

**InAs/GaSb TİP-II SÜPERÖRGÜ YAPILARIN
AKIM VE KAPASİTANS ÖLÇÜMLERİYLE
KARAKTERİZASYONLARI**

Yüksek Lisans Tezi

Erdem Yıldırım

Eskişehir, 2018

**InAs/GaSb TİP-II SÜPERÖRGÜ YAPILARIN
AKIM VE KAPASİTANS ÖLÇÜMLERİYLE
KARAKTERİZASYONLARI**

Erdem YILDIRIM

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İleri Teknolojiler Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Mustafa KULAKCI

Eskişehir
Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Mart, 2018

Bu Tez Çalışması TUBİTAK 2210-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yüksek Lisans Burs Programı kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Erdem YILDIRIM'ın InAs/GaSb Tip-II Süperörgü Yapıların Akım ve Kapasitans Ölçümleriyle Karakterizasyonları” başlıklı tezi 30/03/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği”nin ilgili maddeleri uyarınca, İleri Teknolojileri Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

<u>Jüri Üyeleri</u>	<u>Unvanı Adı Soyadı</u>	<u>İmza</u>
Üye (Tez Danışmanı)	: Doç. Dr. Mustafa KULAKCI
Üye	: Doç. Dr. Uğur SERİNCAN
Üye	: Doç. Dr. Tunay TANSEL

Prof. Dr. Ersin YÜCEL
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

InAs/GaSb TİP-II SÜPERÖRGÜ YAPILARIN AKIM VE KAPASİTANS ÖLÇÜMLERİYLE KARAKTERİZASYONLARI

Erdem YILDIRIM

İleri Teknolojileri Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mart, 2018

Danışman: Doç. Dr. Mustafa KULAKCI

Bu çalışmada orta kızılötesi bölgede algılama yapan InAs/GaSb tip-II süperörgü fotodiyotların elektriksel performansları incelenmiştir. Katman kalınlıkları ve arayüz kalınlıkları sistematik olarak değişen örnek gruplarında karanlık akım, kapasitans ve fotokapasitans ölçümleri yapılmıştır ve sıcaklık bağımlı ölçüm sonuçları ile aktivasyon enerjileri türetilerek yapıdaki kusurlar analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: InAs/GaSb, süperörgü, Akım, Kapasitans, Kızılötesi Foto-algılayıcı

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF InAs/GaSb TYPE-II SUPERLATTICES WITH CURRENT AND CAPACITANCE MEASUREMENTS

Erdem YILDIRIM

Advanced Technologies Program

Anadolu University, Graduate School of Sciences, March, 2018

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa KULAKCI

In this thesis, electrical performance of InAs/GaSb type-II superlattice photodiodes operating in mid infrared region have been studied and analysed. Superlattices whose InAs, GaSb layers and interface thicknesses changing in a systematic way has been chosen for device fabrication. The electrical performances of the devices has been elaborately studied by means of temperature dependent dark current, capacitance-voltage and foto-capacitance measurements. And also using results of these measurements defects and defect levels in the superlattice structures has been depicted and discussed.

Keywords: InAs/GaSb, Superlattice, Current, Capacitance, Infrared Photodetector.

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.

.....
Erdem YILDIRIM

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında bilgi ve deneyimleri ile bana yol gösteren, arkadaşça yaklaşımıyla ve sabırla desteğini esirgemeyen sayın Doç. Dr. Bülent ASLAN'a sağladığı imkanlardan dolayı çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve önerilerini benimle paylaşan, sabırla değerli zamanını bana ayıran sayın Doç. Dr. Mustafa KULAKCI'ya hoşgörüsü desteği için çok teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım sırasında değerli önerileri ve yönlendirmeleri ile desteğini esirgemeyen sayın Doç. Dr. Uğur SERİNCAN'a çok teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında verdikleri eğitimler, destekler ve öneriler ile yardımcı olan Dr. Bülent ARIKAN, Dr. Güven KORKMAZ, Burcu ARPAPAY, Melih KORKMAZ, Ayşe ŞEVİK, Seval ŞAHİN'e,

Bu süreçte yardımları ve arkadaşlıkları için Samet ÖZDEMİR, Mehmet ERKUŞ, Onur ŞENEL ve Hazal ZAIMLER'e,

Bütün süreç boyunca maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme çok teşekkür ederim.

Erdem YILDIRIM

İÇİNDEKİLER

Sayfa

BAŞLIK SAYFASI.....	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ.....	ix
KISALTMALAR DİZİN.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. TİP II InAs/GaSb SÜPERÖRGÜ KIZİLÖTESİ DEDEKTÖRLER.....	6
2.1. Tip II InAs/GaSb Süperörgü Bant Yapısı ve Özellikleri	6
2.2. InAs/GaSb T2SL P-i-n Dedektör Yapısı.....	10
3. DENEYSEL YÖNTEMLER	11
3.1. Epitaksiyel Büyütme.....	11
3.1.1 Moleküler Demet Epitaksi (MBE) Sistemi.....	11
3.1.2 InAs/GaSb Süperörgü Yapıların Büyütülmesi	12
3.2. Tek Piksel Fotodiyot (Aygıt) Fabrikasyonu.....	13
3.2.1 Mesa Oluşturulması.....	13
3.2.2 Metal Kaplama.....	15
3.3. Karakterizasyon.....	16
3.3.1 Karanlık Akım Ölçümü	16
3.3.2 Kapasitans Voltaj Ölçümü.....	17
3.3.3 Fotokapasitans Ölçümü	20
4. ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYON.....	22
4.1. Karanlık Akım Ölçümü.....	22
4.1.1 Arayüz Kalınlığı Değişen Örnek Grubu.....	22
4.1.2 Katman Kalınlıkları Değişen Örnek Grubu	24

4.2. Kapasitans Ölçümü	25
4.2.1 Arayüz Kalınlığı Değişen Örnek Grubu.....	26
4.2.2 Katman Kalınlıkları Değişen Örnek Grubu	30
4.3. Fotokapasitans Ölçümü.....	34
5. SONUÇ.....	37
KAYNAKÇA.....	38

TABLolar DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1-1. <i>HgCdTe fotodiyot, InSb fotodiyot, T2SL, QWIP ve QDIP'lerin kıyaslanması [10]</i>	5
Tablo 3-1. <i>Arayüz kalınlığı değişen örnek grubu</i>	13
Tablo 3-2. <i>Katman kalınlıkları değişen örnek grubu</i>	13
Tablo 4-1. <i>Arayüz kalınlığı değişen örnek grubunun aktivasyon enerjileri.</i>	29
Tablo 4-2. <i>Katman kalınlığı değişen örnek grubunun aktivasyon enerjileri.</i>	33

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Elektromanyetik Spektrum [1].	1
Şekil 2.1. Tip-I, Tip-II basamak ve Tip-II kırık bant hizalanması.	6
Şekil 2.2. InAs, GaSb ve AlSb 'nin yasak bant aralıkları ve birbirlerine göre hizalanması.	7
Şekil 2.3. InAs/GaSb nin oluşturduğu tip-II super örgü yapısında taşıyıcıların tünellemeleri ve mini bantların oluşumunun şematik gösterimi.	8
Şekil 2.4. InAs ve GaSb katman kalınlıklarının, iletim ve değerlik minibantları enerji seviyesine etkisi [16].	9
Şekil 2.5. pin yapıda tasarlanmış InAs/GaSb T2SL fotodiyot yapısının şematik olarak gösterimi [18].	10
Şekil 3.1. Tez çalışması kapsamında kullanılan GaSb alttaş üzerine büyütülmüş InAs/GaSb SL p-i-n fotodiyot yapının yankesit olarak şematik gösterimi. ..	12
Şekil 3.2. Mesa oluşturma süreci şematik gösterimi	14
Şekil 3.3. Aygıt yapısı oluşturulan örnekler üzerine kaplanan Ohmik metal kontak sürecinin şematik gösterimi.	15
Şekil 3.4. Farklı büyüklüklerde tek piksel olarak fabrikasyonu tamamlanmış fotodiyot aygıtların elektriksel ölçüm için örnek taşıyıcıya nakledilip altın tel bağlantılarının alınmış hali.	16
Şekil 3.5. Güç kaynağı/akımölçer, sıcaklık kontrolcüsü ve kreyostattan oluşan karanlık akım ölçüm düzeneği.	17
Şekil 3.6. C-V ölçümü devre şeması	18
Şekil 3.7. Empedans ölçer, sıcaklık kontrolcüsü ve kreyostattan oluşan kapasitans-voltaj ölçüm düzeneği.	20
Şekil 3.8. Örneklerin fotokapasitans ölçümü için kullanılan düzeneğin şematik olarak gösterimi.	21
Şekil 4.1. Arayüz kalınlığı değişen örnek grubunun karşılaştırmalı olarak verilen akım yoğunluğu grafikleri.	23
Şekil 4.2. Arayüz kalınlığı değişen örnek grubunun karşılaştırmalı olarak sunulan R.A grafikleri.	23
Şekil 4.3. Katman kalınlığı değişen örnek grubunun akım yoğunluğu voltaj grafikleri [19].	24

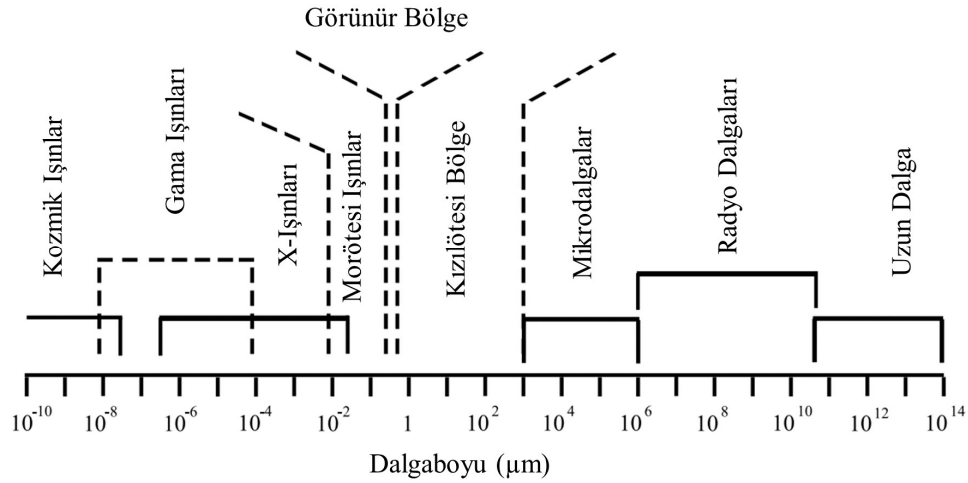
Şekil 4.4. Katman kalınlığı değişen örnek grubunun karşılaştırmalı olarak sunulan R.A eğrileri [19].	25
Şekil 4.5. (Alan/kapasitans)'ın karesi, ters beslem grafiği.	26
Şekil 4.6. B1 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu}) / kT$ grafikleri.	26
Şekil 4.7. B2 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu}) / kT$ grafikleri.	27
Şekil 4.8. B3 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu}) / kT$ grafikleri.	28
Şekil 4.9. B4 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu}) / kT$ grafikleri.	28
Şekil 4.10. B5 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu}) / kT$ grafikleri.	29
Şekil 4.11. B1, B2, B3 ve B5 örneklerinin akım ve kapasitans ölçümleri ile türetilen aktivasyon enerjileri ortalaması ile oluşturulan grafik.	30
Şekil 4.12. M1 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu}) / kT$ grafikleri.	30
Şekil 4.13. M2 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu}) / kT$ grafikleri.	31
Şekil 4.14. M3 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu}) / kT$ grafikleri.	32
Şekil 4.15. M4 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu}) / kT$ grafikleri.	32
Şekil 4.16. M5 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu}) / kT$ grafikleri.	33
Şekil 4.17. Farklı mesa boyutlarındaki örneklerin akım ölçümlerinden türetilen aktivasyon enerjileri ortalamaları ve farklı frekanslarda kapasitans ölçümlerinden türetilen aktivasyon enerjilerinin ortalamaları.	34
Şekil 4.18. $\lambda_{\%50}$ kesim dalga boyu $4,36 \mu\text{m}$ olan M3 örneğinin ışık altında ve karanlıkta ölçülen fotoakım – dalgaboyu grafiği.	35
Şekil 4.19. $\lambda_{\%50}$ kesim dalga boyu $5,41 \mu\text{m}$ olan M1 örneğinin karanlık ve ışık altında fotokapasitans grafikleri.	35
Şekil 4.20. M1 ($\lambda_{\%50}$ kesim dalga boyu $5,41 \mu\text{m}$) ve M3 ($\lambda_{\%50}$ kesim dalga boyu $4,36$ μm) örneklerinin fotokapasitans – dalgaboyu grafikleri.	36

KISALTMALAR DİZİN

AlSb	: Alüminyum Antimon
AlGaSb	: Alüminyum Galyum Antimon
Be	: Berilyum
C₁	: İletim Bandı Minimumu
eB	: Elektron Engeli
FOV	: Görüş Alanı
FTIR	: Fourier Dönüşümü Kızılötesi
GaAs	: Galyum Arsenik
GaSb	: Galyum Antimon
G-R	: Yaratma-Yeniden Birleşme
hB	: Boşluk Engeli
HH₁	: Ağır Boşluk Bandı Maksimumu
HRTEM	: Yüksek Çözünürlüklü Geçirimli Elektron Mikroskobu
InAs	: İndiyum Arsenik
InSb	: İndiyum Antimon
LWIR	: Uzun Dalga Boylu Kızılötesi
LTT	: Kurşun Kalay Tellür
MBE	: Moleküler Demet Epitaksi
MCT	: Civa Kadmiyum Tellür
MWIR	: Orta Dalga Boylu Kızılötesi
Si	: Silisyum
SL	: Süperörgü
S-R-H	: Shockley-Read-Hall
QDIP	: Kuantum Nokta Kızılötesi Foto-Algılayıcı
QSIP	: Kuantum Yapılı Kızılötesi Foto-Algılayıcı
QWIP	: Kuantum Kuyulu Kızılötesi Foto-Algılayıcı

1. GİRİŞ

Kızılötesi ışınımın varlığı 1800 yılında Sir William Herschel tarafından renk tayflarının sıcaklığını ölçmek için yaptığı deney ile keşfedilmiştir. Herschel üçgen prizma ile güneşten gelen ışığı kırmış ve kırmızının altında bulunan bölgede termometre yardımıyla gözle görülmeyen bir ışınımın varlığını tespit etmiştir. Bu ışınım günümüzde kızılötesi olarak isimlendirilmektedir ve elektromanyetik spektrumun (Şekil 1.1.) 0,7 µm ile 1000 µm dalgaboyu aralığını oluşturmaktadır. 1860 yılında Gustav Kirchoff aynı sıcaklıktaki cisimlerden daha siyah olanın daha fazla ışıdığını gözlemlemiş ve ilk kez siyah cisim teriminden bahsetmiştir. 1864 yılında James Clerk Maxwell'in yaptığı çalışmalar farklı elektromanyetik ışınımın varlığını ve kızılötesi ışınımın da elektromanyetik spektrumun bir parçası olduğunu göstermiştir.



Şekil 1.1. Elektromanyetik Spektrum [1].

1879'da Josef Stefan cismin ışınımının enerjisi ile sıcaklığı arasındaki ilişkiyi incelemiş ve 1884'te Ludwig Boltzmann bu ilişkiyi kuramsal olarak incelemiştir (Stefan-Boltzmann yasası, Denklem 1.1). M siyah cisimden yayılan gücü, σ Stefan-Boltzmann sabitini, T Kelvin cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir.

$$M = \sigma T^4 \quad [\text{Watt/cm}^2] \quad (1.1)$$

1893 yılında Wilhelm Wien bir kara cismin sıcaklığı ile en fazla ışımaya yaptığı dalga boyu arasındaki ilişkiyi keşfetmiş ve kendi ismini verdiği Wien yasasını (Denklem 1.2) yazmıştır. Dalgaboyu λ 'nın birimi μm Sıcaklık T 'nin birimi ise Kelvin'dir.

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \text{ [\mu m]} \quad (1.2)$$

1900 yılında Max Planck bir cismin yaydığı kara cisim ışımasının gücünü (W) cismin sıcaklığına (T , Kelvin) ve ışının dalgaboyuna (λ , μm) bağlı olarak ifade eden Planck yasasını (Denklem 1.3) keşfetmiştir. Burada W denge sıcaklığı T olan cismin spektral radyasyonunu, h Planck sabitini, k Boltzmann sabitini, c ışığın boşluktaki hızını, ϵ cismin salım gücünü ifade etmektedir.

$$W(\lambda, T) = \epsilon \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\lambda kT} - 1} \text{ [Watt/cm}^2/\mu\text{m]} \quad (1.3)$$

Tarihsel gelişiminden anlaşılacağı üzere kızılötesi ışının doğasının anlaşılması Herschel'in keşfi ile başlamış ve uzun yıllar devam etmiştir.

Kızılötesi dedektörler üzerine araştırmalar kızılötesi ışının keşfinden kısa süre sonra başlamıştır. Birinci dünya savaşına kadar olan süreçte araştırmalar çoğunlukla sıcaklıktaki değişimi algılayan termal dedektörler üzerine yoğunlaşmıştır. Bu alanda ilk önemli gelişme Seebeck'in 1821 yılında termoelektrik etkiyi keşfetmesi ve sonrasında ilk ısı çifti (thermocouple) geliştirmesi olmuştur. Isıl çift; farklı iki metalin bir uçlarının birleştirilmesiyle oluşur, ortak uçtaki sıcaklık değişimi açık uçlar arasında gerilim yaratır. 1829'da Nobili ısı çiftleri seri bağlayarak ilk termofili (thermopile) yapmıştır. 1833'de ise Molloni bizmut ve antimon kullanarak ısı çifti geliştirmiştir. 1880'de Langley platin folyo kullanarak bolometreyi icat etmiştir. Bolometre üzerine düşen ışınım malzemenin sıcaklığının dolayısıyla direncinin değişmesine sebep olur. Böylece malzemenin direncini ölçerek gelen ışınım hakkında bilgi edinilebilir.

Dedektör üzerine düşen fotonu algılama prensibi ile çalışan foton dedektörleri ile ilgili ilk gelişme ise 1873'de Smith'in selenyum kullanarak fotoiletkenliği keşfi olmuştur. Ardından ilk kızılötesi fotoiletkeni Case 1917'de talyum ve sülfür kullanarak geliştirdi. Daha sonra Kutzscher 1933'de kurşun sülfatın fotoiletken özellik gösterdiğini ve $3\mu\text{m}$ 'ye kadar tepkisinin olduğunu gözlemlemiştir. Cashman kurşun sülfür üzerine çalışmalar yapmış ve kurşun selenyum ve kurşun tellürün (PbSe ve PbTe) umut vadeden kızılötesi dedektörler olduğunu söylemiştir. 1950'li yıllarda 8-14 μm ve 14-30 μm aralığında

algılama yapabilen ilk katkılı germanyum (Ge:X, bakır, çinko altın katkılı) fotoiletken dedektörler ortaya çıkmıştır.

1950'li yıllarda modern kızılötesi dedektörlerde kullanılmaya devam edilen dar bant aralığına sahip malzeme sistemleri üzerine çalışmalar başlamıştır. Bu grubun ilk örneği III-V grubundan InSb malzemesi olmuştur. İlerleyen yıllarda II-VI, III-V, IV-VI gruplarından $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (MCT), $InAs_{1-x}Sb_x$ ve $Pb_{1-x}Sn_xTe$ (LTT) malzeme sistemleri ortaya çıkmıştır. MCT dedektörler gelişmeye devam ederek günümüze kadar ulaşmış ve yüksek performanslarından ötürü 2-14 μm aralığında bir standart haline gelmiştir [2]. 1960 ve 1970'li yıllarda, bugün birinci nesil kızılötesi dedektör olarak adlandırılan taramalı sistem tek sıra dizin şeklindeki dedektörler kullanılmıştır. 1980'li yıllarda, bugün ikinci nesil kızılötesi dedektör olarak adlandırılan ilk odak düzlem dizin (focal plane array, FPA) teknolojisi geliştirilmiştir. 1980'lerin son yıllarında kuantum kuyulu kızılötesi fotodedektörler (Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP) üzerine çalışmalar başlamıştır. Kuantum nokta kızılötesi fotodedektör (Quantum Dot Infrared Photodetectors, QDIP) yapı üzerine ilk deneysel çalışma 1990'lı yılların sonunda yapılmıştır [3]. InAs/Ga(In)Sb Tip II süperörgü (T2SL) kızılötesi dedektör yapısı üzerine deneysel çalışmalar da yine 1990'lı yıllarda başlamıştır [4, 5]. 1990 ve 2000'li yıllarda ise üçüncü nesil kızılötesi dedektör sınıfındaki iki farklı dalgaboyu aralığında algılayabilen, iki-bant veya iki-renk FPA üzerine araştırmalar yapılmıştır [6].

Bugün orta (MWIR, 3-5 μm) ve uzun (LWIR, 8-12 μm) kızılötesi dalgaboyunda çalışan foton dedektörü tasarımlarında, dar bant aralıklı yığın (bulk) malzemeler ve kuantum yapılı kızılötesi fotodedektörler (Quantum Structured Infrared Photodetectors, QSIP) sıklıkla kullanılmaktadır. Kızılötesi algılamada kullanılan MCT ve InSb dedektörler uzun yıllardır araştırılmakta ve dolayısıyla oturmuş bir teknolojiye sahip olmalarına rağmen bazı karakteristik sorunları bulunmaktadır. $Hg_{1-x}Cd_xTe$ dedektörlerde civa kadmiyum oranı değiştirilerek kesim dalga boyu 1 ile 30 μm arasında ayarlanabilmesi, yüksek performans gibi avantajlara sahiptir ancak grup II ve VI arasındaki zayıf bağlar ve pahalı alttaş yüzünden üretimi maliyetli ve zordur. InSb dedektör teknolojisi de oturmuş üretim teknolojisi ve iyi performans sergilemesine rağmen LWIR bölgede çalışmıyor olması araştırmacıları farklı malzeme arayışına yöneltmiştir. Bu noktada MCT'ye alternatif olma potansiyeliyle III ve V grubu

bileşiklerin çoklu-eklem (heterojunction) yapıları (QWIP, QDIP, T2SL) ön plana çıkmaya başlamıştır.

En yaygın QWIP yapısı AlGaAs malzeme arasına büyütülmüş GaAs malzemedен oluşmaktadır. AlGaAs bariyerler arasında kalan GaAs kuyu taşıyıcıların hareketlerini bir boyutta sınırlayarak alt enerji seviyeleri oluşmasını sağlar. QWIP üzerine düşen foton kuyu içerisindeki taşıyıcıyı uyararak bariyer seviyesine çıkarır ve foto-akım oluşmasını sağlar. QWIP yapının kuyu boyutu ayarlanarak içerisindeki enerji seviyeleri ayarlanabilir dolayısıyla algılama yapacağı dalgaboyu aralığı ayarlanabilir. Bu yaklaşım bant aralığı mühendisliği (band gap engineering) olarak adlandırılmaktadır [1]. Oturmuş GaAs üretim teknolojisi, kararlı ve homojen büyütülebilmesi, radyasyona dayanıklılığı ve ucuz olması, QWIP'in MCT'ye göre avantajlarıdır. Ancak yapıya dik gelen fotonları algılayamaması, düşük kuantum verimi ve düşük sıcaklıkta çalışma ihtiyacı gibi dezavantajları da bulunmaktadır [6].

Kızılötesi algılama için bir başka alternatif teknoloji ise QDIP'tir. Çalışma prensibi QWIP ile benzerlik göstermektedir. QDIP'te taşıyıcılar üç boyutta sınırlanır. Böylece üzerine dik düşen fotonları da algılayabilme yeteneği vardır [7]. Taşıyıcıların uzun ömürlü olması ve yüksek sıcaklıkta çalışma potansiyeli yapının diğer avantajlarıdır [7]. Ancak kuantum nokta büyüklüğü ve dağılımının hassas olarak kontrol edilememesi bu yapının aşılması gereken sorunlarıdır.

InAs/GaSb T2SL yapısı üzerine birçok çalışma yapılmış ve çalışılmaya devam eden alternatif kızılötesi dedektör teknolojisidir. QWIP'te olduğu gibi taşıyıcıları bir boyutta sınırlayan bir yapıya sahiptir. GaSb katmanlar arasındaki ince InAs katman elektronlar için kuantum kuyu olur [8]. Aynı şekilde InAs katmanlar arasındaki ince GaSb katman boşluklar için kuantum kuyu olur [8]. InAs ve GaSb katmanların çoklu tekrarından oluşan süperörgü yapısında bariyerlerin ince yapısı sayesinde kuantum kuyu içerisindeki taşıyıcılar komşu kuantum kuyulara tüneller. Komşu kuantum kuyudaki taşıyıcılarla etkileşirler ve bu etkileşimin sonucunda minibantlar oluşur [9].

Günümüzde kullanılan kızılötesi dedektörlerin kıyaslaması Tablo 1.1'de özetlenmiştir.

Tablo 1-1. *HgCdTe* fotodiyot, *InSb* fotodiyot, *T2SL*, *QWIP* ve *QDIP*'lerin kıyaslanması [10].

Karakteristik	HgCdTe Fotodiyot	InSb Fotodiyot	T2SL	QWIP	QDIP
Normal doğrultuda soğurma	Evet	Evet	Evet	Hayır	Evet
Çalışma sıcaklığı	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Yüksek
Spektral ayarlanabilirlik	Hayır	Hayır	Evet	Evet	Evet
Yüksek kuantum verimi	Evet	Evet	Evet	Hayır	Hayır
Yüksek tepkisellik ve duyarlılık	Evet	Evet	Evet	Hayır	Hayır
Çoklu-renk uygulaması	Evet	Hayır	Evet	Evet	Evet
Homojenlik	Hayır	Evet	Evet	Evet	Hayır
Malzeme verimliliği	Düşük	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek

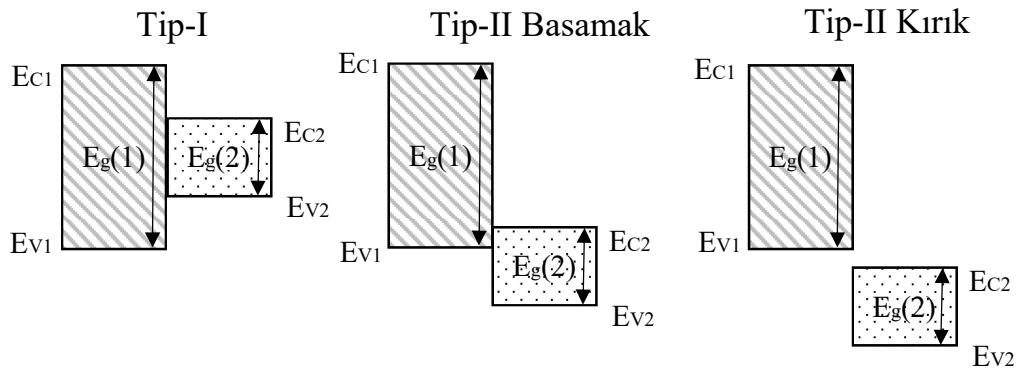
Bu tez çalışması kapsamında, MBE sistemi ile büyütülmüş ve orta dalga boylu kızılötesi bölgesinde çalışan InAs/GaSb tip-II SL fotodedektör yapıların, akım –voltaj (I-V) ve kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleriyle elektriksel karakterizasyonları yapılmıştır. Giriş bölümünde kızılötesi teknolojisinin tarihi, gelişim süreci ve mevcut kızılötesi dedektörlerin genel özelliklerinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde T2SL yapısı ve T2SL tabanlı farklı kızılötesi dedektör tasarımları üzerinde durulmuştur. Üçüncü bölümde tez kapsamında büyütülen SL yapılar, fabrikasyon aşaması ve yapıların karakterizasyonlarında kullanılan deneysel yöntemler anlatılmıştır. Dördüncü bölümde SL yapıların elektriksel karakterizasyon sonuçlarına yer verilmiştir. Beşinci bölümde sonuçlar sunulmuştur.

2. TİP II InAs/GaSb SÜPERÖRGÜ KIZILÖTESİ DEDEKTÖRLER

Yarıiletken süperörgü kavramından ilk kez 1970’te Leo Esaki ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada bahsedilmektedir [11]. InAs/GaSb T2SL yapısından bahsedilen ilk çalışma Sai-Halasz ve arkadaşları tarafından 1977’de yapılmıştır [12]. Teorik çalışmalar 1970’li yıllarda başlamış olsa da ilk InAs/GaInSb T2SL kızılötesi fotodiyot yapısı, kristal büyütme teknolojisindeki gelişmelerden sonra 1996 yılında Johnson ve arkadaşları tarafından üretilmiştir [5]. İlk InAs/GaSb T2SL yapıya sahip FPA ve yüksek performanslı FPA, sırasıyla 2003 ve 2004 yıllarında üretildi [13, 14]. Yıllardır araştırılan ve geliştirilen InAs/GaSb T2SL kızılötesi fotodedektörler, umut vaat eden özellikleri sayesinde bugün de araştırılmaya devam ediyor.

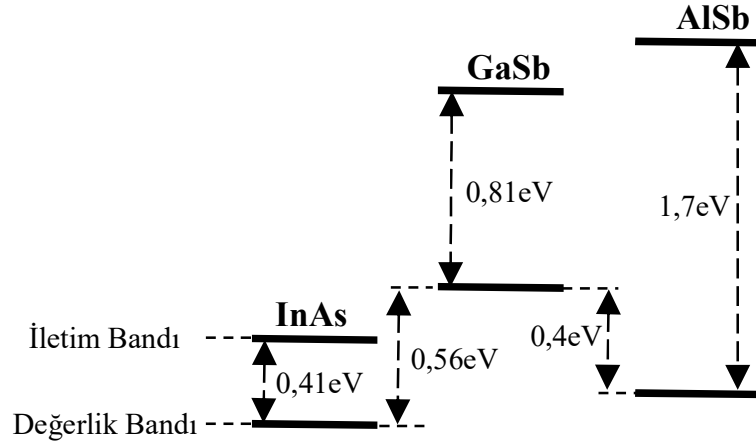
2.1. Tip II InAs/GaSb Süperörgü Bant Yapısı ve Özellikleri

Çoklu-eklem yapıların yasak bant aralıkları; Tip-I, Tip-II basamak ve Tip-II kırık olmak üzere üç şekilde hizalanır (Şekil 2.1.). Tip-I hizalanmada bir malzemenin iletim ve değerlik bandı diğer malzemenin iletim ve değerlik bandının ortasında kalır. Tip-II basamak hizalanması, bir malzemenin iletim bandı diğer malzemenin bant aralığında, değerlik bandının ise diğer malzemenin değerlik bandının altında kaldığı durumdur. Tip-II kırık hizalanmada, bir malzemenin iletim bandı diğer malzemenin değerlik bandının altında kalır. InAs/GaSb süperörgü yapısı Tip-II kırık bant hizalanmasına sahiptir. Bu kırık bant hizalanması T2SL’lere esnek bant aralığı mühendisliği yeteneği kazandırır.



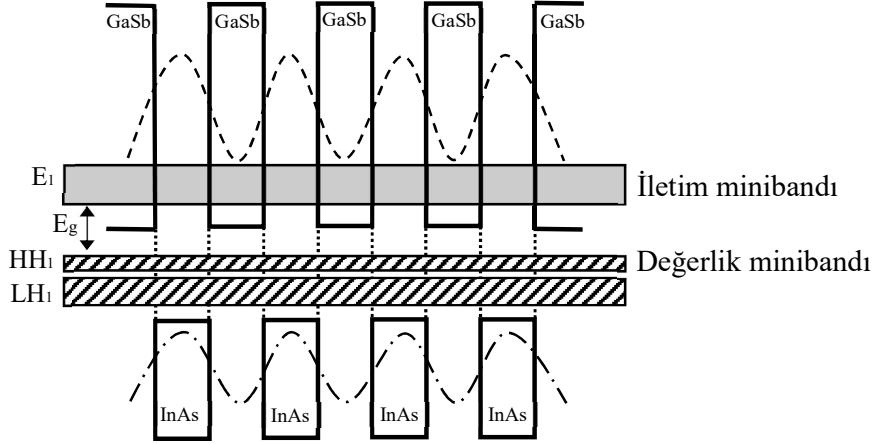
Şekil 2.1. Tip-I, Tip-II basamak ve Tip-II kırık bant hizalanması.

InAs, GaSb ve AlSb malzemeleri, örgü sabitlerinin birbirine oldukça yakın olması sebebiyle ($a_{\text{InAs}}=6,0584 \text{ \AA}$, $a_{\text{GaSb}}=6,0959 \text{ \AA}$ ve $a_{\text{AlSb}}=6,1355 \text{ \AA}$) birbiri üzerine büyütülmeye elverişli malzemelerdir. 6,1 Å ailesi olarak bilinen bu malzeme grubu, çiftler halinde optik ve elektronik aygıtlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu üç malzemenin birbirine göre bant aralıkları hizalanması Şekil 2.2’de görüldüğü gibidir: bahsedilen her üç tipte de bant hizalanması elde etmek mümkündür.



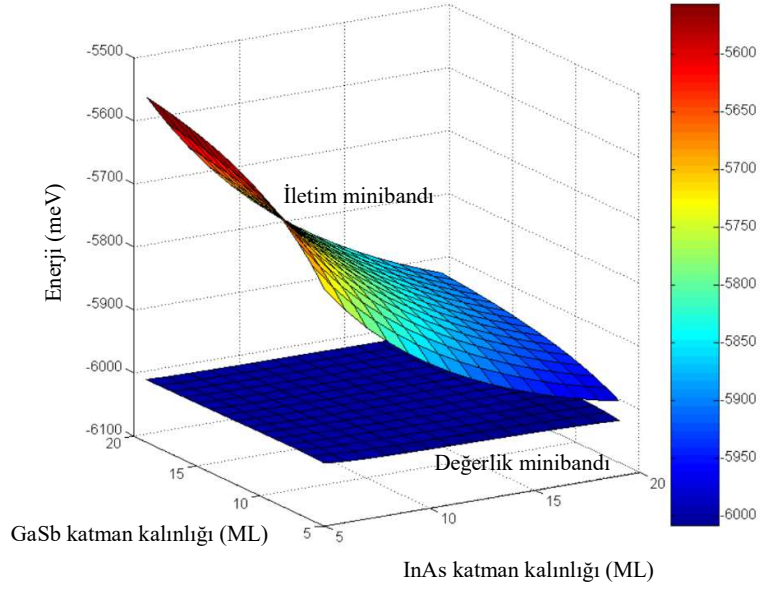
Şekil 2.2. InAs, GaSb ve AlSb'nin yasak bant aralıkları ve birbirlerine göre hizalanması.

InAs ve GaSb'nin oluşturduğu süperörgü yapısı tipik olarak 1,5-6 nm kalınlıktaki InAs ve GaSb ardışık katmanların çok sayıda üst üste büyütülmesi ile oluşur. Tip-II kırık bant hizalanması ile elektron ve boşluklar sırasıyla InAs ve GaSb katmanlar içinde sınırlanırlar ve bunlara eşlik eden dalga fonksiyonları aralarındaki engel genişliğinin az olması nedeniyle etkileşerek yapı içinde elektron ve boşluk mini bantlarını oluştururlar (Şekil 2.3). En düşük elektron minibandı ile en yüksek boşluk minibandı arasındaki fark süperörgünün bant aralığına denk gelir.



Şekil 2.3. *InAs/GaSb* nin oluşturduğu tip-II super örgü yapısında taşıyıcıların tünellemeleri ve mini bantların oluşumunun şematik gösterimi.

InAs ve GaSb katmanların kalınlıkları değiştirilerek süperörgü yapının kesim dalga boyu 3 – 30 μm arasında ayarlanabilir [15]. Elektronların etkin kütlesi boşlukların etkin kütesinden daha az olduğu için InAs kuyunun genişliğindeki değişimin, InAs kuantum kuyuda oluşan elektron enerji seviyelerinin konumuna etkisi fazladır [2]. Ayrıca GaSb bariyerlerin incilmesi elektronların komşu kuyulardaki elektronlarla etkileşimini artırır ve minibandın genişlemesini sağlar. Diğer taraftan boşlukların etkin kütlesi daha fazla olduğu için GaSb kuantum kuyunun genişliğindeki değişimin, GaSb kuantum kuyuda oluşan boşluk enerji seviyelerinin konumuna etkisi azdır [2]. Bununla birlikte etkin kütlelerin fazla olması boşlukların tünellemesini de engeller. Sonuç olarak InAs ve GaSb katman kalınlıklarını değiştirerek iletim ve değerlik minibantlarının konumlarını yani süperörgü yapının bant aralığını değiştirmek mümkündür: iletim minibandı katman kalınlıkları değişiminden, değerlik minibandının etkilenmesinden daha fazla etkilenir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. *InAs ve GaSb katman kalınlıklarının, iletim ve değerlik minibantları enerji seviyesine etkisi [16].*

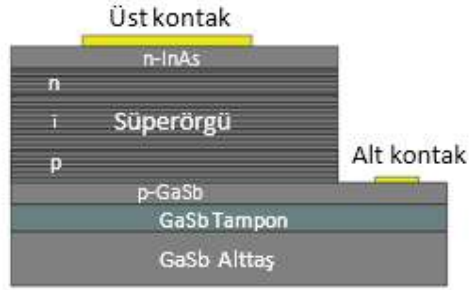
InAs/GaSb T2SL yapıların en önemli avatajlarından bir tanesi Auger yeniden birleşmesinin baskılanmasıdır. Auger yeniden birleşme sürecinde, iletim bandındaki bir azınlık elektron ile değerlik bandındaki bir çoğunluk boşluğun birleşerek değerlik bandındaki başka bir çoğunluk boşluğu değerlik bandında derinlere gönderir [17]. T2SL yapıda ağır boşluk (HH_1) ve hafif boşluk (LH_1) altbantları arasındaki boşluk bant aralığından (E_1-HH_1) büyük olacak şekilde ayarlanarak HH_1-LH_1 arasındaki geçişi zorlaştırılır ve Auger yeniden birleşmesi baskılanmış olur [17].

InAs/GaSb süperörgü yapı büyük etkin kütle ve bu sayede düşük tünelleme akımına sahiptir. Etkin kütle, bant aralığı ile doğru orantılıdır. Özellikle uzun dalgaboyunda algılama yapan yığın malzemeler düşük bant aralığına sahip olmaları sebebiyle tünelleme akımı fazladır. Ancak süperörgülerde etkin kütle bant aralığı değişiminden etkilenmez ve sabittir. Bu özellik uzun kesim dalgaboyuna sahip olan yapılarda yığın yapıya göre süperörgünün daha avantajlı olmasını sağlar.

2.2. InAs/GaSb T2SL P-i-n Dedektör Yapısı

P-i-n yapısı en temel ve en çok çalışılan InAs/GaSb T2SL fotodetektör yapısıdır. Bant yapısı bir p-n ekleme benzerlik gösterir: p ve n tipi katkılı bölgeler arasında katkısız i bölgesi büyütülerek fotonların soğurulduğu aktif tabakanın kalınlığı artırılır. Katkısız bölgenin kalınlığı arttıkça daha fazla foton soğurulur ancak kontak bölgelerine ulaşan taşıyıcı miktarı azalır. Bu sebeple katkısız bölgenin kalınlığı optimize edilerek dedektörün verimliliği optimum düzeye getirilir.

p-i-n yapıda InAs/GaSb T2SL fotodetektörün şematik gösterimi Şekil 2.5’de ki gibidir. p tipi katkılı bölgede GaSb katmanlar Be katkılı, InAs katmanlar katkısız, n tipi katkılı bölgede InAs katmanlar Si katkılı, GaSb katmanlar katkısız olarak büyütülmektedir.



Şekil 2.5. *p-i-n* yapıda tasarlanmış InAs/GaSb T2SL fotodiyot yapısının şematik olarak gösterimi [18].

3. DENEYSEL YÖNTEMLER

Bu bölüm, tez kapsamında çalışılan farklı tasarımlara sahip InAs/GaSb örneklerin üretim ve karakterizasyon aşamalarında kullanılan deneysel yöntemleri kapsamaktadır.

Katman ve arayüz kalınlıkları değişen InAs/GaSb T2SL farklı yapılar büyütülmüştür. Büyütülen yapıların elektriksel ve optik ölçümlerinin yapılabilmesi için fabrikasyonları yapılarak aygıt haline getirilmiştir. Aygıtların elektriksel ve optik ölçümleri yapılarak değişen kalınlıkların aygıtın arka plan katkı miktarına ve aygıt performansına etkisi araştırılmıştır.

InAs/GaSb T2SL fotodiyot yapıların büyütülmesi, aygıt fabrikasyonları, elektriksel ve optik karakterizasyonları Anadolu Üniversitesi, Fizik Bölümü, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

3.1. Epitaksiyel Büyütme

3.1.1 Moleküler Demet Epitaksi (MBE) Sistemi

MBE, ultra yüksek vakum ($\sim 10^{-10}$ Torr) ortamında, hassas kalınlık, kompozisyon ve morfoloji kontrol yeteneğine sahip, epitaksiyel kristal büyütme tekniğidir. MBE sisteminin ana karakteristiği olan ultra yüksek vakum ortamı atom veya moleküllerin herhangi bir etkileşime uğramadan kaynak hücrelerinden alttaş üzerine ulaşarak kristal ince film oluşturmasını sağlar. Ayrıca ultra yüksek vakum, yansıtımlı yüksek enerji elektron kırınımı (reflection high energy electron diffraction, RHEED) ve elipsometre gibi yerinde (in-situ) karakterizasyon yöntemlerinin kullanılmasına olanak sağlar. Büyüme sırasında alttaş ve kaynaklar kimyasal bir değişikliğe uğramaz yani büyüme fiziksel bir süreçtir. Dolayısıyla büyüme hızı malzeme akısı ve kaynak hücre sıcaklığı ile doğrudan ilişkilidir. Bu sayede her bir epikatmanın bileşimi ve katkı atomu miktarı hassas bir şekilde kontrol edilebilir. Epikatman kalınlığı ise kaynak hücrelerinin önlerinde bulunan kepenklerin (shuter) açık ve kapalı olma süreleri ayarlanarak 1 atom-katman (monolayer) hassasiyette ayarlanabilir.

3.1.2 InAs/GaSb Süperörgü Yapıların Büyütülmesi

Bu tez kapsamında çalışılan örnekler Anadolu Üniversitesi, Fizik Bölümü, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarında kurulu olan Veeco GEN20 MBE sistemi kullanılarak büyütülmüştür. Örneklerin büyütülmesi ve kristal karakterizasyonları ile ilgili çalışmalar bu tez kapsamında olmadığından burada bahsedilmeyecektir.

Tez kapsamında arayüz kalınlıkları değişen 5 örnek ve katman kalınlıkları değişen 5 örnekten oluşan 2 farklı örnek grubu çalışılmıştır. Tüm örnekler 2 inç GaSb alttaş üzerine p-i-n fotodiyot yapıda büyütülmüştür. GaSb alttaş üzerine sırasıyla 500 nm katkısız GaSb tampon katmanı, ardından 1000 nm p tipi GaSb alt kontak katmanı, daha sonra 40 tekrar p tipi, 60 tekrar katkısız, 40 tekrar n tipi SL katman ve son olarak 20 n tipi InAs üst kontak katmanı büyütülmüştür (Şekil 3.1).

20nm n-InAs:Si
40x n-InAs:Si/GaSb
60x i-InAs/GaSb
40x p-InAs/GaSb:Be
1000nm p-GaSb:Be
500nm i-GaSb
GaSb Alttaş

Şekil 3.1. Tez çalışması kapsamında kullanılan GaSb alttaş üzerine büyütülmüş InAs/GaSb SL p-i-n fotodiyot yapının yankesit olarak şematik gösterimi.

Arayüz kalınlıkları değişen örneklerde katman kalınlıkları sabit (9ML InAs/ 9 ML GaSb) tutularak InSb benzeri arayüz kalınlığı 0,5-0,8 ML aralığında değiştirilerek 140 tekrar SL büyütülmüştür (Tablo 3.1).

Tablo 3-1. Arayüz kalınlığı değişen örnek grubu

Örnek	InAs (ML)	GaSb (ML)	SL Periyot Kalınlığı (Å)	Arayüz (ML)
B-1	9	9	57,9 ± 0,1	0,5
B-2	9	9	58,6 ± 0,1	0,6
B-3	9	9	59,5 ± 0,1	0,74
B-4	9	9	59,7 ± 0,1	0,77
B-5	9	9	59,9 ± 0,1	0,8

Katman kalınlıkları değişen örnek grubunda InSb benzeri arayüz kalınlığı sabit tutularak InAs ve GaSb katman kalınları 7-9 ML aralığında değişen 5 farklı örnek 140 tekrar SL büyütülmüştür (Tablo 3.2).

Tablo 3-2. Katman kalınlıkları değişen örnek grubu

Örnek	InAs (ML)	GaSb (ML)	SL Periyot Kalınlığı (Å)
M-1	9	9	58,4 ± 0,1
M-2	8	9	54,4 ± 0,1
M-3	7	9	51,3 ± 0,1
M-4	7	8	47,8 ± 0,1
M-5	7	7	44,8 ± 0,1

3.2. Tek Piksel Fotodiyot (Aygıt) Fabrikasyonu

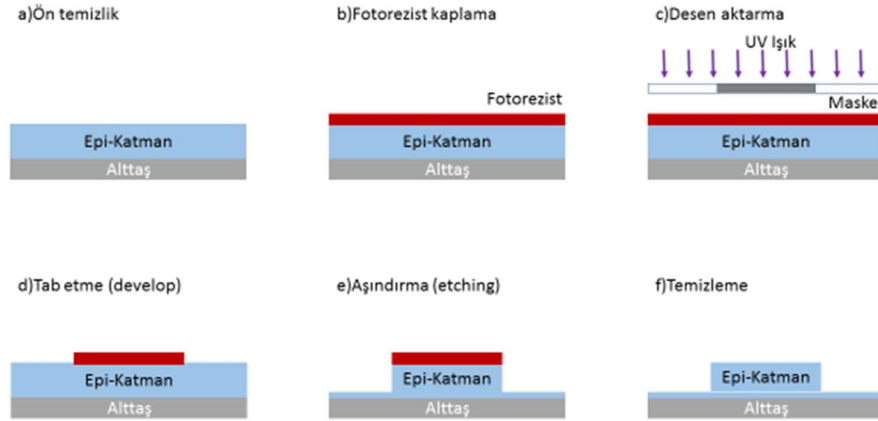
MBE sistemi ile büyütülen T2SL örneklerin elektriksel ve optik karakterizasyonlarının yapılabilmesi için aygıt haline getirilmesi gerekiyor. Fabrikasyon süreci mesa oluşturulması ve metal kaplama olmak üzere 2 bölümden oluşmaktadır.

3.2.1 Mesa Oluşturulması

Mesa oluşturma sürecine ilk olarak temizlik işlemi ile başlanır. Örnek üzerindeki kirlilikler fabrikasyon sürecini olumsuz etkileyerek aygıtın performansını düşürebilir. Bu yüzden fabrikasyona başlamadan önce örnekler önce aseton sonra izopropil alkol

içerisinde 5'er bekletilir. Daha sonra deiyonize su ile yıkanarak yüksek saflıkta azot ile kurutulur ve son olarak 5 dk 150°C'de tutularak yüzeyde tutunan su ve diğer kirlilikler buharlaştırılır (Şekil3.2 a).

Temizlik işleminden sonra örnek üzerine fotorezist (AZ5214E-IR) kaplanır ve 110°C'de 1 dakika bekletilerek ön kurutma (soft-bake) işlemi yapılır (Şekil3.2 b). Fotorezist kurutulduktan sonra mesa deseni maske hizalayıcı kullanılarak aktarılır. Mesa deseni bulunan maske örnek üzerinde mesa oluşturulmak istenilen konuma uygun şekilde yaklaştırılır ve UV ışık ile pozlanır. Maskede şeffaf olan kısımlar ışığı geçirir ve ışığa maruz kalan fotorezistin kimyasal özelliklerinde değişiklik meydana gelir (Şekil 3.2 c). UV ışık ile pozlanan fotorezist kaplı örnek sulandırılmış AZ400K çözeltisinde bekletilerek fotorezistin ışık gören kısımları çözündürülür (develop) ve sonrasında deiyonize su ile durulanıp, azot ile kurutulur (Şekil3.2 d). Bu işlemden sonra örnek 120°C'de 5 dk bekletilerek (hard-bake) fotorezist, kimyasal aşındırma işlemine hazır hale getirilir.



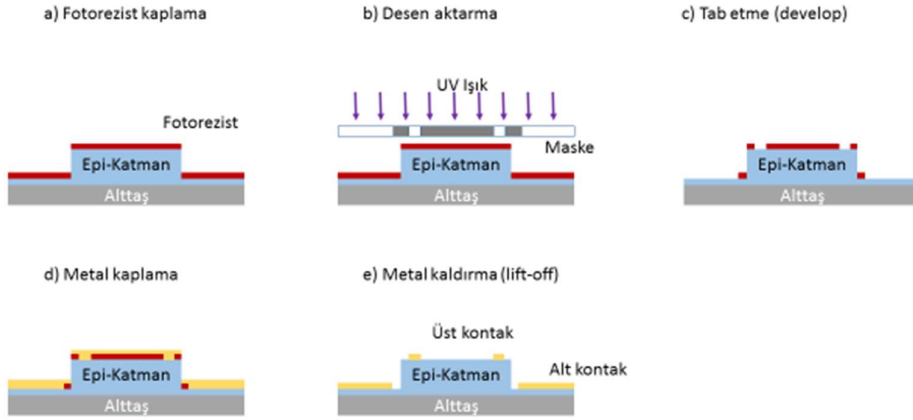
Şekil 3.2. Mesa oluşturma süreci şematik gösterimi

Islak aşındırma işlemi için sitrik asit ($C_6H_8O_7$), fosforik asit (H_3PO_4), hidrojen peroksit (H_2O_2) ve sudan oluşan çözelti kullanılmıştır. Örnekler çözeltinin içerisinde bekletilerek alt kontak bölgesine kadar aşınması sağlanmıştır (Şekil 3.2 e). Aşındırma

işleminde sonra örnekler aseton, alkol ve deiyonize su ile temizlenip kurutulularak metal kaplama işlemine hazır hale getirilmiştir.

3.2.2 Metal Kaplama

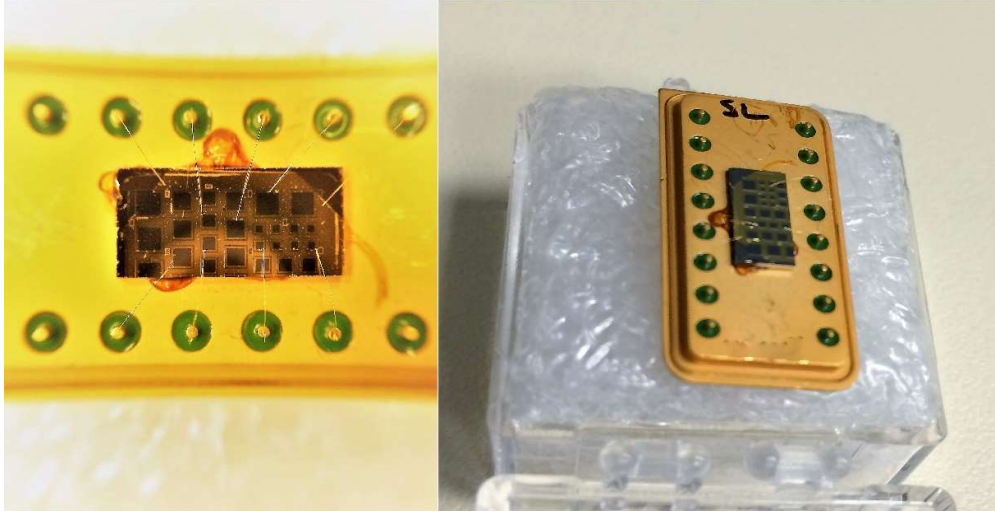
Metal kaplama için titanyum (Ti), altın (Au) metalleri tercih edilmiştir. Çünkü Ti-Au hem GaSb alt kontak hem de InAs üst kontak için omik kontak oluşmasını sağlamaktadır. Alt ve üst metal kontak deseni oluşturmak için örnekler tekrar fotorezistle kaplanıp (Şekil 3.3 a) ve alt, üst kontak deseni aktarılmıştır (Şekil 3.3 b). Daha sonra tab edilen (Şekil 3.3 c) örneklere elektron demeti buharlaştırma (e-beam evaporation) cihazı kullanılarak 5nm Ti, 200nm Au kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.3d). Metal kaplı örnekler aseton içerisinde atılarak fotorezist ve fotorezist üzerindeki metal temizlenmiştir (lift-off, Şekil 3.3. e).



Şekil 3.3. *Aygıt yapısı oluşturulan örnekler üzerine kaplanan Ohmik metal kontak sürecinin şematik gösterimi.*

3.3. Karakterizasyon

Tek piksel fotodiyot fabrikasyonu yapılan örnekler çift taraflı pakete (DIP, dual in-line package) yapıştırılarak tel bağlama cihazı ile elektriksel bağlantıları yapılarak karakterizasyona uygun hale getirilmiştir (Şekil 3.4).



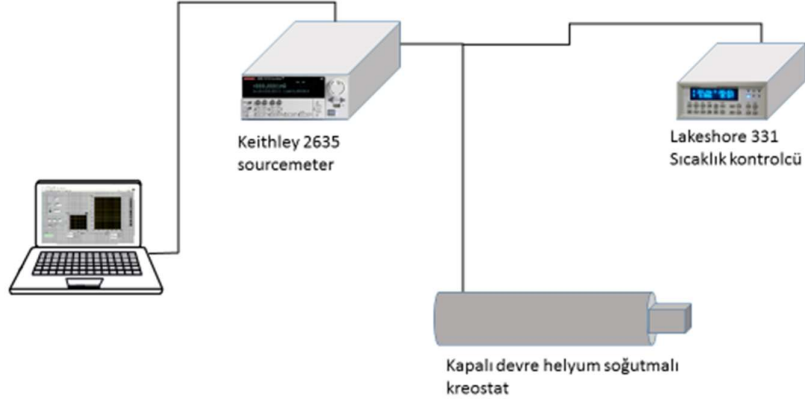
Şekil 3.4. *Farklı büyüklüklerde tek piksel olarak fabrikasyonu tamamlanmış fotodiyot aygıtların elektriksel ölçüm için örnek taşıyıcıya nakledilip altın tel bağlantılarının alınmış hali.*

3.3.1 Karanlık Akım Ölçümü

Karanlık akım dedektörün kalitesi hakkında fikir verebilen temel parametrelerden birisidir. Kristal yapıdaki ve yüzeydeki kusurlar karanlık akıma doğrudan etki eden faktörlerdir.

Farklı sıcaklıklarda karanlık akım ölçümü yapmak için kapalı devre helyum kreyostat (cryostat) sistemi kullanılmıştır. Örneklerin optik olarak uyarılmasını engellemek için soğuk yüzeye bakacak şekilde soğuk kalkan içerisine yerleştirilmiştir. Sıcaklık kontrolü Lakeshore 331 sıcaklık kontrolcüsü ile yapılmıştır. Voltaj kaynağı ve akımölçer olarak Keithley 2635 kaynak ölçer (sourcemeter) kullanılmıştır. Labview

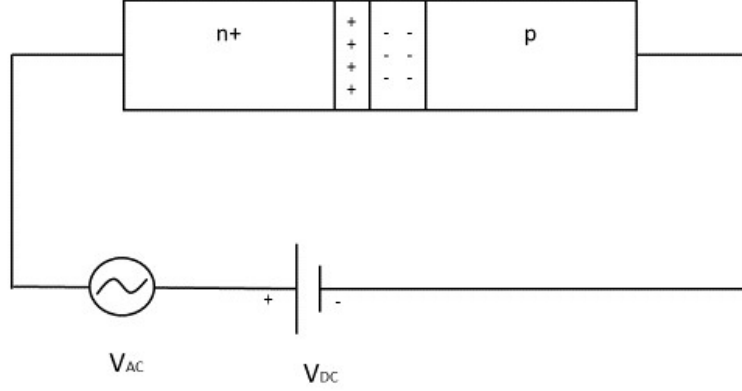
programı kullanılarak bilgisayar GPIB portu üzerinden Keithley 2635 ile haberleşmesi sağlanmıştır ve ölçüm verileri kaydedilmiştir (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Güç kaynağı/akımölçer, sıcaklık kontrolcüsü ve kreyostattan oluşan karanlık akım ölçüm düzeneği.

3.3.2 Kapasitans Voltaj Ölçümü

InAs/GaSb T2SL gibi yaratılan foto-akımı azınlık taşıyıcılar ile taşıyan aygıtların performansı tüketim bölgesinin (arka plan) taşıyıcı miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Kristal büyütme koşulları optimize edilerek arka plan taşıyıcı yoğunluğu azaltılarak aygıt performansı iyileştirilebilir. Taşıyıcı yoğunluğunu ölçmek için kullanılan farklı yöntemler mevcut ancak kapasitans voltaj (C-V) yöntemi sahip olduğu avantajlar nedeniyle tercih edilmiştir. GaAs alttaş üzerine büyütülmüş T2SL yapının taşıyıcı yoğunluğunu hall etkisi yöntemi ile ölçmek mümkündür ancak GaSb üzerine büyütülen süper örgü yapıyı hall yöntemi ile ölçebilmek için GaSb alttaşın etkisini ortadan kaldıracak bir method gereklidir. C-V yöntemi ile alttaş etkisi olmadan sadece tüketim bölgesinin taşıyıcı yoğunluğunu ölçmek mümkündür. Optik ve elektriksel ölçüm için paketlenmiş bir örnek başka bir işleme gerek olmadan C-V yöntemi için kullanılabilir.



Şekil 3.6. *C-V ölçümü devre şeması.*

Ters beslem durumundaki bir yarıiletken eklemın tüketim bölgesinin genişliği uygulanan voltaja bağlıdır. C-V yöntemi bu ilişkidən yararlanır. Ters beslem durumundaki bir pn eklemde elektronlar p kontak bölgesi ile boşluklar n kontak bölgesi ile etkileşir ve n bölgesinde pozitif yüklü donör iyonlar, p bölgesinde negatif yüklü alıcı iyonlar oluşur (Şekil3.6). Ters beslem gerilimi arttıkça iyonların miktarı da artar ve tüketim bölgesi genişler. Bu ilişkidən yola çıkarak tüketim bölgesi üzerine düşen diferansiyel kapasitansı Eşitlik 3.1 şeklinde ifade edilebilir. Bu eşitlikte Q_s yarıiletkenin yükünü, V eklem üzerindeki voltajı ifade eder.

$$C = - \frac{dQ_s}{dV} \quad (3.1)$$

Eklemın yük nötrlüğünü sağlamak için dQ_s eşitlik 3.2'deki gibi tanımlanır.

$$dQ_s = -qAN(W)dW \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte tüketim bölgesinde mobil yük olmadığı, tüm donör ve alıcıların iyonlaştığı varsayılmıştır. Eşitlik 3.1 ve 3.2 birleştirilirse Eşitlik 3.3 elde edilir.

$$C = -\frac{dQ_s}{dV} = qN(W) \frac{dW}{dV} \quad (3.3)$$

p-n eklemnin kapasitansı eşitlik 3.4 ile ifade edilebilir.

$$C = \frac{\epsilon_s \epsilon_0 A}{W_{Dep}} \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabitini, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabitini, A p-n eklemnin enine kesit alanını, W tüketim bölgesinin genişliğini ifade eder.

$$W_{Dep} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0}{qN_{Red}} (V_{bi} - V)} \quad (3.5)$$

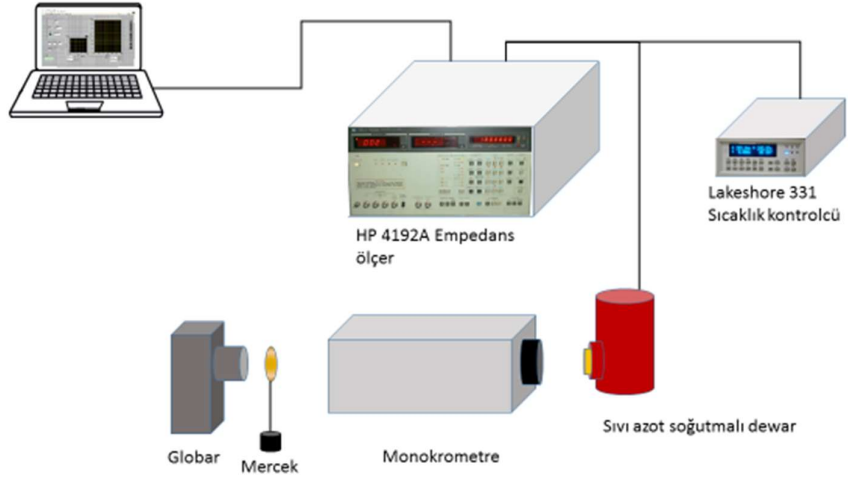
Bu eşitlikte V_{bi} built-in voltajı, V beslem voltajını, N_{Red} tüketim bölgesi taşıyıcı yoğunluğunu ifade eder. Sonuç olarak N_{Red} Eşitlik 3.6 şeklinde ifade edilir.

$$\begin{aligned} N_{red}(W) &= -\frac{C^3}{q\epsilon_s \epsilon_0 A^2 \left(\frac{dC}{dV}\right)} \\ &= -\frac{2}{q\epsilon_s \epsilon_0 \left(\frac{d(A^2/C^2)}{dV}\right)} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Eşitlik 3.6 kullanılarak dielektrik sabiti ve kesit alanı bilinen bir eklemnin taşıyıcı yoğunluğu C-V yöntemi ile hesaplanabilir.

C-V yöntemi kullanılarak ölçüm yapılacak bir p-n eklemnin bir tarafının daha fazla katkılanmış olması gerekmektedir. Tüketim bölgesinin büyük bir bölümü daha az katkılanmış bölgede kalacağı için bu yöntem ile daha az katkılı olan bölgenin taşıyıcı yoğunluğu kolayca ölçülebilmektedir. Ancak p-i-n fotodedektör yapısında tüketim bölgesi katkısız (i) bölge boyunca oluşacağından katkısız (i) bölgenin taşıyıcı yoğunluğu ölçülebilir.

Fotokapasitans ölçümü için kapasitans voltaj ölçümünde kullanılan ekipmanlara ek olarak Newport Oriel 60000 serisi globar ışık kaynağı, ve ışık dalgaboyu taraması için Newport Oriel MS257 monokrometre kullanılmıştır. Örnekler sıvı azot soğutmalı dewar içerisine yerleştirilmiştir. Labview programı kullanılarak monokrometre ve empedans ölçere komut verilmiş veriler bilgisayara kaydedilmiştir.



Şekil 3.8. Örneklerin fotokapasitans ölçümü için kullanılan düzeneğin şematik olarak gösterimi.

4 ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYON

Bu bölümde örneklerin karanlık akım ve kapasitans ölçüm sonuçlarına yer verilecektir.

4.1. Karanlık Akım Ölçümü

Bu bölümde örneklerin karanlık akım yoğunlukları ve diferansiyel direnç (R.A) değerleri verilecektir. Bir aygıtın karanlık akım yoğunluğu ve direnci Denklem 4.1 ve Denklem 4.2 ile ifade edilebilir. Aygıtın karanlık akım yoğunluğu, yığın (bulk) akım yoğunluğu ve yüzey akım yoğunluğunun toplamı ile oluşur. Dolayısıyla aygıtın karanlık akım yoğunluğunu baskın olan akım belirler.

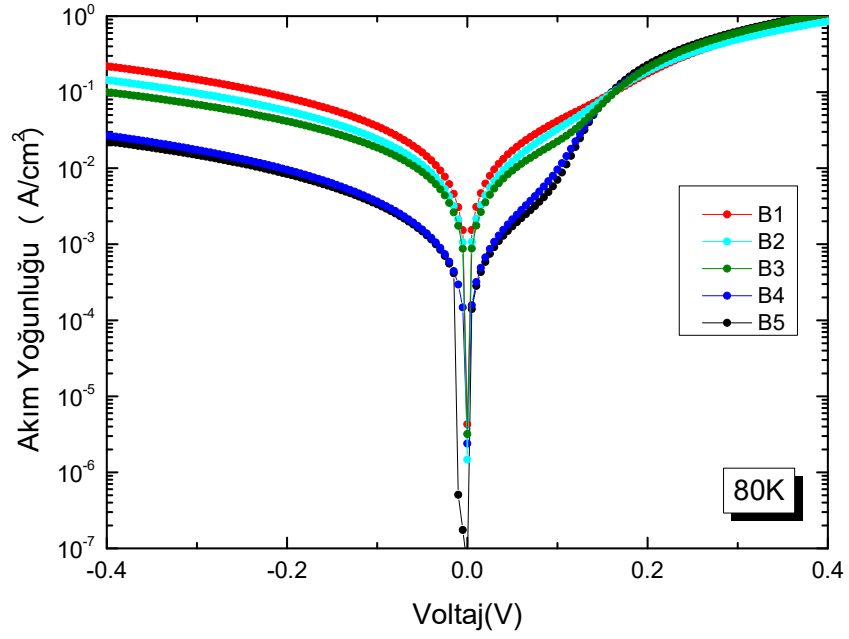
$$J_{aygit} = J_{yığın} + J_{yüzey} \quad (4.1)$$

$$\frac{1}{R_{aygit}} = \frac{1}{R_{yığın}} + \frac{1}{R_{yüzey}} \quad (4.2)$$

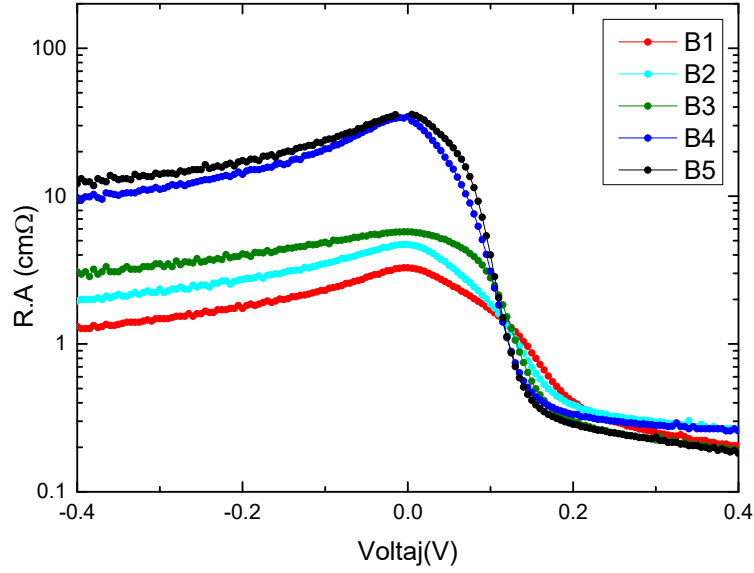
4.1.1 Arayüz Kalınlığı Değişen Örnek Grubu

Arayüz kalınlığı değişen örnek grubunun karanlık akımları 80 K'de ölçülmüş, akım yoğunluğu grafikleri Şekil 4.1'de ve R.A grafikleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Diyotların R.A değerleri Denklem 4.3 ile hesaplanmıştır. Arayüz kalınlığı B1'den B5'e doğru artmaktadır (3. Bölümde detayları verilmiştir), arayüz kalınlığı arttıkça diyot karakterinin daha belirginleştiği ve B4 ile B5 numaralı örneklerin diğerlerinden daha belirgin biçimde diyot karakteristiği gösterdiği görülmektedir. Ancak karanlık akım yoğunluğunun öngörülenden yüksek ve R.A direnç değerinin öngörülenden düşük oluşu yüzey kaçak akımının ve oluşma-birleşme (G-R) akımının varlığına işaret etmektedir. Fabrikasyon süreci iyileştirilerek ve yüzey pasivasyonu yapılarak örneklerin R.A değerleri arttırılabilir.

$$R.A = \frac{dI}{dV} \cdot A \quad (4.3)$$



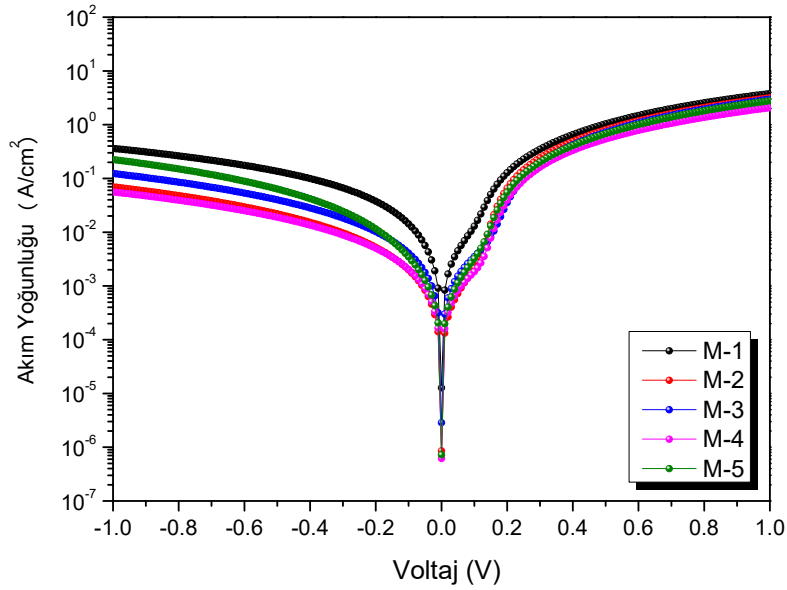
Şekil 4.1. Arayüz kalınlığı değişen örnek grubunun karşılaştırmalı olarak verilen akım yoğunluğu grafikleri.



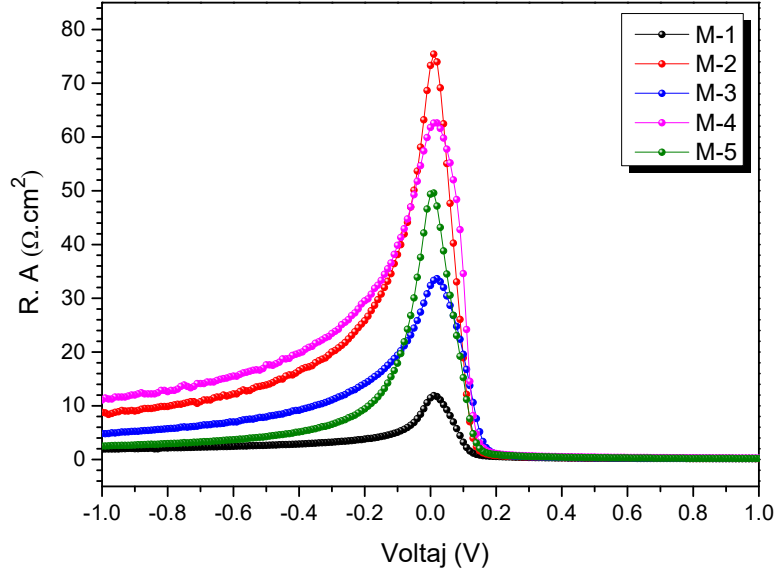
Şekil 4.2. Arayüz kalınlığı değişen örnek grubunun karşılaştırmalı olarak sunulan R.A grafikleri.

4.1.2 Katman Kalınlıkları Değişen Örnek Grubu

Arayüz kalınlığı değişen örnek grubunun karanlık akımları 80 K'de ölçülmüş, akım yoğunluğu grafikleri Şekil 4.3'de ve R.A grafikleri Şekil 4.4'de verilmiştir. Diyotların R.A değerleri Denklem 4.3 ile hesaplanmıştır. M1 numaralı örneğin diğerlerine kıyasla daha kötü bir diyot karakteristiği gösterdiği görülmektedir. Karanlık akım değerlerinin öngörülenden yüksek ve diferansiyel direnç değerlerinin öngörülenden düşük olması yüzey kaçak akımı ve G-R akımının varlığına işaret etmektedir. Fabrikasyon süreci iyileştirilerek ve yüzey pasivasyonu yapılarak örneklerin R.A değerleri arttırılabilir.



Şekil 4.3. Katman kalınlığı değişen örnek grubunun akım yoğunluğu voltaj grafikleri [19].

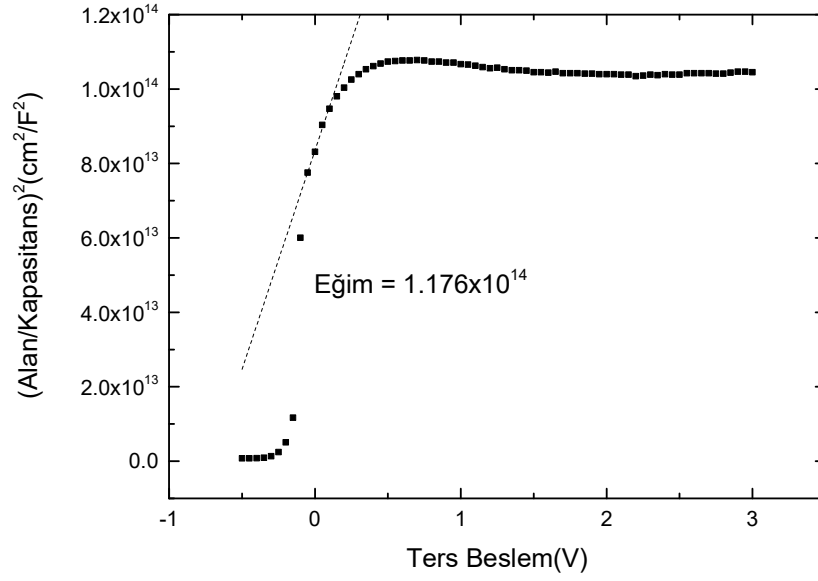


Şekil 4.4. Katman kalınlığı değişen örnek grubunun karşılaştırmalı olarak sunulan $R.A$ eğrileri [19].

4.2. Kapasitans Ölçümü

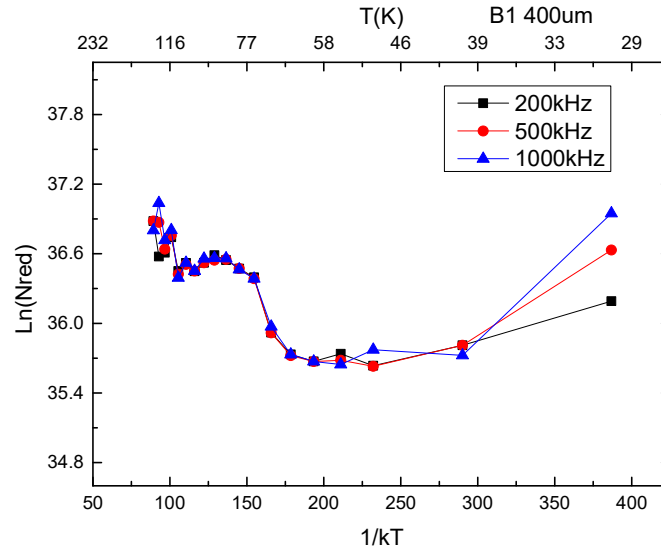
Bu bölümde sıvı azot sıcaklığında kapasitans ölçüm sonuçları, 30 K ile 130 K arasında sıcaklık bağımlı kapasitans ölçüm sonuçları, fotokapasitans ölçüm sonuçları ve sıcaklık bağımlı ölçümlerden türetilen aktivasyon enerjileri verilecektir.

Arka plan taşıyıcı yoğunlukları Bölüm 3'te verilen denklemler kullanılarak hesaplanmıştır. InAs/GaSb yapının dielektrik sabiti 15,4 olarak seçilmiştir [20]. Arka plan taşıyıcı yoğunluğu (Nred) A/C 'nin karesine karşı ters beslem voltajı grafiğinin eğimini Denklem 3.6'da yerine koyarak hesaplanır. Örneğin Şekil 4.5'te görülen grafiğin eğimi Denklem 3.6'da yerine konularak arka plan taşıyıcı yoğunluğu $7,785 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplanır.

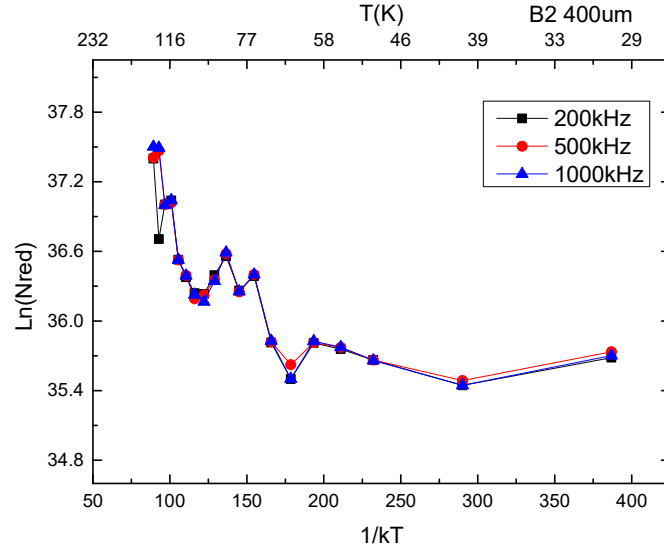


Şekil 4.5. (Alan/kapasitans)'in karesi, ters beslem grafiği.

4.2.1 Arayüz Kalınlığı Değişen Örnek Grubu

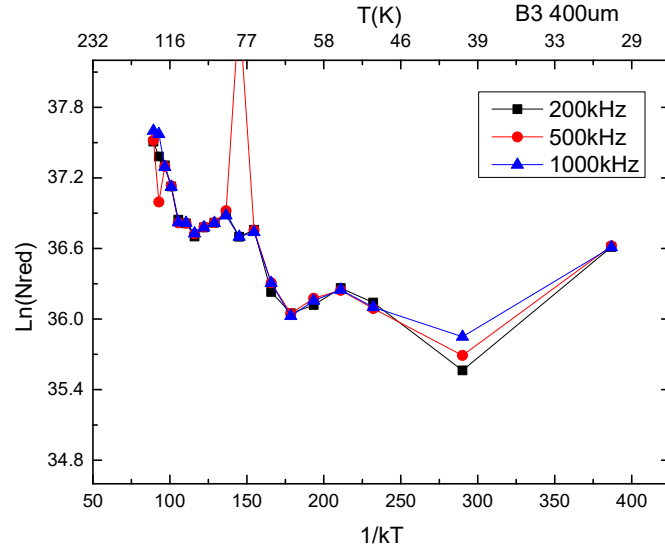


Şekil 4.6. B1 örneğinin $\text{Ln}(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu})$ $1/kT$ grafikleri.

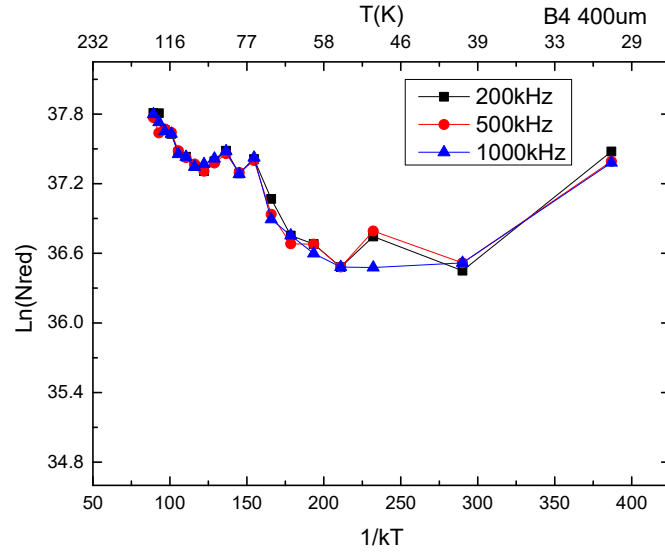


Şekil 4.7. B2 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu})$ $1/kT$ grafikleri.

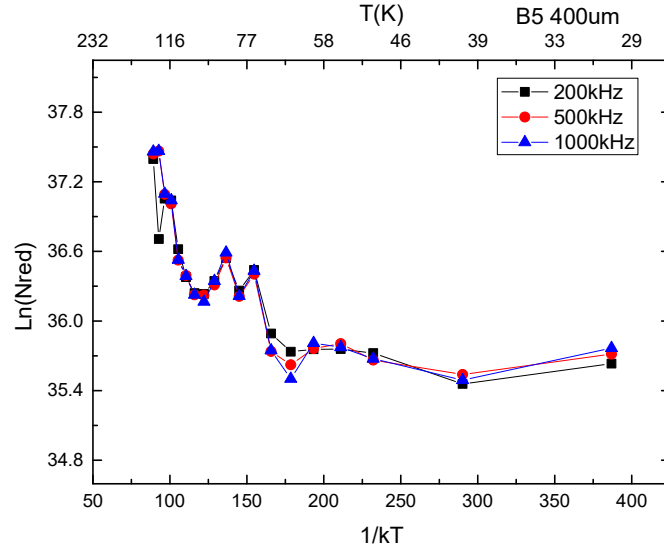
Arayüz kalınlığı değişen örnek grubunun $\ln(N_{\text{red}})-q/kT$ grafikleri (Arrhenius grafikleri) Şekil 4.6, Şekil 4.7, Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde 30 K ile 60 K arası, 75 K ile 95 K arası ve 100 K ile 130 K arası olmak üzere 3 farklı bölge gözlenmektedir. 30 K ile 60 K arası çok sığ enerji tuzaklarına karşılık gelmektedir ve düşük sıcaklıklarda iyonlaşmıştır. Diğer iki bölge farklı büyüklüklerde tuzak enerji seviyelerine karşılık gelmektedir. 75 K ile 95 K arasındaki bölgeye karşılık gelen aktivasyon enerjileri Tablo 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.8. B3 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu})$ $1/kT$ grafikleri.



Şekil 4.9. B4 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu})$ $1/kT$ grafikleri.

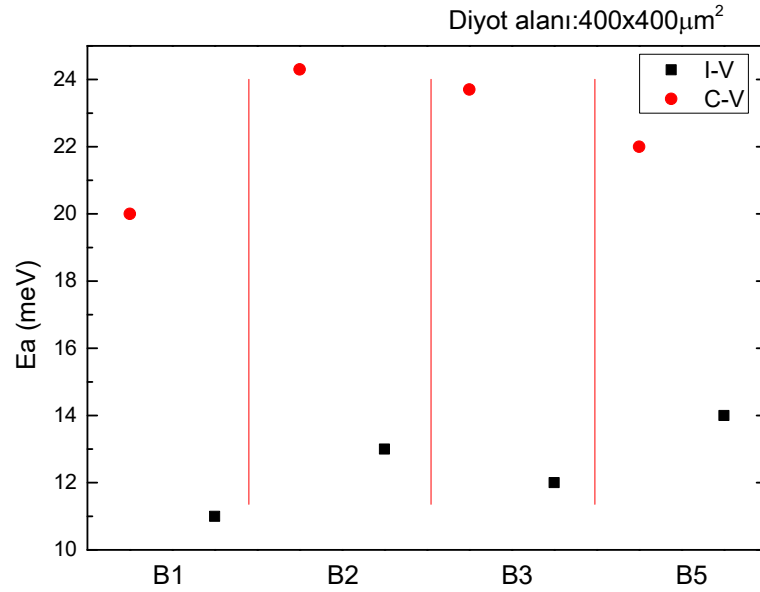


Şekil 4.10. B5 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu})$ $1/kT$ grafikleri.

Arayüz kalınlığı değişen örnek grubunun karanlık akım ve kapasitans ölçümleri ile elde edilen aktivasyon enerjileri grafiği Şekil 4.11’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde akımdan elde edilen veriler ile kapasitanstan elde edilen verilerin B1’den B5’e doğru (B4 hariç) olan davranışları benzerlik göstermektedir.

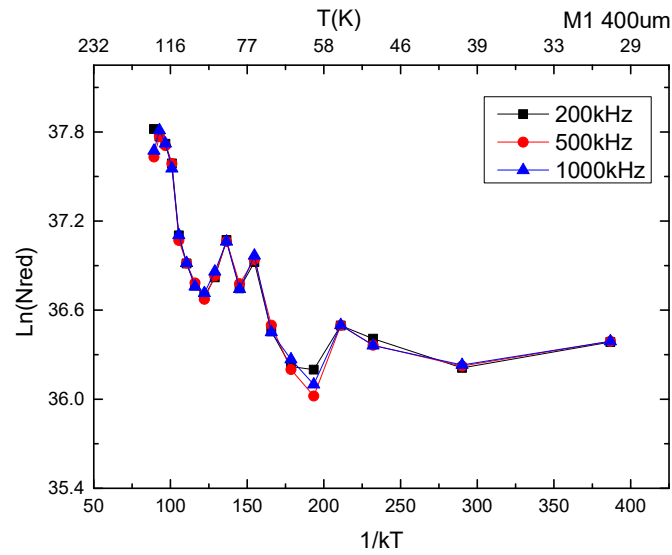
Tablo 4-1. Arayüz kalınlığı değişen örnek grubunun aktivasyon enerjileri.

Ölçüm Yöntemi	C-V		I-V	
	400x400 μm^2	800x800 μm^2	400x400 μm^2	800x800 μm^2
B1	18/21/21	21/24/22	11	9
B2	25/23/25	17/13/18	13	14
B3	21/30/20	18/16/12	12	12
B4	16/14/15	20/19/19	15	9
B5	19/22/26	28/30/24	14	11

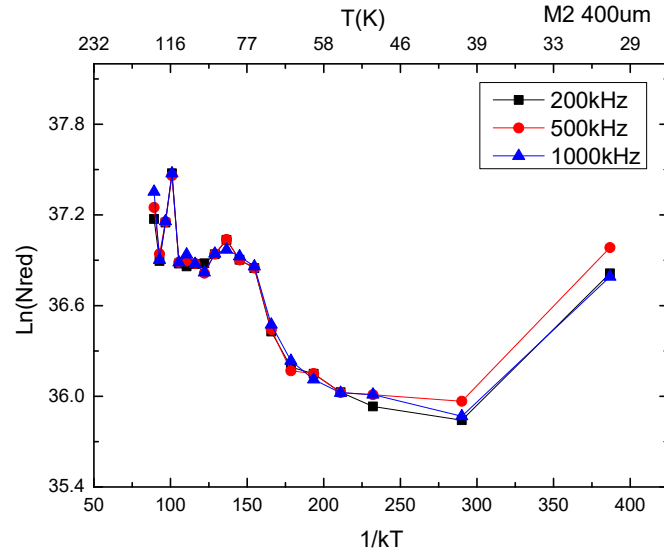


Şekil 4.11. B1, B2, B3 ve B5 örneklerinin akım ve kapasitans ölçümleri ile türetilen aktivasyon enerjileri ortalaması ile oluşturulan grafik.

4.2.2 Katman Kalınlıkları Değişen Örnek Grubu

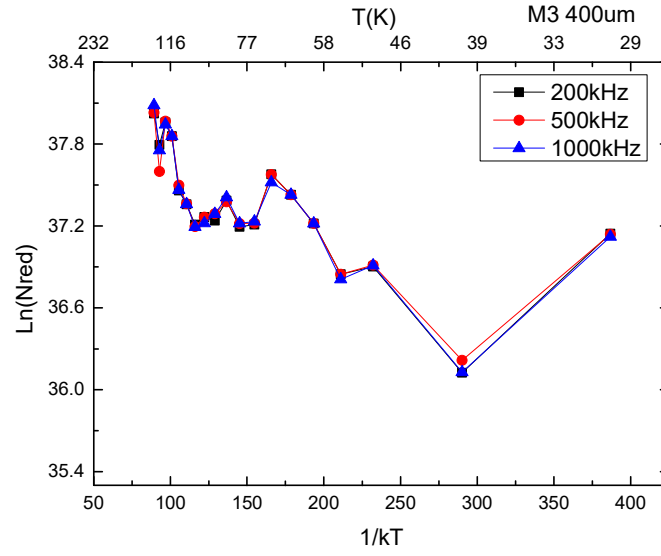


Şekil 4.12. M1 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu})$ $1/kT$ grafikleri.

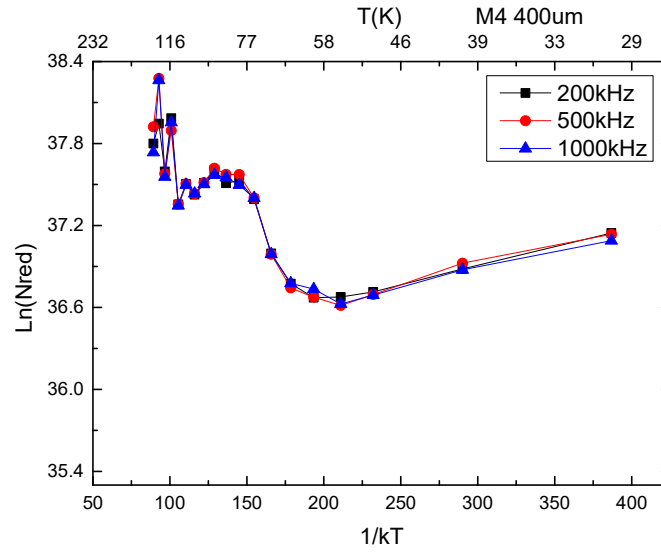


Şekil 4.13. M2 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu})$ $1/kT$ grafikleri.

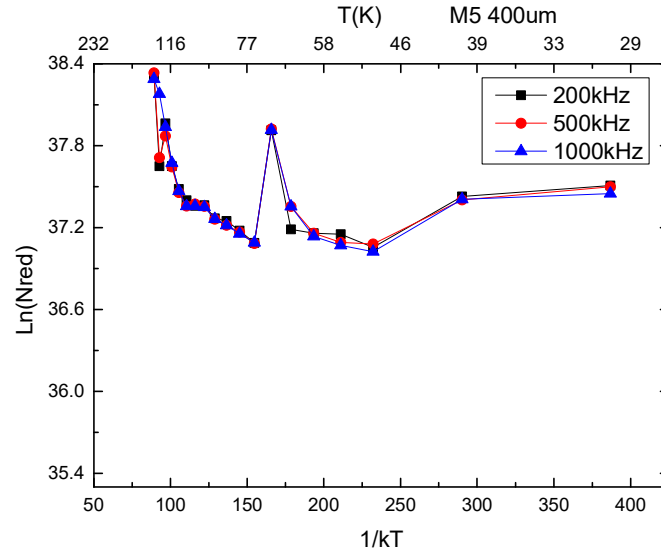
Katman kalınlığı değişen örnek grubunun $\ln(N_{\text{red}})$ - q/kT grafikleri Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da verilmiştir. Grafikler incelendiğinde 30 K ile 60 K arası, 75 K ile 95 K arası ve 100 K ile 130K arası olmak üzere 3 farklı bölge gözlenmektedir. 30 K ile 60 K arası çok sık enerji tuzaklarına karşılık gelmektedir ve düşük sıcaklıklarda iyonlaşmıştır. Diğer iki bölge farklı büyüklüklerde tuzak enerji seviyelerine karşılık gelmektedir. 75 K ile 95 K arasındaki bölgeye karşılık gelen aktivasyon enerjileri Tablo 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.14. M3 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu})$ $1/kT$ grafikleri.



Şekil 4.15. M4 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu})$ $1/kT$ grafikleri.

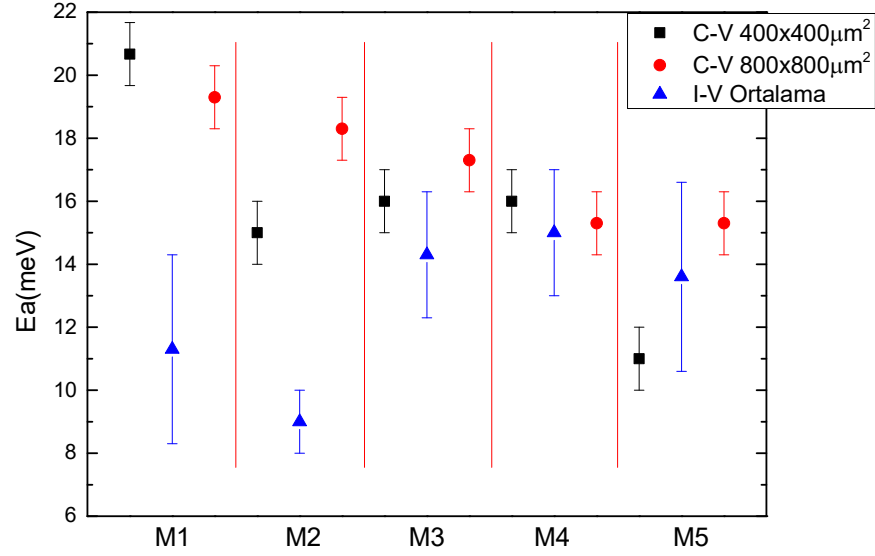


Şekil 4.16. M5 örneğinin $\ln(\text{arka plan taşıyıcı yoğunluğu})$ $1/kT$ grafikleri.

Tablo 4-2. Katman kalınlığı değişen örnek grubunun aktivasyon enerjileri.

Ölçüm Yöntemi	C-V		I-V		
	400x400 μm^2	800x800 μm^2	400x400 μm^2	600x600 μm^2	800x800 μm^2
M1	18/23/21	20/18/20	16	7	11
M2	15/15/15	19/18/18		9	
M3	16/16/16	19/17/16	13	13	17
M4	19/15/14	15/15/16		13	17
M5	10/11/12	15/15/16	9	15	7

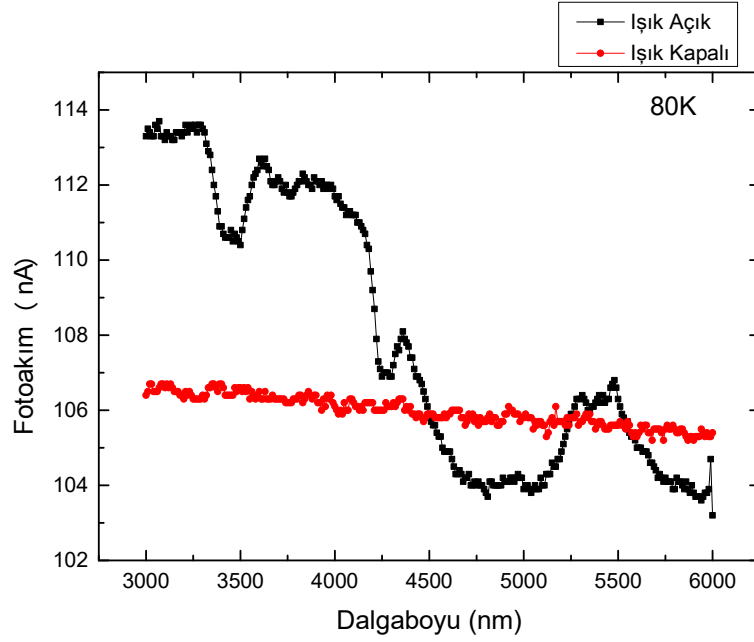
Katman kalınlığı değişen örnek grubunun karanlık akım ve kapasitans ölçümleri ile elde edilen aktivasyon enerjileri grafiği şekil 4.17’de verilmiştir.



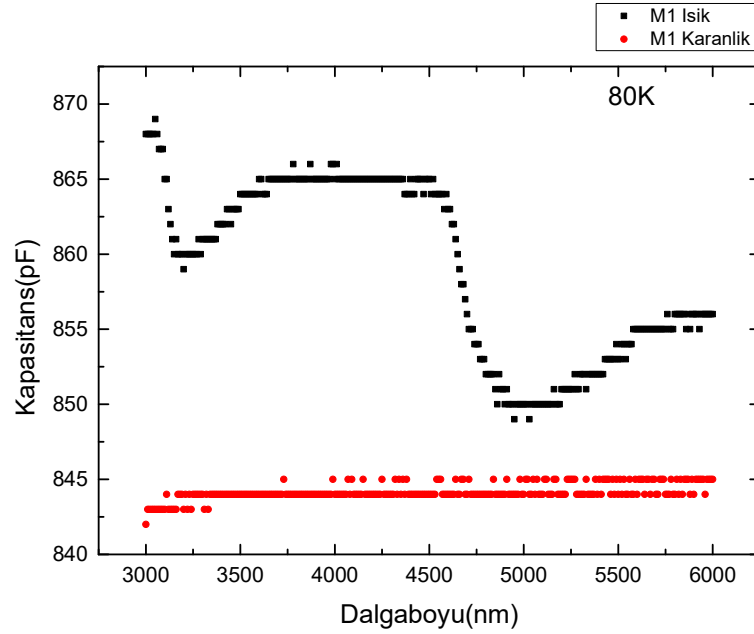
Şekil 4.17. Farklı mesa boyutlarındaki örneklerin akım ölçümlerinden türetilen aktivasyon enerjileri ortalamaları ve farklı frekanslarda kapasitans ölçümlerinden türetilen aktivasyon enerjilerinin ortalamaları.

4.3. Fotokapasitans Ölçümü

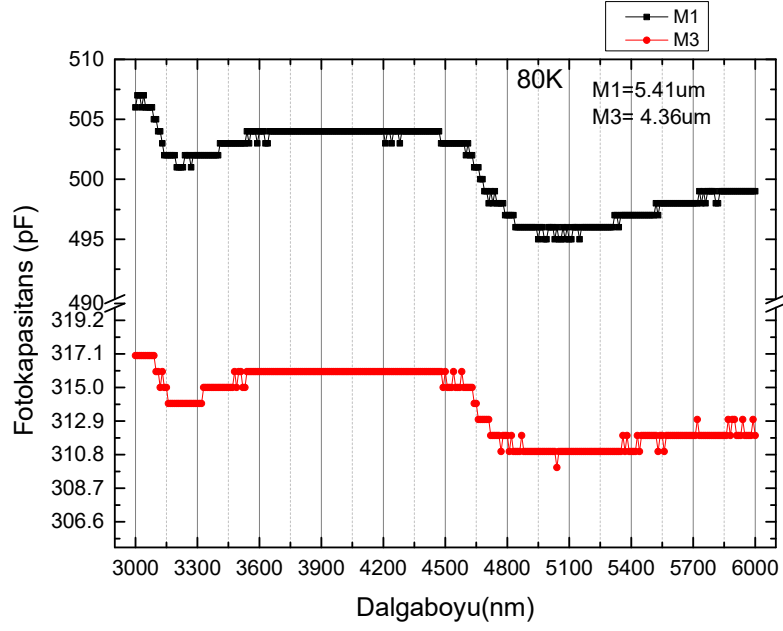
Fotokapasitans ölçümü yapılmadan önce örneğin doğru hizalandığından emin olmak için karanlıkta ve ışık altında dalgaboyu taraması yapılarak fotoakım ölçümü yapılmıştır. Fotoakım – dalgaboyu grafiği Şekil 4.18’de verilmiştir. Daha sonra fotokapasitans ölçümleri yapılmış ancak elde edilen veriler yapının enerji seviyeleri hakkında yorum yapmak için yeterli değildir. M1 numaralı örnek için monokrometrede kepenk (shutter) açıkken ve kapalıyken yapılan ölçüm sonuçları (Şekil 4.19) incelendiğinde ışık varken fotokapasitansın değişimi gözlemlenmektedir. Ancak M1 ve M3 numaralı örneklerin kesim dalga boyu sırasıyla 5,41µm ve 4,36µm olmasına rağmen Şekil 4.20 incelendiğinde fotokapasitans değerlerini kesim dalgaboyları ile ilişkilendirmek mümkün değildir. Fotokapasitanstaki değişimlerin atmosferik soğurmadan kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.18. $\lambda_{\%50}$ kesim dalga boyu $4.36 \mu\text{m}$ olan M3 örneğinin ışık altında ve karanlıkta ölçülen fotoakım – dalgaboyu grafiği.



Şekil 4.19. $\lambda_{\%50}$ kesim dalga boyu $5.41 \mu\text{m}$ olan M1 örneğinin karanlık ve ışık altında fotokapasitans grafikleri.



Şekil 4.20. *M1* ($\lambda_{\%50}$ kesim dalga boyu 5,41 μm) ve *M3* ($\lambda_{\%50}$ kesim dalga boyu 4,36 μm) örneklerinin fotokapasitans – dalgaboyu grafikleri.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında orta kızılötesi (MWIR) bölgesinde algılama yapan InAs/GaSb tip-II süperörgü p-i-n fotodiyot yapılarının elektriksel performansı analiz edilmiştir.

Tez kapsamında çalışılan örneklerin fabrikasyon süreçlerinde yüzey pasivasyonunun olmaması, hem karanlık akım hem de kapasitans ölçümlerini olumsuz yönde etkilemiştir. Kapasitans voltaj ölçümlerinden türetilen arka plan taşıyıcı miktarlarının bir miktar fazla çıkmıştır. Bu yöntemle ölçülen taşıyıcı yoğunluğuna yapı içerisindeki kusurlar da katkıda bulunmaktadır. Bu bilgilerden yola çıkarak örneklerin kusur miktarlarının fazla olduğu ve bu kusurların oluşturduğu tuzak seviyelerinden ötürü taşıyıcıların kontak bölgelerine ulaşmadan tuzaklandığı düşünülebilir.

Fotokapasitans ölçümleri denenmiş fakat yeterli bir sonuç alınamamıştır. Buradan iki sonuç çıkartılabilir, birincisi fotokapasitans yöntemi InAs/GaSb süperörgü yapıyı ölçmek için uygun bir yöntem değildir, ikincisi ölçüm düzeneği iyileştirilerek sonuç alınabilir. Ölçüm düzeneğini iyileştirmek için arka planın etkisi ortadan kaldırılabilir ve daha küçük kapasitansları ölçebilen bir empedans ölçer kullanılabilir. Örneklerin yüzey pasivasyonları yapılarak yüzey kaçak akımlarının ölçümler üzerinde ki etkisi kaldırılabilir daha doğru sonuçlar elde edilebilir.

KAYNAKÇA

- [1] E. A. Plis (2007). *Mid-IR Type-II InAs/GaSb Nanoscale Superlattice Sensors, Doktora Tezi*, Albuquerque, New Mexico: The University of New Mexico.
- [2] G. A. Chen (2015). *Type-II InAs/GaSb Superlattices Infrared Photodetector Optimization and Gated Photodetector Array Realization, Doktora Tezi*, Evanston, Illinois: Northwestern University.
- [3] J. Phillips, K. Kamath ve P. Bhattacharya (1988). Far-infrared photoconductivity in self-organized InAs quantum dots, *Applied Physics Letters*, cilt 72, no. 16, p. 2020.
- [4] H. Mohseni, E. Michel, J. Sandoen, M. Razeghi, W. Mitchel ve G. Brown (1997). Growth and characterization of InAs/GaSb photoconductors for long wavelenght infrared range, *Applied Physics Letters*, cilt 71, no. 10, pp. 1403-1405.
- [5] J. Johnson, L. Samoska, A. Gossard, J. Merz, M. Jack, J. Chapman, B. Baumgratz, K. Kosai ve S. Johnson (1996). Electrical and optical properties of infrared photodiodes using the InAs/GaInSb superlattice in heterojunctions with GaSb, *Journal of Applied Physics*, cilt 80, no. 2, pp. 1116-1127.
- [6] R. Antoni (2003). Infrared detectors: status and trends, *Progress in Quantum Electronics*, cilt 27, pp. 59-210.
- [7] H. C. Liu (2003). Quantum Dot Infrared Photodetector, *Opto-electronics Review*, cilt 11, pp. 1-5.
- [8] M. Razeghi ve B.-M. Nguyen (2014). Advances in mid-infrared detection and imaging: a key issues review, *Reports on Progress in Physics*, cilt 77, pp. 1-17.
- [9] M. Razehgi (2010). *Technology of Quantum Devices*, New York: Springer.
- [10] E. Plis, J. Rodriquez ve S. Krishna (2011). InAs/(In)GaSb Type II Strain Layer Superlattice Detectors, *Comprehensive Semiconductor Science and Technology*, Elsevier, pp. 229-264.

- [11] L. Esaki ve R. Tsu (1970). Superlattice and Negative Differential Conductivity in Semiconductors, *IBM Journal of Research and Development*, cilt 14, pp. 61-65.
- [12] G. Sai-Halasz, R. Tsu ve L. Esaki (1977). A new semiconductor superlattice, *Applied Physics Letters*, cilt 30, pp. 651-653.
- [13] M. Razeghi, Y. Wei, J. Bea, A. Gin, A. Hood, J. Jiang ve J. Nah (2003). Type II InAs/GaSb superlattices for high-performance photodiodes and FPAs, *Proceeding of SPIE*.
- [14] W. Cabanski, K. Eberhardt, W. Rode, J. Wendler, J. Ziegler, J. Fleißner, F. Fuchs, R. Rehm, J. Schmitz, H. Schneider ve M. Walther (2004). 3rd Gen Focal Plane Array IR Detection Modules and Applications, *Proceeding of SPIE*.
- [15] Y. Wei ve M. Razeghi (2004). Modeling of type-II InAs $\bar{\text{O}}$ GaSb superlattices using an empirical tight-binding method and interface engineering, *Physical Review B*, cilt 69, p. 85316.
- [16] B. N. Nyugen (2010). *Theoretical Design and Material Growth of Type-II Antimonide-based Superlattices for Infrared Detection and Imaging*, Evanston, Illinois: Northwestern University.
- [17] D. Z.-Y. Ting, A. Soibel, L. Höglund, J. Nyugen, C. J. Hill, A. Khoshakhlagh ve S. D. Gunapala (2011). Type-II Superlattice Infrared Detectors, *Semiconductors and Semimetals*, San Diego, Academic Press, pp. 1-59.
- [18] M. Korkmaz (2014) *Orta-Kızılötesi Dalgaboyunda Çalışan InAs/GaSb Süperörgü Fotodiyotların Opto-Elektronik Karakterizasyonu*, Anadolu Üniversitesi.
- [19] B. Arıkan (2015). *InAs/GaSb TİP-II SÜPERÖRGÜ KIZILÖTESİ FOTODEDEKTÖR YAPILARIN MBE TEKNİĞİ İLE GaSb ve GaAs ALTAŞLAR ÜZERİNE BÜYÜTÜLMESİ*, Eskişehir: Anadolu Üniversitesi.
- [20] A. Hood, D. Hoffman, Y. Wei, F. Fuchs ve M. Razeghi (2006). Capacitance-voltage investigation of high-purity InAs/GaSb superlattice photodiodes, *Applied Physics Letters*, cilt 88, no. 052112.

- [21] A. Rogalski (2011). *Infrared Detectors*, Boca Raton, US: CRC Press Taylor&Francis Group.
- [22] P. Martyniuk ve A. Rogalski (2008). Quantum-dot infrared photodetectors: Status and outlook, *Progress in Quantum Electronics*, cilt 32, pp. 89-120.