadır [21]. Rezonans kavitesine sahip bu yapıya sadece kavite dalgaboyu civarında elektromanyetik dalga girebildiği gibi yine o dalgaboyu civarında elektromanyetik dalga çıkabilmektedir. Dolayısıyla fotoışıma spektral genişliği, kavite dalgaboyunun spektral genişliğine bağlıdır. Fotoışıma şiddetinin büyüklüğü ise aktif bölgenin absorpsiyon dalgaboyu ile kavite dalgaboyunun eşleşmesine bağlıdır.

MBE kullanılarak 2 inç çaplı disk şeklinde büyütülen fotodedektörlerin çalışma

dalgaboyu homojenliğinin belirlenebilmesi için çeyrek disk üzerinde 5 mm aralıklarla fotoyansıma ve fotoışıma ölçümleri yapıldı. Elde edilen yansıma spektrumlarının merkez dip dalgaboyları ve fotoışıma spektrumlarının merkez pik dalgaboyları alınarak uzaysal dalgaboyu değişimleri elde edildi (Şekil 4.18). Şekil 4.18'de verilen çeyrek disk görselinden yararlanılarak 2 inç çaplı tam disk göz önüne alındığında, diskin merkezi ile sınırları arasında set edilen dalgaboyu referans kabul edildiğinde ±3 nm değişim gözlenmektedir.



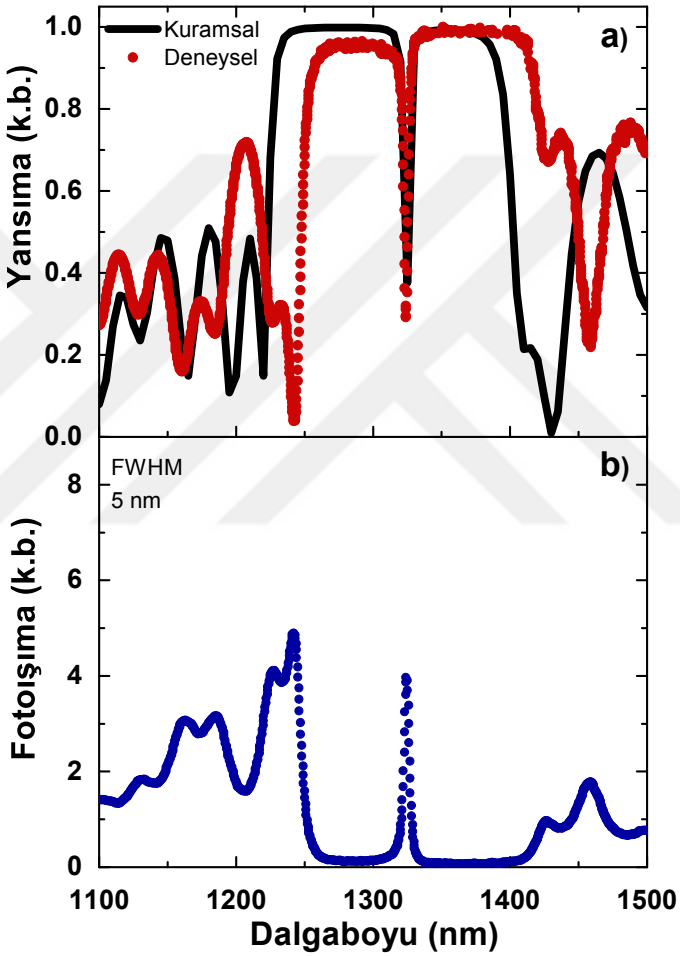
Şekil 4.18: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün, **a)** yansıma ve **b)** fotoışıma dalgaboyunun konumsal değişimi.



Şekil 4.19: Rezonans kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün **a)** yansıma ve **b)** fotoışıma dalgaboyunun konumsal değişimi.

Rezonans kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün yansıma ve fotoışıma uzaysal dalgaboyu değişimleri Şekil 4.19'de verilmektedir. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektör ile tek farkı kuantum kuyu sayısı olan bu fotodedektörde

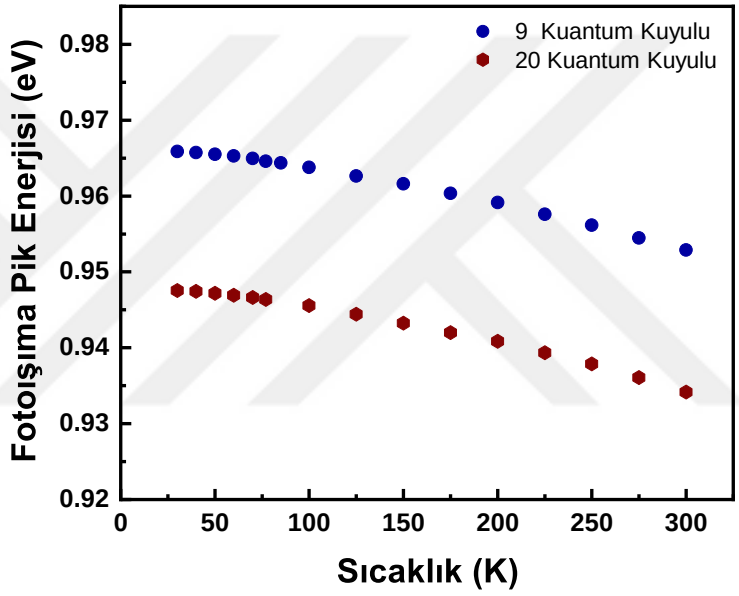
de 2 inç çaplı diskte ±3 nm dalgaboyu değişimi gözlenmektedir. Yansıma ve fotoışıma spektrumlarının merkez dalgaboylarının uzaysal değişimlerine bakıldığında, teorik olarak 1300 nm dalgaboyuna set edilen kavite dalgaboyunun 1325 nm olduğu gözlenmektedir. 25 nm'lik bu fark, örnek tasarımı sırasında hesaplarda kuantum kuyusu sayısı ile ilgili parametrenin yanlış hesaplanmasından kaynaklanmaktadır. Büyütme sonrasında fark edilen bu yanlış durum, kuramsal yansıma spektrumunda düzeltilerek deneysel yansıma ve fotoışıma spektrumlarıyla birlikte Şekil 4.20'de verilmektedir.



Şekil 4.20: Rezonans kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün **a)** kuramsal ve deneysel yansıma ve **b)** deneysel fotoışıma spektrumu.

Literatürde yarıiletkenlerin bant aralığının sıcaklığa bağlı değişimi ile ilgili pek çok çalışma bulunmaktadır. Farklı kırılma indislerine sahip yarıiletkenlerin üst üste büyütülmesiyle oluşan kaviteli sistemlerde (RCEPD, VCSEL vs.) tek bir yarıiletkenin sıcaklığa bağlılığı değil tüm sistemin sıcaklığa bağlılığı önemli hale gelmektedir. Bu nedenle rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin

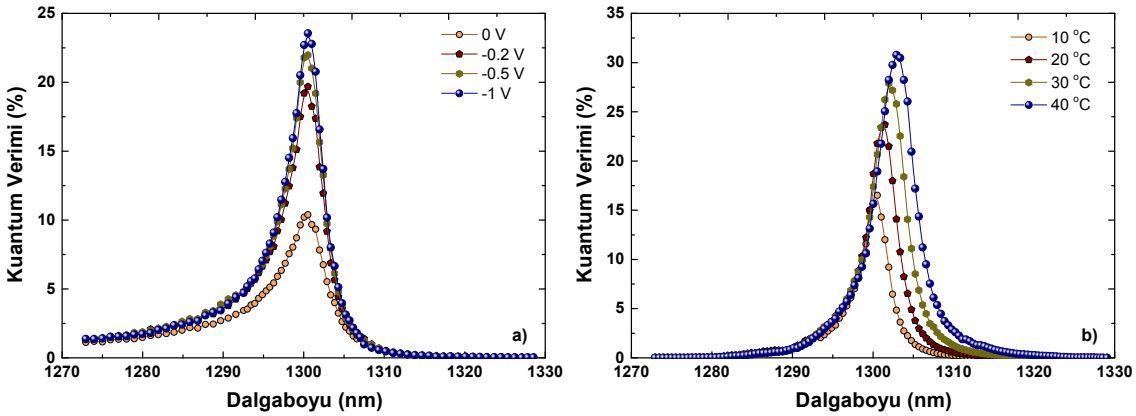
fotoışıma spektrumlarının sıcaklığa bağlılığı incelenmiştir. Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin fotoışıma pik dalgaboylarının sıcaklığa bağlı değişimleri Şekil 4.21'de verilmektedir. DBR'ları oluşturan GaAs ve AlAs gibi yarıiletken yapıların çalışılan sıcaklık aralığında birim sıcaklık başına bant aralığı değişimleri yaklaşık $30-40\times10^{-5}$ eV/K iken, Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörin kavite dalgaboylarının sıcaklığa bağlılıkları sırasıyla 5.4×10^{-5} eV/K ve 5.6×10^{-5} eV/K olarak belirlenmektedir. Rezonans kavitesine sahip aygıtların tasarımında bu bilgi göz önüne alındığında üretilecek aygıtların sıcaklığı azaltılarak veya arttırılarak daha yüksek verimlere ulaşılabileceği öngörülmektedir.



Şekil 4.21: Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin sıcaklığa bağlı fotoışıma pik enerjileri.

4.2.3. Fotoakım Ölçüm Sonuçları

Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin besleme voltajına ve sıcaklığa bağlı spektral fotoakım ölçümleri yapılarak spektral duyarlılık ve kuantum verimleri belirlenmiştir.

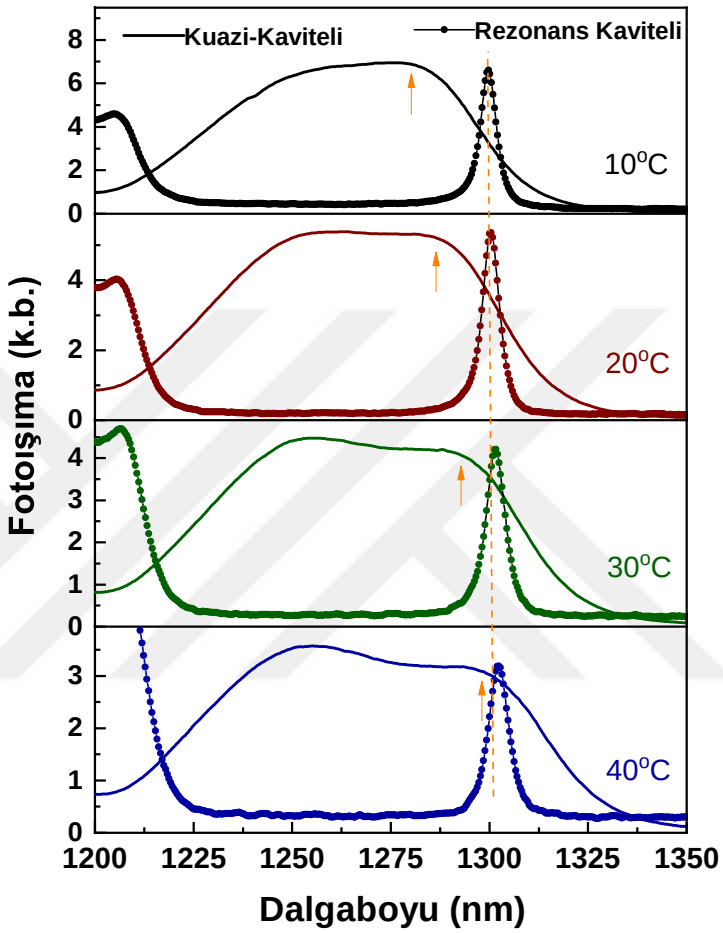


Şekil 4.22: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün **a)** besleme voltajına ve **b)** sıcaklığa bağlı spektral kuantum verimi.

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün besleme voltajına ve sıcaklığa bağlı spektral kuantum verimi Şekil 4.22'de verilmektedir. Şekil 4.22a'da görüldüğü gibi oda sıcaklığında fotodedektörün çalışma merkez dalgaboyu 1.3 μm iken, FWHM değeri yaklaşık 6 nm civarındadır. Fotovoltavik modda %10 kuantum verimiyle çalışan fotodedektörün verimi, 0.2 V geri beslemeyle %20 kuantum verimini aşmaktadır. 25 °C'de 1 V geri besleme altında maksimum %24 kuantum verimine ulaşan rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün kuantum verimi 40 °C'de %32 olmaktadır. Bu durumun daha detaylı analizi için rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörden alınan bir parçanın bir kısmı yukarıdan absorpsiyon bölgesine kadar aşındırılarak her iki kısmınında sıcaklığa bağlı fotoışıma ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen spektrumlar Şekil 4.23'te verilmektedir.

Şekil 4.23'te görüldüğü gibi kuazi-kaviteli durumda fotoışıma spektrumunda iki adet geniş pik görülmüştür. Fotoışma spektrumuna Gaussien fit yapıldığında iki pik elde edilmektedir. Bu piklerden yüksek enerjide (1 eV) olan bariyer malzemesi GaNAs'a ait iken, düşük enerjili (0.95 eV) olan olan GaInNAs kuantum kuyusuna aittir. Bu iki tabakanın enerji bant aralıkları, BAC modeli ile hesaplanarak deneysel sonuçlar yorumlanmıştır. Şekil 4.23'te görüldüğü gibi absorpsiyon bölgesindeki fotoışımanın dalgaboyu kavite dalgaboyundan daha küçüktür yani kavite ile rezonansta değildir. Ayrıca absorpsiyon bölgesinin ve kavite dalgaboyunun birim sıcaklık başına değişim hızları farklıdır. Şekil 4.23'te görüldüğü gibi sıcaklık arttıkça absorpsiyon dalgaboyu ile kavite dalgaboyu birbirine yaklaştığı için sıcaklık arttıkça aygıtın verimi artmaktadır.

Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'teki sonuçlar dikkate alındığında, aygıtın sıcaklığa bağlılığının azaltılması için gelecek nesil yapılarda oda sıcaklığında aktif bölgenin bant aralığına karşılık gelen dalgaboyunun kavite rezonans dalgaboyundan daha yüksek dalgaboylarına gelecek şekilde tasarlanması gerektiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.23: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün 10-40°C aralığında fotoışıma spektrumları.

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün kuantum veriminin sıcaklığa bağlı iyileşmesi göz önüne alındığında, herhangi bir rezonans kaviteli aygıtın tasarımı sırasında absorpsiyon ve kavite dalgaboyunun sıcaklığa bağlı değişimlerinin bilinmesinin önemli olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle fotodedektörün absorpsiyon bölgesinin DBR tabakaları eklenmeden kontrol edilmesi yararlı olacaktır. Yarıiletken tabanlı fotodedektörlerde absorpsiyon bölgesinin sıcaklığa bağlı değişimi, belirli fiziksel büyüklükler bilindiği taktirde "Varshni bağıntısı" ile belirlenebilmektedir. Kavite dalgaboyunun sıcaklığa bağlı değişimi ise Dudley ve arkadaşlarının modeli [100]

kullanılarak analitik olarak hesaplanmaktadır. Bu çalışmada Dudley ve arkadaşlarının modeli TMM'una dahil edilerek kavite dalgaboyunun sıcaklığa bağlı değişimi kuramsal yansıma hesaplarından belirlenerek deneysel sonuçlarla kıyaslanmaktadır.

Dudley ve arkadaşlarının modelinde; hem DBR tabakalarının kırılma indislerinin sıcaklığa bağlılığı hem de DBR tabakalarının termal genleşme sonucu kalınlık değişimlerinin etkisi hesaba katılmaktadır. Sıcaklığa bağlı kırılma indislerinin değişiminin kavite dalgaboyuna etkisi, tabakaların termal genleşmesi sonucu kalınlık değişiminin etkisinin neredeyse 10 katı kadardır. Bununla birlikte termal genleşme etkisinin hesaba katılması deneysel sonuçlarla daha uyumlu sonuçlar vermektedir.

Bu modelde Dudley ve arkadaşları, Afromowitz tarafından geliştirilen "Single Effective Oscillator" (SEO) modeline tabakaların termal genleşmesi sonucu kalınlıklarının değişim etkisini ekleyerek modifiye etmektedirler. Bant kenarı civarı için Afromowitz tarafından tanımlanan kırılma indisi;

$$n = \left[\frac{E_d}{E_0} + E_{ph}^2 \frac{E_d}{E_0^3} + \frac{E^4 E_d}{2E_0^3 \left(E_0^2 - E_g^2\right)} \ln \left[\frac{2E_0^2 - E_g^2 - E_{ph}^2}{E_g^2 - E_{ph}^2} \right] \right]^{1/2} \tag{4.10}$$

ifadesi ile verilmektedir [100]. Burada E_0 and E_d SEO modeline göre elde edilen osilatör enerjilerini, E_g yarıiletkenin bant aralığını, E_{ph} fotonun enerjisini temsil etmektedir. Denklem 4.10'in sıcaklığa bağlı türevi alınarak, kırılma indisinin sıcaklığa bağlı ifadesi;

$$\frac{\partial n}{\partial T} = \frac{\partial n}{\partial E_g} \frac{\partial E_g}{\partial T} + \frac{\partial n}{\partial E_0} \frac{\partial E_0}{\partial T} \tag{4.11}$$

şeklinde elde edilir. DBR tabakalarının termal genleşmesinin de dahil edildiği, kavite dalgaboyunun sıcaklığa bağlı değişimi;

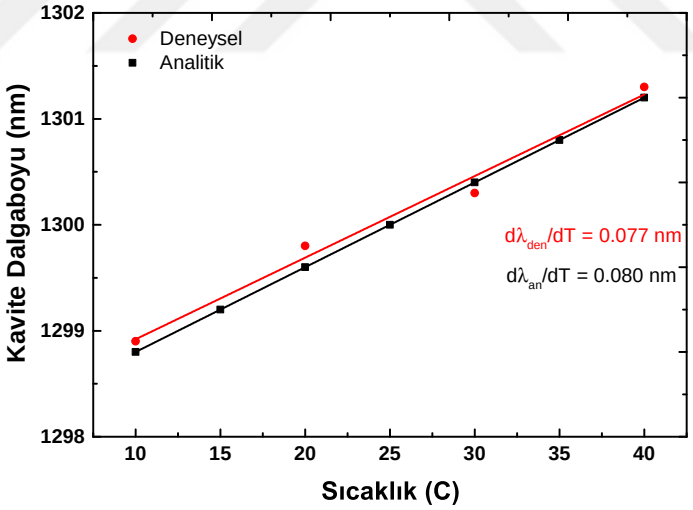
$$\frac{\partial \lambda}{\partial T} = \frac{\left\{ n_1 \alpha_1 d_1 + n_2 \alpha_2 d_2 + d_1 \frac{\partial n_1}{\partial T} + d_2 \frac{\partial n_2}{\partial T} \right\}}{\left\{ \frac{1}{2} - d_1 \frac{\partial n_1}{\partial \lambda} - d_2 \frac{\partial n_2}{\partial \lambda} \right\}} \tag{4.12}$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada n_1 ve n_2 DBR tabakalarının kırılma indislerini, d_1 ve d_2 DBR tabakalarının kalınlıklarını, α_1 ve α_2 DBR tabakalarının termal gerleşme katsayılarını ve λ ise kavite dalgaboyunu ifade etmektedir. Hesaplarda kullanılan tüm parametreler Tablo 4.4'te verilmektedir.

Tablo 4.4: Kavite dalgaboyunun sıcaklığa bağlılığının hesaplamalarında kullanılan parametreler.

	GaAs	**AlAs**
$\alpha\ (10^{-6}/^oC)$	6.86	4.9
$E_g\ (eV)$	1.424	2.16
$E_g\ (eV)$	3.65	4.70
$E_d\ (eV)$	36.1	33.6
$\partial E_g/\partial T\ (10^{-4}eV/^oC)$	3.9	5.2
$\partial E_0/\partial T\ (10^{-4}eV/^oC)$	5.2	6.9

Denklem 4.12'de verilen dalgaboyunun sıcaklığa bağlı değişimi, yansıma spektrumunun kuramsal hesaplarında kullanılan TMM'ye dahil edilerek sıcaklığa bağlı yansıma spektrumları elde edildi. 10 ve 40°C sıcaklık aralığında hesaplanan yansıma spektrumlarının kavite dalgaboyları ve deneysel yansıma spektrumunun kavite dalgaboylarının sıcaklığa bağlı değişimleri Şekil 4.24'te verilmektedir.

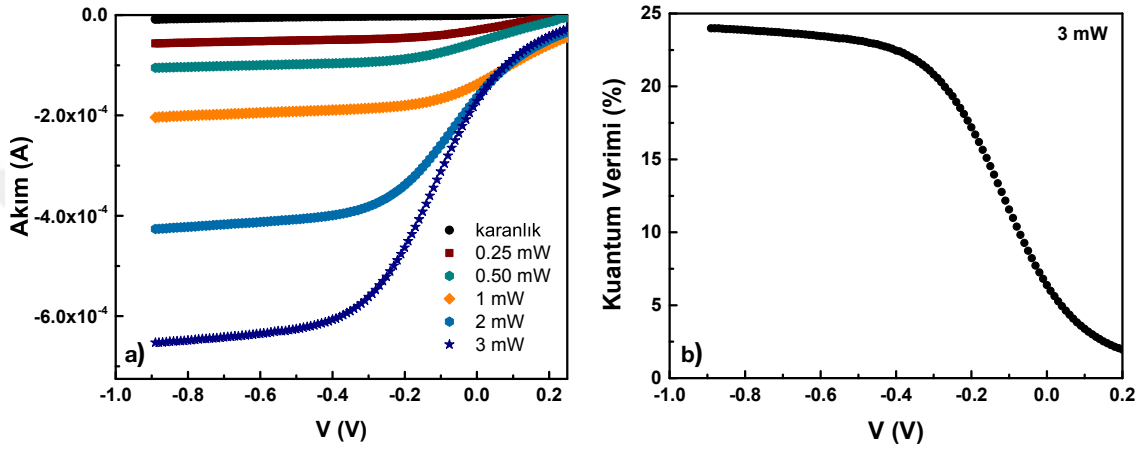


Şekil 4.24: Kuramsal ve deneysel Kavite dalgaboyunun sıcaklığa bağlı değişimi.

Şekil 4.24'te verilen sıcaklığa bağlı kavite dalgaboyu değişimlerinin eğiminden elde edilen birim sıcaklık başına kayma miktarları deneysel ve kuramsal sonuçlar için sırasıyla 0.077 nm/°C ve 0.080 nm/°C'dir. Dudley ve arkadaşları tarafından modifiye edilen modelin bu yapılar için elde edilen deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu olduğu gözlenmektedir. Bu sonuçlar ışığında III-V grubu alaşım yapılardan oluşan rezonans

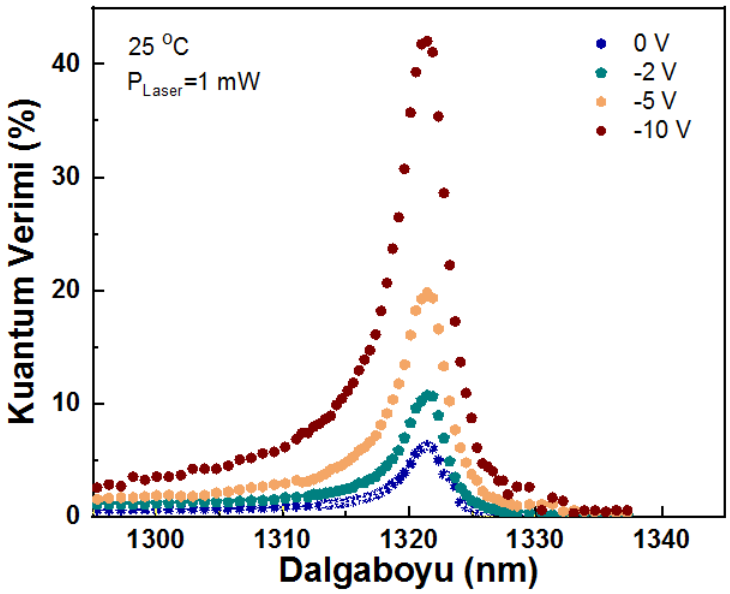
kaviteli sistemlerin sıcaklığa bağlı davranışlarının tasarım sırasında öngürülebeliceği düşünülmektedir.

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün akım-voltaj ölçümü ve besleme voltajına bağlı kuantum verimi Şekil 4.25'te verilmektedir. Şekil 4.25a'da aygıtın karanlık akımı siyah renkle gösterilmiş olup 0 ve -1 V için sırasıyla -1 nA ve -8.1 μA 'dir.



Şekil 4.25: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün akım-voltaj ölçümü ve besleme voltajına bağlı kuantum verimi.

Fotoakımın daha iyi gözlenmesi ve aygıtın yüksek akımlara ulaşarak ısınmasının önüne geçilmesi için fotodedektörlerde karanlık akımın olabildiğince düşük olması istenmektedir. Bariyer malzemesi olarak GaNAs kullanılması nedeniyle, Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün karanlık akımı beklenenin üstünde gözlenmektetir. Buna rağmen oda sıcaklığında, sadece 0.5 V geri besleme ile %23 kuantum verimine ulaşılmaktadır. 0.5 V gibi düşük geri besleme voltajında yüksek fotoakıma ulaşılmasının nedeninin, foto-akım voltaj ve kuantum verimi-voltaj davranışlarından anlaşılacağı gibi 0-0.4 geri besleme voltaj aralığında aygıtın sahip olduğu iç kazanç olduğu düşünülmektedir. Fotoakım-voltaj davranışı 0.4 V geri beslemeden sonra karanlık akım-voltaj eğrisini takip etmektedir. Bu nedenle kuantum verimi bu bölgede satürasyona uğramaktadır.

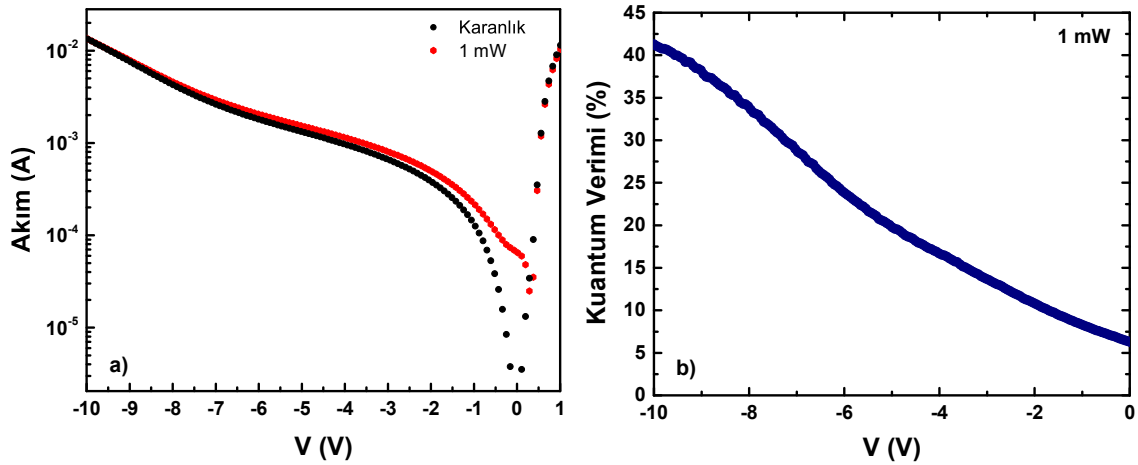


Şekil 4.26: Rezonans kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün spektral kuantum verimi.

Rezonans kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün besleme voltajına bağlı spektral kuantum verimi Şekil 4.26'da verilmektedir. Şekil 4.26'da görüldüğü gibi oda sıcaklığında fotodedektörün çalışma merkez dalgaboyu 1.323 μm iken, FWHM değeri yaklaşık 5 nm civarındadır. 25 °C'de fotovoltavik modda %5 kuantum verimi ile çalışan fotodedektörün verimi 10 V geri beslemede %42'ye ulaşmaktadır. Aynı besleme voltajlarında 9 kuantum kuyulu fotodedektörün kuantum verimiyle kıyaslandığında 20 kuantum kuyulu fotodedektörün kuantum verimi daha düşüktür. 20 kuantum kuyulu fotodedektörde daha çok olmakla birlikte her iki örneğin de problemi absorpsiyon dalgaboyu ile kavite dalgaboylarının çakışmamasıdır. Bu nedenle, oda sıcaklığında çalışacak şekilde tasarlanan bu aygıtların oda sıcaklığında gerçek performanslarına ulaşılamamaktadır.

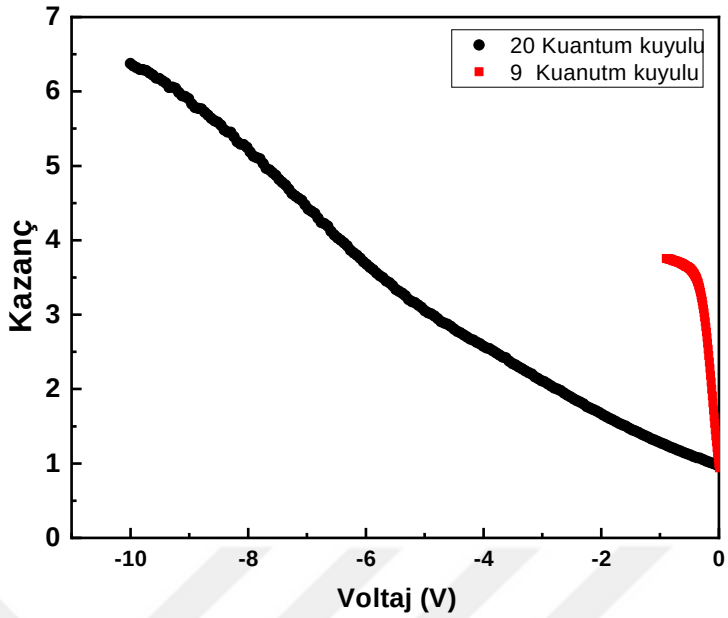
Absorpsiyon dalgaboyu ile kavite dalgaboyu arasında oda sıcaklığında tasarım hatasından kaynaklanan 20 nm fark gözlenmektedir. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörde de gözlenen bu uyumsuzluğun aygıtın sıcaklığı arttırılarak çözülmüş olmasına rağmen, rezonans kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörde sıcaklığa bağlı ciddi bir iyileşme gözlenememektedir. 7 V geri beslemede 25 °C'de %29 olan kuantum verimi 40 °C'ye çıkıldığında ancak %31'e ulaşabilmiştir. Oda sıcaklığında çalışacak şekilde tasarlanan bir aygıtın 40 °C'den daha yüksek sıcaklıklarda karakterize

edilmesi aygıt performansı açısından bir anlam ifade etmemektedir.



Şekil 4.27: Rezonans kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün akım voltaj davranışı ve geri besleme voltajına bağlı kuantum verimi.

Rezonans kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün akım voltaj davranışı ve geri besleme voltajına bağlı kuantum verimi Şekil 4.27'de verilmektedir. Aygıtın karanlık akımı çok yüksek olduğu için ışık altında akım-voltaj davranışı ile karanlık akım-voltaj davranışını birbirini takip ediyor gibi anlaşılmaktadır. Buna rağmen geri besleme voltajına bağlı kuantum verimi grafiğinden anlaşılacağı gibi fotoakım dolayısıyla kuantum verimi geri besleme voltajına bağlı olarak artmaktadır. Rezonans kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün karanlık akım voltaj ölçümlerinden kırılma voltajının -15 V civarında olduğu gözlenmektedir. Kırılma voltajına yaklaştıkça aygıtın sıcaklığı artmakta ve fotoakım-voltaj karakteristiği değişmektedir. Buna rağmen 10 V geri beslemenin altında sıcaklığı sabit kalacak şekilde %42 kuantum verimiyle kararlı olarak çalışmaktadır.

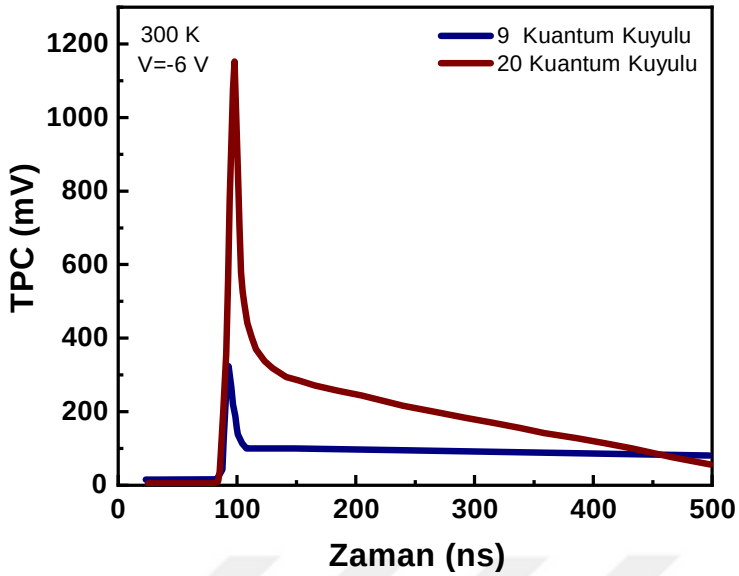


Şekil 4.28: Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin geri besleme voltajına bağlı kazanç değişimi.

Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin geri besleme voltajına bağlı kazanç değişimi Şekil 4.28'de verilmektedir. Her iki fotodedektörün kazancı aynı belseme voltajında kıyaslandığında 9 kuantum kuyulu fotodedektörün kazancının daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun nedeninin 9 kuantum kuyulu fotodedektörün absorpsiyon dalgaboyu ile rezonans kavitesi dalgaboyunun 20 kuantum kuyulu fotodedektöre göre daha iyi çakışması olabilir.

4.2.4. Transiyent Fotoiletkenlik Ölçüm Sonuçları

Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin oda sıcaklığı transiyent fotoiletkenlik ölçüm sonuçları Şekil 4.29'da verilmektedir. TPC spektrumuna yapılan fitlerden elde edilen zaman sabitleri 9 ve 20 kuantum kuyulu fotodedektörler için sırasıyla $\tau_1 = 5$ ns ve $\tau_1 = 20$ ns olarak belirlenmiştir. Çıkış zamanları τ_{rise} ise sırasıyla 2.74 ns ve 8.8 ns olarak elde edilmiştir. Kuantum kuyusu sayısı arttıkça absorpsiyon bölgesinin genişliği dolayısıyla geçiş zamanı arttığı için 20 kuantum kuyulu fotodedektörün cevap hızı 9 kuantum kuyulu fotodedektörünkinden daha yavaştır.



Şekil 4.29: Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin oda sıcaklığı transiyent fotoiletkenlik ölçüm sonuçları

Denklem 2.8 kullanılarak fotodedektörlerin bant genişliğine, sırasıyla Denklem 2.9 ve 2.10 kullanılarak fotodedektörlerin gürültüye özdeş gücüne (NEP) ve dedektivitesine ulaşılır. Rezonans kaviteli 9 ve 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörlerin dedektiviteleri ve NEP büyüklükleri sırasıyla $D^*(9) = 1.39 \times 10^{11}$ cmHz$^{1/2}$/W, $NEP(9) = 2.06 \times 10^{-11}$ W ve $D^*(20) = 3.58 \times 10^{11}$ cmHz$^{1/2}$/W, $NEP(20) = 8 \times 10^{-12}$ W olarak elde edilmiştir. Bant genişlikleri ise 9 ve 20 kuantum kuyulu fotodedektörler için sırasıyla 40 MHz ve 130 MHz olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre 20 kuantum kuyulu fotodedektörün dedektivitesi daha yüksek ve gürültüsü daha düşük olarak bulunmuştur. Absorpsiyon bölgesinin daha geniş olması sayesinde, 20 kuantum kuyulu fotodedektörün daha yüksek dedektiviteye sahip olduğu düşünülmektedir. Bant genişliği ve cevap hızı arasındaki teoride bahsedilen rekabet burada da gözlenmektedir. Absorpsiyon bölgesinin genişliği arttıkça fotodedektörün bant genişliği ve dedektivitesi artmakta, fakat cevap hızı azalmaktır.

Bu ölçümlerde optik uyarım kaynağı olarak 1064 nm'de ışıma yapan pulslı laser kullanılmıştır. 1064 nm bütün yapının yansımasının $R \sim \%40$ olduğu bölgeye denk gelmektedir. Bu nedenle çok düşük geri besleme voltajlarında TPC sinyali gözlenemediğinden transiyent fotoiletkenlik ölçümleri 6 V gibi yüksek geri besleme voltajlarında yapılabilmiştir. Ancak bu geri besleme voltajı bu fotodedektörün çalışma

voltaj aralığına göre çok yüksektir. Hesaplamalara göre bu voltaj değerlerinde impakt iyonizasyon gerçekleşebileceği için fotodedektörlerin cevap hızlarının olduğundan daha yavaş, gürültü seviyesinin ise olduğundan daha yüksek elde edildiği düşünülmektedir. Fotodedektörlerin gerçek hız, dedektivite ve gürültüye özdeş güç değerlerinin belirlenmesi için TPC ölçümleri besleme voltajına bağlı olarak kavite dalgaboyunda çalışan laserle yapılmalıdır.

4.3. REZONANS KAVİTELİ GaInNAs-GaAs *p-i-n* ÇIĞ FOTODEDEKTÖRLER

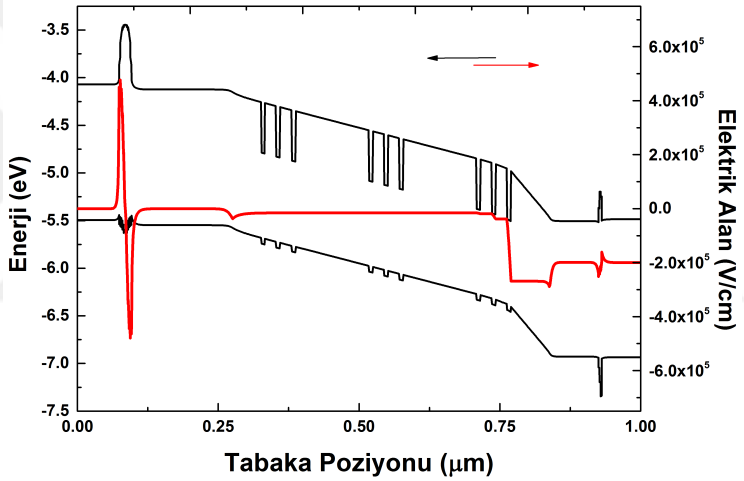
4.3.1. Aygıt Tasarımı

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün aktif bölgesinin bant aralığı enerjisi ve tabakalar arası örgü uyumu BAC modeli ve Vegard yasası kullanılarak hesaplanmıştır. *n*- ve *p*-tipi tabakaların katkı konsantrasyonları, drift-diffusion modelin, termiyonik emisyon ve tünelleme akımlarının hesaba katıldığı Fermi-Dirac istatistiğinin çözümlerini için yarıiletken tabanlı aygıt simülasyon programı SimWindows kullanılarak karar verilmiştir. DBR tabaklarının kalınlıkları ve sayısı ise TMM ile hesaplanmıştır. 3. Bölüm'de verilen fotodedektör yapısı anımsatmak ve izlenebilirliği arttırmak için bu bölümde tekrar verilmektedir.

	GaAs	95 nm			X 21 (DBR)
i	$Al_{0.98}Ga_{0.02}As$	107 nm			
	GaAs	74 nm			
p^+	$Al_{0.8}Ga_{0.2}As$	2 nm	p^+	$5x10^{18}cm^{-3}$	
	$Al_{0.5}Ga_{0.5}As$	2 nm	p^+	$5x10^{18}cm^{-3}$	
	$Al_{0.2}Ga_{0.8}As$	2 nm	p^+	$5x10^{18}cm^{-3}$	
	GaAs	180 nm	p^+	$5x10^{18}cm^{-3}$	
	GaAs	20 nm	i		
i	$Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}$	7 nm	i		X 9 Kuantum Kuyusu
	GaAs	20 nm	i		
	GaAs	86 nm	i		
	$Al_{0.2}Ga_{0.8}As$	2 nm		$1x10^{18}cm^{-3}$	
	$Al_{0.5}Ga_{0.5}As$	2 nm		$1x10^{18}cm^{-3}$	
	$Al_{0.8}Ga_{0.2}As$	2 nm		$1x10^{18}cm^{-3}$	
n^+	$Al_{0.98}Ga_{0.02}As$	111 nm	n^+	$1x10^{18}cm^{-3}$	X 24 (DBR)
	GaAs	95 nm	n^+	$1x10^{18}cm^{-3}$	
	GaAs Alttaş	350 μm	n^+	$> 5x10^{18}cm^{-3}$	

Şekil 4.30: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün yapısı.

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün SimWindows ile hesaplanan bant diyagramı ve denge durumunda iç elektrik alan dağılımı Şekil 4.31'de verilmektedir. Yukarıda da anlatıldığı gibi SimWindows programı GaAs/AlGaAs hetero-eklem örnekler için tasarlanmıştır. Kapalı kaynak SimWindows programında, GaInNAs/GaAs hetero-eklem sistemlerin bant süreksizlik dağılımı ayarlanamadığı için Şekil 4.31'de verilen bant süreksizlikleri gerçeği yansıtmamaktadır. Bununla birlikte elektrik alan dağılımı gerçeği yansıtmaktadır. SimWindows programından yaralanılarak elde edilen sonuçlardan sadece denge durumunda iç elektrik alan dağılımları göz önüne alınmıştır. Yapıda iç elektrik alanın yüksek tutulup taşıyıcı kazancının düşük besleme voltajlarında gerçekleşmesi için katkılı tabakaların katkı konsantrasyonları yüksek seçilmiştir.



Şekil 4.31: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün SimWindows ile hesaplanan bant yapısı ve iç elektrik alan dağılımı.

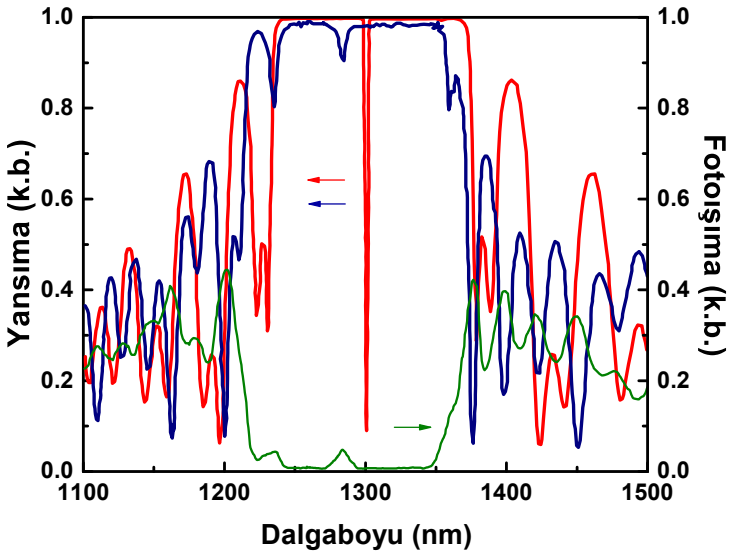
Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün aktif bölgesi $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ kuantum kuyusu sistemlerinden oluşmaktadır. Her bir kuyu ve bariyer arasındaki gerilme (compressive strain) 0.0209'dur. Bu değer, diğer dört örnekle kıyaslandığında biraz büyük olmasına rağmen literatürdeki tabakasal yapıdaki fotodedektörlerle kıyaslandığında oldukça düşüktür.

Şekil 4.30'da verilen fotodedektörün fabrikasyonu çalışmada incelenen diğer örneklerin aksine İngiltere Sheffield Üniversitesi'nde kuru aşındırma tekniği olan RIE kullanılarak yapılmıştır. Mesa yapısı şeklinde hazırlanan fotodedektörde aktif pencere genişliği 20

μm çapındadır. Katkısız olan üst DRB'lar *p*-tipi tabakaya kadar aşındırılmıştır. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün *p*-tipi tabakasında Au/Zn metalleri kaplanarak kontak alınırken, *n*-tipi kısmında Au/AuGe/Ni/Au metalleri kaplanarak kontak alınmıştır.

4.3.2. Yansıma ve Fotoışıma Ölçüm Sonuçları

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün kuramsal ve deneysel yansıma spektrumu ile fotoışıma ölçüm sonuçları Şekil 4.32'de verilmektedir. Kuramsal yansıma spektrumunda her ne kadar kavite rezonans dalgaboyu 1300 nm olsa da deneysel olarak elde edilen yansıtıcılığın yüksek olduğu stop bandı içinde 1236 ve 1286 nm dalgaboyunda olmak üzere iki farklı dip gözlenmektedir. Fotoışıma sinyalinin merkez dalgaboyu bu dalgaboylarından 1286 nm'ye karşılık gelmekte olup deneysel yansıma spektrumuyla oldukça uyumludur. Teorik olarak hesaplanmış kavite rezonansından sapmaların nedeni ise ilk iki yapının DBR tabaklarına göre daha çok sayıda ve farklı kalınlıklardaki DBR tabakalarının homojen olarak büyütülememesinden kaynaklanmış olabilir.

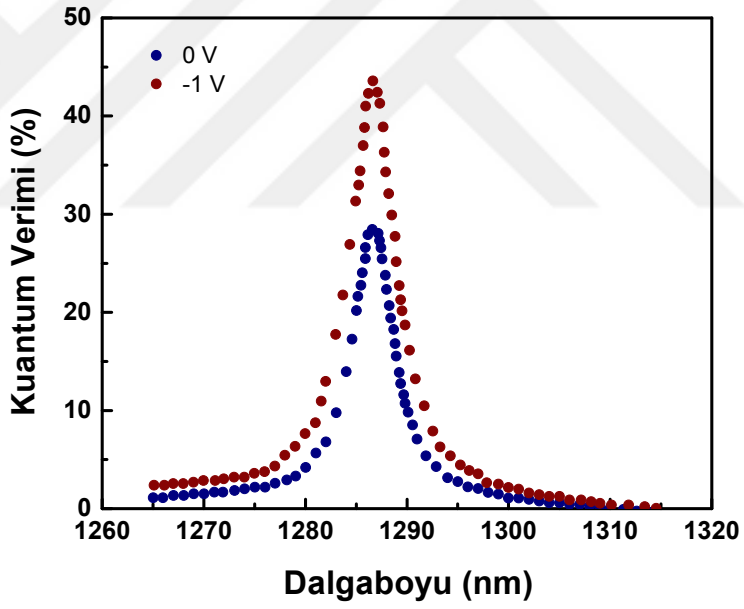


Şekil 4.32: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün kuramsal ve deneysel yansıma ile fotoışıma spektrumu.

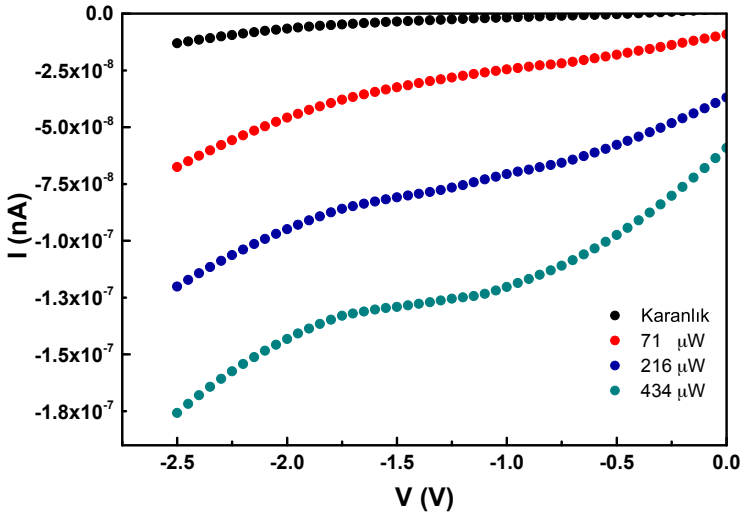
4.3.3. Fotoakım Ölçüm Sonuçları

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün besleme voltajına bağlı spektral fotoakım ölçümleri yapılarak spektral duyarlılık ve kuantum verimi belirlendi. Fotodedektörün 0.097 mW optik güç altında ölçülen besleme voltajına bağlı spektral kuantum verimi Şekil 4.33'te verilmektedir.

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün duyarlılığı maksimum dalgaboyu olan 1286 nm'de 0.43 A/W olarak elde edilmiştir. Responsivity spektrumunun ve kuantum veriminin FWHM değeri 5.0 nm'dir. 1 V geri beslemede elde edilen bu değerler, bilindiği kadarıyla literatürdeki rezonans kaviteli GaInNAs-tabalı fotodedektör çalışmaları içinde ulaşılan en iyi değerlerdir.



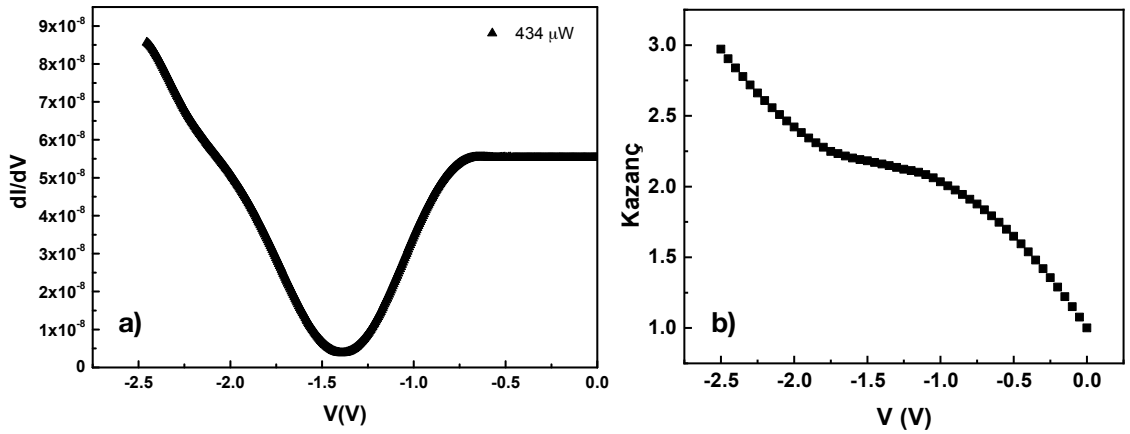
Şekil 4.33: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün geri besleme voltajına bağlı spektral kuantum verimi.



Şekil 4.34: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında akım-voltaj grafiği.

Karanlıkta ve 1286 nm laser ışını altında, geri besleme voltajına bağlı olarak akım-voltaj ölçümleri yapıldı. 1286 nm dalgaboylu laserle farklı foton şiddetleri altında yapılan akım-voltaj ölçüm sonuçları Şekil 4.34'te verilmektedir. Fotodedektörler için önemli bir parametre olan karanlık akım değeri 1 V geri beslemede 1.7 nA olarak ölçülmüştür. Tez kapsamında incelenen diğer örneklerle kıyaslandığında bu değerin oldukça düşük olduğu gözlenmiştir. Bu fotodedektör diğer fotodedektörlerin aksine akımı tüm yapıdan değil oksit tabakası sayesinde belirli bir bölgeden geçmesini sağlanmaktadır. Bu sayede daha düşük mertebelerde karanlık akım gözlenmektedir.

Şekil 4.34'te görüldüğü gibi farklı optik güçler altında gözlenen akım-voltaj davranışları küçük besleme voltaj değerlerinde lineerdir. Dolayısıyla fotonlarla üretilmiş olan taşıyıcı yoğunluğu lineer olarak artmaktadır. 0.8 V geri beslemeden sonra akım-voltaj eğrisi lineerlikten sapmaktadır. Bu durumun nedeni yüksek elektrik alanlarda sıcak taşıyıcıların oluşması sonu taşıyıcı mobilitesinin azalması olabilir. Uygulanan voltajın daha da arttırılmasıyla fotoakım satürasyona uğramaktadır. 1.5 V geri beslemeden sonra ise akımda hızla artış gözlenmektedir.

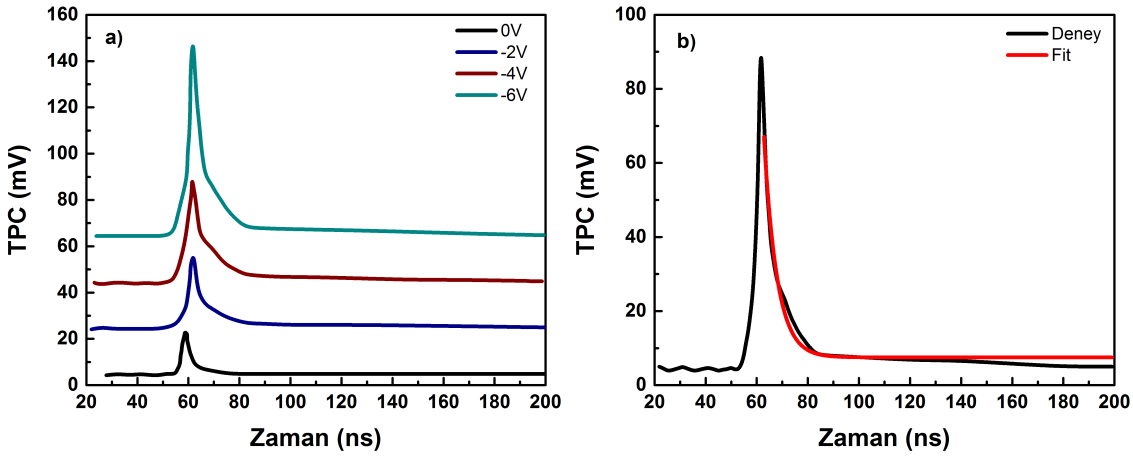


Şekil 4.35: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün **a)** fotoakım-voltaj eğrisinin türevi **b)** kazanç-voltaj grafiği.

Fotoakım-voltaj davranışının daha iyi analizi için, 434 μW optik güç altında ölçülen akım-voltaj eğrisinin türevi alınmıştır (Şekil 4.35a). Şekil 4.35a'da görüldüğü gibi geri besleme voltajı $V \geq 1.5$ V olduğunda (10^4 V/cm) iç kazanç gerçekleşmektedir. 10^4 V/cm, GaAs tabanlı sistemler için impakt iyonizasyonun gerçekleşebileceği elektrik alan değeri olduğu için yapıdaki bu kazancın impakt iyonizasyon kaynaklı olduğu düşünülmektedir (Şekil 4.35b). Bu iç kazanç sayesinde 1 V geri beslemede ulaşılan %43 kuantum verimi, 2.5 V geri beslemeden sonra %67 olmaktadır.

4.3.4. Transiyent Fotoiletkenlik Ölçüm Sonuçları

Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün oda sıcaklığı transiyent fotoiletkenlik ölçüm sonuçları Şekil 4.36'da verilmektedir. Transiyent fotoiletkenlik ölçümlerinden yararlanılarak fotodedektörün tepki zamanı, bant genişliği ve NEP parametreleri belirlenmektedir. Şekil 4.36b'de verilen 1064 nm dalgaboylu ışık altında ve 6 V geri beslemede alınan TPC sinyaline fit yapılarak zaman sabitleri belirlenmektedir.



Şekil 4.36: Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün oda sıcaklığı TPC ölçüm sonuçları

Transiyent fotoiletkenlik spektrumlarına yapılan fitlerden zaman sabitleri $\tau_1 = 1.5$ ns ve $\tau_{rise} = 1.7$ ns olarak elde edilmiştir. Rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörün absorpsiyon bölgesi diğer rezonans kaviteli fotodedektörlerin absorpsiyon bölgesinden daha dar olduğu için tepki süresi daha hızlıdır.

Denklem 2.8 kullanılarak fotodedektörün bant genişliğine, sırasıyla Denklem 2.9 ve 2.10 kullanılarak da fotodedektörün NEP büyüklüğüne ve dedektivitesine ulaşılmıştır. Oda sıcaklığında fotodedektörün bant genişliği BW=205 MHz, dedektivitesi ve NEP büyüklüğü ise sırasıyla $D^* = 4.45 \times 10^{11}$ cmHz$^{1/2}$/W ve $NEP = 2.45 \times 10^{-11}$ W olarak elde edilmiştir.

Bu ölçümlerde optik uyarım kaynağı olarak 1064 nm'de ışıma yapan pulslı laser kullanılmıştır. 1064 nm dalgaboyu bütün yapının yasımasının $R \sim \%40$ olduğu bölgeye denk gelmektedir. Bu nedenle çok düşük geri besleme voltajlarında TPC sinyali gözlenemediği için ölçümleri 6 V gibi yüksek geri besleme voltajı altına yapılabilmiştir. Fotodedektörlerin gerçek hız, dedektivite ve NEP büyüklüğünün belirlenmesi için transiyent fotoiletkenlik ölçümleri besleme voltajına bağlı olarak ve kavite dalgaboyunda ışıma yapabilen laserle yapılmalıdır.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, sadece alt DBR'a sahip kuazi-kavite ve hem alt hem de üst DBR'a sahip rezonans kaviteli iç kazançlı *p-i-n* eklem $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaN_zAsAs_{1-z}$ kuantum kuyulu fotodedektörlerin kuantum kuyusu ve DBR sayısına, aktif bölge ve bariyer malzemelerinin alaşım konsantrasyonlarına bağlı olarak; tasarımları, fabrikasyonları, elektriksel ve optik karakterizasyonları yapılarak fotodedektör özellikleri belirlenmiştir. Çalışmada 5 farklı fotodedektör yapısı incelenmiştir.

Çalışmaya öncelikle fotodedektörlerin tasarımıyla başlanmıştır. İncelenen fotodedektörlerin tasarımını, absorpsiyon bölgesinin tasarımı ve rezonans kavitesini oluşturan DBR tabakalarının tasarımı olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Fotodedektörlerin absorpsiyon bölgeleri seyreltik azotlu $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaN_zAs_{1-z}$(z=0,0.035) kuantum kuyusu sistemlerinden (9, 20) oluşmaktadır. Absorpsiyon bölgesi tasarımında kuantum kuyusunu ve bariyeri oluşturan yarıiletkenlerin bant aralığı ve bu tabakalararasındaki örgü uyumu olmak üzere iki önemli parametreye odaklanılmıştır. Çalışmadaki tüm fotodedektörlerde, $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}$'in absorpsiyon dalgaboyu 1.3 μm ve bariyer malzemesiyle (GaN_zAs (z=0, 0.035)) arasındaki gerilme (strain) minimum olacak şekilde tasarlanmıştır. Seyreltik azotlu yapıların bant aralığı enerjisi hesaplanırken BAC modeli, tabakalararası gerilme hesaplanırken ise Vegard yasası kullanılmıştır.

Kuazi-kaviteli ve rezonans kaviteli $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ kuantum kuyulu fotodedektörlerde tabakalararası gerilme 0.0185'tir. $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ kuantum kuyulu fotodedektörde ise bu değer 0.0209'dur. Literatürle kıyaslandığında oldukça düşük olan bu gerilme mertebeleri sayesinde yapı daha kaliteli büyütülerek oldukça dar spektral kaviteler (FWHM: 3-5 nm) elde edilmiştir.

İncelenen tüm fotodedektörler Tampere Teknoloji Üniversitesi tarafından MBE ile büyütülmüştür. 2 inç çapında büyütülen rezonans kaviteli örneklerin çalışma dalgaboyu homojenliğinin incelenmesi için oda sıcaklığında her 1 cm^2'de bir yansıma ve fotoışıma ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, 2 inç çaplı örnek boyunca çalışma dalgaboyu tasarlanan dalgaboyunun $\mp$3 nm civarında değişmektedir. Bu kadar çok

tabakaya rağmen ulaşılan bu homojenite MBE teknolojinin ve MBE kullanıcılarının geldiği noktayı göstermektedir.

Kuazi-kaviteli $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ kuantum kuyulu fotodedektörler ile rezonans kaviteli $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ kuantum kuyu fotodedektörlerin sıcaklığa bağlı fotoışıma ölçümleri yapılarak ve sonuçlara Varshni fitleri uygulanarak $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}$ alaşım yarıiletkeninin Debye sıcaklığı ve termal genleşme katsayısı belirlenmiştir. İki örnek arasındaki tek fark üst DBR tabakaları olduğu için iki örneğin sonuçları kıyaslanarak absorpsiyon bölgesi ile rezonans dalgaboyu arasındaki uyum incelenmiştir. Deneysel fotoışıma sonuçlarına göre 9 ve 20 kuantum kuyusuna sahip her iki örnekte de absorpsiyon bölgesi ile rezonans kavitesi arasında yaklaşık 20-25 nm fark gözlenmiştir. BAC ile hesaplanan bant aralığı enerjileri deneysel sonuçlardan 20 meV yüksek çıkmaktadır. Bu fark, Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu *p-i-n* çığ fotodedektörün tasarımı sırasında alt DBR tabaka kalınlıklarının yanlış hesaplanmasından kaynaklamaktadır. Gelecekte yapılacak tasarımlarda fotonun kavite içerisindeki tur sayısı ve olası durum yoğunluğu değişimi dikkate alınarak kavite dalgaboyu ile absorpsiyon dalgaboyu arasında daha iyi eşleşme sağlanabilir.

Mevcut altyapıda, kuazi-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 fotodedektörün merkez dalgaboyunda çalışan uyarım kaynağı olmadığı için 0.5 V geri besleme altında maksimum %5 kuantum verimi elde edilmektedir. Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörde ise oda sıcaklığında 2 V geri besleme altında %25 kuantum verimine ulaşılmaktadır. Kuazi-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 fotodedektörlerin merkez dalgaboyunda fotoakım ölçümü yapılamadığı için bu iki aygıt birbiriyle kıyaslanamamaktadır.

Bilindiği kadarıyla literatürde kauzi-kaviteli fotodedektör örneği olmadığı için kuazi-kaviteli 20 kauantum kuyulu fotodedektörde 2 V geri beslemede %25 kuantum verimiyle en yüksek verime ulaşılmıştır.

Kuazi-kaviteli 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörün fotoakım ölçümlerinde besleme voltajına bağlı olarak belirli voltaj

aralığında osilasyonlar gözlenmiştir. Bu osilasyonlar yüksek akımda çalışan aygıtların temel problemi olan Franz-Keldiysh osilasyonları olarak yorumlanmıştır. Geri besleme voltajına bağlı olarak absorpsiyon katsayısının değişimi hesaplanarak bu yorumlar desteklenmiştir.

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 fotodedektörün kuantum verimi oda sıcaklığında %23 olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, hem kuazi-kaviteli hem de rezonans kaviteli fotodedektörlerde yapılan fotoışıma ölçüm sonuçlarına göre absorbsiyon dalgaboyu ile kavite rezonans dalgaboyu arasında 20 nm fark gözlenmiştir. $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}$ yarıiletkenin sıcaklığa bağlı absorpsiyon dalgaboyu değişimi 0.35 nm/°C iken, rezonans kaviteli sistemin kavite dalgaboyu değişimi 0.077 nm/°C dir. Absorpsiyon bölgesinin ve rezonans kavitesinin sıcaklığa bağlılığı birbirinden 5 kat farklı olduğu için rezonans kaviteli sistemlerde örgü sıcaklığı değiştirilerek daha iyi absorpsiyon-kavite uyumu yakalanabileceği, böylece daha yüksek kuantum verimi elde edilebileceği düşünülmüştür. Sıcaklığa bağlı fotoakım ölçümleri yapılarak, 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 fotodedektörün kuantum verimi 10 °C de %16 iken, 40 °C %32 olarak elde edilmiştir. Bu fotodedektörde sadece oda sıcaklığı civarında, sıcaklık kontrollü termoelektrik soğutucu yardımıyla sıcaklığı ayarlanarak kuantum verimi 2 kat arttırılmıştır.

Rezonans kaviteli 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörün kuantum verimi merkez dalgaboyu olan 1323 nm'de sırasıyla 2 V geri beslemede %10 iken, 10 V geri besleme altında %42 olmaktadır.

Transiyent fotoiletkenlik spektrumlarına yapılan fitlerden elde edilen zaman sabitleri 9 ve 20 kuantum kuyulu $Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$ *p-i-n* çığ fotodedektörler için sırasıyla $\tau_1 = 5$ ns ve $\tau_1 = 20$ ns olarak belirlenmiştir. Çıkış zamanları τ_{rise} ise sırasıyla 2.74 ns ve 8.8 ns olarak elde edilmiştir. Kuantum kuyusu sayısı arttıkça absorpsiyon bölgesinin genişliği dolayısıyla geçiş zamanı arttığı için 20 kuantum kuyulu fotodedektörün cevap hızı 9 kuantum kuyulu fotodedektörünkinden daha yavaştır. 20 kuantum kuyulu fotodedektörde kavite ve absropsiyon bölgesinin uyumu daha kötü olduğu için 9 ve 20 kuantum kuyulu örneklerin kuantum verimleri kendi içlerinde değerlendirilmiştir.

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 fotodedektörün FWHM'u 5 nm olup merkez dalgaboyu olan 1286 nm'de -1 V geri beslemede kuantum verimi %43'tür. Sahip olduğu iç kazanç sayesinde kuantum 2.5 V geri beslemeden sonra kuantum verimi %67 olmaktadır. Hem bu çalışmada hem de bilindiği kadarıyla literatürde seyreltik azotlu rezonans kaviteli fotodedektör sistemlerinde ulaşılan en yüksek kuantum verimidir.

Bu çalışmada, sadece alt DBR'a sahip kuazi-kaviteli ve hem alt hem de üst DBR'a sahip rezonans kaviteli iç kazançlı *p-i-n* $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaN_zAs_{1-z}$ kuantum kuyulu fotodedektörlerin, kuantum kuyusu ve DBR sayısına, aktif bölge ve bariyer malzemelerinin alaşım konsantrasyonlarına bağlı olarak; tasarımları, fabrikasyonları, elektriksel ve optik karakterizasyonları yapılarak fotodedektör özellikleri belirlenmiştir. Çalışmada incelenen tüm rezonans kaviteli fotodedektörlerin, fotodedektör karakteristiklerinin sayısal çıktıları Tablo 5.1'de bir arada verilmiştir.

Tablo 5.1: İncelenen tüm rezonans kaviteli fotodedektörlerin deneysel çıktılarla karşılaştırılması.

	$Ga_{0.733}In_{0.267}N_{0.025}As_{0.975}/GaN_{0.035}As_{0.965}$		$Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$
Kuantum Kuyusu	9	20	9
$QE\ (\%)$	23 (-0.5 V)	42 (-10 V)	43 (-1 V)
$\tau_{rise}\ (ns)$	2.74	8.8	1.7
$BW\ (MHz)$	40	130	205
$D\ (cmHz^{1/2}/W)$	1.39×10^{11}	3.58×10^{11}	4.45×10^{11}
$I_D\ (A)$ (-1 V)	-8.1×10^{-6}	-1.3×10^{-4}	-1.7×10^{-9}
$M(V)$ (-1 V)	4	1.5	2

Tablo 5.1'de görüldüğü gibi neredeyse tüm parametrelerde en iyi değerler 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 fotodedektörde elde edilmektedir. Diğer fotodedektörlerden en önemli farkları bariyer malzemesinin GaAs olması ve akım sınırlandırıcı oksit tabakasına sahip olmasıdır. Bariyer malzemesi olarak GaAs kullanıldığından kuantum kuyusu ile bariyer arasında $GaN_{(0.35)}As$'a göre 300 meV daha fazla enerji farklı elde edilmektedir. Yüksek bant süreksizlikleri ve akımı belirli bir alanda sınırlayan oksit tabakası sayesinde daha düşük karanlık akım ve aynı şartlarda daha yüksek kuantum verimi ve bant genişliği elde edilmektedir. Buna rağmen aynı geri besleme voltajında 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 fotodedektörde daha yüksek kazanç elde edilmesinin nedeni absorpsiyon dalgaboyu ile kavite dalgaboyunun en iyi çakıştığı aygıt olması olabilir.

Bu tez kapsamında incelenen fotodedektörlerin performansları literatürde bulunan GaInNAs-tabanlı rezonans kaviteli bir kaç çalışma ile kıyaslanabilir. Zhang ve arkadaşları, aktif bölgesinin 7 nm genişliğinde üç adet GaInNAs/GaAs kuantum kuyusu sisteminin oluşturduğu sırasıyla üst ve alt DBR çifti sayıları 11 ve 6 olan RCEPD ile 1.3 μm merkez dalgaboyunda %12 kuantum verimine ve 5.8 nm FWHM'a ulaşılmıştır [16]. Han ve arkadaşları, 25 alt ve 9 üst olmak üzere GaAs/AlAs DBR çiftine sahip, aktif bölgesinin 7 nm genişliğinde üç tane GaInNAs/GaAs kuantum kuyusu sisteminin oluşturduğu RCE fotodedektör ile 1.55 μm merkez dalgaboyunda 5V geri besleme voltajında %33 kuantum verimine ulaşmışlardır [17]. Her iki fotodedektörle de kıyaslandığında bu çalışmada tasarlanıp, fabrikasyonları yapılarak karakterize edilen fotodedektörler daha düşük geri besleme voltajlarında yüksek kuantum verimine ve daha seçici rezonans dalgaboyuna sahiptir. Bu özlelikleri sayesinde 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 "Türk Patent ve Marka Kurumu" tarafında 21.11.2017 tarihinde ulusal patent (TR 2015 05193 B) olarak tescillenmiştir.

Sonuç olarak çalışmada incelenen fotodedektörler birbirleriyle kıyaslandığında en yüksek değerin rezonans kaviteli 9 kuantum kuyulu $Ga_{0.65}In_{0.35}N_{0.02}As_{0.98}/GaAs$ *p-i-n* çığ fotodedektörde elde edilmesine rağmen yukarıda da bahsedildiği gibi incelenen tüm fotodedektörlerin performansları literatürle kıyaslandığından gayet iyi durumdadır. Bu bağlamda seyreltik azotlu kuazi-kaviteli veya rezonans kaviteli kuantum kuyulu $Ga_{1-x}In_xN_yAs_{1-y}/GaN_zAs_{1-z}$ *p-i-n* çığ fotodedektörler başta fiber optik iletişimin 1.3 μm dalgaboyu penceresinde olmak üzere astronomide, savunma sanayisinde *vb.* pek çok uygulamada fotodedektör olarak kullanılma potansiyeline sahiptirler.

Bu tez kapsamında ulaşılan bilgi ve tecrübeler ışığında ileride daha düşük elektrik alan altında daha yüksek verimde çalışabilen rezonans kaviteli veya geniş spektral duyarlığa sahip fotodedektörler tasarlanabileceği düşünülmektedir. Tez çalışması süresince fabrikasyon konusunda edinilen tecrübe sayesinde dizinler oluşturularak görüntüleme teknolojisi için de fotodedektör tasarımı yapılabilir. Özellikle IR bölgede çalışan

fotodedektörler ile astronomide ve savunma sanayisinde kullanılabilecek fotodedektörler tasarlanarak, fabrikasyonu ve karakterizasyonu yapılabilir. Fiber optik sistemler ile alakalı edinilen bilgi ve beceri ile sadece fotodedektörlerin değil laser, LED gibi ışık yayan optoelektronik aygıtların araştırılması ve geliştirilmesi konusunda da çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Gerd Kaiser, 2010, *Optical Fiber Communications*, Pearson Prentice Hall, ISBN 9780130326812.

[2] Maiman, T. H., 1960, Stimulated optical radiation in Ruby, *Nature* 187 (4736), 493–494.

[3] Kao, K. and Hockham, G., 1966, Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* 113 (7), 1151–1158.

[4] Mendez, A. and Morse, T. F., 2007, *Specialty Optical Fibers Handbook Contents Page*, Elsevier Ltd, ISBN 9780123694065.

[5] 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.

[6] Photodetectors, R.-c. E., 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Miller, B. I., Koren, U., Young, M. G., Cohen, D. A., Young, B. D., Hu, E. and Bowers, J. E., 1994, High Quantum Efficiency and Narrow Absorption Bandwidth of the Wafer-Fused Resonant InGaAs Photodetectors, *IEEE Photonics Technology Letters* 6 (7), 811–813.

[10] Adachi, S., 1985, GaAs, AlAs and AlxGa1-xAs: Material parameters for use in research and device applications, *J. Appl. Phys.* 58 (3), R1.

[11] Xiaoguang Sun, Shuling Wang, Hsu, J., Sidhu, R., Zheng, X., Xiaowei Li, Campbell, J. and Holmes, A., 2002, GaAsSb: a novel material for near infrared photodetectors on GaAs substrates, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 8 (4), 817–822.

[12] 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.

[13] Murtaza, S. S., Chelakara, R. V., Dupuis, R. D., Campbell, J. C. and Dentai, A. G., 1996, Resonant-cavity photodiode operating at 1.55 μm with Burstein-shifted InGaAs/InP reflectors, *Applied Physics Letters* 69 (17), 2462–2464.

[14] HaŠko, D., Kováˇc, J., Uherek, F., Škriniarová, J., Jakaboviˇc, J. and Peternai, L., 2006, Avalanche photodiode with sectional InGaAsP/InP charge layer, *Microelectronics Journal* 37 (6), 483–486.

[15] P Zhong, 2001, GaInNAs/GaAs Multiple-Quantum Well Resonant-Cavity-Enhanced Photodetectors at 1.3 μm, *Chin. Phys. Lett.* 18 (9), 1249.

[16] Zhang, R., Zhong, Y., Xu, Y., Zhang, W., Du, Y., Huang, Y., Ren, X., Pan, Z. and Ling, Y., 2002, 1.3 μm GaInNAs/GaAs quantum well resonant cavity enhanced photodetector, *Acta Photonica Sinica* 31 (3), 303–307.

[17] 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 μm GaInNAs resonant-cavity-enhanced photodetector grown on GaAs, *Applied Physics Letters* 87 (11), 1–4.

[18] 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.

[19] 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.

[20] 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.

[21] Sarcan F., 2012, Modülasyon Katkılı GaInNAs/GaAs Kuantum Kuyusu Yapıların Optik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi.

[22] 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.

[23] 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.

[24] 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 μm optical communications window, *Superlattices and Microstructures* 86, 467–471.

[25] Sun, X., 2002, High Performance 1300 nm Photodetectors Grown By Molecular Beam Epitaxy, Ph.D. thesis, The University of Texas.

[26] Kapron, F. P., Keck, D. B. and Maurer, R. D., 1970, Radiation losses in glass optical waveguides, *Applied Physics Letters* 17 (10), 423–425.

[27] Gloge, D., 1979, The optical fibre as a transmission medium, *Reports on Progress in Physics* 42, 1778–1824.

[28] Ainslie, B. J., Beales, K. J., Day, C. R. and Rush, J. D., 1981, Interplay of Design Parameters and Fabrication Conditions on the Performance Monomode Fibers Made by MCVD, *IEEE Journal of Quantum Electronics* QE17 (6), 854–857.

[29] Saifi, M. A., Jang, S. J., Cohen, L. G. and Stone, J., 1982, Triangular-profile single-mode fiber, *Optics Letter* 7 (1), 1981–1983.

[30] Alwayn, V., 2004, *Implementation*, Cisco Press, ISBN 1587051052.

[31] Sanferrare, R. J., 1987, Terrestrial Lightwave Systems., *AT&T Technical Journal* 66 (1), 95–107.

[32] Suzuki, M., Taga, H., Tanaka, H., Yamamoto, S., Edahawa, N. and Akiba, S., 1989, 2.4Gbit/s lOOkm Penalty-Free Conventional Fibre Transmission Experiments Using GaInAsP, *IEEE electronics lettersronics letters* 25 (3), 192–194.

[33] Tomkos, I., Hallock, B., Roudas, I., Hesse, R., Boskovic, A., Nakano, J. and Vodhanel, R., 2001, 10-Gb / s Transmission of 1 . 55- m Directly Modulated Signal over 100 km of Negative Dispersion Fiber 13 (7), 735–737.

[34] Ludwig, R., Ferber, S., Schubert, C., Huettl, B. and Weber, H. G., 2006, Single Channel Transmission beyond 1 Tbit / s, *Lasers and Electro-Optics Society, 2006. LEOS 2006. 19th Annual Meeting of the IEEE*, pages 27–28.

[35] Soma, D., Wakayama, Y., Beppu, S., Sumita, S. and Tsuritani, T., 2018, 10 . 16 Peta-bit / s Dense SDM / WDM transmission over Low-DMD 6-Mode 19-Core Fibre across C + L Band, *Journal of Lightwave Technology* 36 (6), 1362–1368.

[36] Hall, R. N., Fenner, G. E., Kingsley, J. D., Soltys, T. J. and Carlson, R. O., 1962, Coherent light emission from GaAs junctions, *Physical Review Letters* 9 (9), 366–368.

[37] Chu, P. L. and Whitbread, T., 1982, Measurement of stresses in optical fiber and preform, *Applied Optics* 21 (23), 4241–4245.

[38] Pace, P., Huntington, S. T., Lyytikäinen, K., Roberts, A. and Love, J. D., 2004, Refractive index profiles of Ge-doped optical fibers with nanometer spatial resolution using atomic force microscopy, *Optics Express* 12 (7), 1452–1457.

[39] Johnson, M. K., 1965, High-speed Photodiode Signal Enhancement at Avalanche Breakdown Voltage, *IEEE Transactions on Electron Devices* 12 (2), 55–63.

[40] Kim, O. K., Forrest, S. R., Bonner, W. A. and Smith, R. G., 1981, A high gain In0.53Ga0.47As/InP avalanche photodiode with no tunneling leakage current, *Applied Physics Letters* 39 (5), 402–404.

[41] Majumdar, A., Shah, A., Gokhale, M., Sen, S., Ghosh, S., Arora, B. M. and Tsui, D., 2005, Quantum-Well Infrared Photodetectors Grown Using Metal – Organic Vapor Phase Epitaxy, *IEEE Journal of Quantum Electronics* 41 (6), 872–878.

[42] Sarcan, F., Nordin, M. S., Kuruo˘glu, 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.

[43] Kasap, S. O., 2013, *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, Pearson Prentice Hall, second edi edition, ISBN 9780132151498.

[44] Rogalski, A., 2011, *Infrared Detectors*, CRC Press, second edi edition, ISBN 9781420076714.

[45] Erol, A. and Balkan, N., 2013, *Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları*, Seçkin Yayıncılık, ISBN 9789750222214.

[46] 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.

[47] Yuan, P., Anselm, K. A., Hu, C., Nie, H., Lenox, C., Holmes, A. L., Streetman, B. G., Campbell, J. C. and Mclntyre, R. J., 1999, A new look at impact lonization-part II: Gain and noise in short avalanche photodiodes, *IEEE Transactions on Electron Devices* 46 (8), 1632–1639.

[48] 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.

[49] 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.

[50] Ma, C. F., 1995, Characterization and Modelling of SAGCM InP/InGaAs Avalanche Photodiodes for Multigigabit Optical Fiber Communications, Ph.D. thesis, Simon Fraser University.

[51] Nie, H., Anselm, K. A., Hu, C., Murtaza, S. S., Streetman, B. G. and 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.

[52] 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.

[53] Kagawa, T., Kawamura, Y. and Iwamura, H., 1992, InGaAsP-InA1As Superlattice Avalanche Photodiode, *IEEE Journal of Quantum Electronics* 28 (6), 1419–1423.

[54] 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.

[55] Campbell, J., 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.

[56] 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.

[57] Ünlü, M. S. and Strite, S., 1995, Resonant cavity enhanced photonic devices, *Journal of Applied Physics* 78 (2), 607–639.

[58] Kishino, K., Unlu, M. S., Chyi, J.-i., Reed, J., Arsenault, L. and Morkoq, H., 1991, Resonant Cavity -Enhanced (RCE) Photodetectors, *IEEE Journal of Quantum Electronics* 21 (8), 2025–2028.

[59] Erol, A., 2002, Yüzey I¸sıması Yapan Dü¸sük Boyutlu Yapılarda Bragg Yansıma Olayının İncelenmesi, Ph.D. thesis, İstanbul Üniversitesi.

[60] Choy, H. K. H., 1998, Design and Fabrication of Distributed Bragg Reflectors for Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology.

[61] Fern, R. E. and Onton, A., 1971, Refractive index of AlAs, *Journal of Applied Physics* 42 (9), 3499–3500.

[62] Skauli, T., Kuo, P. S., Vodopyanov, K. L., Pinguet, T. J., Levi, O., Eyres, L. A., Harris, J. S., Fejer, M. M., Gerard, B., Becouarn, L. and Lallier, E., 2003, Improved dispersion relations for GaAs and applications to nonlinear optics, *Journal of Applied Physics* 94 (10), 6447–6455.

[63] Donmez, O., Sarcan, F., Lisesivdin, S. B., Vaughan, M. P., Erol, A., Gunes, M., Arikan, M. C., Puustinen, J. and Guina, M., 2014, Analytic modeling of temperature dependence of 2D carrier mobility in as- grown and annealed GaInNAs / GaAs quantum well structures 125009.

[64] Sarcan, F., Donmez, O., Erol, A., Gunes, M., Arikan, M. C., Puustinen, J. and Guina, M., 2013, Influence of nitrogen on hole effective mass and hole mobility in p-type modulation doped GaInNAs/GaAs quantum well structures, *Applied Physics Letters* 103 (8), 082121.

[65] Nutku, F., Donmez, O. and Sarcan, F., 2014, Negative and positive magnetoresistance in GaInNAs / GaAs modulation-doped quantum well structures, *Applied Physics A Materials Science & Processing* 118 (823-829).

[66] Sharma, T. K., Jangir, R., Porwal, S., Kumar, R., Ganguli, T., Zorn, M., Zeimer, U., Bugge, F., Weyers, M. and Oak, S. M., 2009, Compositional dependence of the bowing parameter for highly strained InGaAs/GaAs quantum wells, *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics* 80 (16), 1–11.

[67] Baca, A. G. and Ashby, C. I. H., 2009, *Fabrication of GaAs Devices*, The Institution of Engineering and Technology, ISBN 978-0863413537.

[68] Liu, Z., Sun, Y., Machuca, F., Pianetta, P., Spicer, W. E. and Pease, R. F. W., 2003, Optimization and characterization of III–V surface cleaning, *Journal of Vacuum Science & Technology* 21 (4), 1953–1958.

[69] Kern, W., 1993, *HANDBOOK OF SEMICONDUCTOR WAFER Cleaning Technology*, ISBN 0815512376.

[70] Lasagni, F. A., 2010, *Fabrication and Characterization in the Micro-Nano Range*, volume 5, Springer, ISBN 9783642290527.

[71] Mack, C., 2008, *Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication*, Wiley, ISBN 978-0-470-01893-4.

[72] Hays, D. C., 1999, Selective Etching of Compound Semiconductors, Ph.D. thesis, University of Florida.

[73] Naureen, S., 2013, Top-down Fabrication Technologies for High Quality III-V Nanostructures, Ph.D. thesis, KTH Royal Institute of Technology.

[74] Shaw, D. W., 1981, Localized GaAs Etching with Acidic Hydrogen Peroxide Solutions, *Journal of The Electrochemical Society* 128 (4), 874.

[75] Mao, B. Y., Nielsen, J. A., Friedman, R. A. and Lee, G. Y., 1994, The Applications of Citric Acid/Hydrogen Peroxide Etching Solutions in the Processing of Pseudomorphic MODFETs, *J. Electrochem. Soc.* 141 (4), 1082–1085.

[76] Chung, S. H., 2005, Gunn Laser, Ph.D. thesis, University of Essex.

[77] 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.

[78] Çokduygulular, E., 2017, III-N-V ve III-Bi-V Yarıiletlen Ala¸sımlarda Elektronik Transport.

[79] Zuleeg, R., Priebertshauser, E. P., Stephens, J. M. and Watanabe, S. H., 1986, Al-Ge Ohmic Contacts to n-Type GaAs, *IEEE electron device letters* 7 (11), 603–604.

[80] Ware, R. M., Material, J. E., Lu, Y., Kalkur, T. S. and Araujo, C. A. P. D., 1989, Rapid Thermal Alloyed Ohmic Contacts to p-Type GaAs, *Journal Electrochem Soc* 136 (10), 4–10.

[81] Wakimoto, H., Koide, Y. and Murakami, M., 1996, Effects of Small Amounts of Silver Added to NiGe Ohmic Contacts to n-Type GaAs, *Journal Electrochem* 143 (5), 1705–1709.

[82] Katz, A., Abernathy, C. R. and Pearton, S. J., 1990, Pt / Ti ohmic contacts to ultrahigh carbondoped pGaAs formed by rapid thermal processing Pt / Ti ohmic contacts to ultrahigh by rapid thermal processing, *Applied Physics Letters* 56 (11), 1028–1030.

[83] Oku, T., Wakimoto, H., Otsuki, A., Murakami, M., Oku, T. and Wakimoto, H., 1994, NiGebased ohmic contacts to ntype GaAs . I . Effects of In addition NiGe-based ohmic contacts to n-type GaAs . I . Effects of In addition, *Journal of Applied Physics* 75 (5).

[84] Winston, D. W., 1996, Physical simulation of optoelectronic semiconductor devices, Ph.D. thesis, University of Colorado.

[85] Varshni, Y. P., 1967, Temperature dependence of the energy gap in semiconductors, *Physica* 34, 149–157.

[86] Passler, P., 1999, Parameter Sets Due to Fittings of the Temperature Dependencies of Fundamental Bandgaps in Semiconductors, *Physica Status Solidi (B)* 216, 975–1008.

[87] Hua, T. K., A Study of Dilute Nitride-Antimonide Semiconductor for Near Infrared Optoelectronic Devices, year= 2010, Ph.D. thesis, Nanyang Technological University.

[88] Warren, A. C., Burroughes, J. H., Woodall, J. M., Mcinturff, D. T., Hodgson, R. T., Member, A. and Melloch, M. R., 1991, 1.3 ump-i-n Photodetector Using GaAs with As Precipitates (GaAs:As), *IEEE Journal of Device Letters* 12 (10), 527–529.

[89] Buyanova, I. A., Chen, W. M. and Tu, C. W., 2004, Defects in dilute nitrides, *Journal of Physics: Condensed Matter* 16, 3027–3035.

[90] Chen, W. M., Buyanova, I. A., Tu, C. W. and Yonezu, H., 2006, Point defects in dilute nitride III-N – As and III-N – P, *Physica B* (376-377), 545–551.

[91] Hu, Y., Menyuk, C. R., Hutchinson, M., Urick, V. J. and Williams, K. J., 2016, Impact of the Coulomb Interaction on the Franz-Keldysh Effect in a High-Current Photodetector, *Optics Letter* 41 (2), 456–459.

[92] Hastings, A. S., Tulchinsky, D. A. and Williams, K. J., 2009, Photodetector nonlinearities due to voltage-dependent responsivity, *IEEE Photonics Technology Letters* 21 (21), 1642–1644.

[93] Hu, Y., Carruthers, T. F., Menyuk, C. R., Hutchinson, M., Urick, V. J. and Williams, K. J., 2015, Modeling nonlinearity in a modified uni-traveling-carrier (MUTC) photodetector, *Modeling nonlinearity in a modified uni-traveling-carrier (MUTC) photodetector*, ISBN 9781479974658, pages 122–123.

[94] Williams, K. J. and Esman, R. D., 1998, Photodiode DC and microwave nonlinearity at high currents due to carrier recombination nonlinearities, *IEEE Photonics Technology Letters* 10 (7), 1015–1017.

[95] Takeda, K., Hiraki, T., Tsuchizawa, T., Nishi, H., Kou, R., Fukuda, H., Yamamoto, T., Ishikawa, Y., Wada, K. and Yamada, K., 2014, Contributions of Franz-Keldysh and Avalanche Effects to Responsivity of a Germanium Waveguide Photodiode in the L-Band, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 20 (4), 64–70.

[96] Lambert, L. M., 1965, Optical absorption in an electric field in semi-insulating gallium arsenide, *J. Phys. Chem. Solids* 26, 1409–1418

[97] Callaway, J., 1964, Optical absorpton in an electric field, *Physical Review* 134 (4A), 998–1000.

[98] Fu, Y., Pan, H., Li, Z., Beling, A. and Campbell, J. C., 2011, Characterizing and modeling nonlinear intermodulation distortions in modified uni-traveling carrier photodiodes, *IEEE Journal of Quantum Electronics* 47 (10), 1312–1319.

[99] Miyamoto, T., Takeuchi, K., Kageyama, T., Koyama, F. and Iga, K., 1999, Chemical beam epitaxy of GaInNAs/GaAs quantum wells and its optical absorption property, *Journal of Crystal Growth* 197 (1-2), 67–72.

[100] Dudley, J. J., Crawford, D. L. and Bowers, J. E., 1992, Temperature Dependence of the Properties of DBR Mirrors Used in Surface Normal Optoelectronic Devices, *IEEE Photonics Technology Letters* 4 (4), 311–314.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Fahrettin SARCAN
Doğum Yeri	Samsun
Doğum Tarihi	17.11.1988
Uyruğu	[X] T.C. [ ] Diğer:
Telefon	0544 662 83 59
E-Posta Adresi	fahrettin.sarcan@istanbul.edu.tr
Web Adresi	http://aves.istanbul.edu.tr/fahrettin.sarcan/

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Fakülte	Fen Fakültesi
Bölümü	Fizik
Mezuniyet Yılı	2010

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	Fizik Anabilim Dalı
Programı	Katıhal Fiziği Programı
Mezuniyet Tarihi	2012

Doktora	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	Fizik Anabilim Dalı
Programı	Katıhal Fiziği Programı
Mezuniyet Tarihi	2018

Makale ve Bildiriler

Patentler

Erol A., Balkan N., Sarcan F., İstanbul TTM, 2017, Dalgaboyu Seçiciliği Yüksek İç Kazançlı Rezonans Kaviteli Fotodetektör, Patent No:TR 2015 05193B.

Makaleler

Sarcan F., Nutku F., Nordin M. S., Vickers A. J., Erol A. 2018, A study on voltage-dependent response of a GaInNAs-based pin photodetector with a

quasi-cavity, *Semiconductor Science and Technology*, Accepted.

Sarcan F., Mutlu S., Çokduygulular E., Donmez Ö., Erol A., Puustinen J., Guina M., 2018, A study of electric transport in n- and p-type modulation-doped GaInNAs/GaAs quantum well structures under a high electric field, *Semiconductor Science and Technology*, 33, 6.

Nordin M. S., Sarcan F., Günes M., Boland-Thoms A., Erol A. Ve Vickers A. J. 2018, Temporal Response of Dilute Nitride Multi-Quantum-Well Vertical Cavity Enhanced Photodetector, *Journal of Electronic Materials*, 47, 1.

Sarcan F., Nordin M. S., Kuruoğlu F., Erol A. Ve 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.

Nutku F., Donmez O., Çokduygulular E., Sarcan F., Kuruoğlu F., Mutlu S., Yıldırım S. Ve Erol A. 2017, Effect Of Thermal Annealing and Nitrogen Composition On Quantum Transport İn GaInNAs Alloy Based Modulation Doped Quantum Well Structures, *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 404-409.

Balkan F., Erol A., Sarcan F., Al-Ghuraibawi L. F. F. ve Nordin M. S. 2015, Dilute Nitride Resonant Cavity Enhanced Photodetector With Internal Gain For The Lambda Similar to 1.3 μM Optical Communications Window, *Superlattices and Microstructures*, 86, 467-471

Nutku F., Dönmez Ö., Sarcan F., EROL A., Janne P. Arıkan M. Ç., ve Mircea G. 2015, Quantum Oscillations and Interference Effects in Strained n- and p-type Modulation Doped GaInNAs/GaAs Quantum Wells, *Applied Physics A-Materials Science and Processing*, 118, 3

Sarcan F., Nutku F., Donmez O., Kuruoğlu F., Mutlu S., Erol A., Yıldırım S. ve Arikan M. Ç. 2015, Quantum Oscillations and Interference Effects in Strained n- and p-type Modulation Doped GaInNAs/GaAs Quantum Wells, *Journal of Physics D-Applied Physics*, 48, 30

Dönmez O., Sarcan F., Lisesivdin S. B., Vaughan M. P., Erol A., Güneş M., Arıkan M. C., Puustınen J. Ve Guina M., 2014, Quantum Oscillations and Interference Effects in Strained n- and p-type Modulation Doped GaInNAs/GaAs Quantum Wells, *Semiconductor Science and Technology*, 29, 12

Sarcan F., Dönmez O., Kara K., Erol A., Akalın E., Arıkan M. C., Makhloufi H., Arnoult A. ve Fontaine C., 2014, Bismuth-Induced Effects on Optical, Lattice Vibrational, and Structural Properties of Bulk GaAsBi Alloys, *Nanoscale Research Letters*, 9, 1

Dönmez Ö.,Sarcan F., Erol A.,Güneş M., Arıkan M. Ç.,Janne P. ve Mircea G. 2014, Magnetotransport Study on as Grown and Annealed n- and p-type Modulation

Doped GaInNAs GaAs Strained Quantum Well Structures, *Semiconductor Science and Technology*, 29, 12

Sarcan F., Dönmez O., Erol A., Günes M., Arıkan M. C., Puustinen J. ve Guina M.2013, Influence Of Nitrogen on Hole Effective Mass and Hole Mobility in p-type Modulation Doped GaInNAs/GaAs Quantum Well Structures, *Applied Physics Letters*, 103, 8

Erol A., Akalın E., Sarcan F., Dönmez O., Akyüz S., Arıkan M. C., Puustinen J. Ve 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, 574

Sarcan F., Dönmez O., Günes M., Erol A., Arıkan M. C., Puustinen J. Ve 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, 529

Sözlü Bildiriler

Muhammetgulyyev A., Erbaş G. Ö., Sarcan F., Kınacı B., Donmez O., Çelebı Y. G., Erol A. (2017). "A comparison of characteristics of heterojunction pin solar cells based on dilute bismide and dilute nitride alloys." International Conference on Condensed Matter And Materialsscience.

Nordin M. S., Sarcan F., Evans M., Erol A., BolandThoms A., Vickers A. J. (2017). "GaInNAs(Sb) Multi QuantumWell Vertical Cavity Enhanced Photodetector." Semiconductor And Integrated Opto- Electronics Conference: SIOE'17.

Nordin M S., Sarcan F., Erol A., BolandThoms A., Vickers A. J. (2017). "Comparative Study of Multi Quantum Well GaInNAs Photodetector Characterisation." The Physics of Optoelectronic Materials and Devices.

Nutku F., Donmez Ö., Çokduygulular E., Sarcan F., Kuruoglu F., Mutlu S., Yıldırım S., Erol A. (2016). "Investigation of ElectronicTransport Properties in GaInNAs GaAs Quantum Well Structures." Türk Fizik Derneği 32. Uluslararası Fizik Kongresi.

Sarcan F., Nordin S., Erol A., Vickers A. J. (2016). "GaInNAs Based Resonance Cavity Enhanced Photodedector for Optical Communıcation Wavelength." Türk Fizik Derneği 32. Uluslararası Fizik Kongresi.

Nordin S., Sarcan F., Erol A., Boland T. A., Vickers A. J. (2016). "Response Time of Dilute Nitride MQW Vertical Cavity Enhanced Photodetectors." 33. International Conference on the Physics of Semiconductors.

Nutku F., Sarcan F., Donmez O., Kuruoğlu F., Mutlu S., Erol A., Yıldırım S., Arıkan

M. Ç. (2015). "Temperature and electric field dependence of localization in modulation doped GaInNAs GaAs quantum well structures." 9th International Physics Conference of the Balkan Physical Union-BPU9.

Nutku F., Sarcan F., Donmez Ö., Kuruoğlu F., Mutlu S., Erol A., Yıldırım S., Arıkan M. Ç. (2015). "Weak Localization and Weak Antilocalization in n and p type Modulation Doped GaInNAs GaAs Quantum Wells." İstanbul Üniversitesi Dünya Teknoloji, İnovasyon ve Girişimcilik Konferansı.

Naci B., Erol A., Sarcan F., Nordin S. (2015). "Dilute nitride resonant cavity enhanced photodetector with internal gain for operation at 1 286 m." SPIE Optics And Optoelectronıcs, Prague.

Naci B., Erol A., Nordin S., Sarcan F. (2015). "Design and Modelling of GaInNAs Resonant Cavity Enhanced Photodetector at 1.3 μm, "Semiconductor and Integrated opto-electronics Conference: SIOE'15.

Donmez Ö., Sarcan F., Martin V., Erol A., Güneş M., Arıkan M. Ç., Janne P., Mircea G. (2014). "Analytic modeling of temperature dependence of 2D carrier mobility in as grown and annealed GaInNAs GaAs quantum well structures." Turkısh Physıcal Socıety 31st Internatıonal Physıcs Congress

Nutku F.,Donmez O., Sarcan F., Erol A., Arıkan M. Ç. (2014). "Magnetoresistance in n- and p-type GaInNAs GaAs Modulatıon Doped Quantum Well Structures." Turkısh Physical Socıety 31st Internatıonal Physıcs Congress.

Sarcan F., Donmez Ö., Guneş M., Erol A., Arıkan M. Ç., Janne P., Guina M. (2012). "An Analysıs Of Scatterıng Mechanısms In As Grown And Annealed N And P Type Modulatıon Doped GaInNAs(GaAs Quantum Wells." Turkish Physical Society 29th International Physics Congress.

Poster Bildiriler

Muhammetgulyyev A., Sarcan F., Kınacı B., Donmez Ö., Erol A. (2017). "Characterization of Heterojunction pinSolar Cells Based on Dilute Bismide and Dilute Nitride." 8. Uluslararası Bismut İçeren Yarıiletkenler Çalıştayı.

Nordin M. S., Mohmad A R., Sarcan F., BolandThoms A., Erol A., Vickers A. J. (2017). "Comparative Study of Multi Quantum WellPhotodetector Characterization based on GaInNAs for 1.0 μm Wavelength." UK Semiconductor, 2017.

Sarcan F., Nordin S., Kuroglu F., Erol A., Vickers A. J. (2016). "Design Issues and Characterization of a GaInNAs based Resonance Cavity Enhanced Photodetector." Nanophotonics and Micro/Nano Optics International

Conference.

Mutlu S., Çokduygulular E., Çetinkaya Ç., Sarcan F., Donmez O., Erol A. (2016). "Electronıc Transport Propertıes Of P Type GaInNAs GaAs Quantum Well Structures." Türk Fizik Derneği 32. Uluslararası Fizik Kongresi.

Donmez Ö., Sarcan F., Erol A., Guneş M., Arıkan M. Ç., Janne P., Mircea G. (2013). "Thermal annealing and Nitrogen induced effects on electronic transport in n and p type modulation doped GaInNAs GaAs quantum well structures." Novel Gain Materials and Devices Based on III-V-N/Bi Compounds.

Sarcan F., Donmez Ö., Martin V., Erol A., Arıkan M. Ç., Janne P. (2013). "Effect of alloy and interface roughness scatterings on the carrier mobility in n and p type modulation doped GaInNAs GaAs quantum well structures." 17th European Molecular Beam Epitaxy Workshop.

Sarcan F., Donmez Ö., Guneş M., Erol A., Arıkan M. Ç., Mircea G. (2013). "Investigation of Nitrogen dependent in plane electron and hole effective masses in GaInNAs GaAs quantum well." 17th European Molecular Beam Epitaxy Workshop.

Sarcan F., Donmez Ö., Guneş M., Erol A., Arıkan M. Ç., Janne P., Mircea G. (2012). "An analysis of Hall mobility in as grown and annealedn and p type modulation doped Ga0 68In0 32NyAs1 y GaAsquantum wells." International Conference on Superlattices, Nanostructuresand Nanodevices.

Akalın E., Erol A., Sarcan F., Dönmez Ö., Akyüz S., Arıkan M. Ç., Janne P., Mircea G. (2012). "Characterization of as grown and annealed modulation doped Ga1 xInxNyAs1 y GaAs quantum well structures using Infrared spectroscopy and Raman scattering techniques." International Conference on Superlattices, Nanostructures and Nanodevice.

Dönmez ., Sarcan F., Erol A., Arıkan M. Ç., Ungan F., Kasapoğlu E., Sari H., Janne P., Mircea G. (2012). "A comprehensive study of optical characterization of n and p type as grown and annealed modulation doped GaAs GaInNAs QW structures." International Conference on Superlattices, Nanostructures and Nanodevice.

Güneş M., Dönmez Ö., Sarcan F., Erol A., Arıkan M. Ç., Janne P., Mircea G. (2012). "A comparative study on electronic transport properties of n and p modulation doped GaInAs GaAs and dilute nitrideGa0 68 In0 32 N0 17 As0 83 GaAs Quantum Well." European Materials Research Society.

Sarcan F., Dönmez O., Güneş M., Erol A., Arıkan M. Ç., Janne P., Mircea G. (2012). "Effect of thermal annealing on optical and electronic transport properties in n and p type modulation doped GaInNAs GaAs quantum wells." European

Materials Research Society.

Erol A., Sarcan F., Güneş M., Arıkan M. Ç., Janne P., Mircea G. (2011). "Electronic transport properties of the GaInNAs GaAs p type as grown and annealed modulation doped quantum well structures." 13th International Conference on Transparent Optical Networks.