

**YAKIN ve ORTA DALGABOYLU
KIZILÖTESİ BÖLGEDE ÇALIŞAN TEK
PİKSEL KIZILÖTESİ ALGILAYICILARDA
PASİVASYON ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Onur ŞENEL

Eskişehir, 2018

**YAKIN ve ORTA DALGABOYLU KIZILÖTESİ BÖLGEDE ÇALIŞAN TEK
PİKSEL KIZILÖTESİ ALGILAYICILARDA PASİVASYON ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Onur ŞENEL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Uğur SERİNCAN

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Temmuz, 2018

Bu tez çalışması BAP-1607F675 numaralı proje kapsamında Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı ve 116F199 numaralı proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Onur ŞENEL'in "Yakın ve Orta Dalgaboylu Kızılötesi Bölgede Çalışan Tek Piksel Kızılötesi Algılayıcılarda Pasivasyon Etkisinin İncelenmesi" başlıklı tezi 29/06/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Fizik Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvanı Adı Soyadı

İmza

Üye (Tez Danışmanı)

: Doç. Dr. Uğur SERİNCAN

.....

Üye

: Doç. Dr. Mustafa KULAKCI

.....

Üye

: Doç. Dr. Kadir ERTÜRK

.....

Prof. Dr. Ersin YÜCEL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

YAKIN ve ORTA DALGABOYLU KIZILÖTESİ BÖLGEDE ÇALIŞAN TEK PİKSEL KIZILÖTESİ ALGILAYICILARDA PASİVASYON ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Onur ŞENEL

Fizik Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Temmuz 2018

Danışman: Doç. Dr. Uğur SERİNCAN

Günümüzde yarıiletkenler yaygın olarak askeri, sağlık ve astronomi alanlarında kullanılmaktadır. Dedektörler, transistörler, lazerler ve güneş pilleri bu alanlardaki en yaygın kullanılan yarıiletken malzemelere örnektir. Malzemelerin aygıt haline getirilme sürecinde kullanılan yöntemler ve işlemler aygıtların verimini doğrudan etkilemektedir. Malzemelerin tek piksel aygıtı dönüştürülme sürecinde, açıkta kalmış, bağ yapmamış atomlar oluşur ve bu kopuk bağlar yüzey kaçak akımları meydana getirirler. Bu bölgelerde oluşan yüzey kaçak akımları, oluşturulan pikselin performansını kötü yönde etkiler. Yüzey kaçak akımlarını baskılamak için piksellere dielektrik sabiti yüksek malzemeler ile yalıtım (pasivasyon) uygulanmalıdır. Bu çalışma kapsamında, moleküler demet epitaksi tekniği ile büyütülmüş, yakın ve orta dalgaboylu kızılötesi bölgede çalışan, III-V grubu tek piksel algılayıcılarda, farklı dielektrik malzemelerin algılayıcıların performansına etkileri araştırılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Moleküler demet epitaksi (MBE), Pasivasyon, NWIR, MWIR, Kızılötesi algılayıcı.

ABSTRACT

OBSERVATION OF PASSIVATION EFFECT ON SINGLE PIXEL NEAR AND MIDWAVELENGTH INFRARED DETECTORS

Onur ŞENEL

Department of Physics

Anadolu University, Graduate School of Sciences, July 2018

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Uğur SERİNCAN

Nowadays, semiconductors are widely used in various areas such as military, health and astronomy. For instance, detectors, transistors, lasers and solar cells are the most common materials used in those areas. Performance of fabricated devices are directly related with the performed methods and processes during device fabrication that can create dangling atomic bonds and consequently generate surface leakage currents. Eventually, those surface leakage currents reduce the pixel's performance. To overcome those surface leakage currents, devices should be passivated with high dielectric constant materials. In this study, the effect of various dielectric materials on the performance of group III-V near and midwavelength infrared single pixel detectors grown by molecular beam epitaxy was investigated.

Keywords: Molecular Beam Epitaxy (MBE), Passivation, NWIR, MWIR, Infrared Detector.

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

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

Onur ŞENEL

TEŞEKKÜR

Danışmanım Doç. Dr. Uğur SERİNCAN'a bu süreçte bana karşı sabırlı, anlayışlı ve yol gösterici olduğu ve her daim yanımda olduğu için çok teşekkür ederim.

Değerli hocalarım Doç. Dr. Bülent ASLAN ve Doç. Dr. Mustafa KULAKCI'ya değerli önerileri, yol göstermeleri ve yardımları için çok teşekkür ederim.

Arkadaşlığı, yardımları ve önerileri sayesinde laboratuvar çalışmalarımnda bana her zaman fayda sağlayan Melih KORKMAZ'a çok teşekkür ederim.

Tezimde kullandığım örnekleri büyüten Mehmet ERKUŞ ve Bülent ARIKAN'a çok teşekkür ederim. Seval ŞAHİN, Güven KORKMAZ, Ayşe ŞEVİK, Samet ÖZDEMİR, Burcu ARPAPAY, Erdem YILDIRIM ve Hazal ZAİMLER'e arkadaşlıkları, samimiyetleri, yardımları ve Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda bir aile ortamını aratmadıkları için çok teşekkür ederim.

ALD cihazı ile Al_2O_3 kaplama işleminde yardımlarından dolayı Doç. Dr. Feridun AY'a ve Arş. Gör. Mustafa DEMİRTAŞ'a çok teşekkür ederim.

Eskişehir'de yaşadığım sürenin hepsinde hayatımda bulunan canım arkadaşım Tutku TUTKUN'a hep yanımda bulunup beni desteklediği için çok teşekkür ederim.

Yanımda olduğunu hiç unutmadığım, en zor zamanlarımda desteğini kalbimde hissettiğim aileme çok teşekkür ederim.

Onur ŞENEL

Canım Anneme...

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER.....	viii
TABLolar DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
GÖRSELLER DİZİNİ	xiv
KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tez Organizasyonu	2
2. KIZILÖTESİ İŞİNİM	3
2.1. Atmosferik İletim Pencereleeri.....	3
2.2. Kara Cisim Işıması	4
2.3. Kızılötesi Algılayıcılar	5
2.3.1. Termal dedektörler	6
2.3.2. Foton dedektörleeri	6
2.3.2.1. Foto-iletken dedektörleeri.....	7
2.3.2.2. Foto-voltaik dedektörleeri.....	8
3. DENEYSEL YÖNTEMLER.....	10

3.1.	Moleküler Demet Epitaksi Büyütme Tekniği.....	10
3.1.1.	Tez çalışmasında kullanılan kızılötesi algılayıcı yapıları	12
3.1.1.1.	$InAs_{1-x}Sb_x$	12
3.1.1.2.	$Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$	13
3.1.1.3.	Tip II InAs/GaSb süperörgü.....	13
3.2.	HRXRD Analizi.....	14
3.2.1.	Sallantı eğrisi	15
3.2.2.	Kusur yoğunluğu.....	16
3.3.	Fotolitografi.....	16
3.4.1.	Karanlık akım ölçümü.....	33
3.4.2.	Spektral tepki ölçümleri.....	36
3.4.3.	Tepkisellik ölçümleri	37
4.	DENEYSEL SONUÇLAR	41
4.1.	HRXRD Sonuçları	41
4.1.1.	Sallantı eğrisi ölçüm sonuçları.....	41
4.1.1.1.	$InAs_{1-x}Sb_x$	41
4.1.1.2.	$Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$	42
4.1.1.3.	Tip II InAs/GaSb süperörgü.....	43
4.1.2.	Kusur yoğunluğu ölçüm sonuçları	45
4.2.	Elektriksel Ölçüm Sonuçları.....	46
4.2.1.	$InAs_{1-x}Sb_x$	46
4.2.2.	$Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$	51
4.2.3.	Tip II InAs/GaSb süperörgü.....	57
4.3.	Optiksel Ölçüm Sonuçları.....	67
4.3.1.	$InAs_{1-x}Sb_x$	67
4.3.2.	$Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$	71
4.3.3.	Tip II InAs/GaSb süperörgü.....	74
5.	SONUÇLAR.....	80
	KAYNAKÇA.....	82

TABLÖLER DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. Kare şeklindeki farklı kenar uzunluklarına ait mesalarda çevre/alan oranı..	22
Tablo 4.1. InAsSb (NB441) için Şekil 4.5a’da bulunan veriler.....	46
Tablo 4.2. GaInAsSb (NB482) için Şekil 4.5b’de bulunan veriler	46
Tablo 4.3. Denklem 3.3’e göre hesaplanan kusur yoğunlukları	46
Tablo 4.4. InAsSb (NB441) için Şekil 4.6 ve 4.7’den 80 K sıcaklıktaki önemli veriler	48
Tablo 4.5. InAsSb (NB441) için Şekil 4.9’un eğiminden elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri	50
Tablo 4.6. GaInAsSb (NB482) için Şekil 4.11 ve 4.12’deki 300 K sıcaklıktaki önemli veriler	54
Tablo 4.7. GaInAsSb (NB482) için Şekil 4.13’ün eğiminden elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri	55
Tablo 4.8. Tip II InAs/GaSb süperörgü (NB355) için Şekil 4.16 ve 4.17’deki 80 K sıcaklıktaki önemli veriler	59
Tablo 4.9. Tip II InAs/GaSb süperörgü (NB355) için Şekil 4.19’un eğiminden elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri	61
Tablo 4.10. Tip II InAs/GaSb süperörgü (NB693) için Şekil 4.21 ve 4.22’deki 80 K sıcaklıktaki önemli veriler	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Atmosferik iletim pencereleri ve kızılötesi ışıınımı soğuran moleküller [1].....	3
Şekil 2.2. Planck yasası ve Wien Kaymasının dalgaboyu ve sıcaklığa bağlı değişimi.....	5
Şekil 2.3. Şematik foto-iletken (a) algılama devresi, (b) bant diyagramı.....	7
Şekil 2.4. Şematik pin fotodedektörün (a) katmanları, (b) bant diyagramı.....	8
Şekil 3.1. III-V grubu bant aralığı örgü sabiti grafiği [2].....	11
Şekil 3.2. Büyütülen pin InAsSb'nin şematik görüntüsü ve katman kalınlıkları.....	13
Şekil 3.3. Büyütülen pin GaInAsSb'nin şematik görüntüsü ve katman kalınlıkları.....	13
Şekil 3.4. (a) GaAs üzerine (b) Si üzerine büyütülen pin tip II InAs/GaSb süperörgünün şematik görüntüsü ve periyot sayısı.....	14
Şekil 3.5. Gizli aygıt deseni aktarılmış temsili örnek görseli.....	20
Şekil 3.6. Alt kontak katmanına kadar aşındırılmış temsili örnek görseli.....	21
Şekil 3.7. Kare şeklindeki mesaların ayrıtları.....	21
Şekil 3.8. Pasivasyon işlemi yapılmış temsili örnek görseli.....	23
Şekil 3.9. 400x400 μm^2 alana sahip mesanın AZ5214E pasivasyon yüzey profili.....	24
Şekil 3.10. 400x400 μm^2 alana sahip mesanın SU8 pasivasyon profili.....	26
Şekil 3.11. 400x400 μm^2 alana sahip mesanın SiO ₂ pasivasyon profili.....	27
Şekil 3.12. 400x400 μm^2 alana sahip mesanın Al ₂ O ₃ pasivasyon profili.....	29
Şekil 3.13. Paketleme işlemi için hazır haldeki 3B temsili örnek görseli.....	31
Şekil 4.1. InAsSb pin fotodedektör yapısına ait (004) RC eğrisi.....	41
Şekil 4.2. GaInAsSb pin fotodedektör yapısına ait (004) RC eğrisi.....	42
Şekil 4.3. GaAs üzerine pin tip II InAs/GaSb süperörgü fotodedektör yapısına ait (004) RC eğrisi.....	43
Şekil 4.4. Si üzerine pin tip II InAs/GaSb süperörgü fotodedektör yapısına ait (004) RC eğrisi.....	44
Şekil 4.5. (a) InAsSb ve (b) GaInAsSb için $\beta^2_{\text{adj}} - \tan^2\theta$ grafikleri.....	45
Şekil 4.6. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 80 K sıcaklıkta NB441 örneğine ait Akım Yoğunluğu – Voltaj eğrisi.....	47
Şekil 4.7. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 80 K sıcaklıkta NB441 örneğine ait Direnç x Alan – Voltaj eğrisi.....	48

Şekil 4.8. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış NB441 örneklerine ait farklı sıcaklıklardaki R_0A değerleri.....	49
Şekil 4.9. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış NB441 örneklerine ait Arrhenius Eğrileri.....	50
Şekil 4.10. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış NB441 örneklerine ait idealite faktörleri.....	51
Şekil 4.11. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 300 K sıcaklıkta NB482 örneğine ait Akım Yoğunluğu – Voltaj eğrisi.....	52
Şekil 4.12. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 300 K sıcaklıkta NB482 örneğine ait Direnç x Alan – Voltaj eğrisi.....	53
Şekil 4.13. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış NB482 örneklerine ait Arrhenius Eğrileri.....	55
Şekil 4.14. 300 K sıcaklıktaki NB482 örneğinin Fotolüminesans eğrisi.....	56
Şekil 4.15. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış NB482 örneklerine ait idealite faktörleri.....	57
Şekil 4.16. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 80 K sıcaklıkta NB355 örneğine ait Akım Yoğunluğu – Voltaj eğrisi.....	58
Şekil 4.17. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 80 K sıcaklıkta NB355 örneğine ait Direnç x Alan – Voltaj eğrisi.....	59
Şekil 4.18. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış NB355 örneklerine ait farklı sıcaklıklardaki R_0A değerleri.....	60
Şekil 4.19. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış NB355 örneklerine ait Arrhenius Eğrileri.....	61
Şekil 4.20. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış NB355 örneklerine ait idealite faktörleri.....	62
Şekil 4.21. 80 K sıcaklıkta NB693 örneğine ait Akım Yoğunluğu – Voltaj eğrisi.....	63
Şekil 4.22. 80 K sıcaklıkta NB693 örneğine ait Direnç x Alan – Voltaj eğrisi.....	63
Şekil 4.23. 80 K sıcaklıktaki NB441 örneğine ait normalize ham spektral tepki eğrisi.....	67
Şekil 4.24. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 80 K sıcaklıktaki NB441 örneğine ait tepkisellik dalgaboyu eğrisi.....	68
Şekil 4.25. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 80 K sıcaklıktaki NB441 örneğine ait dedektivite dalgaboyu eğrisi.....	69

Şekil 4.26. NB441 örneğine ait 3 μm dalgaboyundaki (a) tepkisellik ve (b) dedektivite sıcaklık grafiği.....	70
Şekil 4.27. 300 K sıcaklıktaki NB482 örneğine ait 0 V ve -100 mV beslem altındaki normalize ham spektral tepki eğrisi.....	71
Şekil 4.28. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 300 K sıcaklıktaki NB482 örneğine ait (a) 0 V ve (b) -100 mV beslem altındaki tepkisellik dalgaboyu eğrisi.....	72
Şekil 4.29. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 300 K sıcaklıktaki NB482 örneğine ait (a) 0 V ve (b) -100 mV beslem altındaki dedektivite dalgaboyu eğrisi.....	74
Şekil 4.30. 80 K sıcaklıktaki NB355 örneğine ait normalize ham spektral tepki eğrisi....	75
Şekil 4.31. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 80 K sıcaklıktaki NB355 örneğine ait tepkisellik dalgaboyu eğrisi.....	76
Şekil 4.32. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 80 K sıcaklıktaki NB355 örneğine ait dedektivite dalgaboyu eğrisi.....	77
Şekil 4.33. NB355 örneğine ait 3 μm dalgaboyundaki (a) tepkisellik ve (b) dedektivite sıcaklık grafiği.....	78

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 3.1. MBE sistemi, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı.....	10
Görsel 3.2. HRXRD cihazı, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı	15
Görsel 3.3. Büyütme yapılmış 3’’ alttaş ve kesilmiş 10x10 mm ² test örneği	17
Görsel 3.4. (a) Döner kaplama cihazı, (b) sıcak yüzey cihazı, (c) AZ5214E pozitif fotorezist, (d) SU8 negatif fotorezist	18
Görsel 3.5. Maske hizalama cihazı, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı	19
Görsel 3.6. AZ5214E pasivasyonu yapılmış 400x400 µm ² alana sahip mesaların üstten mikroskop görüntüsü	24
Görsel 3.7. SU8 pasivasyonu yapılmış 400x400 µm ² alana sahip mesaların üstten mikroskop görüntüsü	25
Görsel 3.8. SiO ₂ pasivasyonu yapılmış 400x400 µm ² alana sahip mesaların üstten mikroskop görüntüsü	27
Görsel 3.9. SiO ₂ pasivasyonu yapılmış 400x400 µm ² alana sahip mesanın (a) üstten, (b) kesitinden SEM görüntüleri	28
Görsel 3.10. Al ₂ O ₃ pasivasyonu yapılmış 400x400 µm ² alana sahip mesaların üstten mikroskop görüntüsü	29
Görsel 3.11. Metal deseni aktarılmış 400x400 µm ² alana sahip mesaların üstten mikroskop görüntüsü	30
Görsel 3.12. (a) Metal kaplama cihazının örnek tutucusuna yerleştirilmiş örnekler, (b) metal kaplama sonrası, (c) 10x10 mm ² örneğin lift-off sonrası resmi.....	31
Görsel 3.13. Paketlenmiş ve tel bağlantıları yapılmış örnek.....	32
Görsel 3.14. Akım voltaj ölçüm düzeneği	33
Görsel 3.15. Spektral tepki ölçüm düzeneği	36
Görsel 3.16. Tepkisellik ölçüm düzeneği.....	37
Görsel 4.1. NB693 örneğinin, (a) büyütme sonrası, (b) Aifer Çözeltisi ile aşındırma işlemi sonrası yüzeyi.....	65
Görsel 4.2. NB355 örneğinin, (a) büyütme sonrası, (b) Aifer Çözeltisi ile aşındırma işlemi sonrası yüzeyi.....	66

KISALTMALAR DİZİNİ

μm	: Mikrometre
$\text{\AA}$	: Angstrom
Al_2O_3	: Alümina
ALD	: Atomik Katman Biriktirme
AlGaAs	: Alüminyum Galyum Arsenik
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
FWIR	: Uzak Dalgaboylu Kızılötesi Bölgesi
Ga	: Galyum
GaAs	: Galyum Arsenik
GaSb	: Galyum Antimoni
Ge	: Germanyum
HgCdTe	: Civa Kadmiyum Tellür
HRXRD	: Yüksek Çözünürlüklü X Işını Kırınımı
InAs	: İndiyum Arsenik
InP	: İndiyum Fosfat
LED	: Işık Yayan Diyot
LWIR	: Uzun Dalgaboylu Kızılötesi Bölgesi
MBE	: Moleküler Demet Epitaksi
ML	: Tek Atom Katmanı
MOCVD	: Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
MWIR	: Orta Dalgaboylu Kızılötesi Bölgesi
NWIR	: Kısa Dalgaboylu Kızılötesi Bölgesi
PECVD	: Plazma Destekli Kimyasal Buhar Biriktirme

PL	: Fotolüminesans
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
QWIP	: Kuantum Kuyulu Kızılötesi Dedektör
RC	: Sallantı Eğrisi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	: Silisyum
SiO₂	: Silika
TEM	: Geçirimli Elektron Mikroskobu
UHV	: Çok Yüksek Vakum
UV	: Mor Ötesi

1. GİRİŞ

İçinde bulunduğumuz yüzyılda yarıiletken aygıtlar artık hayatımızın her yerinde bulunmaktadır. Kullandığımız bütün elektronik cihazlar diyotlar, transistörler, kapasitörler, dirençler gibi devre elemanlarından oluşur. Bir pil, direnç ve ışık yayan diyot (light emitting diode, LED) ile yapılan basit bir devreden, kullandığımız bilgisayarlardaki işlemcilere kadar her yerde yarıiletkenler kullanılmaktadır. Yarıiletkenler, farklı teknik ve yöntemler ile üretilirler. Külçe halinde üretilen Si ve Ge için Czochralski yöntemi, epitaksiyel büyüme yöntemi için metal organik kimyasal buhar biriktirme (metal organic chemical vapor deposition, MOCVD) ve moleküler demet epitaksi (molecular beam epitaxy, MBE) teknikleri örnek olarak verilebilir. Üretilen yarıiletken malzemelerin çeşitli teknikler ile aygıt haline getirilme süreçleri, büyüme kadar önemli bir basamaktır. Dolayısıyla üretim yapılacak alanların uygun üretim şartlarını sağlaması gerekir. Bu sebeple yarıiletken aygıtların üretimleri genellikle temiz oda adı verilen; ortamdaki parçacık sayısı, sıcaklık, nem, basınç gibi etkenlerin kontrol altında tutulduğu özel alanlarda gerçekleştirilir. Yarıiletken aygıtlar arasında, işlemciler gibi elektronik sinyaller ile mantıksal sınıma yapan transistörler, elektromanyetik spektrumda bulunan farklı bölgeler için foton yayan lazerler, LED'ler ve foton algılayan dedektörler de vardır. UV bölgesi için GaP tabanlı bileşik yarıiletkenler, görünür bölgede kullanılan elemental halde Si veya daha yüksek verime sahip GaAs tabanlı güneş pilleri ve kızılötesi bölgede algılama yapan InAs, HgCdTe ve kuantum kuyulu kızılötesi fotodedektör (quantum well infrared photodetector, QWIP) gibi yarıiletken foton dedektörleri günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır.

1800'lü yıllarda William Herschel tarafından kızılötesi ışının keşfi ile, bu ışınımın tespit edilmesi için yeni çalışma ve uygulama alanları oluşmuştur. Temelde kızılötesi ışınım, mutlak 0 K sıcaklığının üzerindeki her cisim tarafından, cismin sıcaklığına bağlı olarak yayılan bir elektromanyetik enerjidir. Yaklaşık oda sıcaklığı olan 300 K sıcaklıkta (27 °C) cisimlerden yayılan kızılötesi ışınım insanlar tarafından görülemez. Geliştirilen teknikler ve malzemeler ile birlikte bu ışınımın tespit edilmiş ve gece görüşü, güdümlü hedef takip sistemleri, uzay çalışmaları, kızılötesi görüntüleme ve iletişim gibi uygulama alanları ortaya çıkmıştır.

Teknolojinin ilerlemesi ile birlikte kızılötesi algılayıcılar daha yüksek kalitede üretilmeye başlamıştır. Farklı üretim teknikleri ile üretilmiş kızılötesi algılayıcıların,

kullanılabilir ürün haline gelinceye kadar geçirdiği tüm evreler birer güncel araştırma konusudur. III-V grubu elementleri ile MBE’de büyütülmüş kızılötesi algılayıcı yapıları bu tez kapsamında kullanılacak kızılötesi algılayıcı yapılarıdır. Yakın ve orta dalga boylu kızılötesi bölgede çalışan büyütülmüş malzemeleri tek piksel aygıt haline getirmenin yanı sıra; üretilen aygıtların pasivasyon uygulanarak elektriksel ve optiksel verimlerinin iyileştirilmesi bu tez çalışmasının ana amacıdır. Bu çalışma sonunda, farklı pasivasyon malzemesi uygulanan tek piksel algılayıcıların elektriksel ve optiksel performansları karşılaştırılarak en uygun pasivasyon malzemesi ilgili algılayıcı için seçilmiştir.

1.1. Tez Organizasyonu

Tez içeriği şu sırayı takip etmektedir:

Bölüm 2, kızılötesi ışınının temelleri ve kızılötesi dedektörler hakkında temel bilgilerin anlatıldığı bölümdür.

Bölüm 3, bu tez çalışması kapsamında kullanılan deneysel yöntemler ve kullanılan malzeme gruplarının tanıtıldığı bölümdür.

Bölüm 4, üretilen aygıtların yapısal, elektriksel ve optiksel ölçüm sonuçlarının bulunduğu bölümdür.

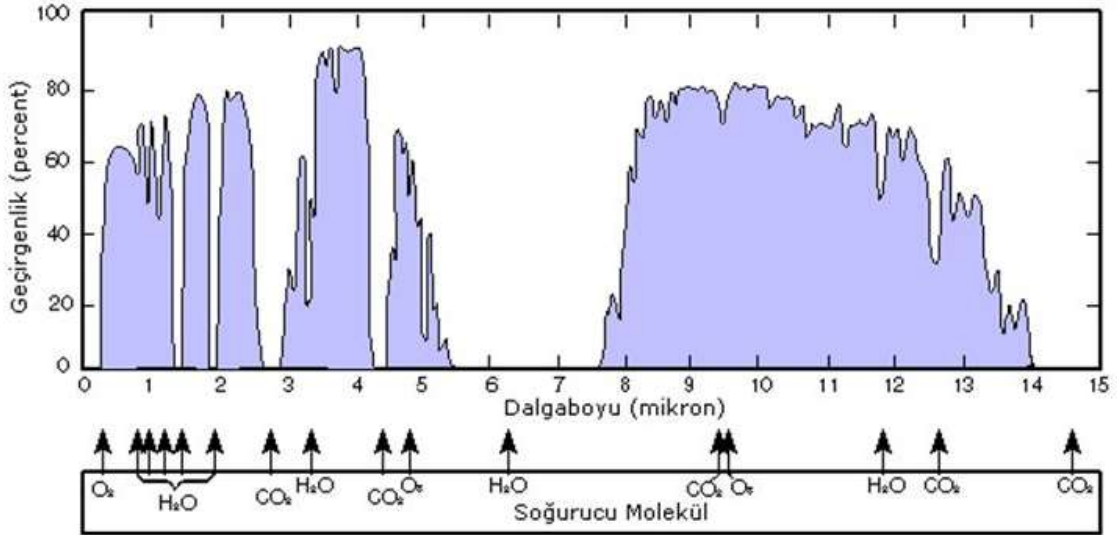
Bölüm 5, tez çalışmasında elde edilmiş sonuçların değerlendirildiği bölümdür.

2. KIZILÖTESİ IŞINIM

Sıcaklığı 0 K'den yüksek her cisim elektromanyetik ışıma yapmaktadır. Yapılan ışımanın dalgaboyu, sıcaklık arttıkça daha kısa dalgaboylarına doğru kaymaktadır. Örneğin, oda sıcaklığındaki bir demir çubuğun yaydığı ışıma kızılötesi bölgesi içerisinde yer alırken; ısıtılan bir çubuk görünür bölgede önce kırmızı daha sonra turuncu, sarı ve akkor halde görülecektir. İnsan gözünün göremediği kızılötesi bölgesi, elektromanyetik spektrumda 0,7 – 1000 μm dalgaboylu ışınların oluşturduğu aralıktır (Şekil 2.1).

2.1. Atmosferik İletim Pencereleri

Kızılötesi ışınlar, molekül titreşim enerjilerine denk geldiği için atmosferde bulunan gaz molekülleri tarafından soğurulmaktadır. Atmosferde yaygın olarak bulunan moleküller içerisinde kızılötesi ışımayı soğuran moleküller H_2O , O_3 , N_2O , CO , CH_4 ve N_2 olarak sayılabilir. Atmosferik iletim spektrumu ve algılamaya engel teşkil eden soğurulma çizgilerine veya bantlarına neden olan moleküller Şekil 2.1'de gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Atmosferik iletim pencereleri ve kızılötesi ışımayı soğuran moleküller [1]

Atmosferdeki moleküllerin dalgaboyuna göre soğurmaları, atmosferik pencerelerin oluşmasına sebep olur. Bu pencereler literatürde genel olarak 0,7 – 3 μm arası *Yakın*

Dalgaboylu Kızılötesi Bölgesi (near wavelength infrared region, NWIR), 3 – 5 µm arası *Orta Dalgaboylu Kızılötesi Bölgesi* (mid wavelength infrared region MWIR), 8 – 12 µm arası *Uzun Dalgaboylu Kızılötesi Bölgesi* (long wavelength infrared region LWIR), 12 – 1000 µm arası ise *Uzak Dalgaboylu Kızılötesi Bölgesi* (far wavelength infrared region FWIR) olarak adlandırılır. MWIR ve LWIR arasında 5,5 – 7,5 µm aralığında kalan bölüm ise su molekülleri tarafından tamamen soğurulmaktadır.

2.2. Kara Cisim Işıması

Teorik bir model olan kara cisim ışımasının yayınım (emissivity) değeri 1 olarak kabul edilir. Böylelikle sıcaklığından dolayı ışıyan cisimleri bu modele göre inceleme olanağı sunar. Planck yasası, bir cismin sıcaklığına karşılık gelen ışımayı Denklem 2.1 ile ifade eder:

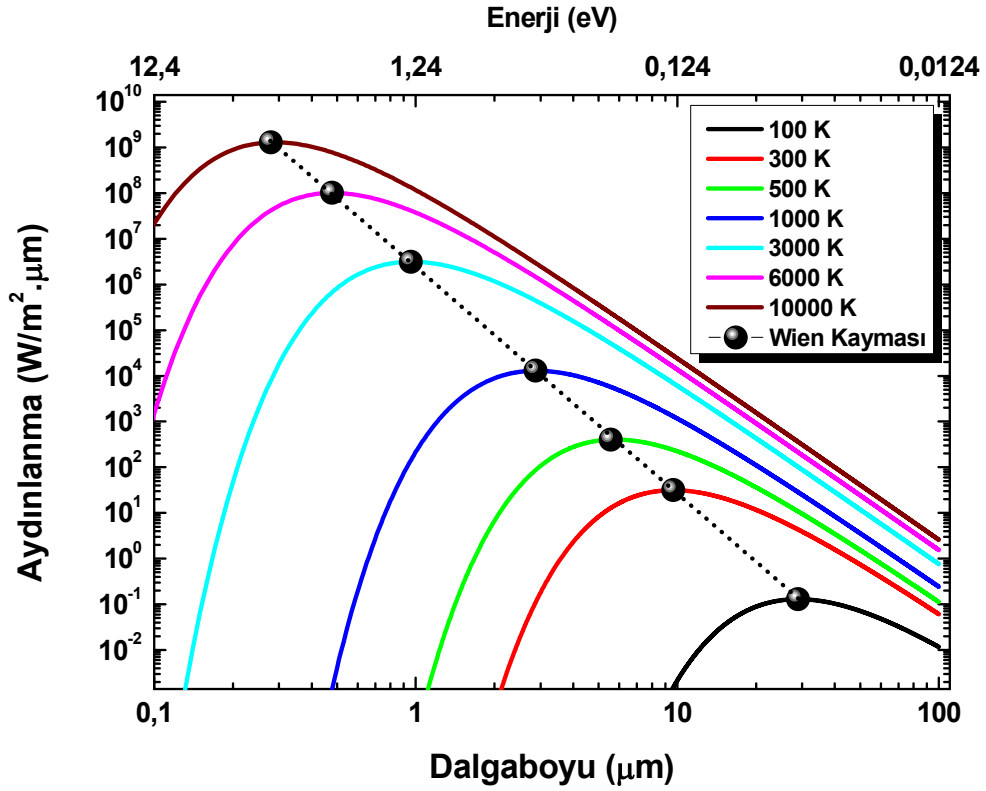
$$L(T, \lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (2.1)$$

Eşitlikte $L(T, \lambda)$ tayfsal parlaklık, h Planck sabiti, k Boltzmann sabiti, c ışık hızı, λ dalgaboyu ve T ise sıcaklıktır.

Denklem 2.2 ile Wien kayma yasası ile sıcaklığa bağlı olarak ışımanın en yüksek olduğu tepe dalgaboyu elde edilir:

$$\lambda_{tepe}(\mu m) = \frac{2898}{T} \quad (2.2)$$

Burada λ_{tepe} µm cinsinden dalgaboyu, T ise K cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir. Sıcaklık arttıkça tepe dalgaboyu azalmakta ve enerji artmaktadır. Şekil 2.2’de Planck Yasasının ve Wien Kaymasının dalgaboyu ve sıcaklığa bağlı değişimi görülmektedir.



Şekil 2.2. Planck yasası ve Wien Kaymasının dalgaboyu ve sıcaklığa bağlı değişimi

Denklem 2.3 ile Stefan – Boltzmann yasası ile kara cisimden yayılan gücün sıcaklıkla arasındaki bağıntı elde edilir:

$$M(T) = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2.3)$$

Burada M ıyırıcılık, ε yayınım katsayısı, σ Stefan-Boltzmann sabitidir ve değeri $5,67 \times 10^{-12} \text{ W/cm}^2\text{K}^4$ dür.

ε değeri herhangi bir cismin ıyırıcılık değeri ile ideal durumdaki ıyırıcılığın birbirine bölünmesiyle bulunabilir. Eğer $\varepsilon=1$ ise cisim kara cisim olarak adlandırılır.

2.3. Kızılötesi Algılayıcılar

Kızılötesi algılamanın kullanım alanları günümüzde oldukça fazladır. Bunlardan en önemlileri askeri, sağlık ve uzay alanlarındadır. Algılama mekanizmasına göre kızılötesi algılayıcıları iki ana başlıkta toplamak mümkündür. Termal algılayıcılar (dedektörler), üzerlerine gelen kızılötesi ışıyım ile algılayıcı malzemenin ısınıp fiziksel özelliklerini

(direnç, voltaj vb.) değiştirerek algılama yapılır. Foton dedektörlerde ise gelen elektromanyetik ışınının soğurulması ile elektriksel sinyal taşıyıcısı elektronlar üretilir. Foton dedektörlerinde, termal dedektörlerde olduğu gibi herhangi bir sıcaklık değişimi ile algılama yapılmadığı için algılama daha hızlı gerçekleşir.

2.3.1. Termal dedektörler

Gelen kızılötesi ışınım ile birlikte termal dedektörlerin aktif bölgedeki fiziksel özelliklerinin değişimi, bağlı ekipmanlar aracılığıyla tespit edilip algılama yapılabilmektedir. Termal dedektörlerin algılama hızı sıcaklık değişimi ile doğrudan ilişkilidir. Sıcaklık değişiminden dolayı milisaniye mertebelerinde tepki süreleri vardır. Ancak en önemli avantajları soğutmaya ihtiyaç duymamalarıdır. Yaygın olarak kullanılan termal dedektör tipleri şunlardır:

Bolometreler: Gelen kızılötesi ışınının soğurulduğunda ısınan aktif alanın elektriksel direncinin değişmesini temel alan ve bu prensibine göre çalışan sistemlerdir.

Piroelektrik dedektörler: En çok bilinen ve oda sıcaklığında en hassas termal dedektörlerdir. Gelen ışınının ile aktif bölgenin sıcaklık değişimi, elektrik dipol momentinin değişimine yani elektriksel polarizasyonun değişimine sebep olup akım üretir.

Isıl çiftler: İki farklı metalin bir noktada eklem yapmasıyla birlikte, gelen kızılötesi ışınım bu eklemde voltaj değişimine sebep olup, sabit bir referans voltaj kaynağı kullanılarak algılama yapan dedektör tipleridir.

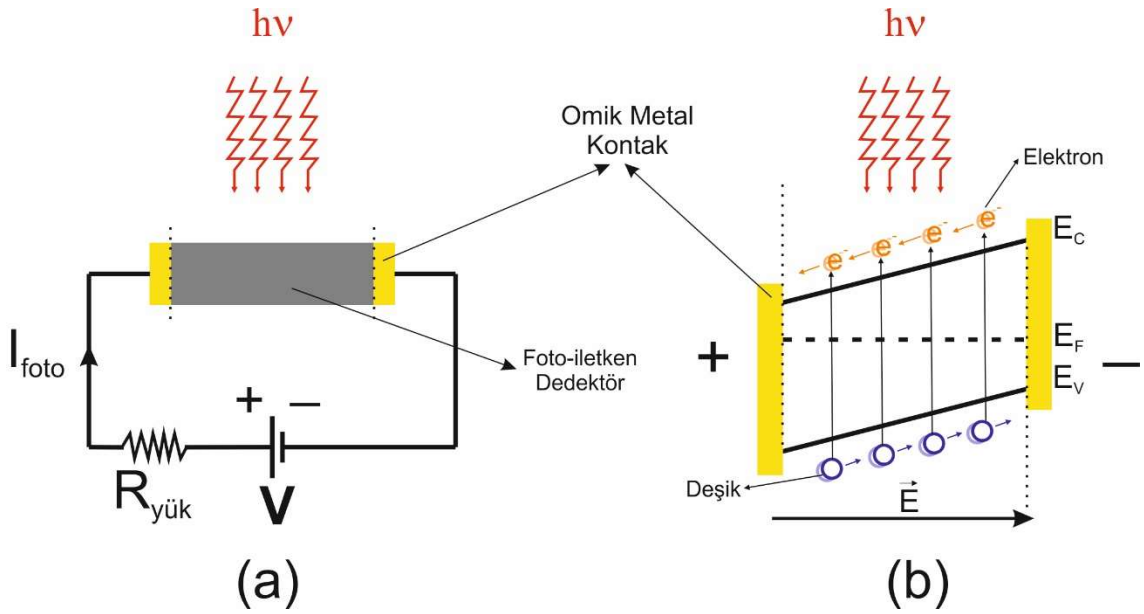
2.3.2. Foton dedektörleri

Yarıiletkenlerden üretilen foton dedektörleri, *foto-iletken* ve *foto-voltaik* olmak üzere iki farklı türde bulunur. Yarıiletkenlerde bulunan serbest taşıyıcı sayısı, yarıiletkenin bulunduğu sıcaklık veya üzerine düşen ışınım ile değişebilmektedir. Bu serbest taşıyıcı sayısı, yarıiletkenin elektriksel iletkenliğini, dolayısıyla elektriksel direncini değiştirmektedir. Üzerine elektromanyetik ışınım gelen bir yarıiletkende serbest taşıyıcılar artmaktadır. Işınının soğurulmasıyla yeterli enerjiyi alan elektronlar bağlarını kırarak iletim bandına geçerler. İletim bandına geçen uyarılmış elektron arkasında bir

pozitif yüklü deşik bırakır. Oluşan elektron deşik çiftinin kontak bölgelerine sürüklenmesi ile algılama gerçekleşmektedir.

2.3.2.1. Foto-iletken dedektörler

Üzerine ışınlam gelen bir yarıiletkenin uçları arasında bir yönlendirme gerilimi (voltajı) uygulandığında, elektron deşik çiftleri farklı yönlerde kontak bölgesine sürüklenir ve foto akım (I_{foto}) oluşur. Bu algılama türüne *foto-iletken* adı verilir.



Şekil 2.3. Şematik foto-iletken (a) algılama devresi, (b) bant diyagramı

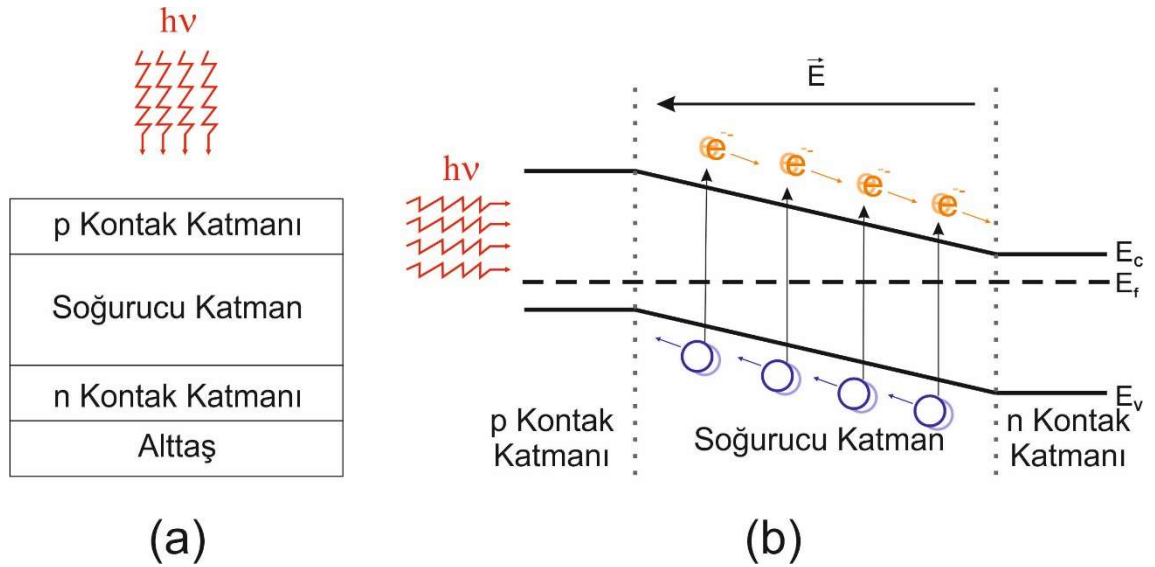
Şekil 2.3a'da üzerine foton gelen bir foto-iletken dedektörün devre şeması görülmektedir. Şekil 2.3b'de ise dışarıdan uygulanan bir elektrik alan ile bantlardaki bükülme ve oluşturulan elektron deşik çiftlerinin kontak bölgelerine sürüklenmesi görülmektedir. Kontak bölgelerine ulaşan taşıyıcılar ile oluşan foto akım ölçülerek veya yük direnci üzerindeki voltaj değişimi ölçülerek algılama yapılır.

2.3.2.2. Foto-voltaik dedektörler

Foto-iletken dedektörlerdeki dışarıdan uygulanan bu yönlendirme voltajının, algılayıcıda kendisinin olduğu durumdaki algılama türüne ise *foto-voltaik* adı verilir. Bir p-n eklemi foto-voltaik algılama için örnek verilebilir. p-n eklemde, serbest taşıyıcılardan arındırılmış bölgede (depletion region) elektrik alan oluşur. Yarıiletkenin üzerine gelen ışınım ile oluşan serbest taşıyıcılar, yarıiletkendeki elektrik alanda kontak bölgesine sürüklenerek bir akım oluşturur. Böylelikle gelen ışınım elektriksel sinyal oluşturarak algılama yapılır.

p-i-n yapıdaki fotodedektörler

Temel bir p-n eklemine arasına katkısız bir katman eklenmesiyle *pin* adı verilen yapı oluşur. Buradaki temel amaç; p-n eklemde oluşan serbest taşıyıcılardan arındırılmış bölgenin kalınlığını arttırarak daha fazla ışığın soğurulmasını sağlamaktır. Bu sebeple bu katmana *soğurma katmanı* adı verilir. Işığın bu katmanda soğurulmasıyla oluşan elektron deşik çiftleri p-n eklemde kendiliğinden oluşan elektrik alanda kontak katmanlarına sürüklenerek elektriksel sinyale dönüşür. pin fotodedektör yapısı Şekil 2.4'te görülmektedir.



Şekil 2.4a’da epitaksiyel büyütme yapılmış pin yapıda bir algılayıcıya gelen bir kızılötesi ışıının görülmektedir. Şekil 2.4b’de ise bu ışıının soğurucu katmanda oluşturduğu elektron deşik çiftlerinin, ekleme bulunan elektrik alanda kontak katmanlarına sürüklenerek elektriksel sinyal oluşturmaları görülmektedir.

3. DENEYSEL YÖNTEMLER

Bu bölümde, büyütme tekniği, büyütülen malzemelerin yapısal karakterizasyonu, aygıt haline getirme süreçleri ve elektriksel optiksel karakterizasyonda kullanılan deney düzenekleri tanıtılmaktadır.

3.1. Moleküler Demet Epitaksi Büyütme Tekniği

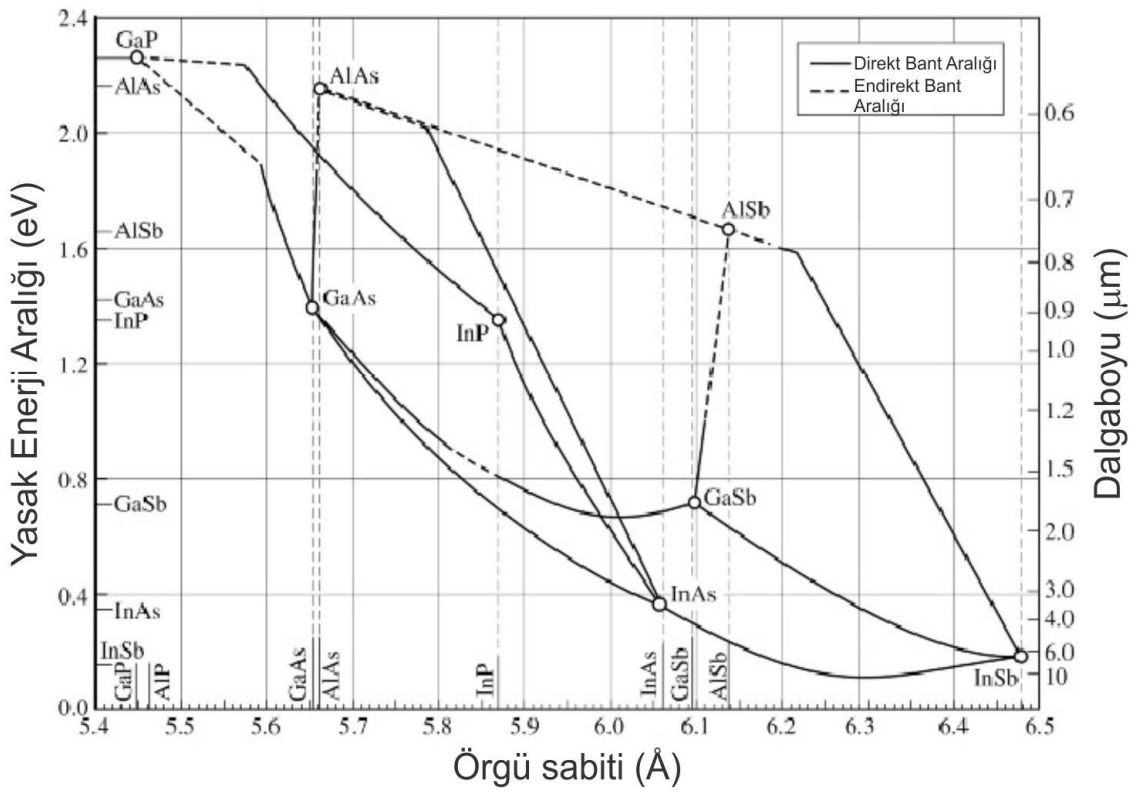
Yarıiletken büyütme tekniklerinden biri olan MBE, $\sim 5 \times 10^{-10}$ Torr veya daha çok yüksek vakum (ultra high vacuum, UHV) altında çalışan ve yüksek saflıktaki kaynak malzemeleri ile atomik katman hassasiyetinde II-VI ve III-V grubu ile oluşturabilen yarıiletken ince filmleri tekrar edilebilir, homojen ve yüksek kristal kalitesi ile bir alttaş üzerine büyütebilen bir sistemdir.

Bu tez kapsamında üretilen fotodedektörler Anadolu Üniversitesi, Fen Fakültesi Fizik Bölümü, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda 1000 sınıfı temiz odada bulunan Veeco GEN20MC (Görsel 3.1) III-V grubu katı kaynaklı MBE sistemi ile üretilmiştir.



Görsel 3.1. MBE sistemi, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı

Epitaksiyel büyütme sistemlerinde ince filmin üzerine büyütülecek alttaşın ve büyütülecek filmin örgü sabitinin uyumlu olması gerekmektedir. Örgü sabitinin farklı olduğu durumda büyütülen filmde kusurlar meydana gelmektedir. Kusurlar, kristal kalitesine ve üretilecek olan aygıtın performansına etki eden temel etkenlerden biridir. Şekil 3.1’de III-V grubu elementleri ile oluşturulabilecek malzemelerin örgü sabitleri ve yasak enerji aralıkları görülmektedir.



Şekil 3.1. III-V grubu bant aralığı örgü sabiti grafiği [2]

Şekil 3.1’e bakıldığında, ikili III-V grubu yarıiletken bileşiklerin bant aralıkları ve örgü sabitlerinin yanı sıra; bu bileşikler ile oluşturulabilecek yarıiletken üçlü ve dörtlü alaşımların da bant aralıkları ve örgü sabitleri görülebilmektedir. Düz ve kesikli çizgiler teorik hesaplar ve deneysel veriler yardımıyla oluşturulmuş direkt ve endirekt bant aralığına sahip yarıiletken alaşım konsantrasyonlarını göstermektedir. Üçlü ve dörtlü alaşımların içerdiği elementlerin konsantrasyonları değiştirilerek alttaşlara örgü uyumlu hale getirilebilmektedir. Alaşımların bu özellikleri sayesinde kusursuz ve bant aralığı

ayarlanabilen fotodedektör, lazer, LED ve yüksek verimli güneş pili yapıları büyütebilmek mümkün olmaktadır. Örnek olarak, InAs ve GaAs arasında In ve Ga konsantrasyonu değiştirilerek oluşturulmuş $\text{In}_{0,53}\text{Ga}_{0,47}\text{As}$ bileşiği InP alttaş ile örgü uyumludur. Aynı şekilde GaAs alttaş üzerine $\text{GaAs}/\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ kuantum kuyulu hetero eklem yapılar üretilebilmektedir. Epitaksiyel olarak bir alttaş üzerine büyütülmüş külçe yapılarda yüzdece örgü uyumsuzluğu Denklem 3.1'e göre hesaplanmaktadır.

$$\Delta a / a(\%) = \left(1 - \frac{a_{alttaş}}{a_{epikatman}} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

Burada $\Delta a/a$ yüzdece örgü uyumsuzluğu, $a_{alttaş}$ alttaşın örgü sabitini ve $a_{epikatman}$ büyütülen katmanın örgü sabitidir.

3.1.1. Tez çalışmasında kullanılan kızılötesi algılayıcı yapıları

Bu tez çalışmasında MBE'de büyütülmüş külçe halinde InAsSb ve GaInAsSb ve tip II InAs/GaSb süperörgü fotodedektör yapıları kullanılmıştır. Büyütülen tüm algılayıcılar pin fotodedektör yapısındadır. Büyütülmüş örneklerin kodları şu şekildedir:

InAsSb – NB441

GaInAsSb – NB482

Tip II InAs/GaSb süperörgü – NB355 ve NB693

3.1.1.1. $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$

InAs ve InSb arasında oluşturulan üçlü alaşım InAsSb fotodedektörler, GaSb alttaşla örgü uyumlu olarak büyütülebilmektedir. MWIR bölgede fotodedektör, lazer ve LED gibi opto-elektronik aygıtlar için, iyonik bağlı HgCdTe'e alternatif olarak kullanılabilen InAsSb alaşım malzemelerde; kovalent bağlanma, düşük dielektrik katsayısı ve bant kenarında kompozisyona bağımlılık oldukça azdır [3]. Tez çalışmasında kullanılan büyütülmüş InAsSb'nin şematik yapısı Şekil 3.2'de görülmektedir.

1090 nm n- InAsSb
1170 nm i- InAsSb
1090 nm p- InAsSb
1350 nm GaSb
GaAs Alttaş

şekil 3.2. *Büyütölen pin InAsSb'nin şematik göröntüsü ve katman kalınlıkları*

3.1.1.2. $Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}$

Kesim dalgaboyu 1,7 ile 4,9 μm arasında değiştirilebilen ve bu geniş aralıktta GaSb alttaşla örgü uyumlu olarak büyütölebilen dörtlü GaInAsSb alaşımlar; gaz sensörleri, lazerler ve farklı opto-elektronik aygıtlar gibi geniş bir yelpazede kullanılabilecek bir malzeme grubudur. Kovalent bağlı GaInAsSb dörtlü alaşımlar, genellikle kullanılan iyonik bağlı HgCdTe'ün atomik örgüsüne göre daha kararlıdır [4]. Tez çalışmasında kullanılan büyütölmüş GaInAsSb'nin şematik yapısı şekil 3.3'te görölmektedir.

1330 nm n- GaInAsSb
1400 nm i- GaInAsSb
1330 nm p- GaInAsSb
1080 nm GaSb
GaAs Alttaş

şekil 3.3. *Büyütölen pin GaInAsSb'nin şematik göröntüsü ve katman kalınlıkları*

3.1.1.3. *Tip II InAs/GaSb süperörgü*

1970'li yıllarda Tip II InAs/GaSb süperörgü malzeme grubu ilk olarak Leo Esaki ve ark. tarafından ortaya konulmuştur [5]. 1987 yılında ilk olarak kızılötesi algılayıcı olarak kullanımı Smith ve Mailhiot tarafından gerçekteşirilmiiştir [6]. Süperörgü fotodedektör yapıları, birkaç tek katman (monolayer, ML) kalınlığında InAs ve GaSb'nin üst üste büyütölerek tekrarlandığı (periyot) yapılarıdır. Günümüzde hala güncelliğini koruyan çalışma konularından biri olan tip II InAs/GaSb süperörgü dedektörler, büyütölen InAs ve GaSb kalınlıkları değiştirilerek örgü sabiti ve kesim dalgaboyu

değiştirilebilen esnek ve kullanışlı bir malzeme grubudur. Tip II InAs/GaSb süperörgü yapılarında GaSb yerine GaAs ve Si alttaşlar kullanılması; alttaş maliyetinin dü"şürülmesi ve aygıt uygulamaları açısından avantaj sağlamaktadır. Ayrıca III-V grubu ve olgunlaşmış Si teknolojisi (daha geniş çaplı alttaşlar, düşük kusur yoğunluğu ve düşük maliyet) ile bütünleşik aygıtlar üretilebilmektedir. Tez çalışmasında kullanılan GaAs ve Si alttaşlar üzerine büyütölmüş tip II InAs/GaSb süperörgünün şematik yapısı Şekil 3.4a ve 3.4b'de görölmektedir.

20 nm n-InAs	20 nm n-InAs
40 periyot n- InAs/GaSb	40 periyot n- InAs/GaSb
60 periyot InAs/GaSb	60 periyot InAs/GaSb
40 periyot InAs/p- GaSb	40 periyot InAs/p- GaSb
1000 nm p- GaSb	2000 nm p- GaSb
2500 nm GaSb	AlSb Kuantum Nokta
GaAs Alttaş	Si Alttaş
(a)	(b)

Şekil 3.4. (a) GaAs üzerine (b) Si üzerine büyütölen pin tip II InAs/GaSb süperörgünün şematik göröntüsü ve periyot sayısı

3.2. HRXRD Analizi

X ışınları, bir filaman tarafından oluşturulan elektronların yüksek potansiyel fark altında (>40 kV) hızlandırıldıktan sonra hedef bir metale çarpıp hızla yavaşlamasıyla oluşurlar. X ışınlarının dalgaboyu 0,01-100 Å arasındadır. Büyütölmüş yarıiletken kristale gönderilen X ışınları, belli açılarda atomik örgü ile etkileşerek kırınım desenlerini oluştururlar.

X ışını kırınım tekniğı (X-ray diffraction, XRD), ince filmler için yapısal karakterizasyon tekniklerinden biridir. X ışını kırınım tekniğı ile, büyütölen yapıların kristal kalitesi, örgü uyumsuzluğu, bileşik yüzdeleri (konsantrasyon), katman rahatlığı, periyot kalınlığı hakkında bilgiler edinilmektedir.

3.2.1. Sallantı eğrisi

Sallantı eğrisi (rocking curve, RC), ideal duruma göre kristalde bulunan düzlemlerin kusurlar, burkulmalar ve eğrilikler sonucunda paralelliğinin ne kadar değiştiğinin bir göstergesidir. Bragg koşulunun sağlandığı durumdaki düzlem açısının küçük değişimlerine karşılık gelen sinyal kaydedilerek ölçüm yapılır. Kırınım grafiğinde, ideal bir kristal için çok ince, keskin ve sivri bir tepe elde edilir. Tepe yarı genişliği (full width at half maximum, FWHM) ile kristal kalitesi hakkında bilgi elde edilir.

Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan Panalytical X'Pert Pro MRD (Görsel 3.2) yüksek çözünürlüklü X ışını kırınım cihazı (high resolution X-ray diffraction, HRXRD) kullanılarak (004) simetri düzleminde $0,0005^\circ$ hassasiyette büyütülen yapıların sallantı eğrisi grafikleri elde edilmiştir.



Görsel 3.2. HRXRD cihazı, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı

3.2.2. Kusur yoğunluğu

III-V grubu yarıiletkenlerde kusurlar, taşıyıcı ömrünü ve mobilitiyi azaltan etkililerdir. Taşıyıcı ömrü ve mobilite aygıt performansında önemli rol oynarlar. Bu sebeple dedektör performansının daha iyi anlaşılması için, kusurların büyütülen katmanlardaki seviyesinin tespit edilmesi gerekmektedir. Genellikle geçirimli elektron mikroskobu (transmission electron microscope, TEM) ve kusur aşındırma işlemi (etch pit density, EPD) ile kusur yoğunluğu bulunabilmektedir. Ancak bu yöntemler hem zahmetlidir hem de incelenen örneği kullanılamaz hale getirmektedir. Külçe halinde büyütülmüş olan ince filmler için alternatif bir yöntem olarak HRXRD; basit, temassız ve örneğe zarar vermeyen bir yöntem olarak kullanabilmektedir [7]. Bu yöntem ile kusur yoğunluğu 10^5 ile 10^9 /cm² arasında yüksek doğruluk ile bulunabilmektedir. *Ayers*'in önerdiği bu yöntemde yarıiletkenlerde kusur yoğunluğu Denklem 3.2'deki gibi ifade edilebilir:

$$\beta^2 \approx K_a + K_\epsilon \tan^2 \theta \quad (3.2)$$

Burada β sallantı eğrisi grafiğinden elde edilen FWHM, K_a ve $K_\epsilon \beta^2$ 'nin düzleme ait açının tanjantının karesine göre çizdirilmiş grafiğin kesim ve eğim değerleridir.

$$D = \frac{K_a}{4,36b^2} \quad (3.3)$$

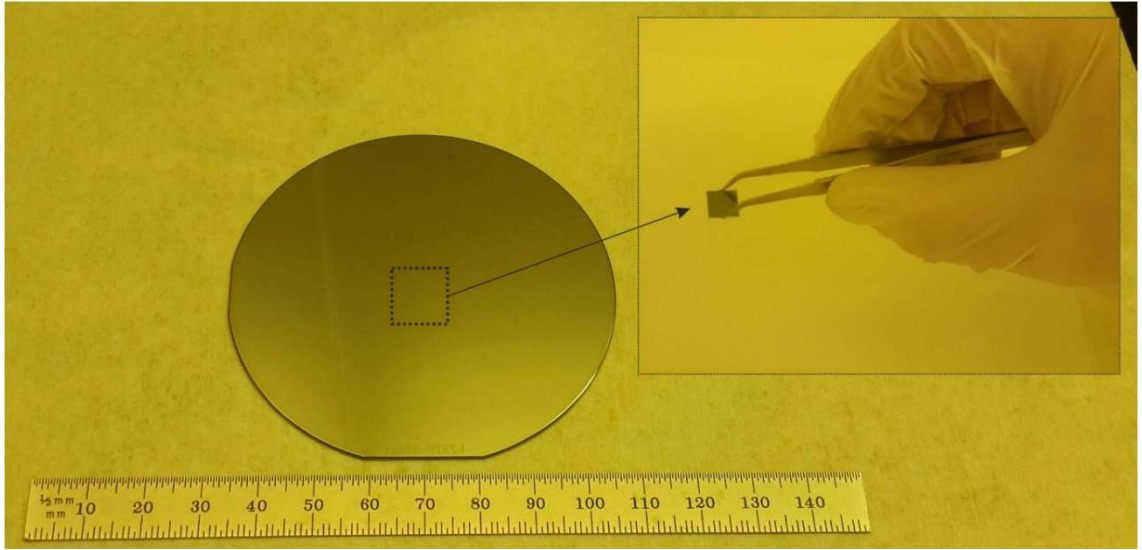
b , Burger Vektörü'nün uzunluğunu göstermektedir. Bu durumda D kusur yoğunluğu olmak üzere Denklem 3.3'ten hesaplanabilir.

3.3. Fotolitografi

MBE ile büyütülen fotodedektörler, elektriksel ve optiksel ölçümlerin yapılabilmesi için fotolitografi işlemleri ile tek piksel aygıt haline getirilmiştir. Fotolitografi, ışığa duyarlı bir fotorezist yardımıyla büyütülen malzemeler üzerine desen aktarma işlemidir. Aygıt haline getirme süreci 100 sınıfı temiz odada gerçekleştirilmiştir. Fotolitografi işlemindeki süreçler şu sırayı takip etmektedir:

- Tam alttaştan örnek kesilmesi

MBE sisteminde alttaş üzerine büyütülen fotodedektör yapıları, test örnekleri hazırlanması amacıyla $10 \times 10 \text{ mm}^2$ kesilmektedir. Kesme işlemi elmas uçlu çizici ile yapılmaktadır. Büyütme yapılmış bir alttaşın ve kesilen örneğin resmi Görsel 3.3'te görülmektedir.



Görsel 3.3. *Büyütme yapılmış 3'' alttaş ve kesilmiş $10 \times 10 \text{ mm}^2$ test örneği*

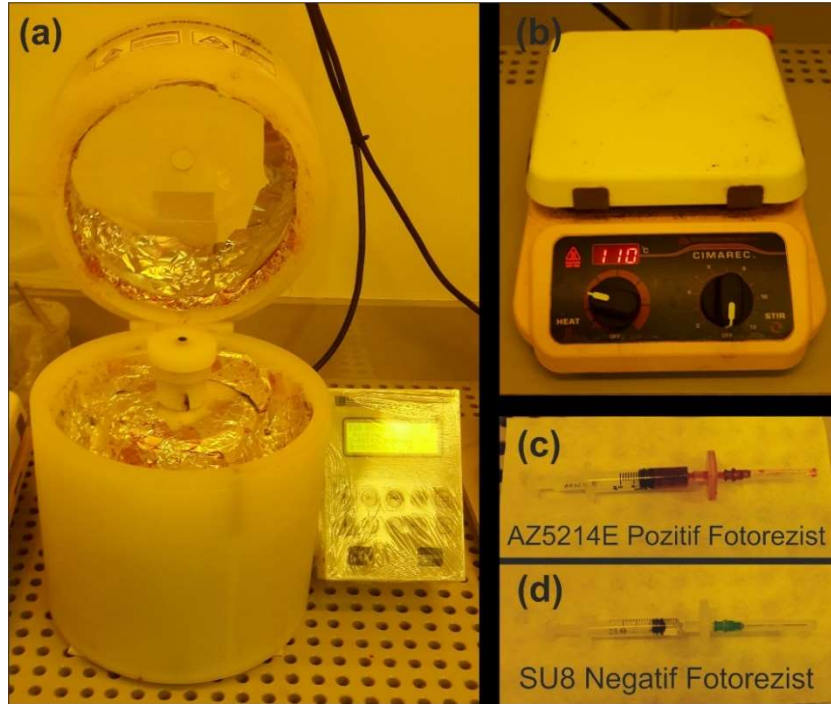
- Kesilen örneğin temizlenmesi

Kesilen test örneğinin üzerinde oluşmuş organik kirler, metal veya kristal parçaları ve doğal oksit tabakası hem aygıt üretim sürecini hem de aygıt performansını etkileyen etkenlerdendir. Örnek temizlik aşamasında şu işlemler uygulanmıştır:

- organik kirliliği ortadan kaldırmak için 5 dakika aseton içerisinde bekletilir,
- asetonun bıraktığı kirliliği ve metal veya kristal parçalarını yüzeyden uzaklaştırmak için 5 dakika 80°C alkol içerisinde bekletilir,
- Akan de-iyonize su altında ($18,2 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$) 30 saniye yıkayıp, filtrelenmiş yüksek saflıkta N_2 gazı ile kurutulur,
- Test örneğinin üzerinde oluşan doğal oksit tabakası 1:10 oranında $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}$ içerisinde 30 saniye bekletilerek kaldırılır ve yıkayıp kurutulur.

- Örneğe fotorezist kaplanması

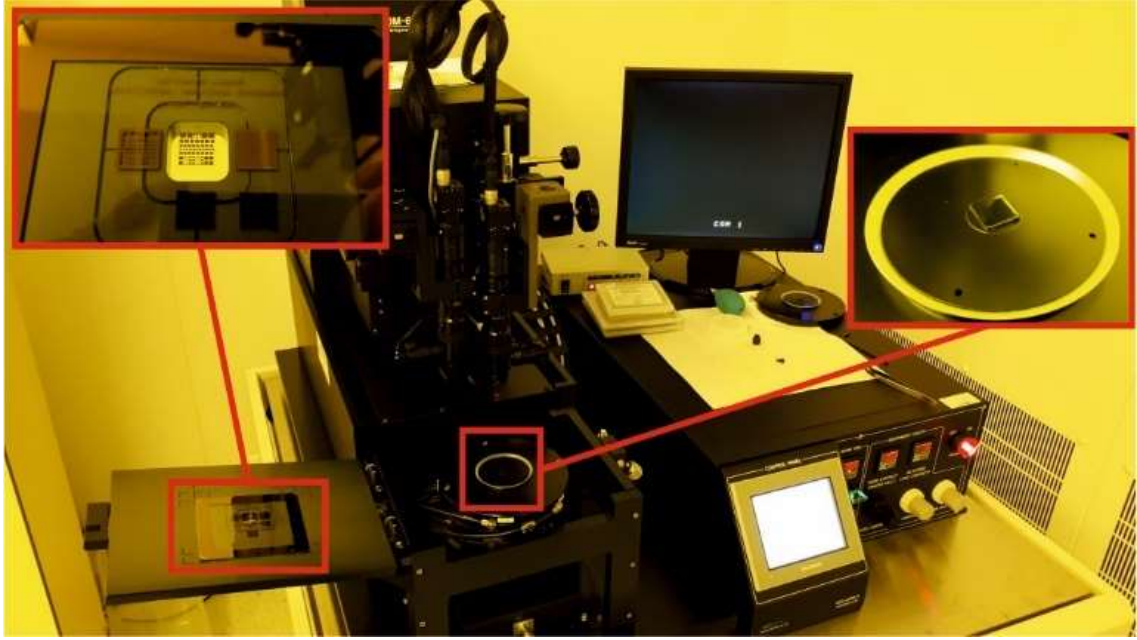
Test örneği üzerine istenilen desenlerin aktarılması amacıyla ışığa duyarlı organik malzeme olan fotorezist kullanılmaktadır. Fotorezistler ışığa karşı verdiği tepkiye göre pozitif ve negatif olmak üzere ikiye ayrılırlar. *Pozitif fotorezist* ışık ile uyarıldığında polimer yapısı değişir ve uygun tab çözeltisi içerisinde ışık gören yerler çözünür. *Negatif fotorezist* için ışık gören bölümlerin bağ yapısı güçlenir ve tab çözeltisi içerisinde ışık görmeyen bölümler çözünür. Bu çalışmada kullanılan pozitif *AZ5214E* (Görsel 3.4c) ve negatif *SU8* (Görsel 3.4d) fotorezistleridir. Test örneklerini aygıt haline getirme işleminde mesa adı verilen yapılara ihtiyaç vardır. Fotolitografi işleminde, mesa deseni örnek üzerine fotorezist kullanılarak aktarılmaktadır. Bu işlem için *AZ5214E* pozitif fotorezisti kullanılmıştır. Döner kaplama cihazına yerleştirilen temizlenmiş test örneğinin üzerine, şırınga ucuna yerleştirilmiş 45 µm'lik filtreden geçirildikten sonra örnek üzerine fotorezist damlatılır. Döner kaplama cihazında örnek, 4000 rpm devirde 1 dakika döndürülerek fotorezist kaplanmıştır. Kaplanan fotorezistin kuruması ve içerisindeki çözücü maddelerin buharlaşması için sıcak yüzey cihazının (hotplate) üzerine konulan örneğe 110 °C sıcaklıkta 1 dakika *hafif ısıtma* işlemi uygulanır.



Görsel 3.4. (a) Döner kaplama cihazı, (b) sıcak yüzey cihazı, (c) *AZ5214E* pozitif fotorezist, (d) *SU8* negatif fotorezist

- Maskeleme/işınlama

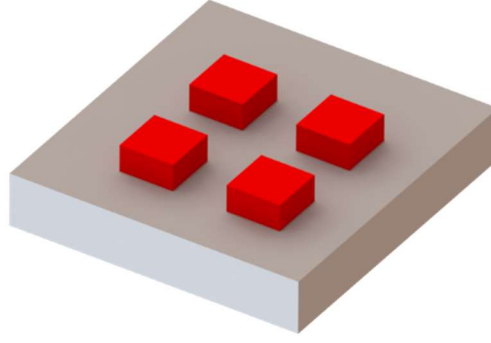
Hafif ısıtma işleminin ardından örnek, mesa deseni aktarmak için maske hizalama cihazına yerleştirilir (Görsel 3.5). Krom kaplı cam maskede bulunan mesa deseninden geçirilen UV ışık, örnek üzerine düşürülür. Bu işleminden önce herhangi bir gölgeleme etkisi olmaması için örnek maskeye dokunana kadar yaklaştırılmalıdır.



Görsel 3.5. Maske hizalama cihazı, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı

- Tab çözeltisi

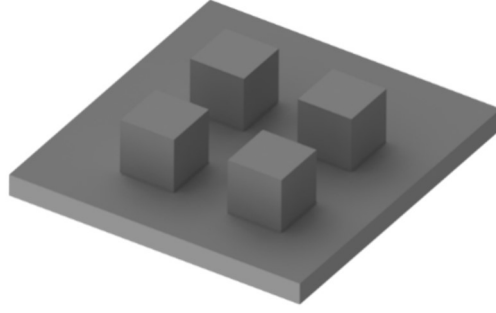
Maskeleme/işınlama işleminin sonucunda polimer yapısı değişen (ışık gören yerlerin) fotorezistin, tab çözeltisi olan 1:4 $AZ400K:H_2O$ içerisinde bekletilmesiyle gizli aygıt deseni ortaya çıkarılır (Şekil 3.5). Tab çözeltisi içerisinde örneğin tutulacağı süre önceden belirlenmelidir. Tab çözeltisi içerisinde tutulması gereken süre geçilirse, fotorezistin üzerine aktarılan maske deseninde bozulmalar oluşabilmektedir ve tab çözeltisi örnek yüzeyinde tahribata sebep olabilmektedir.



Şekil 3.5. *Gizli aygıt deseni aktarılmış temsili örnek görseli*

- Aşındırma

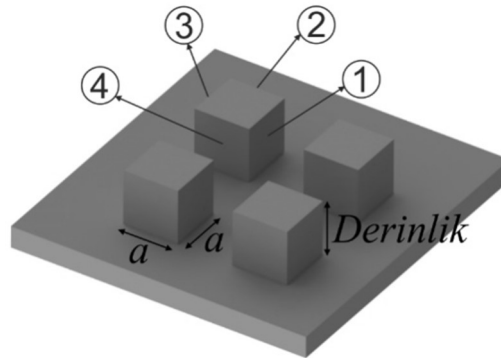
MBE sisteminde büyütülen malzemeler epikatman şeklinde oluşturulduğu için test örneklerinde altta kalan kontak bölgesine, elektriksel bağlantıların yapılması için erişmek gerekmektedir. Aşındırma işlemi verilen yöntem ile istenilen bölgeye atomlar yüzeyden koparılarak erişilir. Aşındırma, kuru aşındırma ve ıslak aşındırma olarak ikiye ayrılır. *Kuru aşındırma*, reaktif gazların plazma formunda yüzeydeki atomları uzaklaştırmasıdır. *Islak aşındırma*, kimyasal asitlerin kullanıldığı, malzeme seçicilikleri yüksek, düşük maliyetli ve kuru aşındırmaya oranla genellikle 10 kat daha hızlı bir işlemdir. Test örneği üzerine aktarılan mesa deseni, aşındırma işlemi yapıldığında yüzeyi asitlerden koruyucu bir tabaka görevi görür. Böylece aşındırma çözeltisi içerisinde mesa deseni olan yerler korunur. Aşındırma işlemi öncesi yapılması gereken iki işlem vardır. Birincisi 5 dakika 120 °C *sert ısıtma* işlemidir. Bu sayede fotorezist sertleşir ve asitlere karşı dayanıklı hale gelir. İkinci işlem ise aşındırma derinliğinin kontrolü için fotorezistin kalınlığının tespit edilmesidir. Yüzey belirleyici cihazı ile fotorezist yüksekliği tespit edildikten sonra asit içerisinde aşındırma derinliği yine yüzey belirleyici cihazı ile tespit edilmektedir. Fotorezisti temizlenmiş, alt kontak katmanına kadar aşındırılmış örnek (Şekil 3.6) bir sonraki işlem için hazırdır.



Şekil 3.6. Alt kontak katmanına kadar aşındırılmış temsili örnek görseli

- Pasivasyon

Islak aşındırma ile test örneği üzerinde oluşturulan mesa duvarları, atomların koparılmasından dolayı açık bağlara sahiptirler. Açık bağlar yüzeyde akım kanalları oluştururlar. Ayrıca atmosfere maruz kalan yüzeydeki III-V grubu atomlar, kendilerine ait oksitli bileşikler kısa sürede oluştururlar. Bu bileşiklerden bazıları elektriksel olarak iletkenler ve yüzey kaçak akımları meydana getirirler [8]. Bu sebepten dolayı yüzeydeki bağ yapmamış atomların oksitlenmeden önce yalıtılması gerekmektedir. Bu işleme *pasivasyon* adı verilir. Pasivasyon yapılmamış örneklerde yüzey kaçak akımı, fotodedektöre bağlanmış bir paralel direnç gibi davranan oksit tabakasından dolayı oluşur. Paralel akım kanalı ile yapının direnci düşer. Özellikle yüksek alan/hacim oranına sahip küçük mesa boyutlarında yüzey kaçak akımları baskın mekanizma haline gelmektedir. Şekil 3.7’de bir kare şeklindeki mesanın ayrıtları görülmektedir.



Şekil 3.7. Kare şeklindeki mesaların ayrıtları

Şekilde görülen yüzey kaçak akımları oluşan 1, 2, 3 ve 4 yüzeylerinin toplam alanı Denklem 3.4'teki gibi ifade edilir:

$$\text{Toplam Mesa Yüzey Alanı} = 4 \times (a \times \text{Derinlik}) \quad (3.4)$$

Burada, a karenin bir kenarının uzunluğudur. Bütün mesanın hacmi Denklem 3.5'teki gibi hesaplanabilir:

$$\text{Mesa Hacmi} = a^2 \times \text{Derinlik} \quad (3.5)$$

Toplam mesa yüzey alanı ile mesa hacmi oranı Denklem 3.6'da görülmektedir:

$$\frac{\text{Toplam Mesa Yüzey Alanı}}{\text{Mesa Hacmi}} = \frac{4 \times a \times \text{Derinlik}}{a^2 \times \text{Derinlik}} = \frac{4a}{a^2} \quad (3.6)$$

Denklem 3.6'dan görülebileceği gibi, alan/hacim oranı, aşındırma derinliğinden bağımsız hale gelmektedir. Bu nedenle denklem çevre/alan formunda da gösterilebilmektedir. Tablo 3.1'te kare şeklindeki farklı mesa boyutlarına ait çevre/alan değerleri görülmektedir.

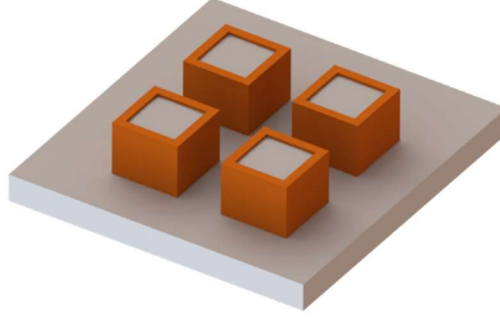
Tablo 3.1. Kare şeklindeki farklı kenar uzunluklarına ait mesalarda çevre/alan oranı

Mesa kenar uzunluğu (cm)	Çevre (cm)	Alan (cm ²)	Çevre/Alan (cm ⁻¹)
0,01	0,04	0,0001	400
0,02	0,08	0,0004	200
0,03	0,12	0,0009	133,33
0,04	0,16	0,0016	100
0,05	0,2	0,0025	80
0,06	0,24	0,0036	66,66
0,07	0,28	0,0049	57,14
0,08	0,32	0,0064	50

Tablo 3.1'deki veriler incelendiğinde; mesanın yüzey alanlarından geçen kaçak akım, mesa boyutu küçüldükçe mesanın kendi içinden geçen akıma kıyasla oldukça artmaktadır. Özellikle mesa boyutu 50 µm'den küçük odak düzlem dizini (focal plane array, FPA) yapılarda kaçak yüzey akımını bastırmak oldukça önem kazanmaktadır.

Pasivasyon işleminde mesa duvarlarının kaplanması farklı teknikler ile uygulanmıştır. Aşındırılmış mesaya hemen pasivasyon işlemi yapılması, sıradaki

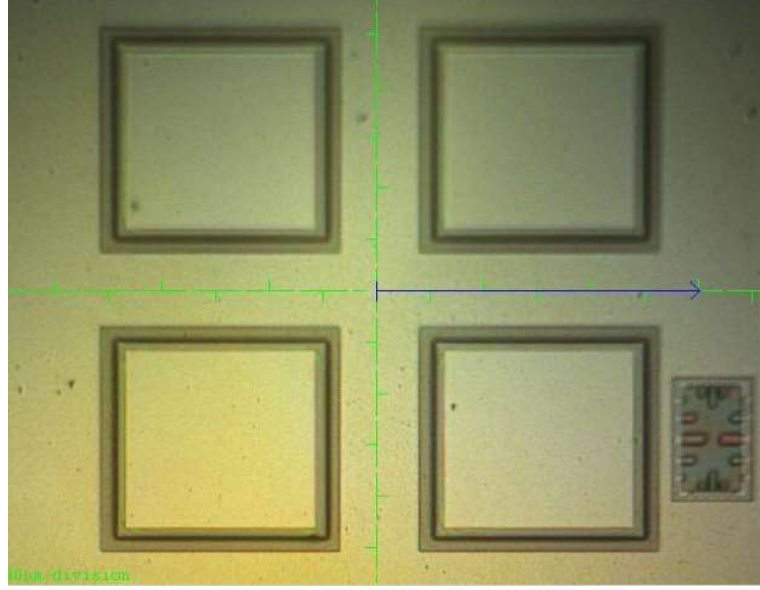
fotolitografi basamaklarındaki kirlilik ve etkileri ortadan kaldırmaktadır. Şekil 3.8’de pasivasyon işlemi yapılmış temsili örnek görseli görülmektedir.



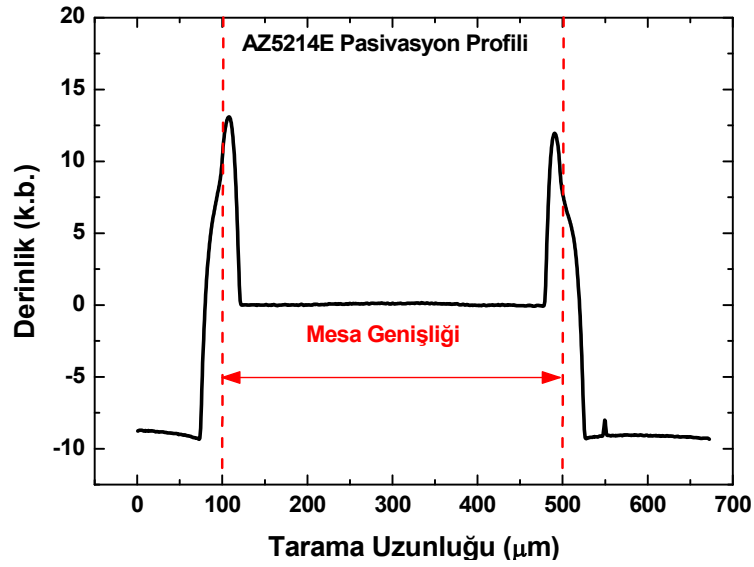
Şekil 3.8. *Pasivasyon işlemi yapılmış temsili örnek görseli*

1. AZ5214E pasivasyonu

Yaygın olarak SU8 negatif fotorezisti pasivasyon malzemesi olarak kullanılmasından yola çıkılarak fotolitografi işleminde mesa deseni ve metal deseni için kullanılan AZ5214E fotorezistin pasivasyon malzemesi olarak kullanılması denenmiştir. Bu işlem için öncelikle mesa duvarlarının fotorezist kaplanmadan önce oksitten arındırılmış olması gerekmektedir. Örnek, öncelikle 1:10 HCl:H₂O içerisinde 30 saniye bekletilerek oksit temizleme işlemi yapılır. Örnek çözeltiden çıkartılıp atmosfer ile temas etmeye başladığı andan itibaren yüzeyi oksitleneceği için işlemin hızlıca yapılması gerekmektedir. Örnek yüzeyinin oksitlendirme sürecini hızlandıracak için de-iyonize su yerine alkol ile yıkanan örnekler N₂ gazı ile kurutulup hızlıca döner kaplayıcı cihazına yerleştirilip, üzerlerine fotorezist damlatılmıştır. Kaplama işlemi sonunda pasivasyon maske deseni ile ışınlanıp tab edilmiştir. AZ5214E pasivasyonu yapılmış 400x400 µm² mesaların üstten yüzey belirleyici cihazının mikroskop görüntüsü Görsel 3.6’da ve yüzey profili Şekil 3.9’da görülmektedir.



Görsel 3.6. AZ5214E pasivasyonu yapılmış $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ alana sahip mesaların üstten mikroskop görüntüsü

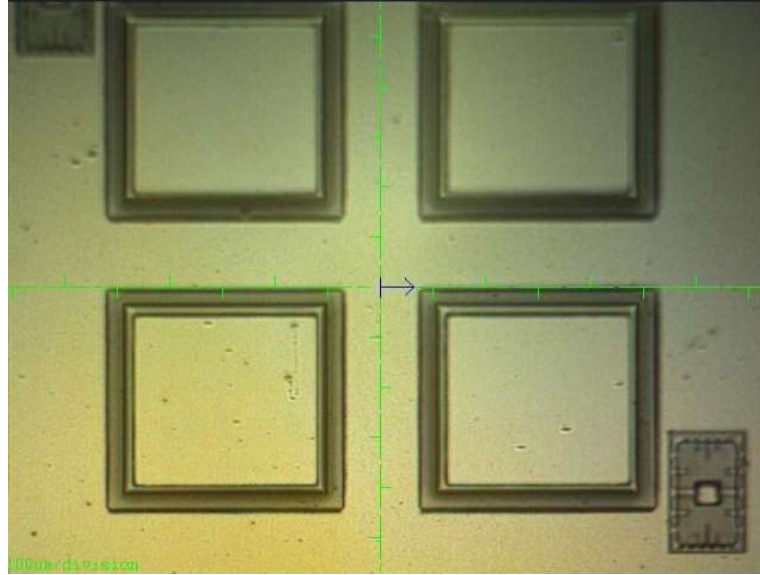


Şekil 3.9. $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ alana sahip mesanın AZ5214E pasivasyon yüzey profili

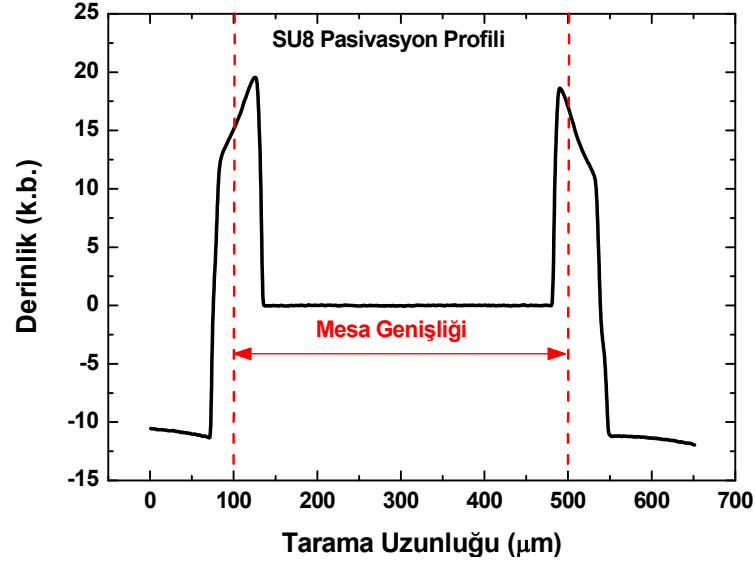
AZ5214E, aseton içerisinde çözülen bir fotorezisttir. AZ5214E fotorezisti ile yapılan pasivasyon işleminden sonra sıradaki fotolitografi işlemlerinde yine aseton kullanılacağı için AZ5214E'nin asetona dayanıklı olması gerekmektedir. Fotorezisti asetona dayanıklı hale getirmek için sıcaklık ve süre bağımlı testler yapılmıştır. Sıcak yüzey cihazı üzerinde $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 10 dakika AZ5214E fotorezistini asetona karşı dayanıklı hale getirmektedir.

2. SU-8 pasivasyonu

III-V grubu yarıiletkenlerde sıklıkla kullanılan SU8, 0,2-100 μm kalınlık aralığında döner kaplayıcı ile kaplanabilen, termal dayanıklılığı yüksek, optoelektronik çalışmalarda oldukça kullanılmaktadır [9]. SU8 yüzeyden kolayca temizlenebilen bir fotorezist olmamasına rağmen yapılan pasivasyon işlemi, AZ5214E pasivasyonundaki gibi sıcak yüzey cihazı üzerinde 200 °C 10 dakika bekletilmiştir. Bu basamakların aynı olması, fotorezist pasivasyonu karşılaştırılmasında geçerli olan düzenin korunması içindir. SU8 pasivasyonu yapılmış 400x400 μm^2 mesaların üstten yüzey belirleyici cihazının mikroskop görüntüsü Görsel 3.7’de ve yüzey profili Şekil 3.10’da görülmektedir.



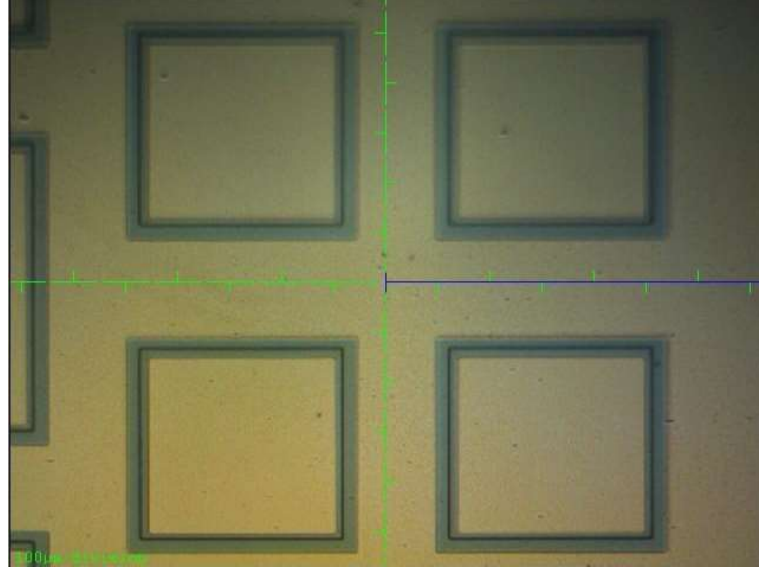
Görsel 3.7. SU8 pasivasyonu yapılmış 400x400 μm^2 alana sahip mesaların üstten mikroskop görüntüsü



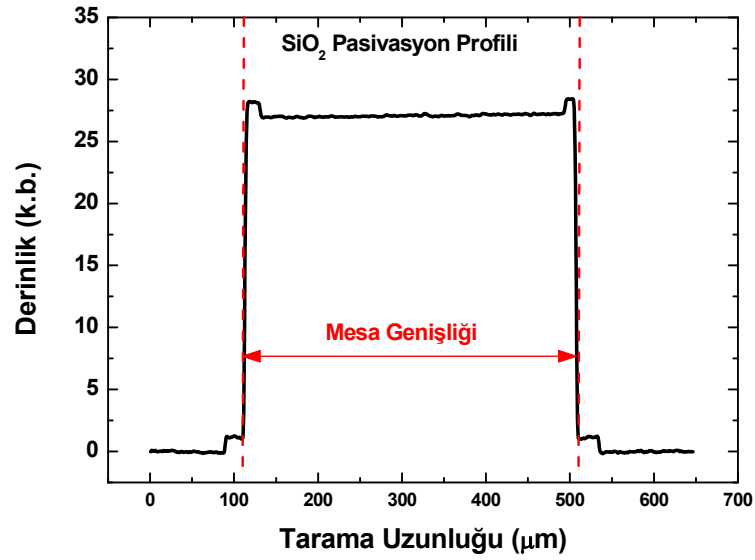
Şekil 3.10. 400x400 μm^2 alana sahip mesanın SU8 pasivasyon profili

3. SiO₂ pasivasyonu

Yüksek dielektrik katsayısına sahip SiO₂, plazma destekli kimyasal buhar biriktirme (plasma-enhanced chemical vapor deposition, PECVD) yöntemiyle kaplanarak pasivasyon malzemesi olarak yaygınlıkla kullanılmaktadır [10]. Bu tez çalışmasında aşındırılmış ve mesa yapısı oluşturulmuş örnekler saçırma (magnetron sputtering) yöntemiyle kaplama cihazında (physical vapor deposition, PVD) SiO₂ kaplanmıştır. SiO₂ kaplanması öncesinde örnek yüzeyindeki oksitin temizlenmesi için öncelikle 1 dakika düşük güçte N₂ plazma uygulanmıştır. Önemli noktalardan birisi plazma temizliği sırasında, plazmanın oluştuğu örnek tutucu üzerinde plazmadan etkilenecek başka malzeme olmamalıdır. Bu yüzden örnek tutucu pasivasyon işlemi öncesinde SiO₂ kaplanmıştır. Örneklerin üzerine kaplanan SiO₂, optik pencere ve metal kontak bölgelerinden kaldırılmak için üzerine uygun desen aktarılıp 1:10 HF:H₂O içerisinde aşındırılmıştır. Aşındırma işlemi sonunda SiO₂ pasivasyonu yapılmış 400x400 μm^2 mesaların üstten yüzey belirleyici cihazının mikroskop görüntüsü Görsel 3.8’de ve yüzey profili Şekil 3.11’de görülmektedir.

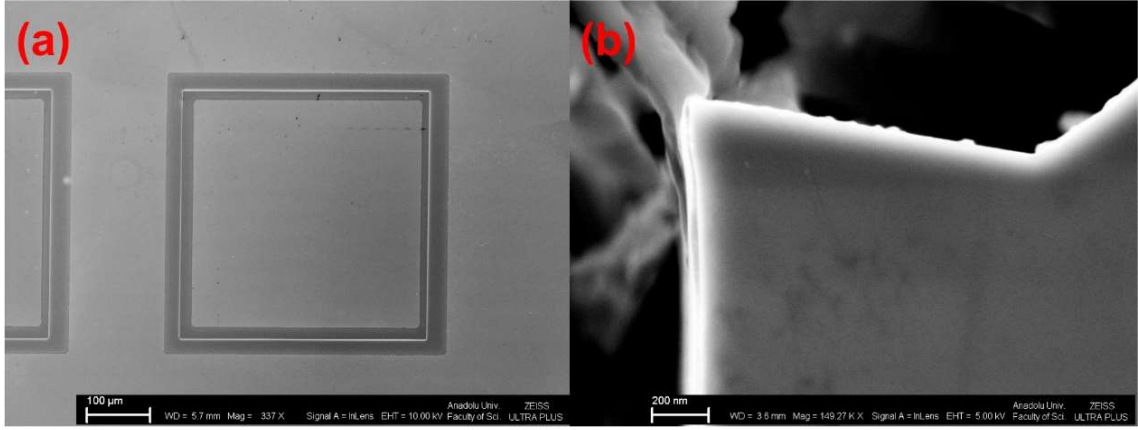


Görsel 3.8. SiO_2 pasivasyonu yapılmış $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ alana sahip mesaların üstten mikroskop görüntüsü



Şekil 3.11. $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ alana sahip mesanın SiO_2 pasivasyon profili

Kaplanan SiO_2 , üstten bakıldığında, yüzey profil belirleme cihazının mikroskopunda görülmesine rağmen mesa duvarlarının kaplanıp kaplanmadığını kontrol etmek için taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope, SEM) ile üstten ve mesa kesitinden görüntü alınmıştır (Görsel 3.9).

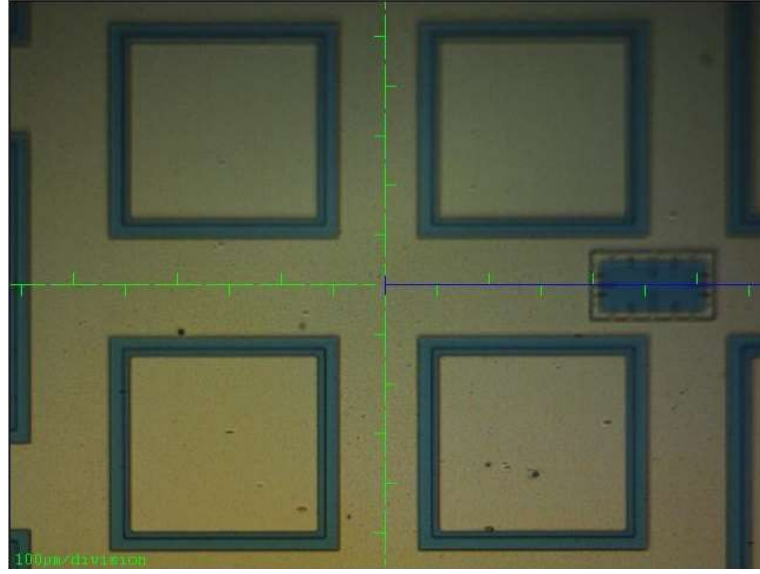


Görsel 3.9. *SiO₂ pasivasyonu yapılmış 400x400 μm² alana sahip mesanın (a) üstten, (b) kesitinden SEM görüntüleri*

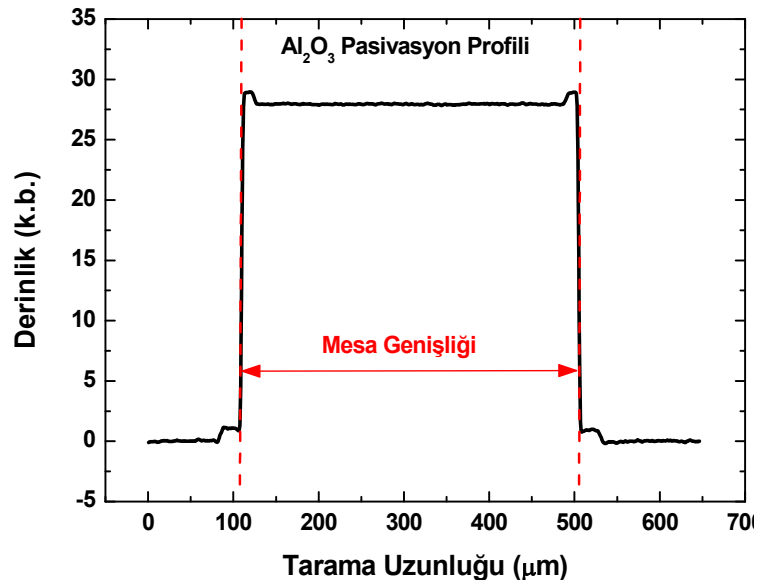
Görsel 3.9b’de mesa duvarlarında görülen beyaz kaplama SiO₂’e aittir. Mesa duvarlarının SiO₂ kaplandığı SEM görüntüsü ile teyit edilmiştir.

4. Al₂O₃ pasivasyonu

Al₂O₃, III-V grubu yarıiletkenlerin oksitleri ile aynı stikoyometrik formda ve Gibb’s serbest enerjisi daha düşük olduğu için, kaplama işlemi sırasında Al atomları ile III-V grubu elementleri yer değiştirip hem kaplama sırasında temizlik hem de pasivasyon işlemini bir arada yapmaktadır. Genellikle atomik katman biriktirme (atomic layer deposition, ALD) cihazı ile kaplanan Al₂O₃, Tip II süperörgü dedektörlerde en iyi iyileştirmeye sahip olan malzeme olarak belirlenmiştir [8]. Örneklerin üzerine kaplanan Al₂O₃, optik pencere ve metal kontak bölgelerinden kaldırılmak için üzerine uygun desen aktarılıp seyreltilmemiş 70 °C’deki H₃PO₄ içerisinde aşındırılmıştır. Aşındırma işlemi sonunda Al₂O₃ pasivasyonu yapılmış 400x400 μm² mesaların üstten yüzey belirleyici cihazının mikroskop görüntüsü Görsel 3.10’da ve yüzey profili Şekil 3.12’de görülmektedir.



Görsel 3.10. Al_2O_3 pasivasyonu yapılmış $400 \times 400 \mu m^2$ alana sahip mesaların üstten mikroskop görüntüsü

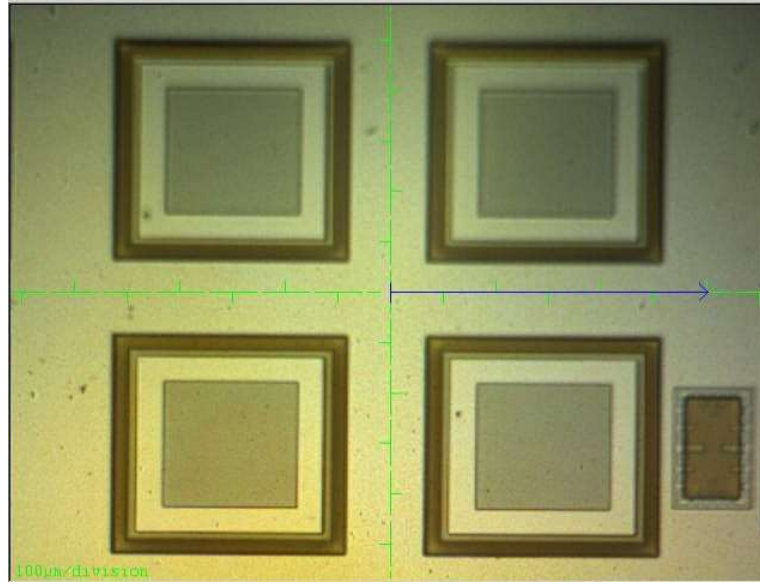


Şekil 3.12. $400 \times 400 \mu m^2$ alana sahip mesanın Al_2O_3 pasivasyon profili

- Metal kaplama

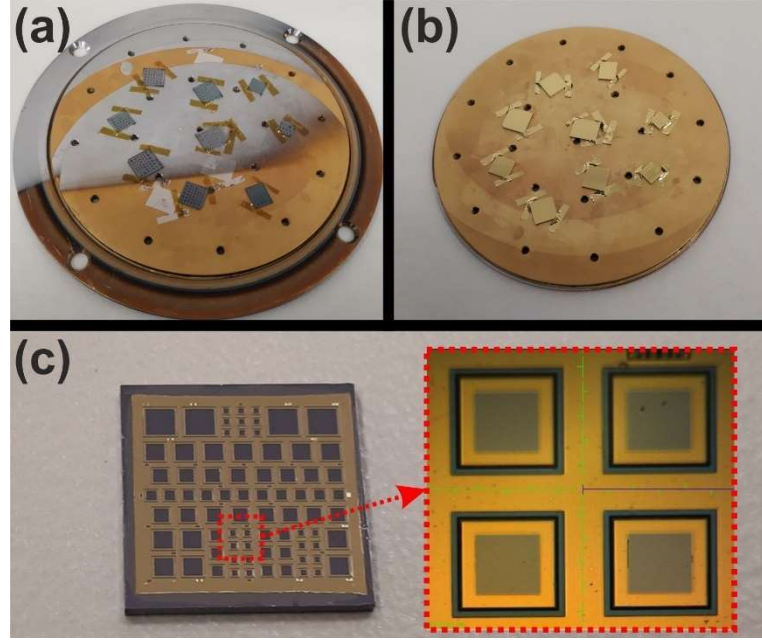
Pasivasyon işlemi tamamlanmış örnek, omik metal kontakların oluşturulması için tekrar fotorezist ile kaplanır ve metal kontak deseni maske hizalama cihazı ile örnek üzerine aktarılır. Tab etme işleminin ardından örnek metal kaplama işlemi için hazırdır. *Metal kaldırma* (Lift-off), metal kaplanan örnek üzerindeki kontak bölgesi hariç metalleri

yüzeyden uzaklaştırma işlemidir. AZ5214E fotorezisti 4000 rpm’de 1 dakika döndürülerek kaplandığında yaklaşık 1,45 μm kalınlığında olur. Aşındırılan örneklerin derinlikleri eğer bu kalınlıktan daha fazla ise, lift-off işleminde problem yaşanmaması için daha kalın fotorezist kullanılmalıdır. AZ9260 fotorezisti, tez çalışmasında kullanılan tüm örneklerde metal kontak deseninde kullanılmıştır. AZ9260 için 5000 rpm’de 1 dakika döndürülerek kaplama sonucunda ölçülen kalınlık yaklaşık 6 μm olmaktadır. Görsel 3.11’de metal deseni aktarılmış örnek görülmektedir.



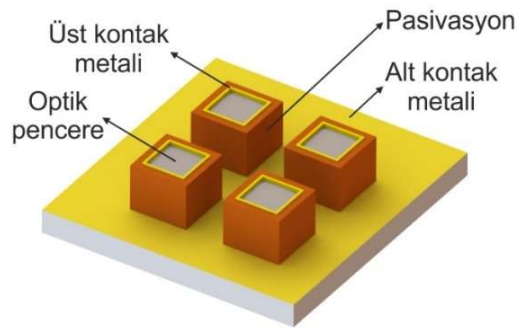
Görsel 3.11. Metal deseni aktarılmış $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ alana sahip mesaların üstten mikroskop görüntüsü

Kontak bölgelerine kaplanacak metalin yüzeye daha iyi tutunması ve yüzeydeki doğal oksit tabakasının temizlenmesi için örnekler 1:10 oranında HCl:H₂O çözeltisinde 30 saniye tutulduktan sonra hızlıca metal kaplama cihazının vakum haznesine yerleştirilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan tüm örneklerle 10 nm Ti üzerine 200 nm Au kaplanarak omik üst ve alt metal kontaklar oluşturulmuştur (Görsel 3.12).



Görsel 3.12. (a) Metal kaplama cihazının örnek tutucusuna yerleştirilmiş örnekler, (b) metal kaplama sonrası, (c) 10x10 mm² örneğin lift-off sonrası resmi

Görsel 3.12’de metal kaplama öncesi, sonrası ve metal kaldırma (lift-off) işleminden sonra paketlenmeye hazır örnekler görülmektedir. Şekil 3.13’te paketlenmeden önceki üretilmiş tek piksel fotodedektörlerin 3 boyutlu temsili resmi görülmektedir.

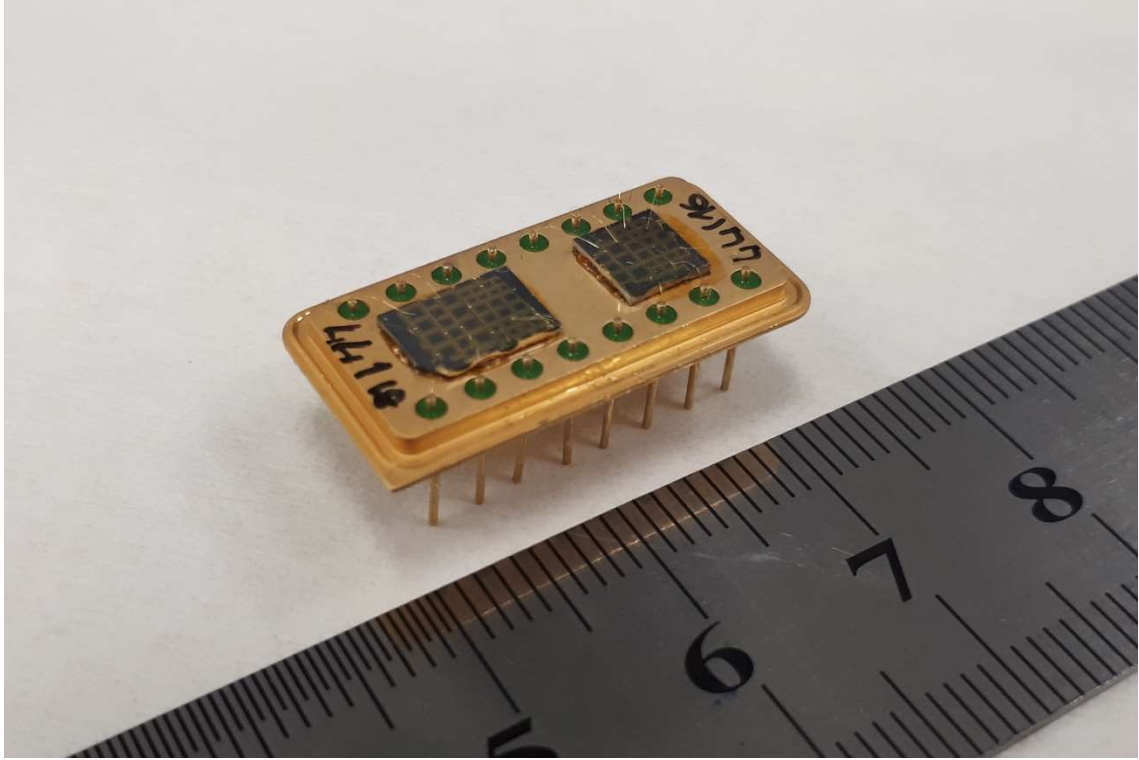


Şekil 3.13. Paketleme işlemi için hazır haldeki 3B temsili örnek görseli

- Paketleme ve tel bağlama

Elektriksel ve optiksel ölçümlerin yapılması için örnekler, GE Vernish ile DIP paketlere yerleştirilmiştir. GE Vernish elektriksel olarak yalıtkan ve termal iletkenliği

yüksek bir yapıştırıcıdır. Paketlenmiş örnekler, yapıştırıcının kuruması için 15 dakika 150 °C de tutulmuştur. 25 µm çaplı altın tel ile mesa ve DIP paket pinleri arasında kontaklar alındıktan sonra örnekler, elektriksel ve optiksel ölçüm için hazır hale gelmiştir (Görsel 3.13).



Görsel 3.13. Paketlenmiş ve tel bağlantıları yapılmış örnek

3.4. Elektriksel ve Optiksel Ölçümler

Aygıt haline getirilmiş olan örneklerin elektriksel ve optiksel ölçümleri kapalı devre helyum kreostat cihazı içerisinde yapılmıştır. Kreostat cihazı, örnekleri 8 – 300 K aralığında sıcaklıklara soğutulup ısıtılabilir. Kreostat cihazı bu tez çalışmasında, sıcaklık bağımlı karanlık akım, spektral tepki ve tepkisellik ölçümlerinde kullanılmıştır. Düşük sıcaklıklara soğutulan örnek üzerinde atmosfer gazlarının yoğunlaşması için kreostatın içerisi turbo pompa ile vakum değeri 1×10^{-5} mBar'a kadar vakuma alındıktan sonra soğutma işlemi yapılmıştır. Kreostatta, karanlık akım ölçümleri için soğuk metal kalkan ve optik ölçümler için optik bir pencere kullanılır.

3.4.1. Karanlık akım ölçümü

Fotodedektörün üzerine ışık düşmediği durumda üzerinden geçen akıma karanlık akım denilmektedir. İdeal bir p-n eklemünde termal dengede, difüzyon ve sürüklenme akımı birbirini dengeleyerek net akım oluşmaz. İleri besleme voltajı ile birlikte potansiyel bariyer azalır ve p-n eklemi boyunca akım akmaya başlar. Ters besleme ile bariyer yüksekliği artacağı için akım düşüktür ve akım taşıyıcı difüzyonu ile sınırlıdır. Fotodedektörlerde çeşitli karanlık akım mekanizmaları bulunmaktadır. Bunlardan en etkilileri yaratma-yeniden birleşme, difüzyon ve tünelleme akımlarıdır.

Diferansiyel direnç (R_d), karanlık akım-voltaj grafiğinin eğiminden edilmektedir (Denklem 3.7). Akım-voltaj grafiğinin $V=0$ 'da elde edilen eğimi R_0 olarak tanımlanır ve mesa alanı ile çarpılarak R_0A ($\Omega.cm^2$) değeri elde edilir. R_0A değeri dedektörün gürültüsünün hesaplanmasında kullanılan önemli parametredir [11].

$$R_d = \frac{dV}{dI} \quad (3.7)$$

Aygıt haline getirilmiş örneklerin karanlık akım-voltaj ölçümleri, Keithley 2635a güç kaynağı ile uygulanan voltaja karşı örneğin üzerinden geçen akımın yine Keithley 2635a ile okunmasıyla elde edilir. Okunan akım değerleri LabVIEW programı ile bilgisayara kaydedilir. Ölçümler -1, +1 V arasında 5 mV adım aralığı ile ölçülmüştür. Görsel 3.14'te akım-voltaj ölçüm düzeneği görülmektedir.



Görsel 3.14. Akım voltaj ölçüm düzeneği

Görsel 3.14'teki spektral tepki ölçüm düzeneğinde harf kodlaması yapılan cihazlar:

a: Akım değerlerini kaydeden LabVIEW programı

b: Keithley 2635a güç kaynağı

c: Kreostat sıcaklık kontrolcüsü

d: Kreostat

Yapılan karanlık akım-voltaj ölçümleri ile ideal bir diyota göre üretilen fotodedektörlerin kıyaslaması idealite faktörü ile belirlenebilmektedir. İdealite faktörü, ideal diyot denkleminde elde edilebilmektedir (Denklem 3.8).

$$I = I_0 (e^{\frac{qV}{nk_B T}} - 1) \quad (3.8)$$

Burada I ölçülen akım, I_0 ters doyum akımı, q elektron yükü, V uygulanan voltaj, k_B Boltzmann sabiti, T sıcaklık ve n idealite faktörüdür. Denklem 3.8'de 100 mV üzerindeki voltaj değerlerinde, eksponansiyel terimin yanında -1 ihmal edilebilmektedir ve denklemin her iki tarafının doğal logaritması alınırsa Denklem 3.9 elde edilir.

$$\ln(I) = \ln(I_0) + \left(\frac{q}{nk_B T}\right)V \quad (3.9)$$

Denklem 3.9'da, uygulanan voltaja karşı doğal logaritması alınmış akım grafiğinin kesim noktası, $\ln(I_0)$ değerini, eğimi ise $q/nk_B T$ değerini vermektedir. q , k_B ve T değerleri sabitler olduğu için n grafiğin eğiminden elde edilebilir. Burada $k_B T/q$ terimine “*termal voltaj*” da denilmektedir. Hesaplanan idealite değerinin 1'e yakın olması diyot malzemesinin kusursuzluğuna işaret eder. İdealite faktörü hesaplanırken dikkat edilmesi gereken üç ana etken vardır [12].

- Paralel direnç etkisi düşük voltajlarda aygıt performansında baskındır.
- Yüksek voltajlarda seri direnç etkisi artacağı için idealite faktörü çok yüksek değerler alır.
- Karanlık akım voltaj ölçümü sırasında sıcaklık sabit kalmalıdır.

Ölçülen sıcaklık bağımlı karanlık akım voltaj verileri ile oluşturulan “*Arrhenius Eğrisi*” kullanılarak aktivasyon enerjisi hesaplanabilmektedir. Bir p-n eklemünde geri beslem altında difüzyon akımı katkısız taşıyıcı yoğunluğunun karesi ile, yaratma-yeniden birleşme akımı katkısız taşıyıcı yoğunluğunun ile orantılıdır (Denklem 3.10-11).

$$J_D \propto n_i^2 \quad (3.10)$$

$$J_{G-R} \propto n_i \quad (3.11)$$

$$n_i \propto e^{-E_g/2k_B T} \quad (3.12)$$

Burada J_D , difüzyon akım yoğunluğu, J_{G-R} yaratma-yeniden birleşme akım yoğunluğu, n_i katkısız taşıyıcı yoğunluğu, E_g yasak enerji aralığı, k_B Boltzmann sabiti ve T sıcaklıktır. Denklem 3.10 ve 3.11’deki n_i ifadeleri Denklem 3.12 ile birleştirilirse, Denklem 3.13 ve Denklem 3.14’de J_D ve J_{G-R} ’yi yasak enerji aralığı ile ilişkilendirilir.

$$J_D \propto e^{-E_g/k_B T} \quad (3.13)$$

$$J_{G-R} \propto e^{-E_g/2k_B T} \quad (3.14)$$

Karanlık akım yoğunluğu Denklem 3.15’teki gibi ifade edilebilir:

$$J = J_0 e^{-E_a/k_B T} \quad (3.15)$$

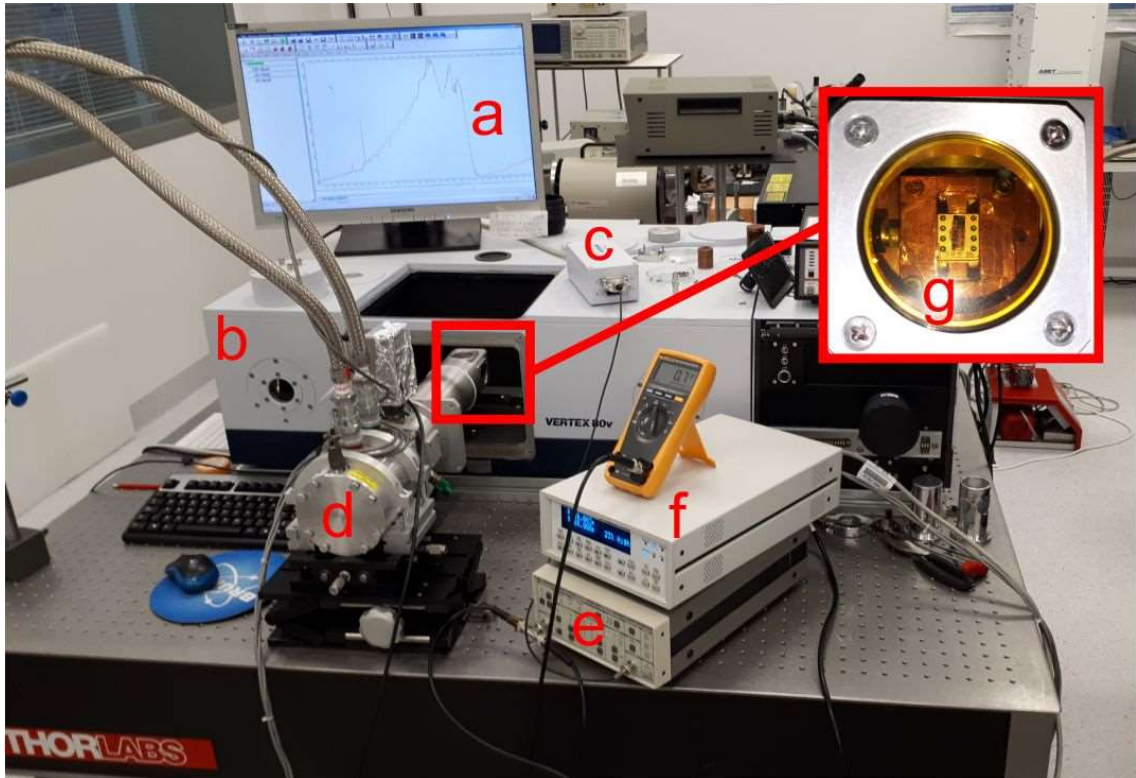
Denklem 3.15’in her iki tarafının doğal logaritması alınırsa Denklem 3.16 elde edilir:

$$\ln J = \ln J_0 - (E_a) \frac{1}{k_B T} \quad (3.16)$$

Denklem 3.16’ya göre çizdirilen Arrhenius Eğrisi’nde, ölçülen karanlık akım yoğunluğuna karşılık $1/k_B T$ grafiğinin eğimi aktivasyon enerjisini vermektedir. Eğimden elde edilen aktivasyon enerjisi, Denklem 3.13’e göre yasak enerji aralığına eşit olduğu durumda difüzyon akımı, Denklem 3.14’e göre yarısına denk geliyor ise yaratma-yeniden birleşme akımı eğimin alındığı sıcaklık aralığında baskın akım mekanizmasını gösterir [13].

3.4.2. Spektral tepki ölçümleri

Fotodedektörler, genel olarak üzerine düşen ışınımı elektrik sinyaline çeviren aygıtlardır. Aygıt haline getirilmiş örneklerin spektral tepkilerinin incelenmesi için Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) cihazı kullanılmıştır. Dışarıdan harici dedektör olarak tanıtılan örneklerin üzerine MWIR ışık kaynağı (Globar) kullanılarak ışık düşürülmüş ve üretilen örneklerin spektral tepkileri elde edilmiştir. Dış ortam etkilerinin ayrıştırılması için örneklerin spektral tepkileri, spektral tepki şiddeti dalgaboyundan bağımsız ve referans dedektör olarak kullanılan piroelektrik DLaTGS dedektöre göre oranlanıp düzeltilmiştir. Görsel 3.15'te spektral tepki ölçümü için kullanılan düzenek görülmektedir.



Görsel 3.15. Spektral tepki ölçüm düzeneği

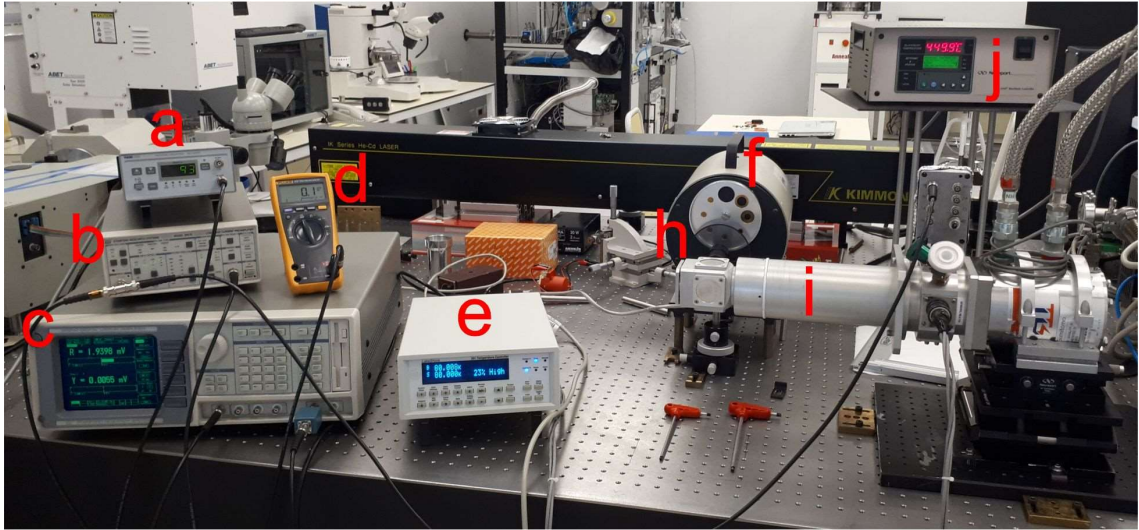
Görsel 3.15'teki spektral tepki ölçüm düzeneğinde harf kodlaması yapılan cihazlar:

a: Elde edilen spektral tepki

- b: Bruker Vertex 80V FTIR cihazı
- c: Harici dedektör ekleme modülü
- d: Kreostat
- e: Düşük gürültülü ön yükseltici (SR570)
- f: Kreostat sıcaklık kontrolcüsü
- g: ZnSe optik pencere

3.4.3. Tepkisellik ölçümleri

Tepkisellik ölçümünde, kalibre bir ışık kaynağından çıkan ışığa göre örneklerin oluşturduğu elektriksel sinyal ölçülmektedir. Tepkisellik, oluşan elektrik sinyalinin gelen optik ışığın gücüne oranıdır. Elektrik sinyalinin türüne göre tepkisellik Amper/Watt veya Volt/Watt birimlerinde elde edilir. Ölçümde kullanılan düzenek Görsel 3.16’te görülmektedir.



Görsel 3.16. *Tepkisellik ölçüm düzeneği*

Görsel 3.16’deki tepkisellik ölçüm düzeneğinde harf kodlaması yapılan cihazlar:

- a: Optik demet kısıyıcı frekans kontrolcüsü

b: Düşük gürültülü ön yükseltici (SR570)

c: Kilitlemeli yükseltici (SR580)

d: Multimetre

e: Kreostat sıcaklık kontrolcüsü

f: Kara cisim ışıması kaynağı

h: Optik demet kısıyıcı

i: Kreostat

j: Kara cisim kaynağı sıcaklık kontrolcüsü

Görsel 3.16'daki düzenekte, siyah cisim ışıması yapan kaynaktan çıkan ışık, optik kısıyıcıdan geçtikten sonra üretilen örneğin üzerine düşmektedir. Siyah cisim ışıması yapan kaynak önüne konulan optik kısıyıcı ile dışarıdan gelen gürültü engellenmektedir. Örnekte oluşan sinyal, ön yükselticide yükseltildikten sonra kilitlemeli yükselticide optik kısıyıcı frekansında örneğin çıkış voltajı okunmaktadır. Ön yükseltici ile örneklere voltaj uygulanabilmekte ve multimetre üzerinden uygulanan voltaj görülebilmektedir.

Kara cisim uyarıcılığını hesaplayabilmek için Denklem 3.17 kullanılmıştır.

$$M_k = \frac{2\pi hc^2 k^3}{e^{\left(\frac{hc}{k_B T}\right)k} - 1} \quad (3.17)$$

Burada M_k siyah cisim uyarıcılığı, k_B Boltzmann sabiti, h Planck sabiti, k dalga numarası, c ışık hızı ve T sıcaklıktır. Siyah cisim kaynağının tepkisellik değerinin hesaplanabilmesi için Denklem 3.18 kullanılmıştır.

$$R_{BB} = \frac{V_L S_p}{\left(\int_0^\infty M_k dk\right) E_{ESE} \theta_{LA} T_W R_S A_D} \quad (3.18)$$

Burada R_{BB} siyah cisim kaynağının tepkiselliği, V_L Kilitlemeli yükseltici çıkış voltajı, S_p ön yükseltici hassasiyeti, E_{ESE} genişletilmiş kaynak etkisi, θ_{LA} demet gelme açısı, T_W optik pencere geçirgenliği, R_s örnek yüzeyindeki yansıma miktarı ve A_D aktif

mesa alanıdır. Siyah cisim kaynağının tepkiselliğinden tepe tepkisellik değerine geçiş yapabilmek için dönüşüm faktörü hesaplamaktadır. Dönüşüm faktörü hesaplamak için kullanılan formül Denklem 3.19’da görülmektedir.

$$C = \frac{\int_0^{\lambda_c} M_k dk}{\int_0^{\lambda_c} S_D M_k dk} \quad (3.19)$$

Burada C dönüşüm faktörü, S_D ise örneğe ait spektral tepki eğrisidir. Tepe tepkisellik değeri, dönüşüm faktörü ile siyah cisim kaynağının tepkiselliğinin çarpımı ile elde edilir (Denklem 3.20).

$$R_{Tepe} = C \times R_{BB} \quad (3.20)$$

Tepe tepkisellik değeri ile örneğe ait normalize edilmiş spektral tepki grafiğinin çarpımı ile dalgaboyuna bağlı tepkisellik eğrisi A/W cinsinden elde edilmiş olur.

Kuantum verimi (η): Bir yarıiletken fotodedektöre gelen birim miktardaki ışığın algılanan elektron sayısına oranıdır (Denklem 3.21).

$$\eta = \frac{\text{üretilen fotoelektron sayısı}}{\text{gelen foton sayısı}} \times \frac{\text{algılanan elektron sayısı}}{\text{üretilen fotoelektron sayısı}} \quad (3.21)$$

$$= \frac{\text{algılanan elektron sayısı}}{\text{gelen foton sayısı}}$$

Kuantum verimi, tepkisellik eğrisinden dalgaboyuna bağlı olarak denklem 3.22’e göre hesaplanabilir.

$$\eta = \frac{hc}{q\lambda} \times R \quad (3.22)$$

Burada η kuantum verimi, h Planck sabiti, q temel elektron yükü, λ dalgaboyu, c ışık hızı ve R tepkisellik değeridir.

Özel Dedektivite (D^)*: Yarıiletken foton dedektörlerin, yapıldıkları malzemelerden bağımsız olarak performanslarının birbirleriyle kıyaslanabilmesi için kullanılan,

tepkisellik (R), karanlık akım yoğunluğu (J) ve çalışma sıcaklığı (T) gibi parametrelere bağımlı olan bir kalite göstergesidir. Özel dedektivite, Denklem 3.23 ile hesaplanabilir.

$$D^* = R \times \left(2qJ + \frac{4k_B T}{R_d \times A} \right)^{-1/2} \quad (3.23)$$

Burada, q elektron yükü, k_B Boltzmann sabiti, R_d diferansiyel direnç ve A mesa alanıdır.

4. DENEYSEL SONUÇLAR

Bölüm 3'te anlatılan yapısal, elektriksel ve optiksel ölçüm sonuçları bu bölümde sunulmuştur.

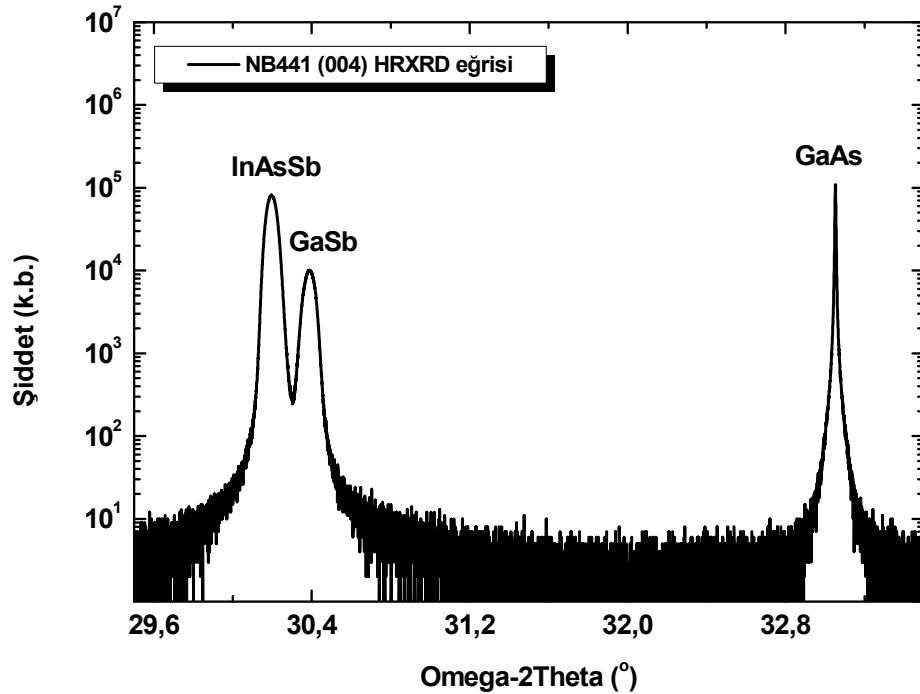
4.1. HRXRD Sonuçları

4.1.1. Sallantı eğrisi ölçüm sonuçları

MBE'de büyütme sonrası sallantı eğrisi ölçümleri tam alttaştan yapılmıştır. Alttaşın üzerinde 5 farklı noktadan yapılan sallantı eğrisi ölçümleri ile alttaş boyunca homojenlik incelenmiştir. Bu tez kapsamında sadece alttaşın tam ortasından alınan sallantı eğrisi ölçümleri incelenmiştir.

4.1.1.1. $InAs_{1-x}Sb_x$

Şekil 4.1'de büyütülen pin InAsSb'ye ait (004) sallantı eğrisi görülmektedir.

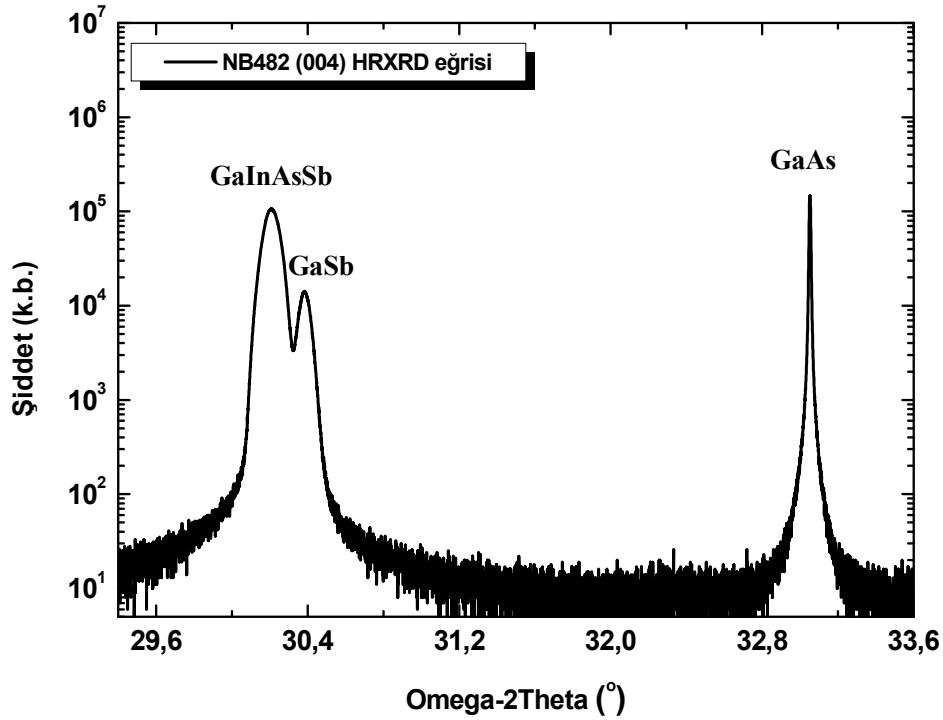


Şekil 4.1. $InAsSb$ pin fotodetektör yapısına ait (004) RC eğrisi

Şekil 4.1’de bulunan kırınımlara ait tepe noktaları InAsSb için 30,19°, GaSb için 30,38° ve GaAs için 33,05°’dir. GaSb katmanının teorik tepe değeri olan 30,39° ile ölçülen değerin birbirine çok yakın olması, katmanın %100 rahatlama ile büyüdüğünü göstermektedir. FWHM değerleri InAsSb için 200 arcsec, GaSb için ise 213 arcsec bulunmuştur. Büyütülen $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ için x konsantrasyonu, (004) sallantı eğrisi kullanılarak yaklaşık 0,17 olarak bulunmuştur. InAsSb katmanının GaAs alttaş ile arasındaki örgü uyumsuzluğu Denklem 3.1’e göre %7,8 olarak hesaplanmıştır.

4.1.1.2. $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$

Şekil 4.2’de büyütülen pin GaInAsSb’ye ait (004) sallantı eğrisi görülmektedir.



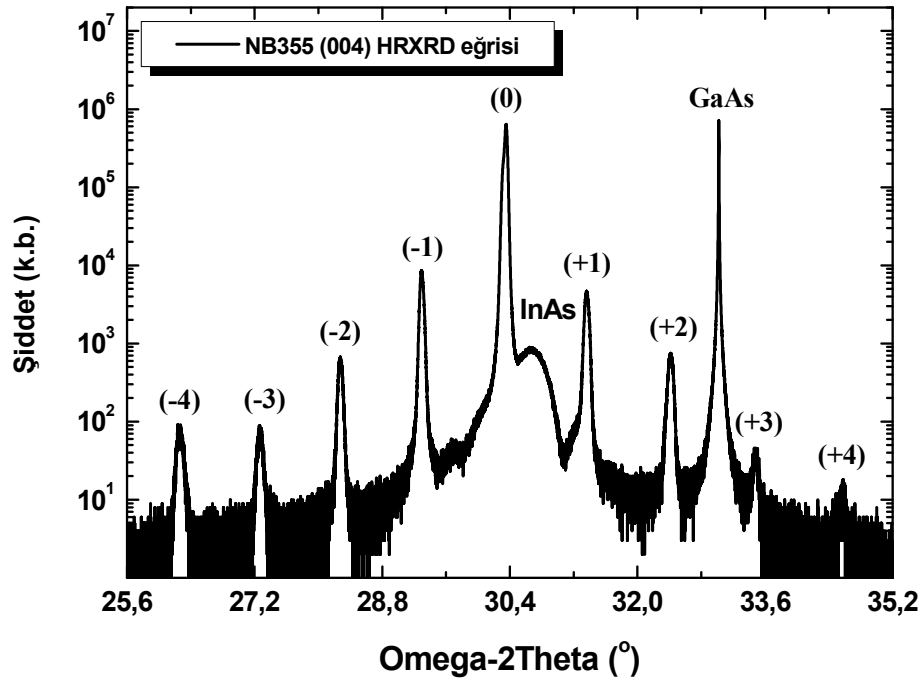
Şekil 4.2. GaInAsSb pin fotodedektör yapısına ait (004) RC eğrisi

Şekil 4.2’de bulunan kırınımlara ait tepe noktaları GaInAsSb için 30,21°, GaSb için 30,38° ve GaAs için 33,05°’dir. GaSb katmanının teorik tepe değeri olan 30,39° ile ölçülen değerin birbirine çok yakın olması katmanın %100 rahatlama ile büyüdüğünü göstermektedir. FWHM değerleri GaInAsSb için 308 arcsec, GaSb için ise 211 arcsec

bulunmuştur. Büyütülen $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ için x konsantrasyonu, (004) sallantı eğrisi kullanılarak yaklaşık 0,13, y konsantrasyonu ise yaklaşık 0,04 olarak bulunmuştur. GaInAsSb katmanının GaAs alttaş ile arasındaki örgü uyumsuzluğu Denklem 3.1'e göre %7,7 olarak hesaplanmıştır.

4.1.1.3. Tip II InAs/GaSb süperörgü

Şekil 4.3'te NB355 GaAs üzerine büyütülen pin Tip II InAs/GaSb süperörgüye ait (004) sallantı eğrisi görülmektedir.

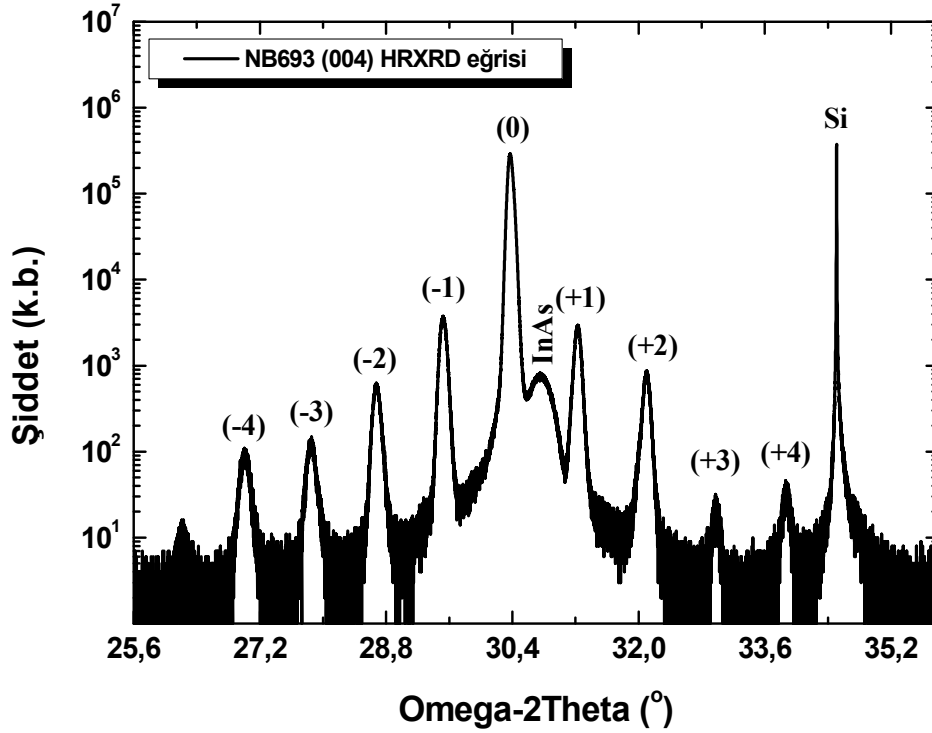


Şekil 4.3. GaAs üzerine pin tip II InAs/GaSb süperörgü fotodedektör yapısına ait (004) RC eğrisi

Şekil 4.3'te bulunan (-1), (+1) ile işaretlenmiş periyodik tepeler süperörgü katmanına ait saçakları göstermektedir. Simetrik olarak dağılan saçakların arasındaki açı farkından süperörgünün periyot kalınlığı bulunabilmektedir. Hesaplanan periyot kalınlığı 49,35 Å dur. Süperörgünün 0. tepesi 30,35° de bulunmaktadır. Süperörgünün 0. tepesi ile 30,38° de bulunan GaSb tepesi ile üst üste bindiği için ayrı bir tepe görülmemektedir. Bu da GaSb ile süperörgünün örgü uyumlu olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda bu tepe süperörgünün ortalama örgü parametresini de göstermektedir. Süperörgünün 0. tepesinin

FWHM değeri 137 arcsec olarak bulunmuştur. 0. tepenin sağ tarafındaki yayvan görünen tepe ise 20 nm InAs üst kontak katmanını göstermektedir. Süperörgü ile alttaş arasında Denklem 3.1'e göre hesaplanan örgü uyumsuzluğu %7,3 dür.

Şekil 4.4'te NB693 Si üzerine büyütülen pin tip II InAs/GaSb süperörgüye ait (004) sallantı eğrisi görülmektedir.

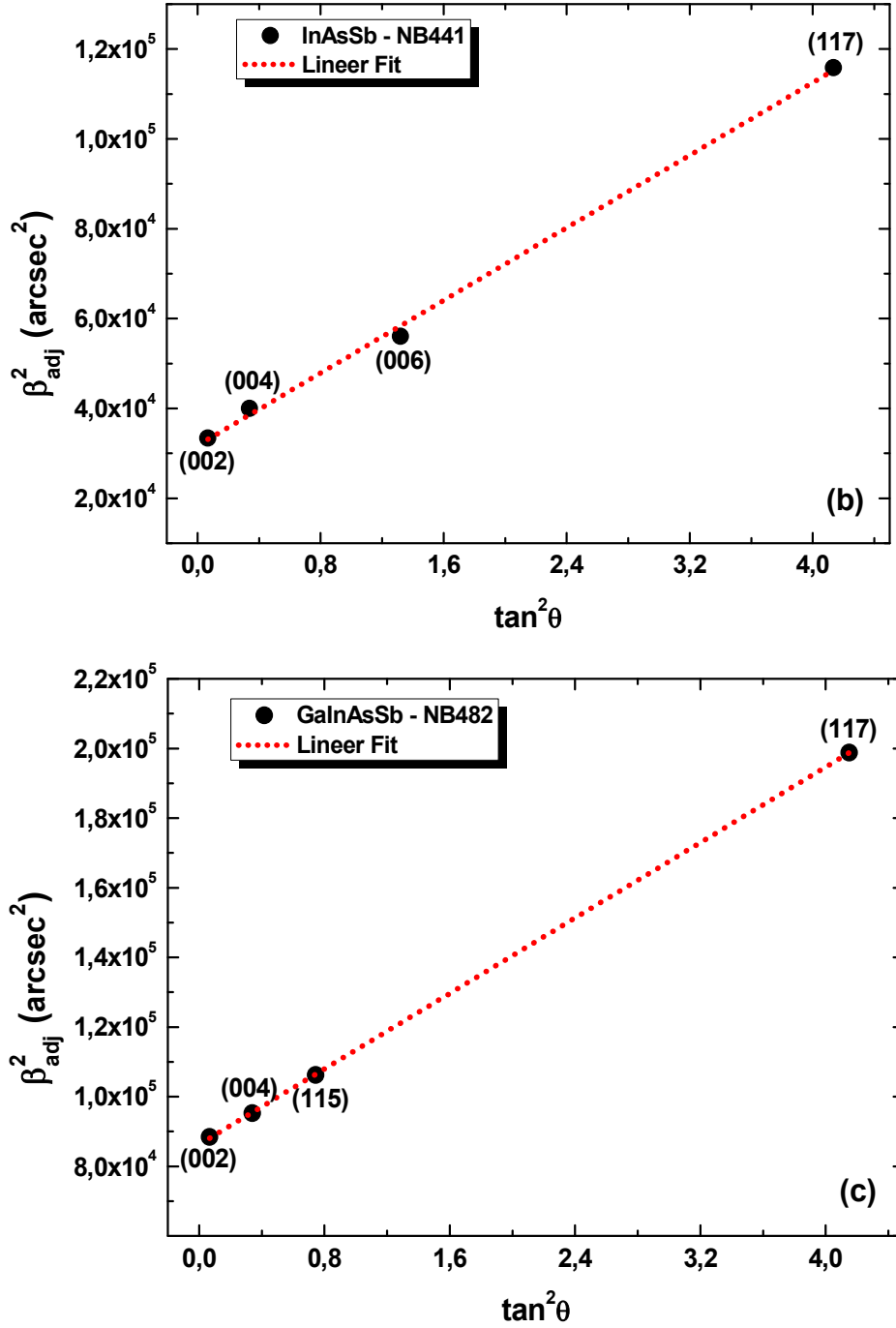


Şekil 4.4. Si üzerine pin tip II InAs/GaSb süperörgü fotodedektör yapısına ait (004) RC eğrisi

Süperörgü katmanın hesaplanan periyot kalınlığı 59,8 Å bulunmuştur. Süperörgünün 0. Tepesi 30,37° de bulunmaktadır. Süperörgünün, GaSb katman ile örgü uyumlu olarak büyütüldüğü Şekil 4.4'ten görülmektedir. Süperörgünün 0. Tepesinin FWHM değeri 253 arcsec olarak bulunmuştur. Süperörgü ile alttaş arasında Denklem 3.1'e göre hesaplanan örgü uyumsuzluğu %10,7 olarak bulunmuştur.

4.1.2. Kusur yoğunluğu ölçüm sonuçları

Dislokasyon yoğunluğunu belirlemek için külçe örneklerde simetrik ve asimetrik düzlemlerde yapılan sallantı eğrisi ölçümlerinde, kırınımlardan elde edilen FWHM değerinin karesine karşılık kırınım açılarının tanjantının kareleri çizdirilmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. (a) InAsSb ve (b) GaInAsSb için $\beta_{adj}^2 - \tan^2\theta$ grafikleri

Grafiklerden elde edilen sayısal veriler Tablo 4.1 ve 4.2’de, Denklem 3.3’e göre hesaplanmış kusur yoğunlukları da Tablo 4.3’te görülmektedir.

Tablo 4.1. *InAsSb (NB441) için Şekil 4.5a’de bulunan veriler*

$h\ k\ l$	$\theta(^{\circ})$	$\tan^2\theta$	$FWHM\ (arcsec)$	$FWHM^2\ (arcsec^2)$
0 0 2	14,5793	0,06765	182	33124
0 0 4	30,1961	0,33863	215	46225
0 0 6	48,9501	1,3187	236	55696
1 1 7	63,8126	4,13472	340	115600

Tablo 4.2. *GaInAsSb (NB482) için Şekil 4.5b’de bulunan veriler*

$h\ k\ l$	$\theta(^{\circ})$	$\tan^2\theta$	$FWHM\ (arcsec)$	$FWHM^2\ (arcsec^2)$
0 0 2	14,5916	0,06777	297	88209
0 0 4	30,2197	0,33928	308	94864
1 1 5	40,7705	0,74353	325	105625
1 1 7	63,8536	4,14969	445	198025

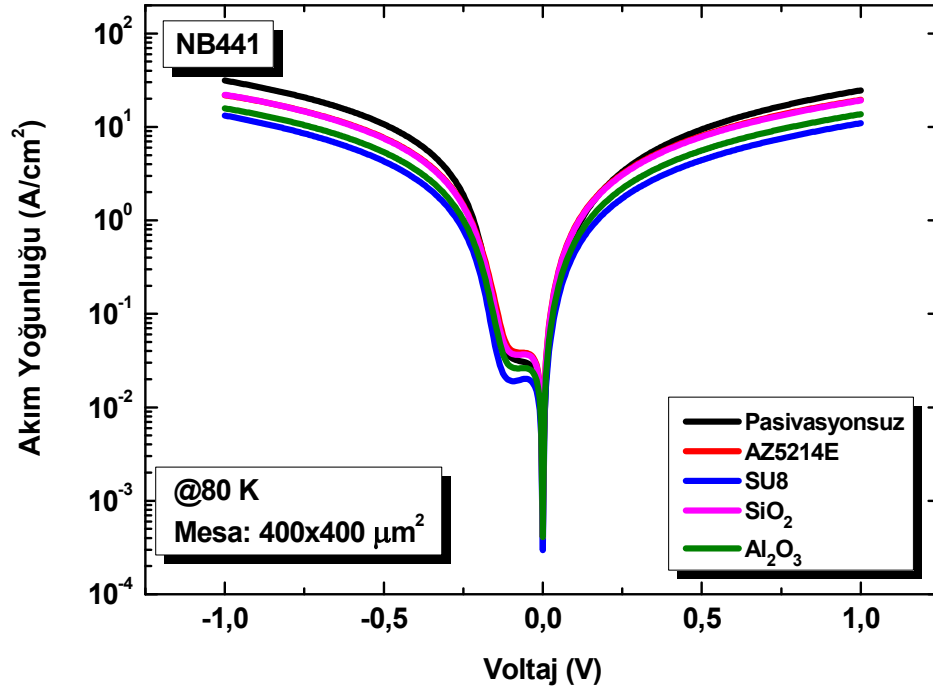
Tablo 4.3. *Denklem 3.3’e göre hesaplanan kusur yoğunlukları*

Örnek Kodu	Lineer Fit kesim noktası ($arcsec^2$)	Kusur yoğunluğu (cm^{-2})
InAsSb (NB441)	31735,26	$9,12 \times 10^7$
GaInAsSb (NB482)	86240,12	$2,48 \times 10^8$

4.2. Elektriksel Ölçüm Sonuçları

4.2.1. InAs_{1-x}Sb_x

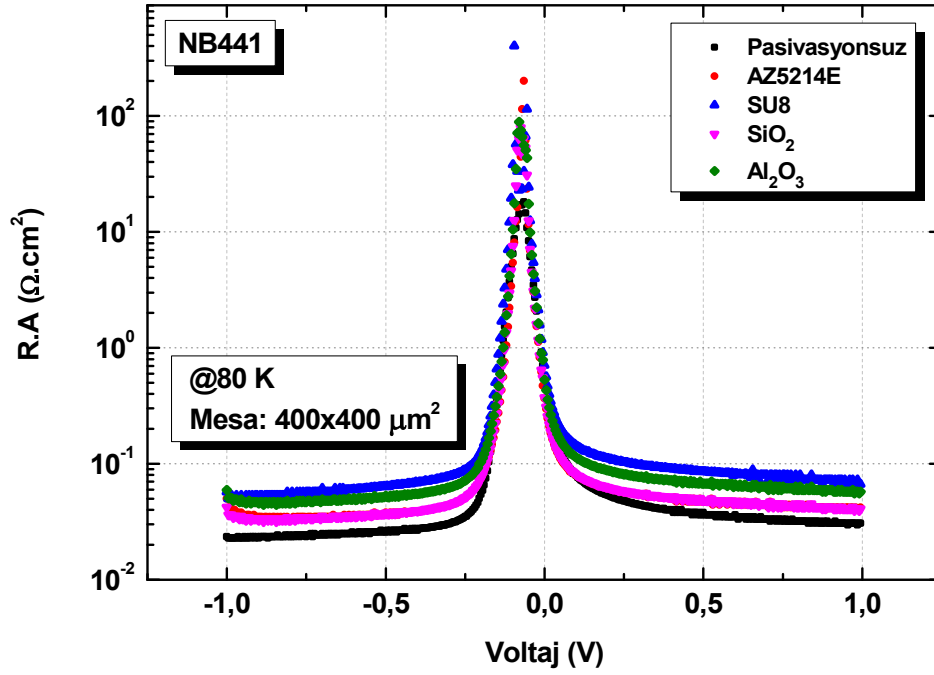
Pasivasyon işlemi uygulanmamış ve 4 farklı pasivasyon malzemesi uygulanan NB441 örneğine ait karanlık akım voltaj eğrileri Şekil 4.6’da görülmektedir.



Şekil 4.6. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 80 K sıcaklıkta NB441 örneğine ait Akım Yoğunluğu – Voltaj eğrisi

NB441 örneğine uygulanan pasivasyon işlemi sonucunda Şekil 4.6’da görülebileceği gibi akım yoğunluğu değerlerinde kayda değer bir iyileşme olmamıştır. Yüksek kusur yoğunluğundan dolayı yüzey kaçak akımları baskılanmasına rağmen yapı içerisindeki baskın akım mekanizmaları sebebiyle pasivasyon istenilen kadar etkili olmamıştır.

Şekil 4.6’dan elde edilen diferansiyel direnç, alan çarpımı voltaj grafiği Denklem 3.7’ye göre hesaplanmış ve Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 80 K sıcaklıkta NB441 örneğine ait Direnç x Alan – Voltaj eğrisi

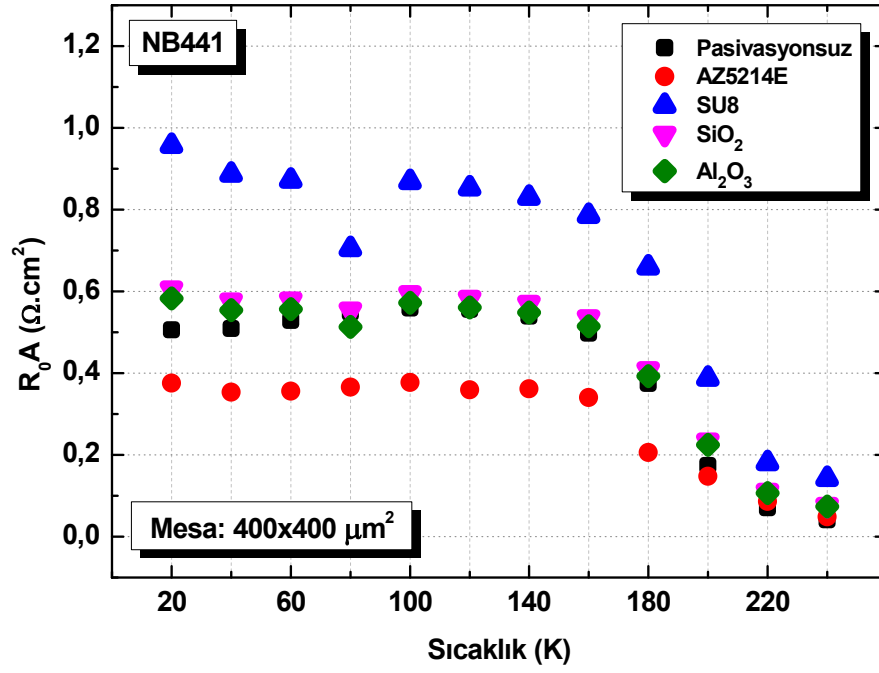
Şekil 4.7’de görülen diferansiyel direnç, alan çarpımı grafiğinde akım yoğunluğu voltaj grafiğindeki durum devam etmektedir. Önemli bir iyileşme sağlanamayan NB441 örneğinde pasivasyonun etkisi, yüzey kaçak akımları bastırılmasına rağmen, yapı içerisindeki baskın akım mekanizmasının yanında etkisiz kalmıştır.

Şekil 4.6 ve 4.7’den elde edilen önemli veriler Tablo 4.4’te sunulmuştur.

Tablo 4.4. InAsSb (NB441) için Şekil 4.6 ve 4.7’den 80 K sıcaklıktaki önemli veriler

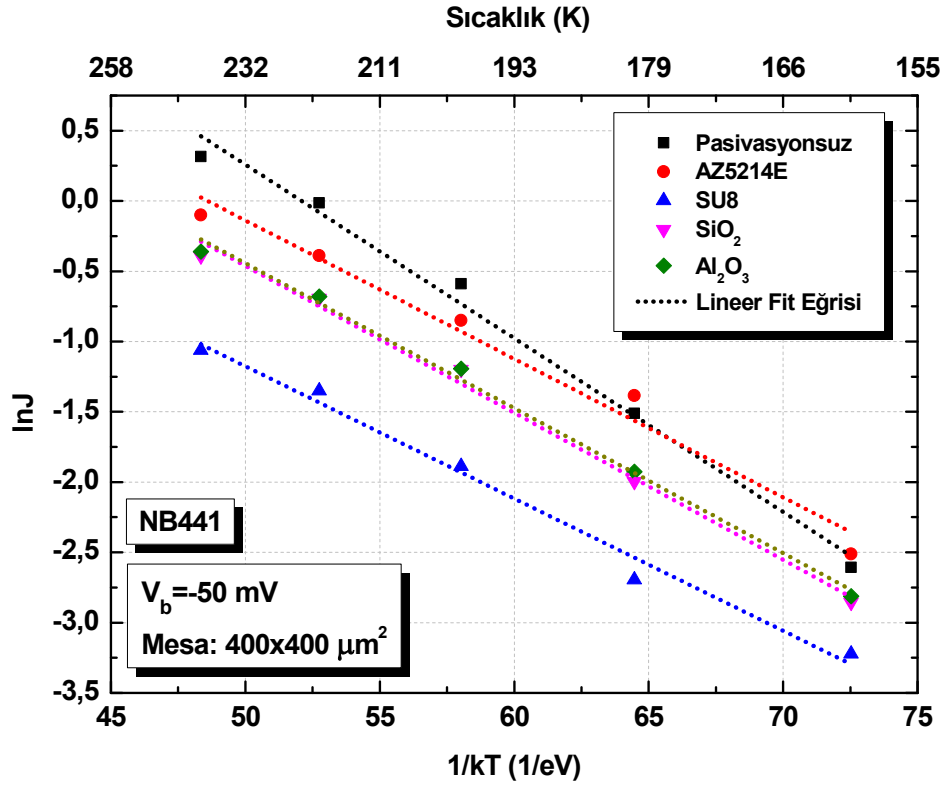
Pasivasyon Türü	En Düşük Karanlık Akım Yoğunluğu (A/cm²)	R ₀ A (Ω.cm²)	-100 mV’deki R.A değeri (Ω.cm²)
Pasivasyonsuz	1,6x10 ⁻³	0,54	6,5
AZ5214E	8,3x10 ⁻⁴	0,36	5,4
SU8	2,9x10 ⁻⁴	0,71	38,1
SiO ₂	4,13x10 ⁻⁴	0,37	7,5
Al ₂ O ₃	4,09x10 ⁻⁴	0,52	10,5

R₀A değerinin sıcaklık değişimi ile ilişkisi incelenmiş ve Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış NB441 örneklerine ait farklı sıcaklıklardaki R_0A değerleri

Şekil 4.8'den görülebileceği gibi, R_0A değerleri sıcaklık ile birlikte fazla değişmemektedir. 20 K gibi oldukça düşük sıcaklıklarda bile R_0A değerinin iyileşmemesi, yapı içerisinde yüksek sayıda kusur bulunduğunun bir göstergesidir.



Şekil 4.9. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış NB441 örneklerine ait Arrhenius Eğrileri

Farklı sıcaklıklarda yapılan akım voltaj ölçümleri ile Denklem 3.16'ya göre hesaplanan Şekil 4.9'daki Arrhenius Eğrilerinin eğiminden elde edilen aktivasyon enerjileri Tablo 4.5'te sunulmuştur.

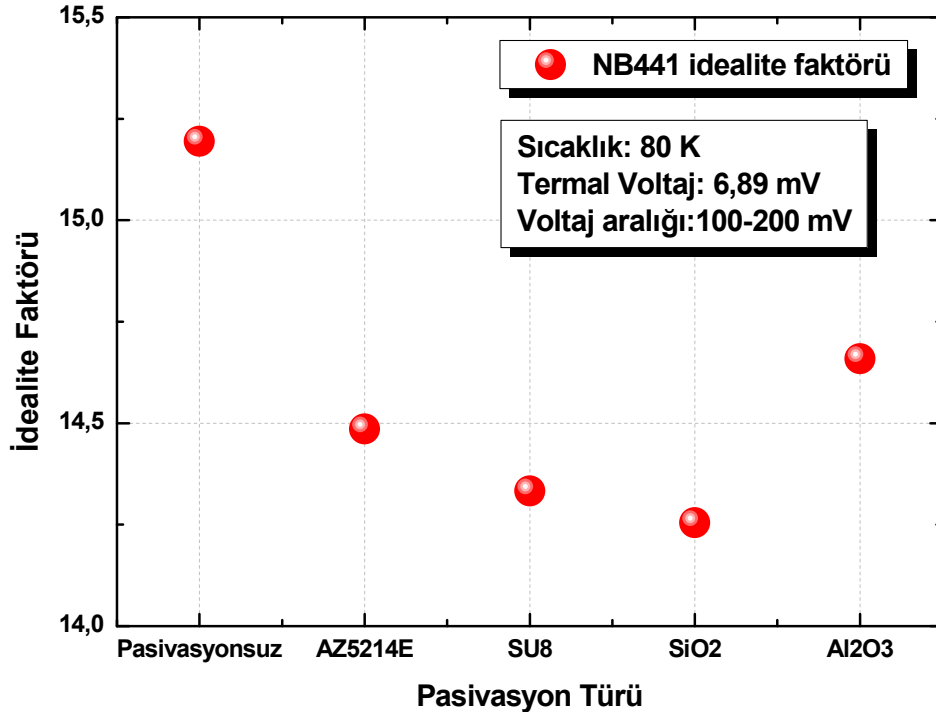
Tablo 4.5. InAsSb (NB441) için Şekil 4.9'un eğiminden elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri

Pasivasyon Türü	Aktivasyon Enerjisi (meV)
Pasivasyonsuz	123,5
AZ5214E	98,5
SU8	94,1
SiO ₂	104,5
Al ₂ O ₃	103,1

Tablo 4.5 incelendiğinde aktivasyon enerjisi, 80 K sıcaklıkta NB441 örneğinin spektral tepki grafiğinde (optiksel ölçümler bölümünde bulunabilir) %50 kesim dalgaboyu enerjisini olan 293 meV değerinin yarısına yakın bir değere denk geldiği

görülmektedir. Denklem 3.14'e göre yaratma-yeniden birleşme akımının yapıdaki baskın akım mekanizması olduğu göstermektedir.

Denklem 3.9'a göre hesaplanan idealite faktörü farklı pasivasyon uygulanmış NB441 örneği için Şekil 4.10'da görülmektedir.

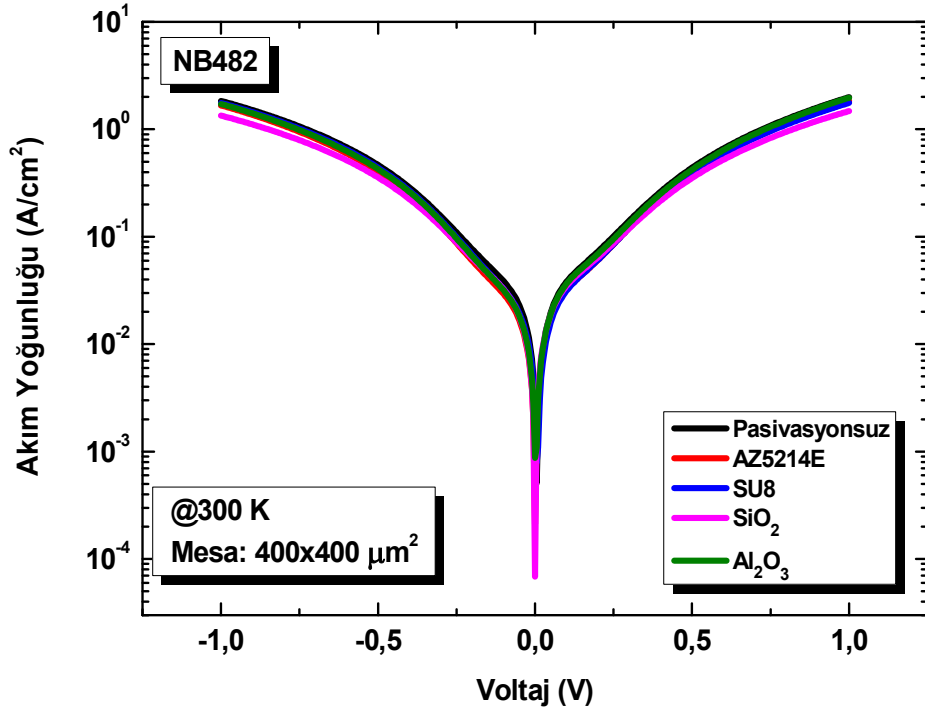


Şekil 4.10. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış NB441 örneklerine ait idealite faktörleri

NB441 örneğine uygulanan pasivasyon ile birlikte idealite faktörü değeri düşmektedir. Ancak oldukça yüksek değerler alan idealite faktöründe iyileşme yeterli miktarda değildir.

4.2.2. $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$

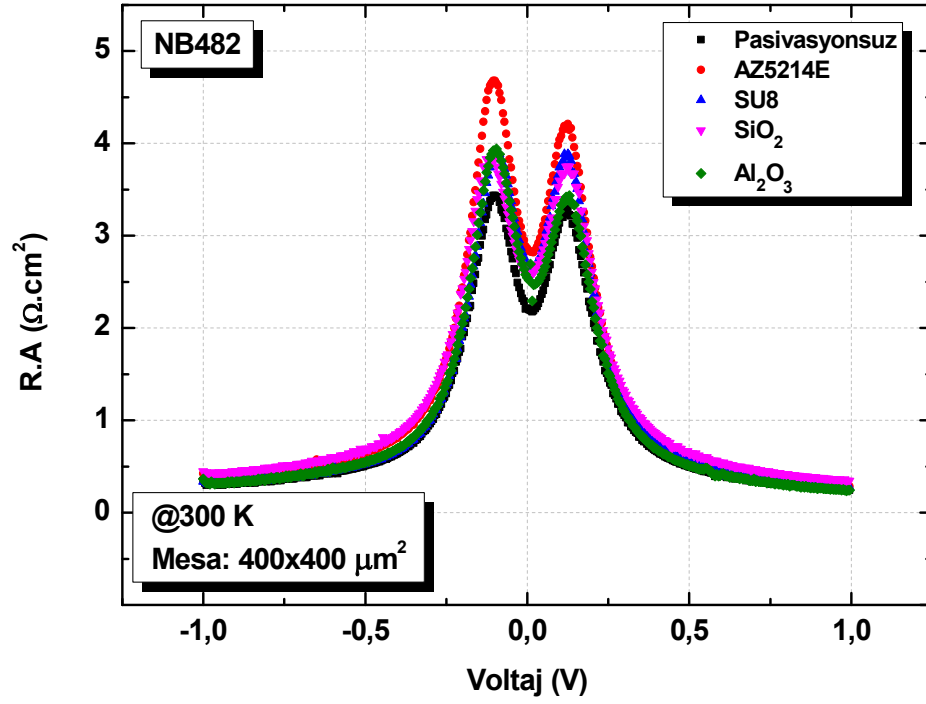
Pasivasyon işlemi uygulanmamış ve 4 farklı pasivasyon malzemesi uygulanan NB482 örneğine ait karanlık akım yoğunluğu voltaj eğrileri Şekil 4.11'de görülmektedir.



Şekil 4.11. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 300 K sıcaklıkta NB482 örneğine ait Akım Yoğunluğu – Voltaj eğrisi

Şekil 4.11’de pasivasyon uygulanmamış ve uygulanmış örneklerin neredeyse aynı karanlık akım yoğunluğuna sahip olduğu görülmektedir. Geri beslem uygulanmış mesalarda bir p-n eklemine oluşan bariyer, aygıt haline getirilmiş pasivasyonsuz ve pasivasyonlu örneklerin hiçbirinde görülmektedir. Bu örneklerde, yüksek kusur yoğunluğundan kaynaklı yaratma-yeniden birleşme akımının yapıda baskın olduğu söylenebilir. Ayrıca yüzey kaçak akımını bastırılsa dahi pasivasyon yapılmış örneklerde herhangi bir diyot karakteristiği görülmemektedir.

Denklem 3.7 kullanılarak, Şekil 4.11’den elde edilen diferansiyel direnç, alan çarpımı voltaj grafiği Şekil 4.12’de görülmektedir.



Şekil 4.12. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 300 K sıcaklıkta NB482 örneğine ait Direnç x Alan – Voltaj eğrisi

Şekil 4.12’de görülen -100 ve +100 mV beslem altında görülen tepe R.A değerleri, ileri ve geri beslemde simetrik iki bariyerin oluşması, aygıt üretiminde metal kontakların hem p hem n katkılı bölge için Schottky kontak oluşturması veya katkı işleminin tasarlandığı gibi yapılamadığını göstermektedir. Schottky kontak oluşması için kullanılan titanyumun iş fonksiyonunun, büyütülen n tipi GaInAsSb katmanının elektron ilgisinden büyük olması gerekmektedir (Denklem 4.1). $Ga_{1-x}In_xAs_{1-y}Sb_y$ katmanının GaSb ile örgü uyumlu olduğu durumda x konsantrasyonuna bağlı elektron ilgisi 4,87-0,81x olarak verilmektedir [14]. $x=0,13$ için $Ga_{0,87}In_{0,13}As_{0,04}Sb_{0,96}$ katmanının elektron ilgisi 4,76 eV olarak bulunmuştur. Bu durumda iş fonksiyonu 4,33 eV olan titanyum, NB482 örneği için Schottky kontak oluşturmayacaktır.

$$e\phi_b = e(\phi_m - \chi) \quad (4.1)$$

Burada e temel elektron yükü, ϕ_b Schottky bariyer yüksekliği, ϕ_m metalin iş fonksiyonu ve χ yarıiletkenin elektron ilgisidir.

GaInAsSb katmanlar Ga ve Sb oranı yüksek olduğu için p katkılı davranmaktadır [4]. Si katkı yapılan katkısız bölgede oluşan bir problemten dolayı aygıtların Şekil

4.12'deki davranışı sergilediği düşünülmektedir. Ayrıca Si, GaSb epikatmanlarda p katkı olarak kullanılmaktadır [15]. NB482 örneğinin elemental konsantrasyonları GaSb'ye çok yakın olduğu için Si katkı, NB482'ye p tipi katkı yapmış olduğu düşünülmektedir. Böylece büyütülen epikatmanların hepsi gradyan p katkı olarak büyütülmüş olabileceği düşünülmektedir.

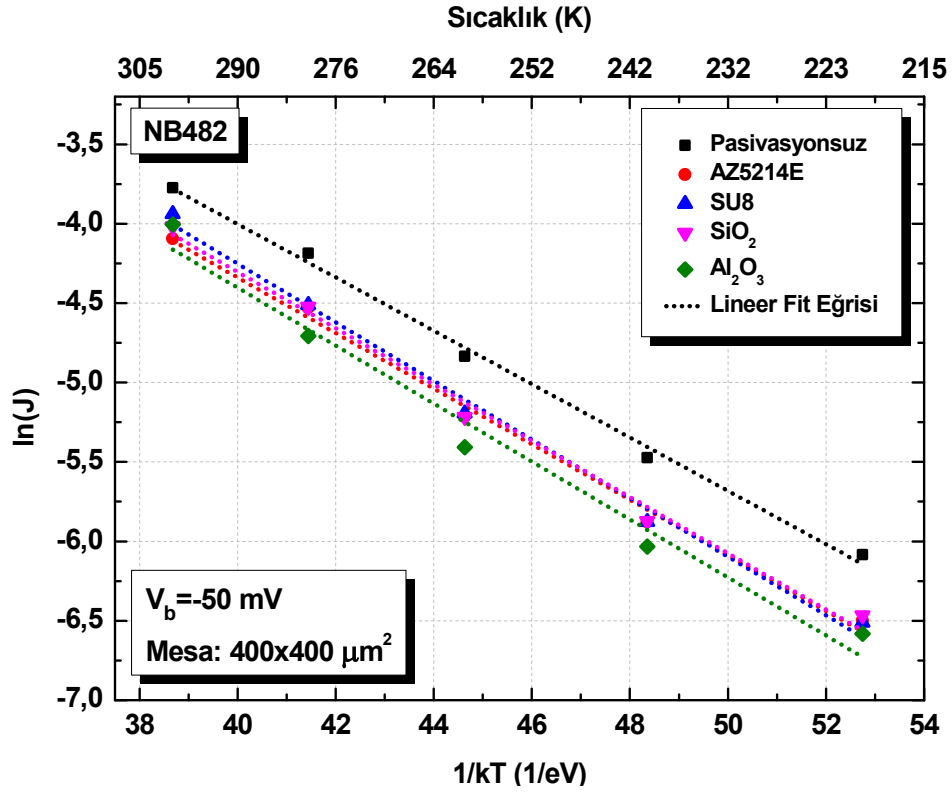
Şekil 4.12'de AZ5214E pasivasyonu yapılmış örneğin en yüksek R.A değeri verdiği görülmektedir. Ancak yüksek kusur yoğunluğu sebebi ile yüzey kaçak akımının bastırılması, yapı içerisindeki baskın yaratma-yeniden birleşme akımının yanında etkisi yok denecek kadar azdır.

Şekil 4.11 ve 4.12'den elde edilen önemli parametreler Tablo 4.6'de sunulmuştur.

Tablo 4.6. *GaInAsSb (NB482) için Şekil 4.11 ve 4.12'deki 300 K sıcaklıktaki önemli veriler*

Pasivasyon Türü	En Düşük Karanlık Akım Yoğunluğu (A/cm ²)	R ₀ A (Ω.cm ²)	-100 mV'daki R.A değeri (Ω.cm ²)
Pasivasyonsuz	5,1x10 ⁻⁴	2,21	3,43
AZ5214E	2,1x10 ⁻⁴	2,86	4,67
SU8	7,9x10 ⁻⁴	2,68	3,88
SiO ₂	6,8x10 ⁻⁵	2,59	3,82
Al ₂ O ₃	8,7x10 ⁻⁴	2,54	3,92

Şekil 4.13'de sıcaklık bağımlı yapılan karanlık akım yoğunluğu voltaj ölçümleri ile oluşturulmuş NB482 örneklerine ait Arrhenius Eğrisi görülmektedir.



Şekil 4.13. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış NB482 örneklerine ait Arrhenius Eğrileri

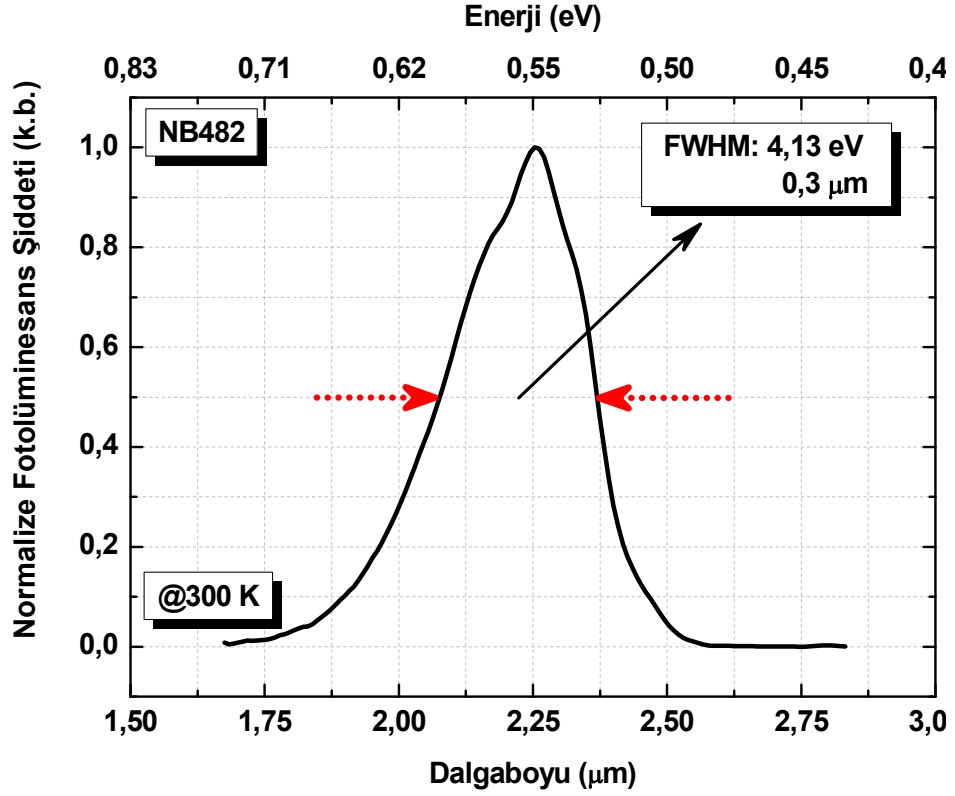
Farklı sıcaklıklarda yapılan akım voltaj ölçümleri ile Denklem 3.16'ya göre hesaplanan Şekil 4.13'teki Arrhenius Eğrilerinin eğiminden elde edilen aktivasyon enerjileri Tablo 4.7'de sunulmuştur.

Tablo 4.7. GaInAsSb (NB482) için Şekil 4.13'ün eğiminden elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri

Pasivasyon Türü	Aktivasyon Enerjisi (meV)
Pasivasyonsuz	168,1
AZ5214E	174,8
SU8	184,4
SiO ₂	177,1
Al ₂ O ₃	182,4

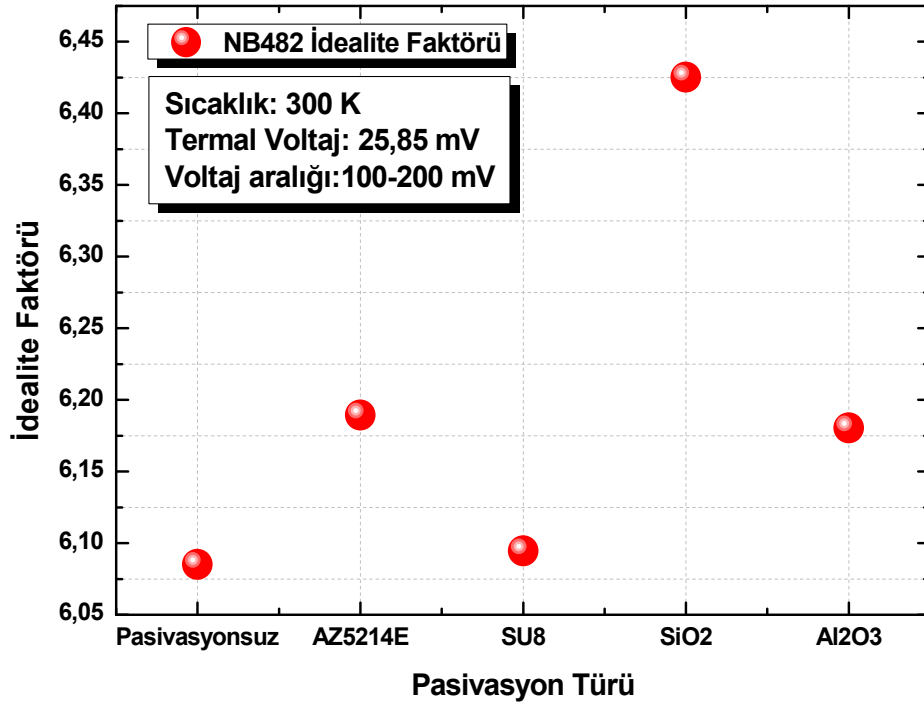
Tablo 4.7 incelendiğinde hesaplanan aktivasyon enerjilerinde pasivasyonsuz örneğe göre az da olsa iyileşme görülmektedir. 300 K'de fotoluminesans (PL) ölçümleri ile NB482 örneğinin yasak enerji aralığı 550 meV olarak bulunmuştur (Şekil 4.14). Bulunan aktivasyon enerjileri yasak enerji aralığının yaklaşık 1/3 üne denk gelmektedir.

Bu enerji seviyeleri safsızlık aktivasyon enerjilerine oldukça yakındır [17] ve yapıda bulunan yüksek kusur yoğunluğu ile ilişkilendirebilir. Şekil 4.14'teki 300 K'deki PL eğrisi oldukça geniş görülmektedir. Bu safsızlık seviyeleri PL eğrisinin de genişlemesine sebep olan etkenlerden biridir.



Şekil 4.14. 300 K sıcaklıktaki NB482 örneğinin Fotoluminesans eğrisi

100 – 200 mV arasında hesaplanan her bir NB482 pasivasyon örneklerine ait idealite faktörü Şekil 4.15'te görülmektedir.



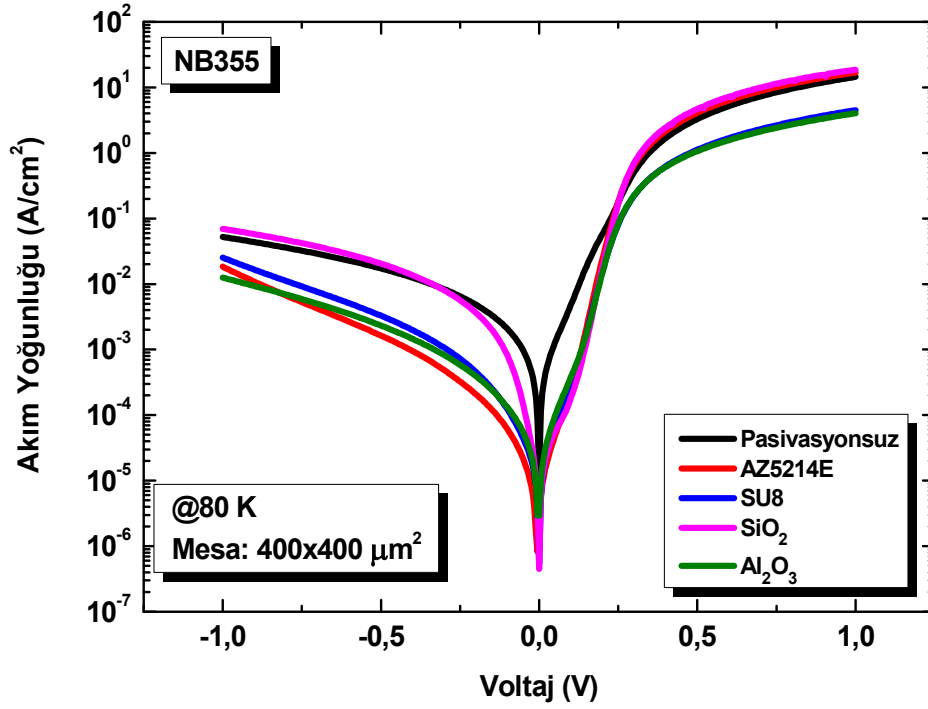
Şekil 4.15. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış NB482 örneklerine ait idealite faktörleri

Her bir NB482 örneği için hesaplanan idealite faktöründe pasivasyonun olumlu etkisi görülmemektedir.

4.2.3. Tip II InAs/GaSb süperörgü

NB355 (GaAs alttaşı üzerine)

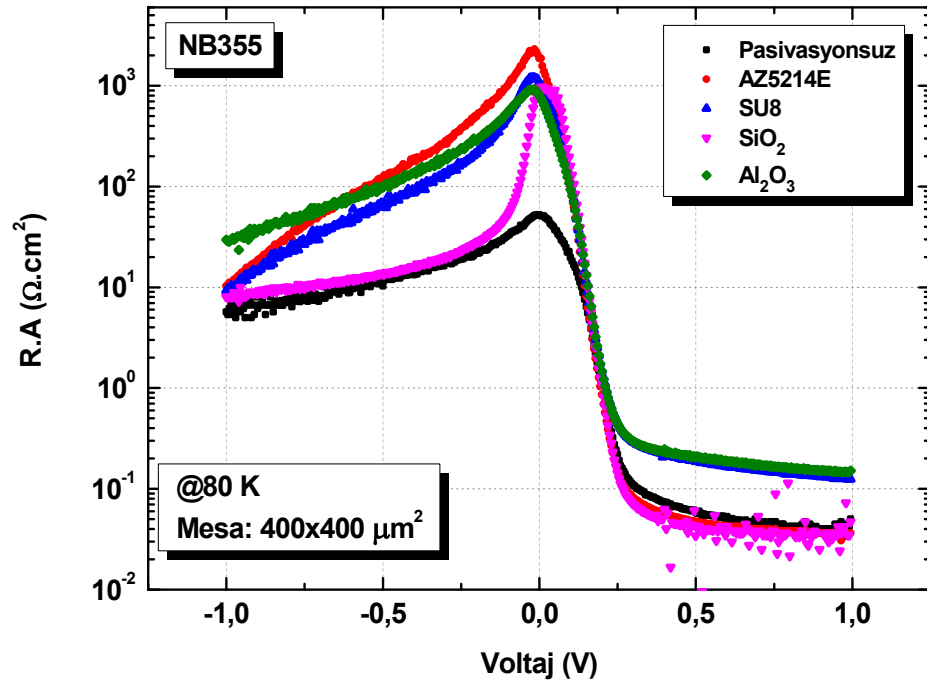
Pasivasyon işlemi uygulanmamış ve 4 farklı pasivasyon malzemesi uygulanan NB355 örneğine ait karanlık akım voltaj eğrileri Şekil 4.16'da görülmektedir.



Şekil 4.16. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 80 K sıcaklıkta NB355 örneğine ait Akım Yoğunluğu – Voltaj eğrisi

Şekil 4.16 incelendiğinde SiO₂ hariç diğer pasivasyon yapılmış örnekler geri beslem altında karanlık akımı 1,5 kat düşürerek iyileşme sağlamıştır. SiO₂ pasivasyonu yapılırken uygulanan plazma temizliğinin optimizasyonu yapılamadığı için, SiO₂ yüzeye kaplanırken oksit katmanının tamamıyla temizlenemediği düşünülmektedir. Ancak SiO₂ pasivasyonlu örnek V=0 altında en düşük karanlık akım yoğunluğuna sahiptir. Beslem uygulanmadığında en düşük karanlık akım yoğunluğu elde edildiğinden dolayı, SiO₂ yüksek dielektrik katsayısı ve yüksek yasak enerji aralığından dolayı mesa kenarlarında taşıyıcılar için bariyer etkisi göstermektedir.

Şekil 4.16'dan elde edilen diferansiyel direnç, alan çarpımı voltaj grafiği Şekil 4.17'de görülmektedir.



Şekil 4.17. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 80 K sıcaklıkta NB355 örneğine ait Direnç x Alan – Voltaj eğrisi

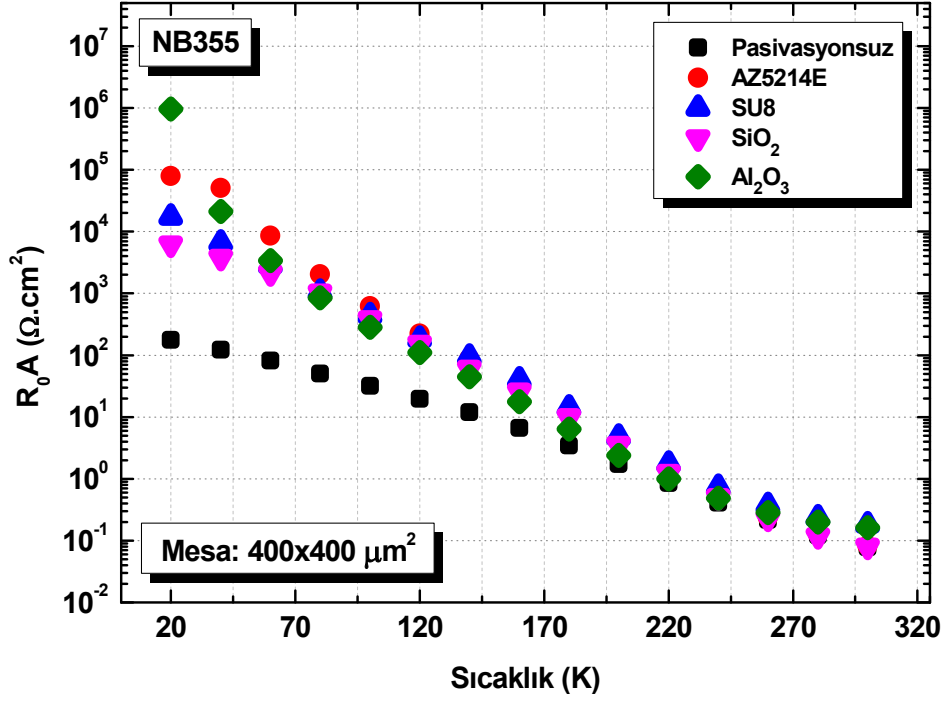
Şekil 4.16 ve 4.17’den elde edilen önemli parametreler Tablo 4.8’de sunulmuştur.

Tablo 4.8. Tip II InAs/GaSb süperörgü (NB355) için Şekil 4.16 ve 4.17’deki 80 K sıcaklıktaki önemli veriler

Pasivasyon Türü	En Düşük Karanlık Akım Yoğunluğu (A/cm²)	R ₀ A (Ω.cm²)
Pasivasyonsuz	1,30x10 ⁻⁵	52,25
AZ5214E	8,25x10 ⁻⁷	1867,84
SU8	5,45x10 ⁻⁷	1057,27
SiO ₂	4,48x10 ⁻⁷	928,82
Al ₂ O ₃	2,90x10 ⁻⁶	797,52

Tablo 4.8’den görülebileceği gibi NB355 örneğinin AZ5214E pasivasyonu en yüksek R₀A değerine sahiptir. Pasivasyonsuz haline göre karanlık akımda 634, R₀A değerinde ise 35 kat iyileşme göstermiştir. SU8’in yaygınla kullanılan bir pasivasyon malzemesi olduğu bilinmektedir [9]. Buna karşın en iyi iyileşme AZ5214E ile olmuştur. Bu sonuç ile birlikte elektriksel olarak AZ5214E, pasivasyon malzemesi olarak en az SU8 kadar iyi olabileceği görülmektedir.

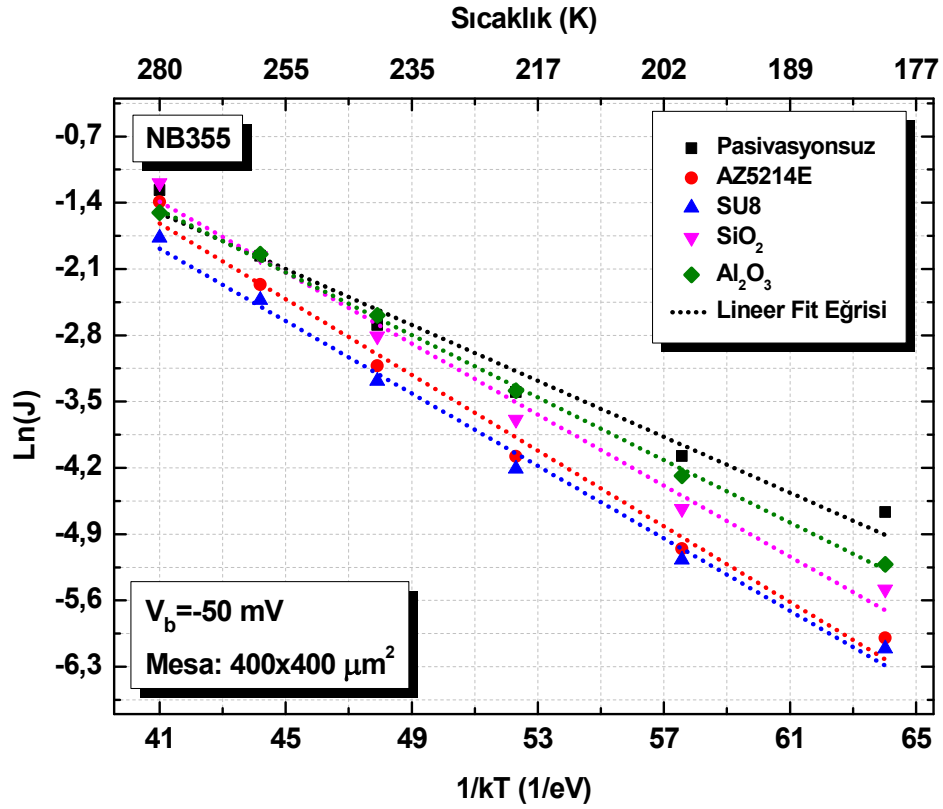
Şekil 4.18’de sıcaklık bağımlı R_0A değerinin değişimi görülmektedir.



Şekil 4.18. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış NB355 örneklerine ait farklı sıcaklıklardaki R_0A değerleri

Beklenildiği gibi düşük sıcaklıklardaki pasivasyonlu NB355 örneklerinin R_0A değerleri yüksek ve sıcaklık arttıkça yaratma-yeniden birleşme ve difüzyon akımı baskın akım mekanizması haline geldiği için tüm örneklerde R_0A sabit bir değere doğru eğilim göstermektedir.

Her bir NB355 örneği için hesaplanan aktivasyon enerjileri 180 – 280 K sıcaklık arasındaki Arrhenius Eğrileri ile Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış NB355 örneklerine ait Arrhenius Eğrileri

180 – 280 K arasında -50 mV beslem altındaki karanlık akım yoğunluğu kullanılarak oluşturulan Arrhenius Eğrisinde Denklem 3.16'ya göre hesaplanan aktivasyon enerjileri Tablo 4.9'da sunulmuştur.

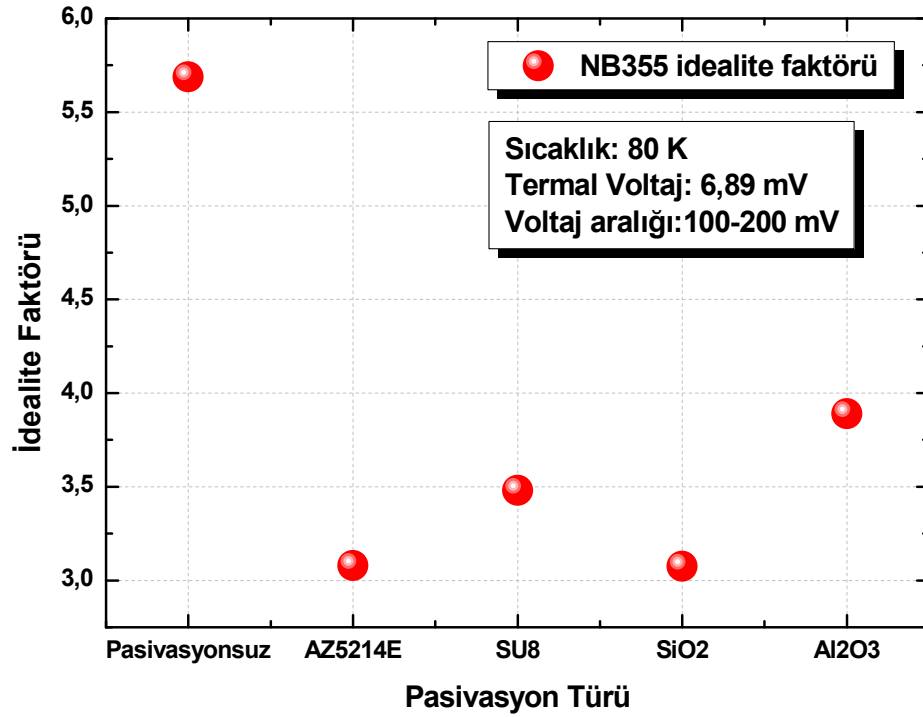
Tablo 4.9. Tip II InAs/GaSb süperörgü (NB355) için Şekil 4.19'un eğiminden elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri

Pasivasyon Türü	Aktivasyon Enerjisi (meV)
Pasivasyonsuz	147,6
AZ5214E	199,8
SU8	191,2
SiO ₂	187,4
Al ₂ O ₃	165,1

Tablo 4.9'da pasivasyonlu örneklerin aktivasyon enerjilerinde artış görülmektedir. 80 K sıcaklıkta NB355 örneğinin spektral tepki grafiğinde (optiksel ölçümler bölümünde bulunabilir) %50 kesim dalgaboyu enerjisi olan 328 meV değerinin yarısına yakın bir

değere denk geldiği görülmektedir. Bu da yapıda yaratma-yeniden birleşme akımının baskın mekanizma olduğunu göstermektedir. Pasivasyonla birlikte aktivasyon enerjisi artmış ve difüzyon akımına doğru yaklaşmakta olduğu görülmektedir.

100 – 200 mV arasında hesaplanan her bir NB355 pasivasyon örneklerine ait idealite faktörü Şekil 4.20’de görülmektedir.

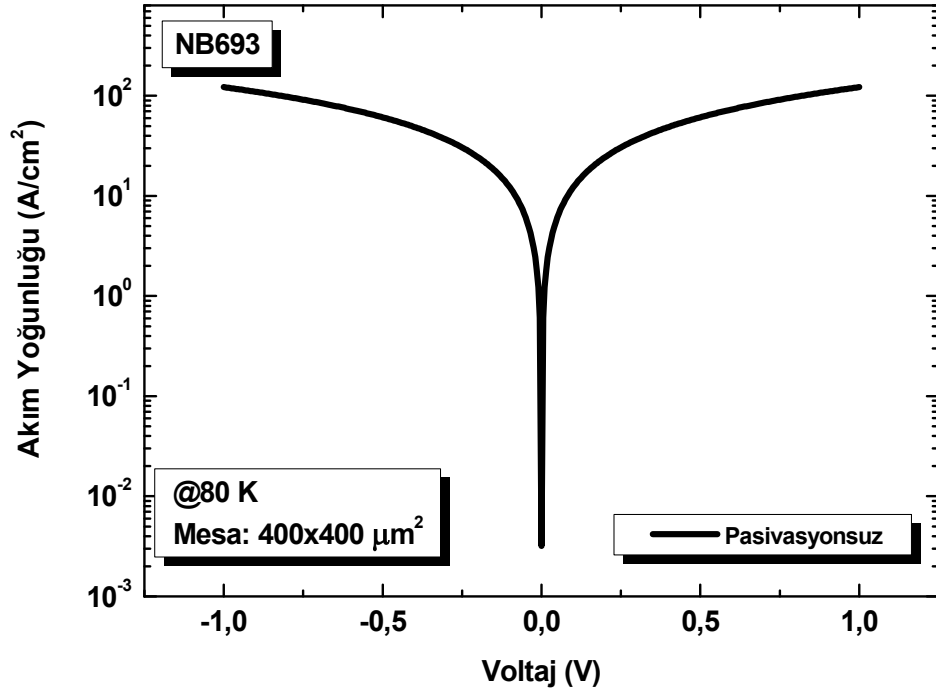


Şekil 4.20. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış NB355 örneklerine ait idealite faktörleri

NB355 pasivasyon yapılmış örneklerde idealite faktörü neredeyse yarı yarıya düştüğü görülmektedir.

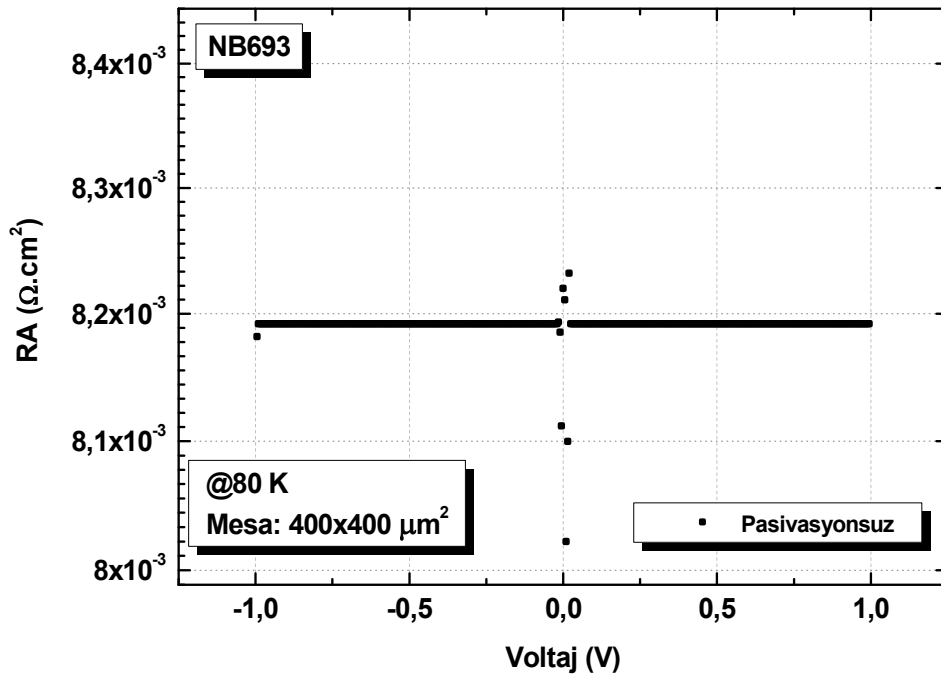
NB693 (Si alttaş üzerine)

NB693 örneğinin karanlık akım yoğunluğu voltaj grafiği Şekil 4.21’de görülmektedir.



Şekil 4.21. 80 K sıcaklıkta NB693 örneğine ait Akım Yoğunluğu – Voltaj eğrisi

Şekil 4.22’de NB693 örneğine ait diferansiyel direnç, alan çarpımı voltaj grafiği görülmektedir.



Şekil 4.22. 80 K sıcaklıkta NB693 örneğine ait Direnç x Alan – Voltaj eğrisi

Şekil 4.21 ve 4.22’den elde edilen veriler Tablo 4.10’da sunulmuştur.

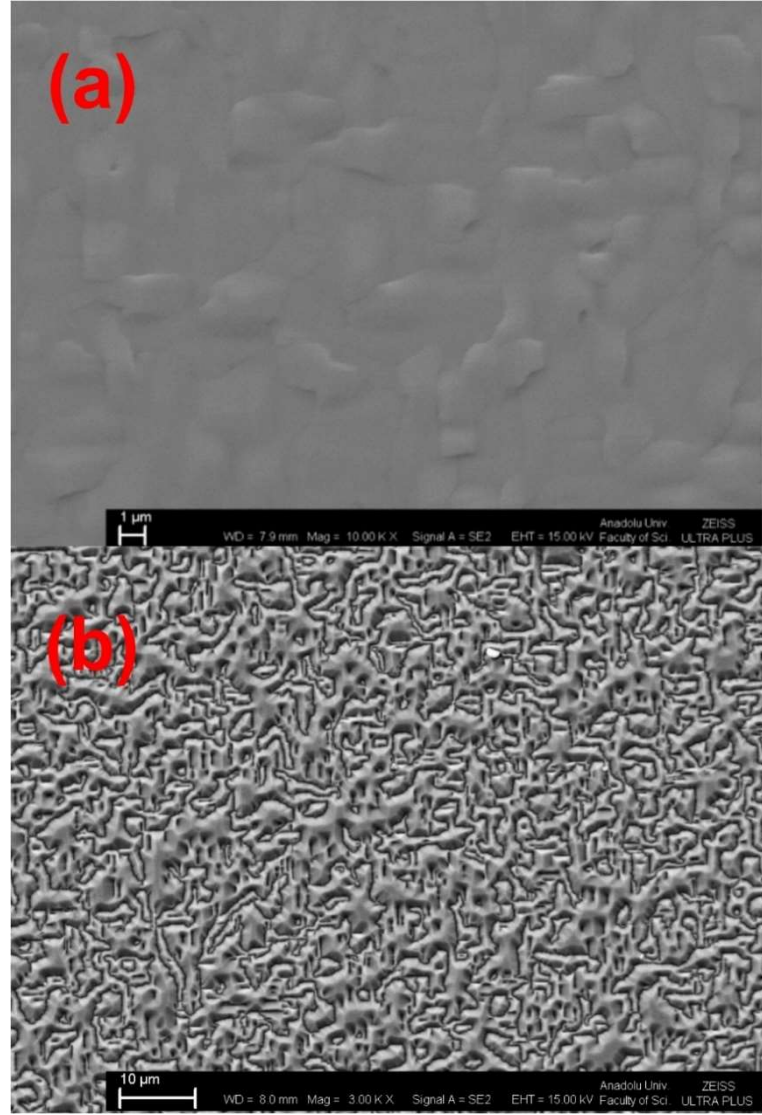
Tablo 4.10. *Tip II InAs/GaSb süperörgü (NB693) için Şekil 4.21 ve 4.22’deki 80 K sıcaklıktaki önemli veriler*

Pasivasyon Türü	En Düşük Karanlık Akım Yoğunluğu (A/cm ²)	R ₀ A (Ω.cm ²)
Pasivasyonsuz	3,2x10 ⁻³	8,2x10 ⁻³
AZ5214E	..	..
SU8	..	..
SiO ₂	..	..
Al ₂ O ₃	..	..

NB693 örneğine ait Şekil 4.21 ve 4.22’de görülen akım yoğunluğu-voltaj ve direnç, alan çarpımı-voltaj eğrileri incelendiğinde, örneğin bir diyot karakteristiği göstermediği anlaşılmıştır. Kreostat içerisinde örnek soğutuldukça direnç değişimi multimetre ile gözlemlenmiştir. Okunan direncin yükselmesi gerekirken direncin düştüğü gözlenmiştir. Bu davranış bir metal davranışdır ve okunan direncin kontak ve tel bağlantılarının direnci olduğu düşünülmektedir. Örnekteki bu davranış sebebiyle fabrikasyon aşamaları tekrarlanmıştır ve aynı durum tekrar gözlemlenmiştir. Örneğin elektriksel olarak diyot yerine direnç davranışı göstermesi sebebiyle pasivasyon uygulanmasına gerek olmadığına karar verilmiştir.

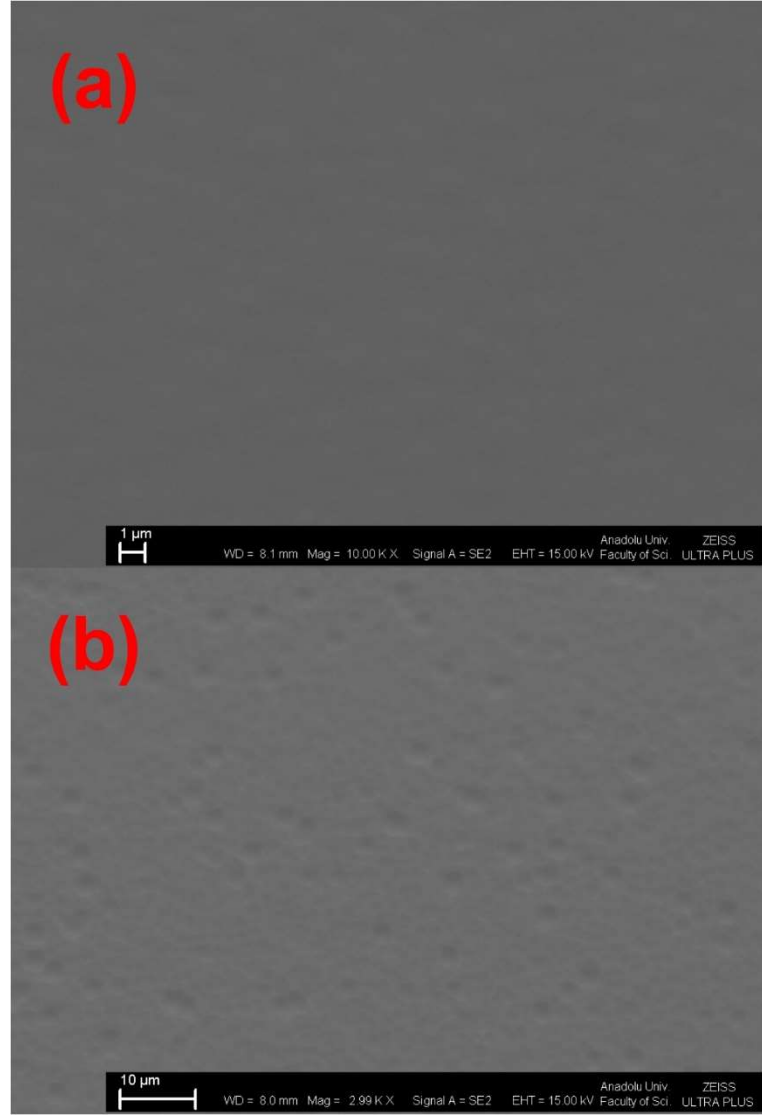
Si üzerine büyütülen tip II InAs/GaSb süperörgü örneğin her ne kadar GaSb geçiş katmanı kullanılsa da, yüksek kusur oranına sahip olduğu ve yüzeyinin pürüzlü olduğu düşünülmektedir. Bu sebeple *Aifer Çözeltisi* ile EPD çalışması yapılmıştır. Aifer çözeltisi HF:H₂O₂:H₃PO₄:H₂O (2:5:4,5:16,5:280) asitlerini içeren ve tip II InAs/GaSb süperörgülerde kusurları ortaya çıkartan bir çözeltidir. Örnekler çözeltiye sokulmadan önce tepede bulunan InAs şapka katmanı, mesa oluşturmak için kullanılan çözelti içinde 30 s tutularak kaldırılmıştır. Daha sonra 75 s Aifer Çözeltisi içerisinde tutulan örnekler yıkanıp kurutulduktan sonra SEM görüntüleri alınmıştır.

NB693 örneğine ait aşındırılan ve aşındırılmayan yüzeylerden elde edilen SEM görüntüleri Görsel 4.1’de görülmektedir.



Görsel 4.1. NB693 örneğinin, (a) büyütme sonrası, (b) Aifer Çözeltilisi ile aşındırma işlemi sonrası yüzeyi

Görsel 4.1a’da işlemsiz yüzey, 4.1b’de Aifer Çözeltilisi uygulandıktan sonra yüzey NB693’ün yüzeyi görülmektedir. İşlem görmemiş yüzeyde bile görülen kusur yoğunluğu oldukça fazladır. EPD işleminin sonunda yüzey tahribatı oldukça fazladır ve kusur yoğunluğu çok yüksektir. NB693 örneğinin elektriksel olarak diyot karakteristiği göstermemesinin sebebi çok yüksek kusur yoğunluğudur. Karşılaştırma yapabilmek için NB355 örneğine de Aifer Çözeltilisi ile EPD işlemi, NB693 ile aynı anda aynı basamaklar ile uygulanmıştır. Görsel 4.2’de NB355 örneğine ait SEM görüntüleri görülmektedir.



Görsel 4.2. NB355 örneğinin, (a) büyütme sonrası, (b) Aifer Çözeltisi ile aşındırma işlemi sonrası yüzeyi

Görsel 4.2a’da NB355 örneğine ait işlem görmemiş yüzey görülmektedir. NB355’in NB693’e yüzeyine göre oldukça pürüzsüz olduğu görülmektedir. Aifer Çözeltisi ile aşındırıldıktan sonra, NB355’in kusur yoğunluğu NB693’e oldukça az olduğu görülmektedir.

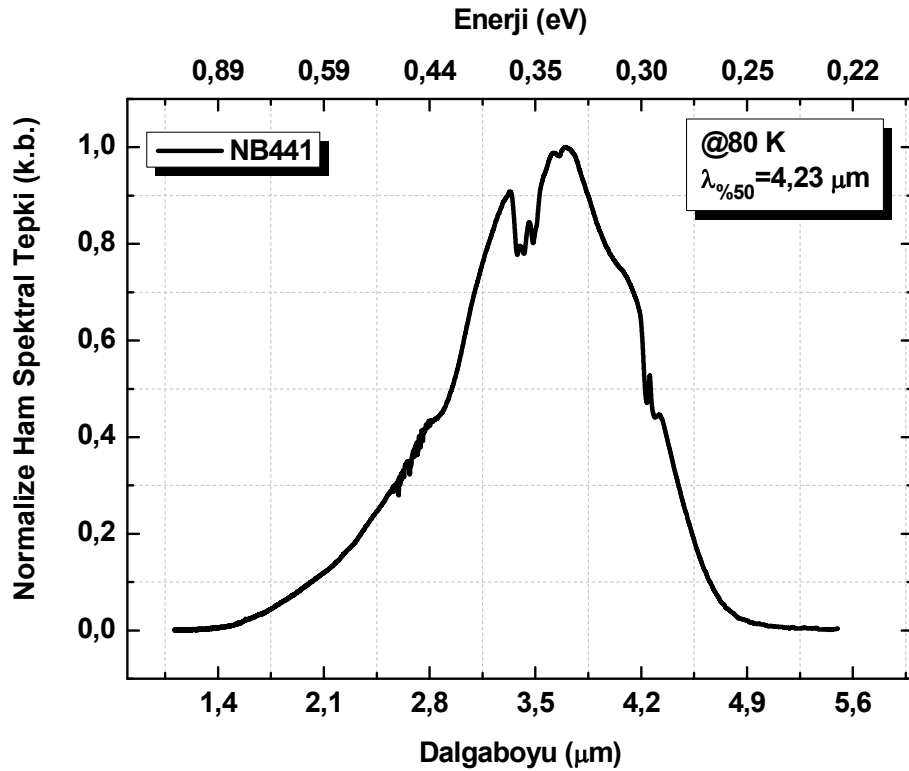
Elektriksel olarak diyot karakteristiği göstermeyen NB693’ün kusur yoğunluğunun azaltılması için iyileştirme çalışmaları yapılmalıdır.

4.3. Optiksel Ölçüm Sonuçları

Spektral tepki ölçüm sonuçları, üretilen fotodedektörlerde beklenildiği gibi pasivasyondan bağımsız, hep aynı spektral tepki grafiğini verdiği görülmüştür. Bu sebeple tüm fotodedektörlerin pasivasyon işlemi uygulanmamış örneklerin spektral tepkisi sunulmuştur.

4.3.1. InAs_{1-x}Sb_x

Şekil 4.23'te NB441 örneğine ait dalgaboyuna bağlı normalize ham spektral tepki grafiği görülmektedir.

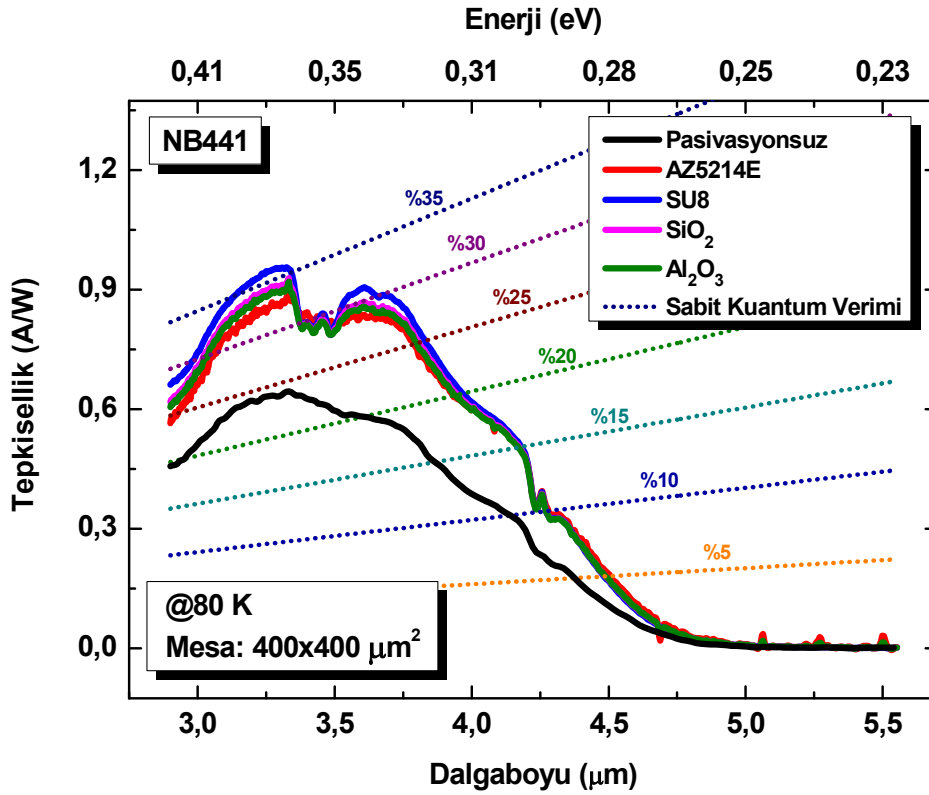


Şekil 4.23. 80 K sıcaklıktaki NB441 örneğine ait normalize ham spektral tepki eğrisi

Şekil 4.23'te NB441 örneğine ait 80 K sıcaklıktaki normalize ham spektral tepki grafiği görülmektedir. Normalize ham spektral tepkinin tepe noktasının %50'si kesim dalgaboyu (λ_{50%}) olarak adlandırılır ve o sıcaklıkta yaklaşık olarak yasak enerjisi aralığına

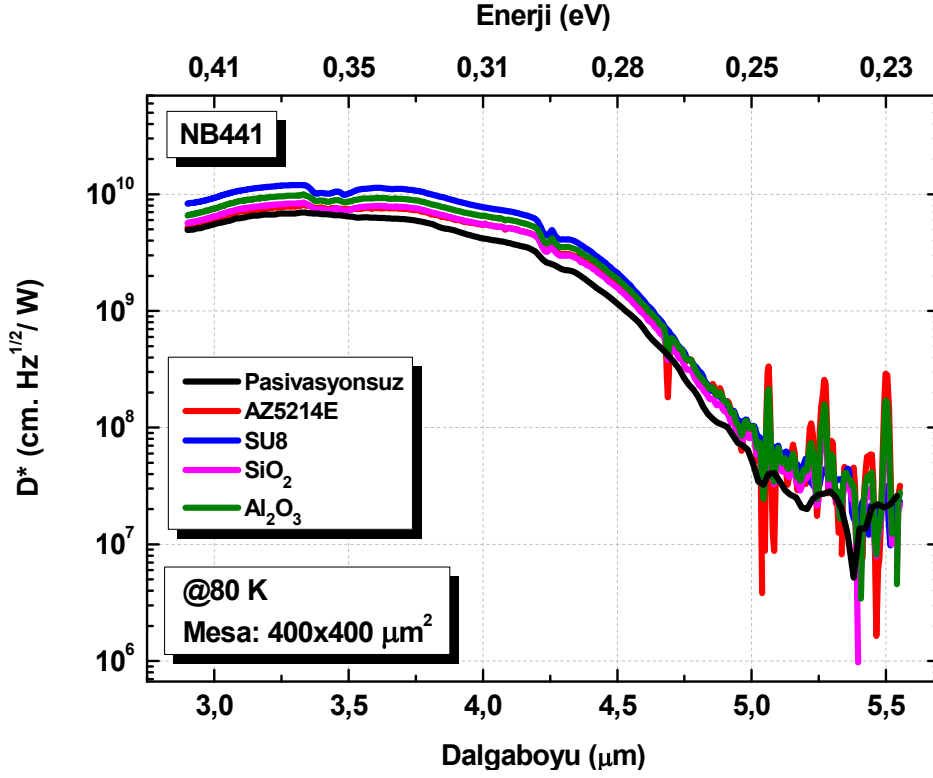
denk gelmektedir. 80 K sıcaklıkta NB441 örneği için %50 kesim dalgaboyu 4,23 μm (293 meV) olarak bulunmuştur.

Tepkisellik ölçümlerinde kullanılan spektral tepkiyi elde etmek için, spektral tepkisi dalgaboyundan bağımsız kabul edilen referans DLaTGS piroelektrik dedektöre oranlanarak bulunmuştur. Böylece optik yol ve ışık kaynağı gibi arkaplan etkileri ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 4.24. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 80 K sıcaklıktaki NB441 örneğine ait tepkisellik dalgaboyu eğrisi

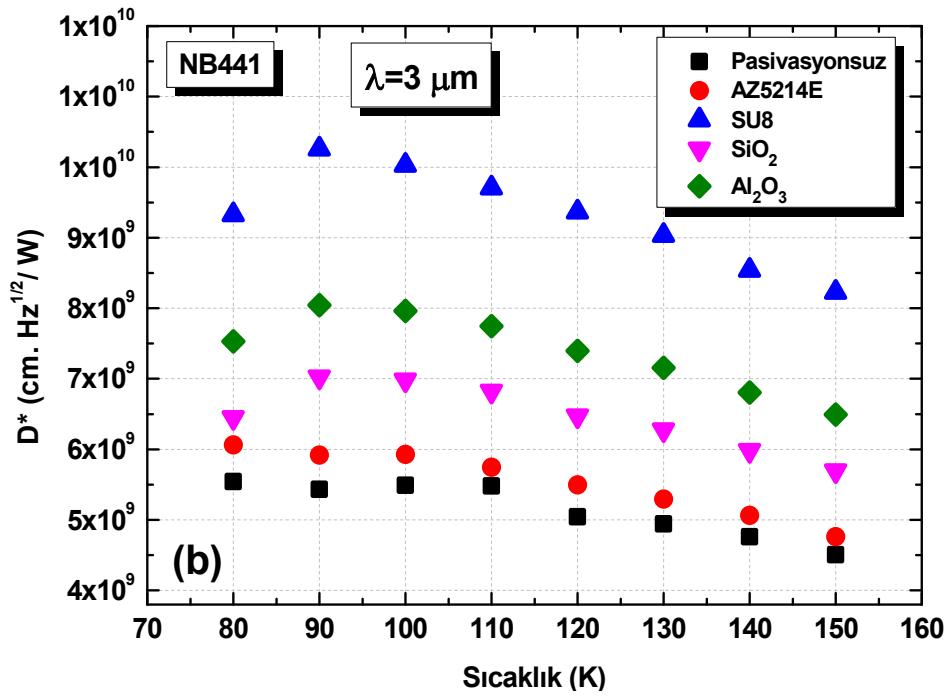
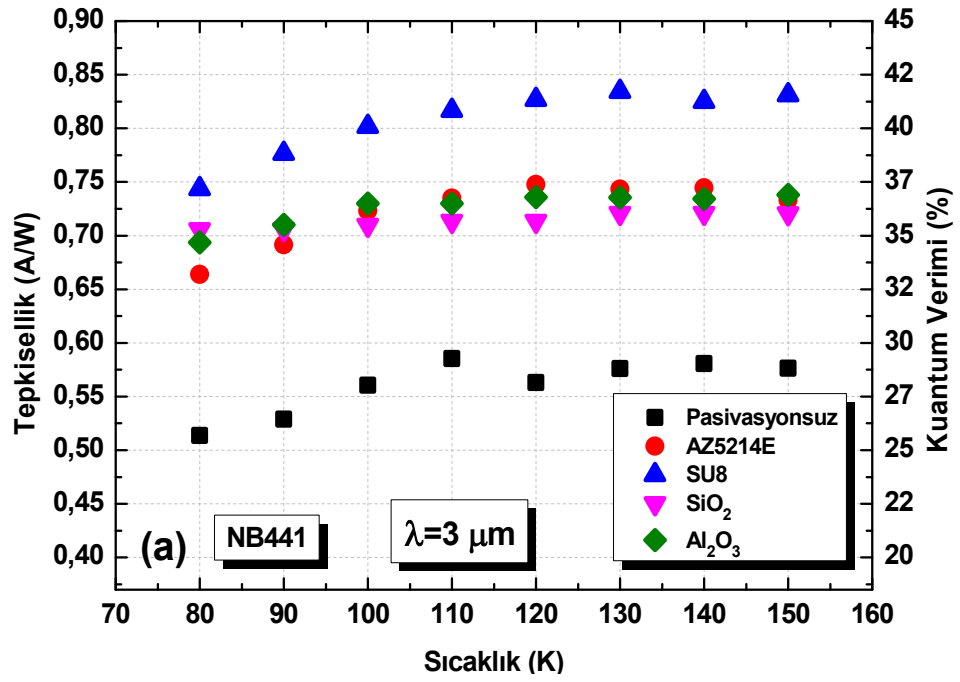
Şekil 4.24'te görülen kesikli çizgiler Denklem 3.22'ye göre hesaplanmış sabit kuantum verimi eğrileridir. Tepkisellik eğrisi ile sabit kuantum verimi eğrisinin kesiştiği noktalar o tepkisellik değerine ait kuantum verimini belirtmektedir.



Şekil 4.25. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 80 K sıcaklıktaki NB441 örneğine ait dedektivite dalgaboyu eğrisi

Şekil 4.25 incelendiğinde elektriksel ve optiksel özellikleri pasivasyon ile çok değişmeyen NB441 örneğinin dedektivite değerlerinin de yine birbirine çok yakın olduğu görülmektedir.

FPA gibi kamera yapılacak kızılötesi dedektörlerin önüne algılama yapacağı aralıkta optik filtreler yerleştirilmektedir. Bu sebeple 3 μm dalgaboyuna ait sıcaklık bağımlı tepkisellik ve D^* değerleri her bir NB441 örneği için incelenmiş ve Şekil 4.26a ve 4.26b’de sunulmuştur.

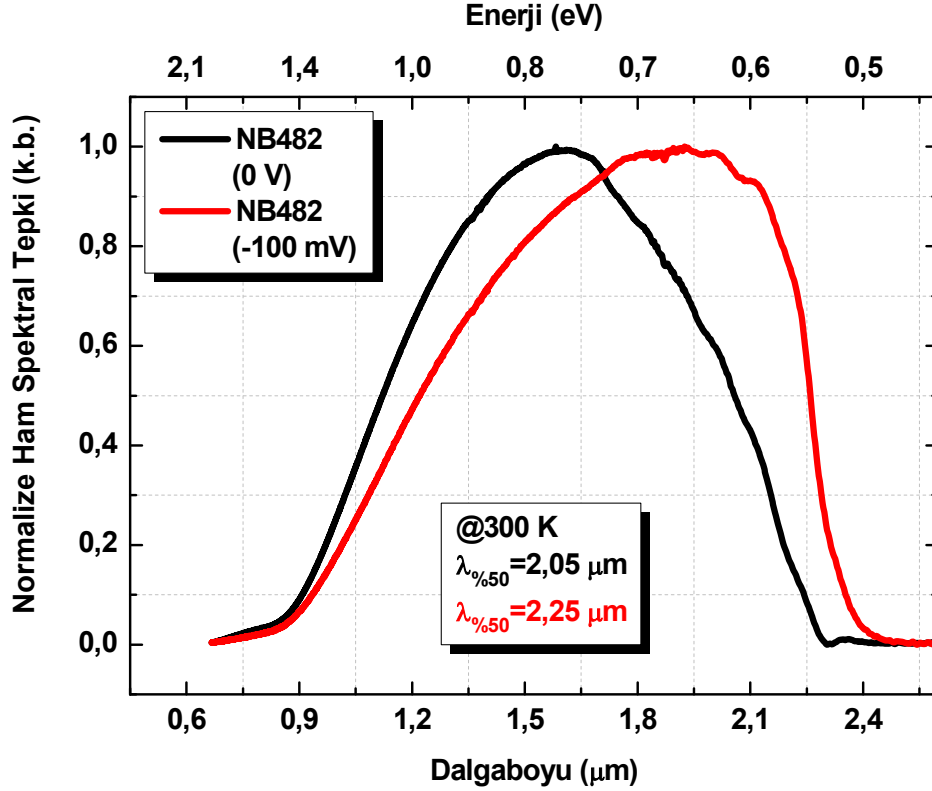


Şekil 4.26. NB441 örneğine ait $3 \mu\text{m}$ dalgaboyundaki (a) tepkiselilik ve (b) dedektivite sıcaklık grafiği

$3 \mu\text{m}$ 'deki tepkiselilik ve dedektivite değerlerinde SU8 pasivasyonu yapılmış NB441 örneğinin diğer örneklerle göre daha yüksek değerler aldığı görülmektedir.

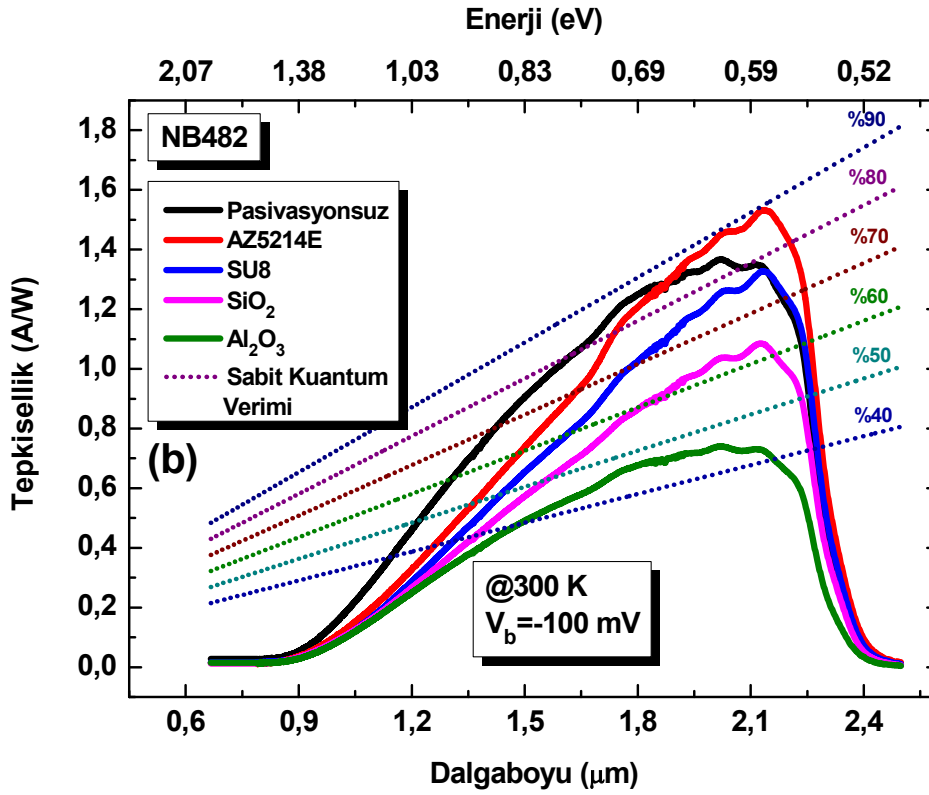
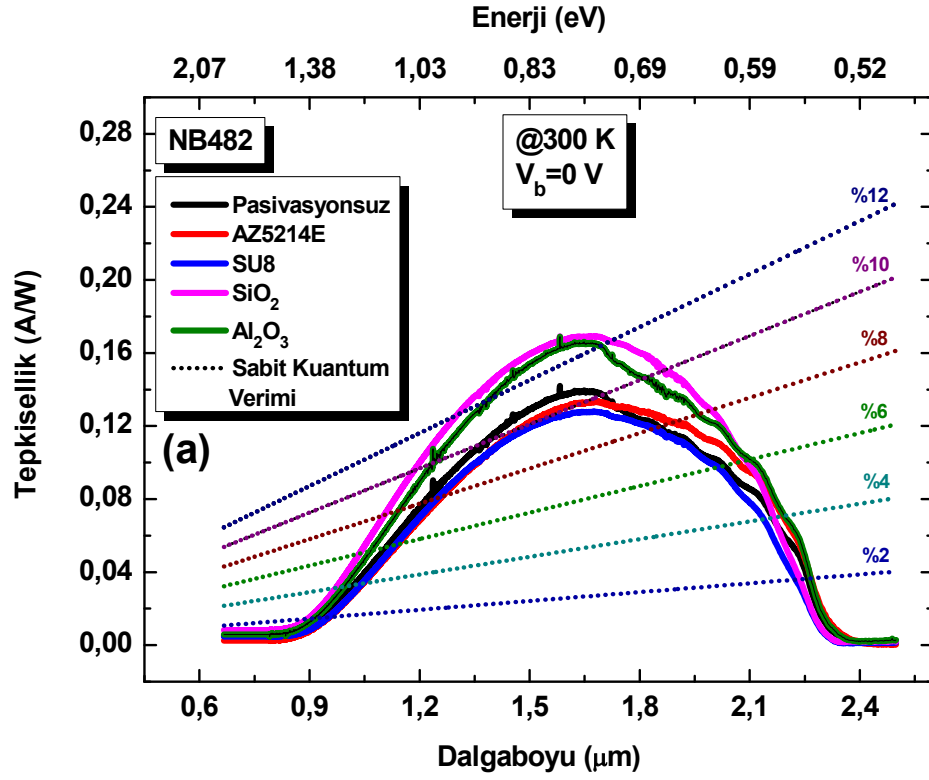
4.3.2. Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}

Şekil 4.27’de NB482 örneğine ait dalgaboyuna bağlı normalize ham spektral tepki grafiği görülmektedir.



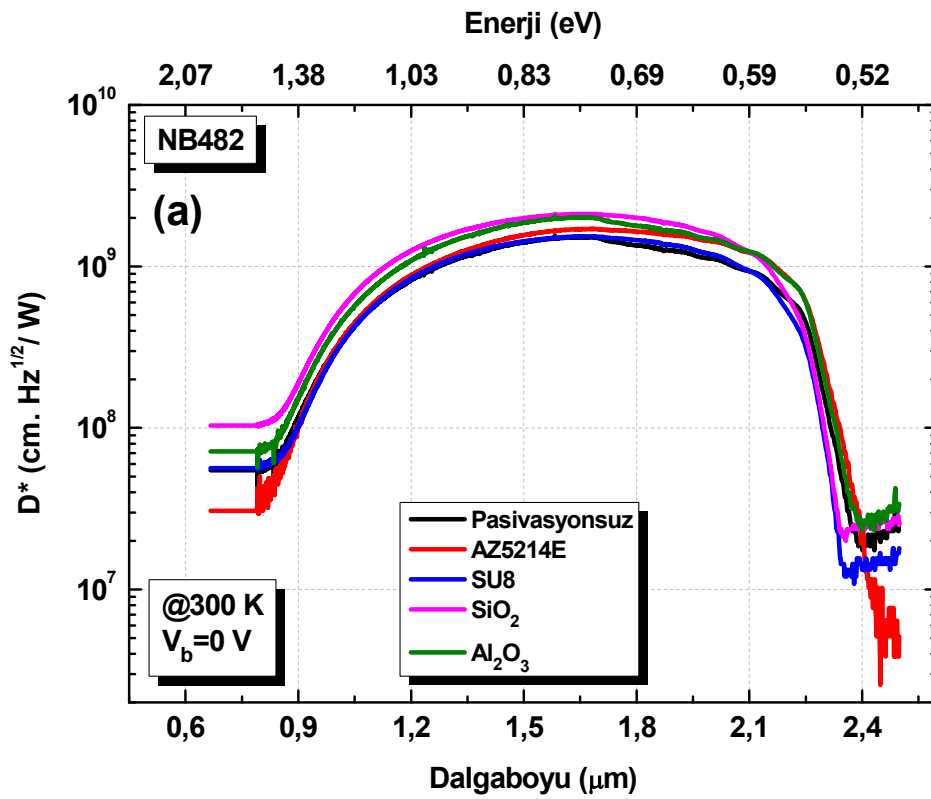
Şekil 4.27. 300 K sıcaklıktaki NB482 örneğine ait 0 V ve -100 mV beslem altındaki normalize ham spektral tepki eğrisi

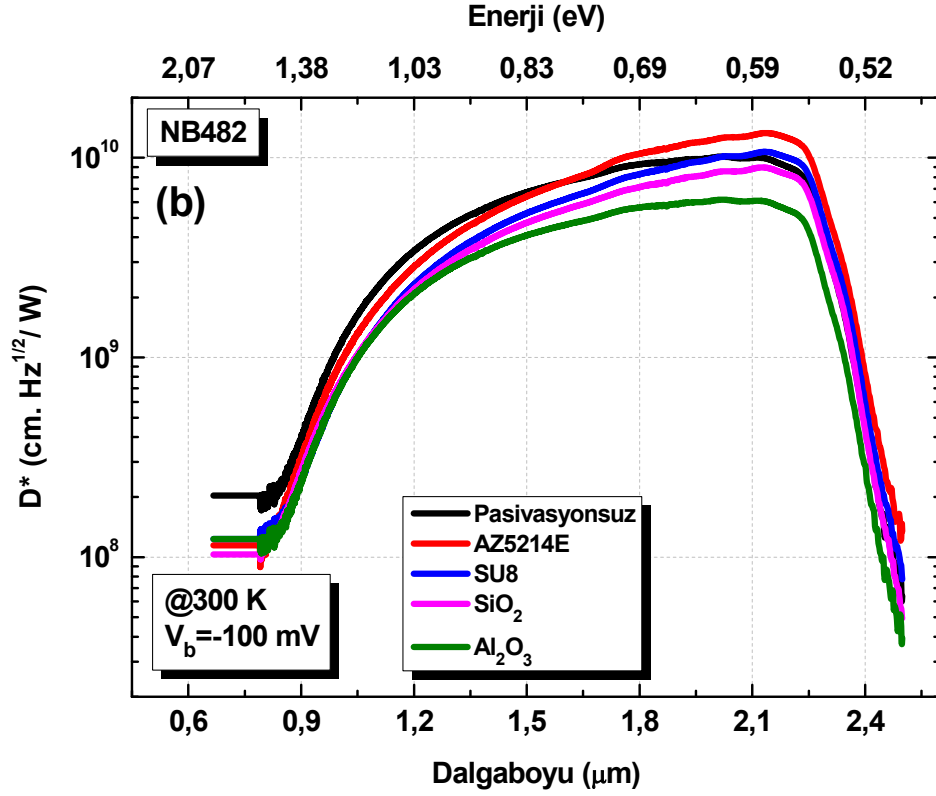
Şekil 4.27’de NB482 örneğine ait gerilim uygulanmamış ($V=0$) ve geri beslem uygulanmış ($V=-100$ mV) görülmektedir. Şekil 4.12’de diferansiyel direnç alan çarpımı değerinin, -100 mV ve +100 mV voltajları için tepe değerler vermesi sonucunda spektral tepki ölçümünde aygıtta -100 mV ters beslem uygulanmıştır. Uygulanan beslem sonucunda spektral tepki şiddeti uygulanmamış duruma göre oldukça artmıştır. Örnek büyütülürken katkısız katman ters katkılanmak istenmişse de bir p-i-n yapı oluşturulamadığı düşünülmektedir. Dışarıdan uygulanan bir beslem ile spektral tepki şiddetinin artması katkı ile ilişkilendirilebilir. Geri beslem altında kesim dalgaboyu 2,25 μm ’ye kaymaktadır. Kesim dalgaboyundaki kayma, geri beslem altındaki aygıtın ısınması, dolayısıyla yasak enerji aralığındaki değişim ile açıklanabilir.



Şekil 4.28. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 300 K sıcaklıktaki NB482 örneğine ait (a) 0 V ve (b) -100 mV beslem altındaki tepkisellik dalgaboyu eğrisi

Spektral tepki ölçümünde uygulanan -100 mV geri beslem ile şiddetin oldukça yükselmesi tepkisellik ölçümünde de görülmektedir. Pasivasyonu yapılmış NB482 örneğinin, beslem uygulanmadığındaki tepkisellik değerleri birbirine çok yakın görülmektedir. Ancak Şekil 4.28'den görülebileceği gibi -100 mV geri beslem ile AZ5214E pasivasyonu yapılan NB482 örneğinin tepkisellik değeri 1,55 μm 'de 5 kat, 2,1 μm 'de 15 kat artmıştır.





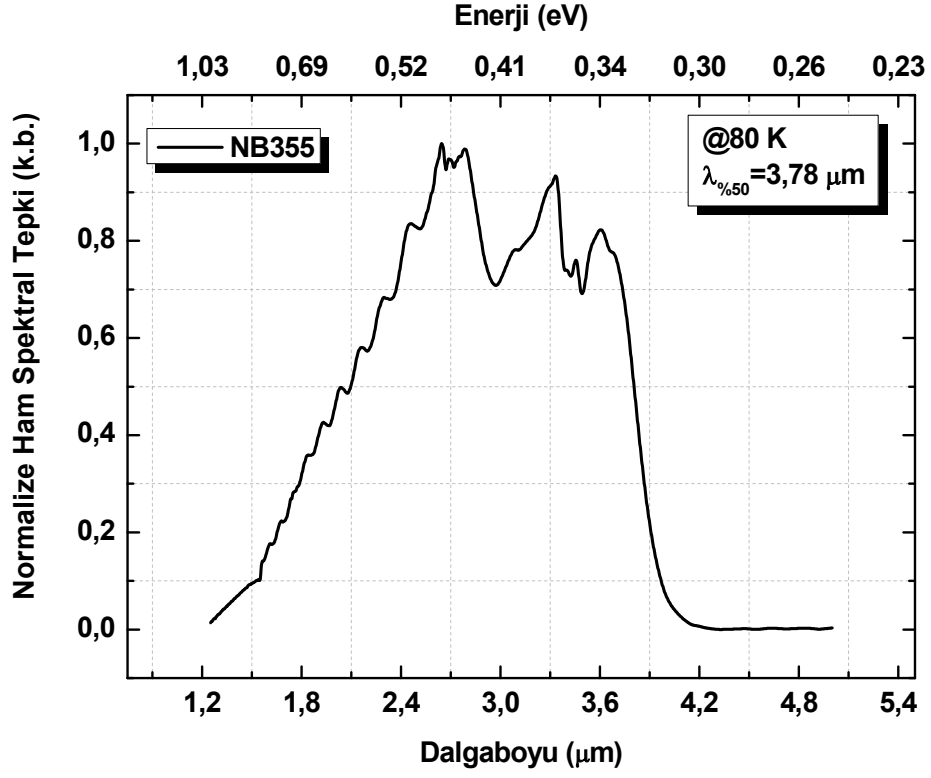
Şekil 4.29. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 300 K sıcaklıktaki NB482 örneğine ait (a) 0 V ve (b) -100 mV beslem altındaki dedektivite dalgaboyu eğrisi

Şekil 4.29 incelendiğinde, beslem uygulanmadığında ve -100mV beslem uygulandığında elektriksel ve optiksel olarak pasivasyonun etkisi yeterli miktarda etkili olamadığı için dedektivite değerleri NB482 örneğinde birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

4.3.3. Tip II InAs/GaSb süperörgü

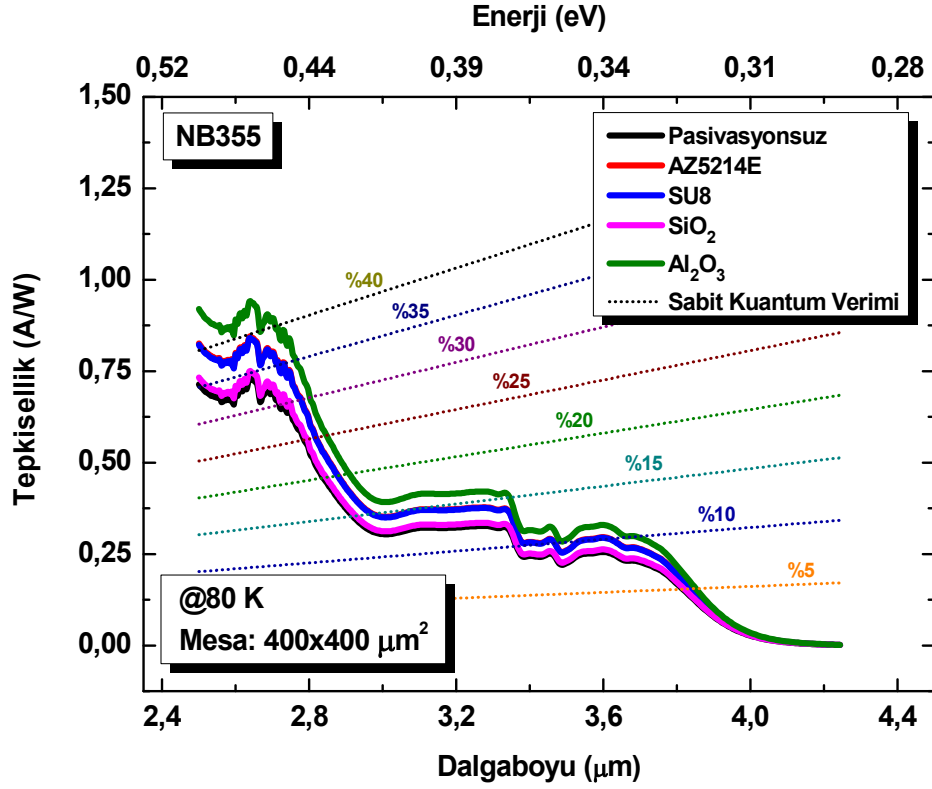
NB355 (GaAs alttaş üzerine)

Şekil 4.30'da NB355 örneğine ait dalgaboyuna bağlı normalize ham spektral tepki grafiği görülmektedir.



Şekil 4.30. 80 K sıcaklıktaki NB355 örneğine ait normalize ham spektral tepki eğrisi

80 K sıcaklıkta NB355 örneği için %50 kesim dalgaboyu 3,78 μm (328 meV) olarak bulunmuştur. Şekil 4.31’de NB355 örneğine ait 80 K sıcaklıktaki tepkisellik dalgaboyu grafiği görülmektedir.

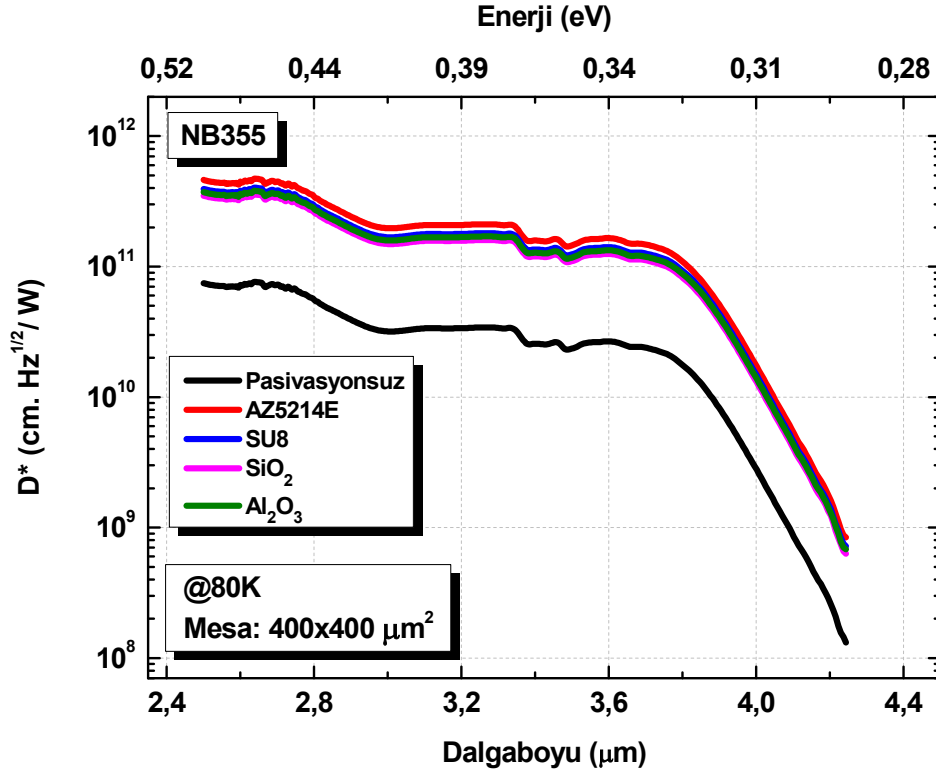


Şekil 4.31. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 80 K sıcaklıktaki NB355 örneğine ait tepkisellik dalgaboyu eğrisi

Şekil 4.31’de Al_2O_3 pasivasyonu yapılmış NB355 örneğinin en yüksek tepkisellik değerine sahip olduğu görülmektedir. Ref. 8’de yapılan InAs/GaSb pasivasyon karşılaştırmasında Al_2O_3 pasivasyonu en iyi sonuçları vermiştir. Benzer olarak bu çalışmada Al_2O_3 pasivasyonu en iyi tepkisellik değerini vermektedir. Ancak Ref. 8’deki pasivasyonsuz haline göre iyileşme oranı bu çalışmadaki iyileşme oranından daha yüksektir. Bu çalışmada GaAs alttaş üzerine büyütülen InAs/GaSb, Ref. 8’deki gibi GaSb alttaş üzerine büyütülmediği için tam bir karşılaştırma yapmak mümkün değildir. Ayrıca kaplanan Al_2O_3 kaplama sıcaklığı, süre gibi optimizasyonlar bu çalışmada yapılmamıştır. Bu iki etken de göz önüne alındığında Al_2O_3 en iyi tepkisellik iyileştirmesini sağlamıştır.

SU8, InAs/GaSb süperörgülerde yaygınla pasivasyon için kullanılan bir fotorezisttir [9]. Diğer yandan AZ5214E, SU8’e göre azda olsa daha yüksek tepkisellik değerleri vermiştir. Bu çalışmada AZ5214E, SU8 kadar iyi bir pasivasyon malzemesi olabileceğini göstermektedir.

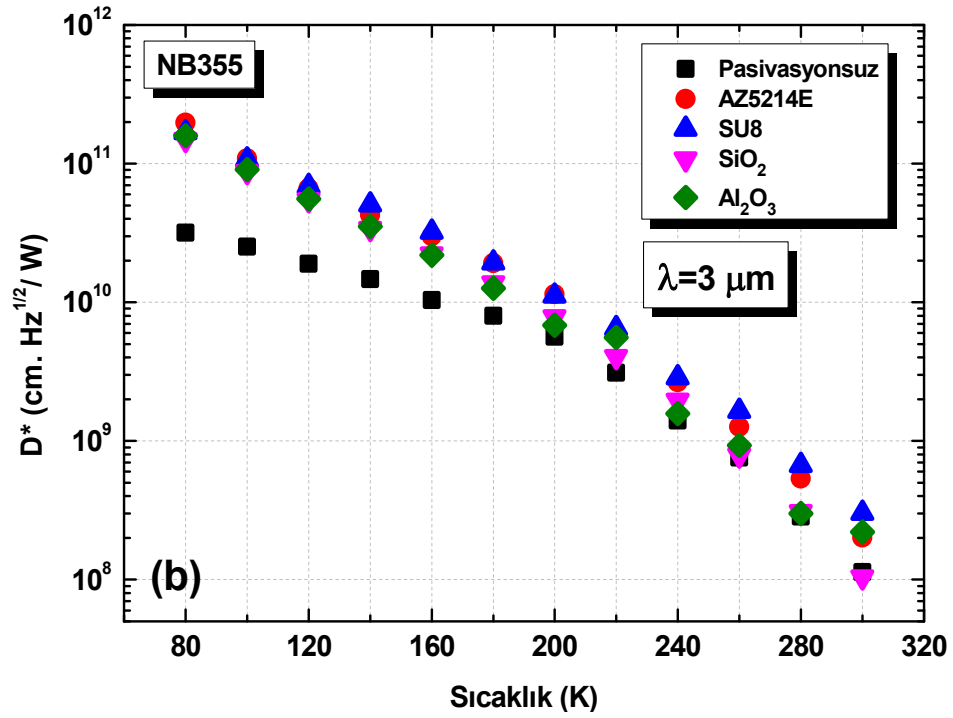
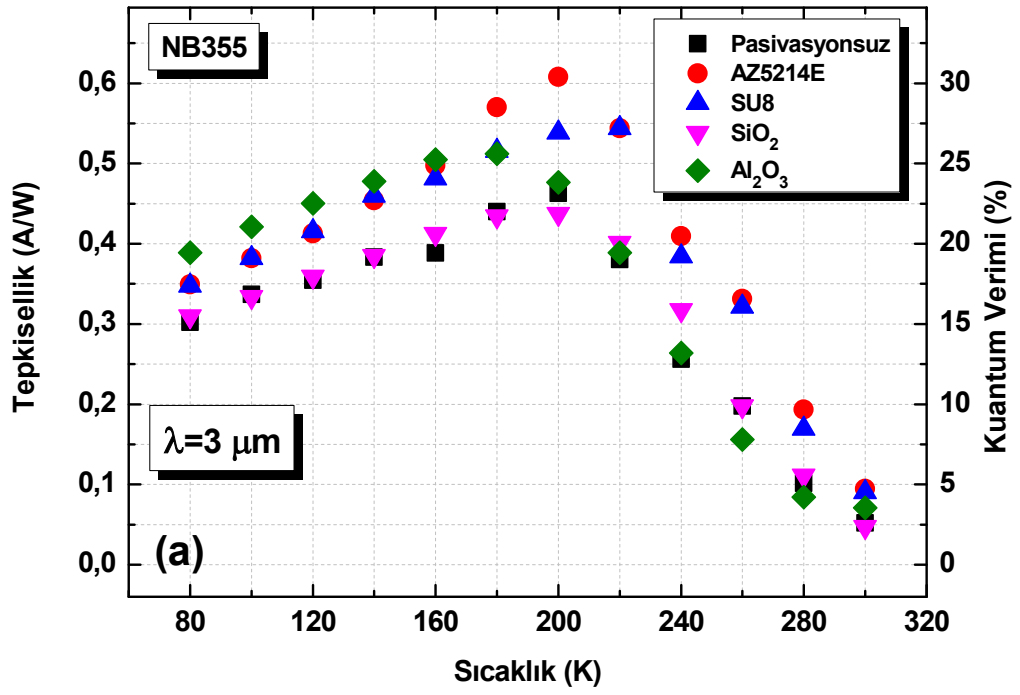
Şekil 4.32’de, Denklem 3.23’e göre hesaplanan D^* dalgaboyu grafiği görülmektedir.



Şekil 4.32. Farklı pasivasyon malzemesi uygulanmış 80 K sıcaklıktaki NB355 örneğine ait dedektivite dalgaboyu eğrisi

Pasivasyon yapılmış her örneğin D^* değerleri birbirine çok yakın görülmektedir. Pasivasyon çalışması NB355 örneği için, hesaplanan D^* değerleri arasında AZ5214E pasivasyonu yapılmış örneğin en iyi sonucu verdiği görülmektedir.

Şekil 4.33a ve 4.33b’de NB355 3 μm ’deki sıcaklık bağımlı tepkisellik ve D^* değerleri görülmektedir.



Şekil 4.33. NB355 örneğine ait $3 \mu\text{m}$ dalgaboyundaki (a) tepkisellik ve (b) dedektivite sıcaklık grafiği

80 – 300 K arasında yapılan sıcaklık bağımlı ölçümlerde en yüksek tepkisellik değerleri 180 – 200 K arasında görülmüştür. Sıcaklığın yükselmesiyle birlikte, tip II InAs/GaSb süperörgü yapılarında tepkisellik ve dolayısıyla kuantum veriminin artışının nedeni tam anlaşılamamakla birlikte E. Plis ve ark. tarafından sıcaklığın yükselmesi ile soğurma katsayısının artışı olarak öngörülmüştür [17]. Örneklerin 300 K oda sıcaklığında düşük de olsa tepkisinin olduğu yapılan ölçümler ile görülmüştür. D^* değerleri 80 K de en yüksek değerini alırken sıcaklıkla beraber kademe kademe düştüğü gözlemlenmiştir.

NB693 (Si alttaş üzerine)

NB693 örneğinden hiçbir sıcaklıkta yüksek kusur yoğunluğundan dolayı optiksel sinyal elde edilememiştir.

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında, kısa ve orta dalgaboylu kızılötesi bölgesinde çalışan MBE yöntemiyle pin yapıda büyütülmüş InAsSb, GaInAsSb ve tip II InAs/GaSb süperörgü dedektörlerde, dört farklı pasivasyon malzemesi, oluşturulmuş mesa yapılarına uygulanmıştır. Uygulanan pasivasyon malzemeleri, polimer bazlı AZ5214E ve SU8 ile yüksek dielektrik sabitine sahip SiO₂ ve Al₂O₃'ten oluşmaktadır. Polimer bazlı fotorezistler, seyreltilmiş HCl asit çözeltisinde doğal oksit kaldırıldıktan sonra döner kaplama cihazı ile, SiO₂, plazma temizliği yapıldıktan sonra saçtırma yöntemiyle PVD cihazı ile ve son olarak Al₂O₃, ALD cihazı ile örneklerin üzerlerine kaplanmıştır. Elektriksel ve optiksel ölçümler sonucunda en uygun pasivasyon malzemesi büyütülmüş fotodedektör yapıları için belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada kullanılan fotodedektör yapılarında yüzey kaçak akımlarının etkisi, aygıtların yüksek kusur yoğunluklarından kaynaklı yapı içerisindeki farklı akım mekanizmalarının yanında oldukça azdır. Bu sebeple yüzey kaçak akımlarının bastırılmasına rağmen hiçbir fotodedektör yapısında yeterli olan iyileşmeler sağlanamamıştır.

Özet olarak, her bir örnek grubu için aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

NB441 (InAsSb) için:

HRXRD sonuçlarından (004) InAsSb tepesinin FWHM değeri 200 arcsec, ve $9,12 \times 10^7 / \text{cm}^2$ kusur yoğunluğu bulunmuştur. Yüksek kusur yoğunluğu sebebiyle, yüzey kaçak akımlarının bastırılması aygıt performansına istenilen etkiyi göstermemiştir. Yapılan pasivasyon uygulaması ile karanlık akım ve tepkisellik değerlerinde iyileşme sağlandı. En iyi iyileştirme SU8 pasivasyonu yapılan örnekte elde edilmiştir.

NB482 (GaInAsSb) için:

HRXRD sonuçlarından (004) GaInAsSb tepesinin FWHM değeri 308 arcsec, ve $2,48 \times 10^8 / \text{cm}^2$ kusur yoğunluğu bulunmuştur. Yüksek kusur yoğunluğu sebebiyle, yüzey kaçak akımlarının bastırılması aygıt performansına istenilen etkiyi göstermemiştir. pin yapı oluşturulmak istense de, yapılan elektriksel ve optiksel ölçümler sonucunda pin yapının oluşmadığı görülmüştür. Yapılan pasivasyon uygulaması ile karanlık akım seviyesi değişmemiştir. Optiksel ölçüm sonuçları da, elektriksel ölçüm sonuçları gibi pasivasyon ile değişmemiştir. Dışarıdan uygulanan beslem ile ise optiksel ölçüm sonuçlarında en iyi iyileşme AZ5214E pasivasyonu yapılmış örnekte görülmektedir.

Tip II InAs/GaSb süperörgü için:

NB355 için:

HRXRD sonuçlarından (004) 0. tepesinin FWHM değeri 137 arcsec bulunmuştur. Yapılan pasivasyon uygulaması ile elektriksel ve optiksel olarak iyileşme sağlanmıştır. Literatürde tip II InAs/GaSb süperörgü için çoğunlukla kullanılan pasivasyon malzemelerinin yanında AZ5214E pasivasyonu yapılmış örnek, en az çoğunlukla kullanılan malzemeler kadar iyileşme sağlamıştır. Böylece, temel fotolitografik işlemlerde kullanılabilen AZ5214E fotorezisti, maliyet, uygulanabilirlik ve zaman düşünüldüğünde uygun bir pasivasyon malzemesi olabilmektedir.

NB693 için:

HRXRD sonuçlarından (004) 0. tepesinin FWHM değeri 253 arcsec bulunmuştur. Si alttaş üzerine büyütülen ve aralarında yüksek örgü uyumsuz tip II InAs/GaSb süperörgü dedektör yapılarında oluşan yüksek kusur yoğunluğu sebebiyle elektriksel olarak herhangi bir iyileşme görülmemiştir. Optiksel sinyal görülememiştir. Si ile III-V yapılarının bütünleştirilmesi için yapılan NB693 örneğinin daha fazla geliştirilmeye ihtiyacı bulunmaktadır.

KAYNAKÇA

- [1] Rogalski, A. (2011). *Infrared Detectors*, CRC Press Taylor&Francis Group, Boca Raton, U.S.
- [2] Ekber, S. (2009). *Guided and Deterministic Self Organization of Quantum Dots*. Doktora Tezi. Hollanda: Eindhoven Teknik Üniversitesi.
- [3] Erkuş, M., Şenel, O. and Serincan, U. (2016). Structural, optical and electrical characterization of $\text{InAs}_{0.83}\text{Sb}_{0.17}$ p- π -n photodetector grown on GaAs substrate”, *Thin Solid Films*, 616, 141-144.
- [4] Serincan, U., Erkuş, M. and Şenel, O. (2017). Unpassivated high operating temperature GaInAsSb infrared photodetector grown on GaAs substrate, *Anadolu Univ. J. of Sci. and Technology A*, 18 (3), 624-631.
- [5] Sai-Halasz, G.A., Tsu, R. and Esaki, L. (1977). A new semiconductor superlattice, *Appl. Phys. Lett.*, 30, 651.
- [6] Smith, D.L. and Mailhot, C. (1987). Proposal for strained type II superlattice infrared detectors, *J. Appl. Phys.*, 62, 2545.
- [7] Ayers, J.E. (1992). The measurement of threading dislocation densities in semiconductor crystals by X-ray diffraction, *Journal of Crystal Growth*, 135, 71-77.
- [8] Salihlioğlu, Ö., Muti, A. and Aydınli, A. (2013). A comparative passivation study for InAs/GaSb pin superlattice photodetectors, *Journal of Quantum Electronics*, 49 (8), 661-666.
- [9] Kim, H. S., Plis E., Khoshakhlagh A., Myers, S., Gautam, N., Sharma, Y.D., Dawson, L.R., Krishna, S., Lee, S.J., and Noh, S.K. (2010). Performance improvement of InAs/GaSb strained layer superlattice detectors by reducing surface leakage currents with SU-8 passivation, *Applied Physics Letters*, 96, 033502.
- [10] Inada, H., Machinaga, K., Miura, K., Tsuji, Y., Migita, M., Iguchi, Y., Katayama, H. and Kimata, M. (2014). Pretreatment for surface leakage current reduction in type-II superlattice MWIR photodetectors, *Proc. of SPIE*, 90700Z.

- [11] Arıkan, B. (2015). *InAs/GaSb Tip-II Süperörgü Kızılötesi Fotodedektör Yapıların MBE Tekniği İle GaSb ve GaAs Alttaşılar Üzerine Büyütülmesi*. Doktora Tezi. Eskişehir: Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [12] <https://www.pveducation.org/pvcdrom/characterisation/measurement-of-ideality-factor>
- [13] Li, Q., Ma, W., Zhang, Y., Cui, K., Huang, J., Wei, Y., Liu, K., Cao, Y., Wang, W., Liu, Y. and Jin, P., (2014). Dark current mechanism of unpassivated mid wavelength type II InAs/GaSb superlattice infrared photodetector, *Chin. Sci. Bull.*, 59(28):3696-3700.
- [14] <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaInAsSb/bandstr.html>
- [15] Abroug, S., Saadallah, F., Genty, F., Yacoubi, N., (2009). Investigation of Electrical and Optothermal Properties of Si-doped GaSb epitaxial layers by the Hall Effect, PL measurement and Photothermal Deflection Spectroscopy, *Physics Procedia* 2, 787-795.
- [16] Voronina, T.I., Dzhurtanov, B.E., Lagunova, T.S., Sipovskaya, M.A., Sherstnev, V.V., (1998). Electrical properties of GaSb-based solid solutions (GaInAsSb, GaAlSb, GaAlAsSb) and their compositional dependence, *Semiconductors*, 32, 3, 250-256.
- [17] Plis, E., Klein, B., Myers, S., Gautam, Nutan and Krishna, S., (2013), (111) InAs/GaSb Type-II Strained Layer Superlattice Material For High Operating Temperature Detection, *Phys. Status Solidi C*, 1-4.