

**ORTA-KIZILÖTESİ
DALGABOYUNDA ÇALIŞAN
InAs/GaSb SÜPERÖRGÜ FOTODİYOTLARIN
OPTO-ELEKTRONİK KARAKTERİZASYONU**

Melih KORKMAZ
Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Haziran 2014

Bu tez çalışması BAP-1205F082 numaralı proje kapsamında Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Melih KORKMAZ'ın “Orta-Kızılötesi Dalgaboyunda Çalışan InAs/GaSb Süperörgü Fotodiyotların Opto-Elektronik Karakterizasyonu” başlıklı **Fizik** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 16.04.2014 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı) :	Doç. Dr. Bülent ASLAN
Üye :	Doç. Dr. Uğur SERİNCAN
Üye :	Prof. Dr. Raşit TURAN

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

**ORTA-KIZILÖTESİ DALGABOYUNDA ÇALIŞAN
InAs/GaSb SÜPERÖRGÜ FOTODİYOTLARIN
OPTO-ELEKTRONİK KARAKTERİZASYONU**

Melih KORKMAZ

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Bülent ASLAN

2014, 91 sayfa

Bu çalışmada, orta-kızılötesi bölgesinde çalışan InAs/GaSb süperörgü fotodiyotların opto-elektronik karakterizasyonları yapılmıştır. Hall etkisi ölçümleriyle InAs ve GaSb malzemeleri için katkı kalibrasyonları tamamlanmış; ayrıca, katkısız süperörgü yapıdaki taşıyıcı tipinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi incelenmiştir.

Katman kalınlıklarının sistematik olarak değiştirildiği süperörgü yapılarıdaki kesim dalga boyu değişimi ve enerji seviyeleri arasındaki geçişler tayfsal fototepki ve soğurma ölçümleri yapılarak incelenmiştir. Sıcaklık bağımlı optik ölçümlerle, bant kenarının değişimi ve yapıların yüksek sıcaklıklarda çalışma potansiyelleri araştırılmıştır. Fotodiyotların tepkisellik ölçümleri yapılarak, foto-akım yaratma yetenekleri incelenmiş ve kuantum verimleri hesaplanmıştır. Sıcaklık bağımlı karanlık akım ölçümleri, yaratma-yeniden birleşme (G-R) ve yüzey kaçak akımlarının farklı sıcaklıklarda baskın mekanizma olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: InAs/GaSb, süperörgü, Hall etkisi, kızılötesi foto-algılayıcı, tayfsal fototepki.

ABSTRACT**Master of Science Thesis****OPTO-ELECTRONIC CHARACTERIZATION OF
InAs/GaSb SUPERLATTICE PHOTODIODES
OPERATING IN THE MID-WAVELENGTH INFRARED****Melih KORKMAZ****Anadolu University
Graduate School of Sciences
Physics Program****Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Bülent ASLAN****2014, 91 pages**

In this thesis, opto-electronic characterization of InAs/GaSb superlattice photodiodes operating in mid-infrared region have been studied. Doping calibration for InAs and GaSb materials have been completed by using Hall effect measurements. The change in the carrier type as a function of temperature in unintentionally doped superlattices has been investigated as well by using the same technique.

The change in the cut-off wavelength and the transitions between the energy levels have been investigated by using the spectral photoresponse and absorption measurements for the superlattice structures where the individual layer thicknesses were systematically changed. The band edge tuning and their ability for high temperature operation have been examined by temperature dependent optical measurements. Photo-current generation in the photodiodes have also been investigated by responsivity measurements and their quantum efficiencies were calculated. Temperature dependent dark current measurements showed that the generation-recombination (G-R) and surface leakage currents are dominant mechanisms at different temperature regions.

Keywords: InAs/GaSb, superlattice, Hall effect, infrared photodetector, spectral photoresponse.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sırasında bilgisi ve tecrübesiyle bana yol gösteren, birçok ölçümün yapılabilmesi için imkân yaratan, arkadaşça yaklaşımıyla desteğini her zaman gördüğüm, değerli hocam Doç. Dr. Bülent Aslan'a çok teşekkür ederim.

Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'na katılmamda ve buradaki çalışmaların yapılması için destek sağlayan, yorumları ve önerileri ile yönlendiren Doç. Dr. Uğur Serincan'a teşekkür ederim.

Tez kapsamında yer alan birçok çalışmanın yapılabilmesi için imkân sunan, yardımlarını ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, tez çalışmasına olan değerli öneri ve yorumları için Prof. Dr. Raşit Turan'a teşekkür ederim. ODTÜ'de geçirdiğim süre boyunca, Hall ölçümlerinin alınmasında yardımları olan, yemek aralarındaki hoş sohbetleri ile keyifli vakit geçirmemi sağlayan, Kutlu Kutluer ve Yasin Ergunt'a teşekkür ederim. Merkez Laboratuvarı'ndaki Hall ölçümlerindeki yardımları için Ali Güzel ve Dr. İbrahim Çam'a teşekkür ederim.

Aygitların fabrikasyonu konusunda bilgi ve tecrübelerini paylaşan Prof. Dr. Atilla Aydın ve ekibi Dr. Ömer Salihoğlu'na ve Abdullah Muti'ye teşekkür ederim.

Süperörgü örneklerin manyetik ölçümlerinin yapılabilmesini sağlayan ASELSAN MGEO birimindeki Melih Kaldırım ve Murat Celal Kılınç'a teşekkür ederim.

Laboratuvardaki çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen, değerli bilgisini ve yorumlarını paylaşan, hoş sohbeti ile motivasyon sağlayan Yrd. Doç. Dr. Mustafa Kulakçı'ya teşekkür ederim.

Fabrikasyon sürecini öğrenirken deneyim ve tecrübelerini paylaşan Burcu Arpaway'a, tez kapsamında incelediğim örnekleri büyüten ve tez örneklerini benimle paylaşan Bülent Arıkan'a, XRD ölçümlerindeki yardımları için Güven Korkmaz'a, laboratuvarda yaptığım çalışmalar sırasında yardımları ve arkadaşlıkları için Ayşe Şevik'e, Eren Suyolcu'ya, Hülya Kuru'ya, Mehmet Erkuş'a, Samet Özdemir'e ve Seval Şahin'e ayrı ayrı teşekkür ederim.

Sevgisini ve desteğini her zaman yanımda hissettiğim, en zor anlarımda yanımda olan değerli arkadaşımda Seda Yıldız'a çok teşekkür ederim.

Varlıkları ve sevgileriyle, hayatımın en zor anlarında bile bunun üstesinden gelebilecek gücü bulmamı sağlayan, beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
TABLolar DİZİNİ	x
KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. TİP-II InAs/GaSb SÜPERÖRGÜ KIZILÖTESİ ALGILAYICILAR	5
2.1. 6,1 Angström (Å) Ailesi ve Tip-II Bant Yapısı.....	5
2.2. Bant Aralığının InAs ve GaSb Kalınlığına Bağlı Olarak Değişimi	7
2.3. Tip-II InAs/GaSb SL Kızılötesi Algılayıcı Yapıları	10
2.3.1. P-i-n diyot yapısı	10
2.3.2. “M-Engel” diyot yapısı.....	12
2.3.3. pBp ve nBn algılayıcı yapısı.....	13
2.3.4. CBIRD ve pBiBn algılayıcı yapıları.....	14
3. DENEYSEL YÖNTEMLER	17
3.1. Epitaksiyel Büyütme	17
3.2. MBE Sisteminde Büyütülen Epikatman ve Süperörgü Yapılar	18
3.2.1. GaSb ve InAs epikatman yapılar	19
3.2.2. InAs/GaSb süperörgü yapılar	20



3.3. Ayrııt Üretimi	21
3.4. Hall Etkisi (Hall Effect)	24
3.5. Karanlık Akım Ölçümleri.....	28
3.6. Soğurma Spektrumu Ölçümleri.....	29
3.7. Tayfsal Fototepki Ölçümleri.....	30
3.8. Tepkisellik Ölçümleri.....	31
4. EPİKATMAN VE SÜPERÖRGÜ YAPILARDA HALL ETKİSİ ÖLÇÜMLERİ	34
4.1. N ve P tipi Epikatman Yapılarda Hall Etkisi Ölçümleri	34
4.2. Katkısız Süperörgü Yapıların Manyetik Karakterizasyonu	43
5. SÜPERÖRGÜ FOTODİYOTLARIN OPTO-ELEKTRONİK KARAKTERİZASYONU	48
5.1. Optik Ölçümler.....	50
5.2. Karanlık Akım Ölçümleri.....	60
5.2.1. Karanlık Akım Yoğunluğu ve Diferansiyel Direnç.....	61
6. SONUÇ	67
KAYNAKLAR	69
Ek-1 Hall Çubuğı ve van der Pauw Yöntemine Göre Katkı ve Mobilitenin Hesaplanması.....	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
2.1. 6,1 Å malzeme grubu ve birbirlerine göre enerji bant seviyeleri.....	6
2.2. InAs, GaSb ve AlSb ile oluşturulabilen 3 farklı bant dizilimi	6
2.3. InAs/GaSb SL dalga fonksiyonlarının oluşturduğu minibant yapısı	7
2.4. GaSb kalınlığının, iletim bandı genişliğine (ΔC_1) ve bant aralığına (E_g) olan etkisi.....	8
2.5. InAs kalınlığının, iletim bandı genişliğine (ΔC_1) ve bant aralığına (E_g) olan etkisi.....	9
2.6. P-i-n diyot yapıları InAs/GaSb SL kızılötesi foto-algılayıcı aygıt yapısı	10
2.7. P-i-n süperörgü fotodiyot yapıda foto-akım mekanizması	11
2.8. 288 x 384 formatında çift renkli SL foto algılayıcı ile alınmış eş zamanlı görüntü a) kesim dalga boyu $\lambda_c = 4\mu m$, b) $\lambda_c = 5\mu m$ olan iki ayrı kanaldan alınan görüntü ve c) bu iki kanal arasındaki fark	12
2.9. “M-Engel” yapısının şematik gösterimi.....	12
2.10. a) pBp ve b) nBn diyotların ideal davranışı	14
2.11. CBIRD algılayıcısının (a) enerji bant diyagramı ve (b) şematik aygıt yapısı.	15
2.12. pBiBn yapısının a) ters besleme altındaki bant şekli ve b) diyot yapısı	16
3.1. Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı’nda kurulu olan MBE sistemi.....	18
3.2. İncelenen InAs/GaSb p-i-n SL fotodiyot yapısının şematik gösterimi	21
3.3. Aşındırma işlemi sonucunda oluşan mesanın profili	23
3.4. a) Paketlenmiş tek piksel diyot, b) mesanın SEM görüntüsü ve c) mesanın temsili kesiti.....	24
3.5. İletken bir malzemedeki Hall olayı	25
3.6. (a) Hall çubuğu aygıtında boyuna direnç ve (b) manyetik alan altında Hall voltajı ölçümü	26
3.7. Van der Pauw yöntemine göre (a) öz direnç ve (b) Hall etkisi ölçümü.....	27
3.8. ODTÜ Merkez Laboratuvarı’nda kurulu olan PPMS sistemi (Cryogenic Limited)	27
3.9. Sıcaklık bağımlı karanlık akım ölçüm düzeneği.....	28
3.10. Soğurma spektrumu düzeneği ve örneklerin kreostat içerisindeki yerleşimi	29
3.11. Tayfsal fototepki ölçüm düzeneği	30

3.12. DLaTGS algılayıcının atmosfer ortamındaki fototepkisi	31
3.13. Tepkisellik ölçümleri için kullanılan düzenek	31
4.1. Hall ölçümünde kullanılan a) Hall çubuğu ve b) van der Pauw geometrili aygıtlar	35
4.2. Berilyum katkılı GaSb epikatmanlar için (a) katkı miktarı ve (b) boşluk mobilitesinin efüzyon hücre sıcaklığına bağlı değişimi	36
4.3. Silisyum katkılı InAs epikatmanlar için (a) katkı miktarı ve (b) elektron mobilitesinin efüzyon hücre sıcaklığına bağlı değişimi	38
4.4. Epi-15 örneğine ait manyetik alan taraması	40
4.5. Epi-15 örneğinin 300 K ve 80 K'deki katkı miktarı ve mobilitelerinin oranının manyetik alana göre değişimi	41
4.6. Si katkılı InAs örneklerin, manyetik alana bağlı hesaplanan katkı miktarı .	41
4.7. Epi-12 örneğinin Hall çubuğu aygıtındaki yüzey kusurlarının görünümü...	42
4.8. Manyetik alanın fonksiyonu olarak $\mu.B$ değerinin değişimi	43
4.9. GaSb alttaş üzerine büyütülmüş SL yapı; InAs katmanın aşındırma öncesi ve sonrası	45
4.10. GaAs alttaş üzerine büyütülmüş SL yapı; InAs katmanın aşındırma öncesi ve sonrası	46
4.11. SL örneklerin sıcaklığa bağlı olarak net taşıyıcı yoğunluğunun ve Hall mobilitesinin değişimi	47
5.1. InAs/GaSb süperörgünün HRTEM görüntüsü	48
5.2. InAs/GaSb süperörgü yapının GaSb (004) civarında çift kristal X-ışını sallantı eğrisi	49
5.3. InAs ve GaSb kalınlığına bağlı olarak, (a) geçirgenliğin enerjiye göre birinci türevinin ve (b) soğurmanın değişimi	51
5.4. SL-01 örneğine ait sıcaklık bağımlı soğurma ölçümü	52
5.5. InAs kalınlığına bağlı olarak kesim dalga boyunun değişimi	53
5.6. GaSb kalınlığına bağlı olarak kesim dalga boyunun değişimi	54
5.7. InAs ve GaSb kalınlığına bağlı olarak bant kenarı eğiminin (α) değişimi...	55
5.8. Sıcaklığa bağlı olarak SL algılayıcıların fototepkilerinin değişimi	56
5.9. a) InAs ve b) GaSb kalınlığı değiştirilen örnek setlerinin sıcaklığa bağlı bant kenarının değişimi	58

5.10. SL foto-algılayıcılara ait (a) tepkisellik ve (b) kuantum verimi grafikleri...	60
5.11. InAs kalınlığının değiştiği fotodiyotlara ait a) karanlık akım yoğunluğu ve b) R.A grafikleri.....	61
5.12. GaSb kalınlığının değiştiği fotodiyotlara ait a) karanlık akım yoğunluğu ve b) R.A grafikleri.....	62
5.13. Pasivasyon uygulanan ve uygulanmayan SL-03 örneğine ait R.A grafiği ..	64
5.14. SL foto-algılayıcıların $\ln(\text{Akım yoğunluğu})-q/kT$ grafiği ve aktivasyon enerjileri.....	65
E.1. Hall çubuğu aygıtında boyuna direnç ölçümü	77
E.2. Hall çubuğu aygıtında manyetik alan altında Hall voltajının ölçülmesi.....	77
E.3. Van der Pauw yöntemine göre (a) Hall etkisi ve (b) öz direnç ölçümü	78

TABLOLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 1.1. Farklı kızılötesi algılayıcı teknolojilerinin kıyaslaması.....	3
Tablo 1.2. HgCdTe, QWIP, QDIP ve Tip-II SL foto-algılayıcıların orta ve uzun dalga boylu kızılötesi bölgesindeki (77 K) genel performans değerleri	4
Tablo 2.1. Farklı yapılardaki SL algılayıcılara ait performans değerleri.....	16
Tablo 3.1. Be katkılı GaSb epikatman örnek grubu.....	19
Tablo 3.2. Si katkılı InAs epikatman örnek grubu	20
Tablo 3.3. Tez çalışmasında kullanılan InAs/GaSb SL yapıları örnekler.....	20
Tablo 4.1. GaAs alttaş üzerine büyütülen Be katkılı GaSb epikatman örneklerin katkı hücre sıcaklığı ve Hall etkisi ölçüm sonuçları....	35
Tablo 4.2. GaAs alttaş üzerine büyütülen Si katkılı InAs epikatman örneklerin katkı hücre sıcaklığı ve Hall etkisi ölçüm sonuçları....	37
Tablo 4.3. GaSb alttaş üzerine büyütülen Si katkılı InAs epikatman örneklerin katkı hücre sıcaklığı ve Hall etkisi ölçüm sonuçları....	37
Tablo 4.4. Literatürde yer alan sıcaklık bağımlı Hall ölçümleri.....	44
Tablo 5.1. Tez kapsamında incelenen foto-algılayıcı yapıların yüksek çözünürlüklü x-ışını sallantı eğrisi sonuçları	50
Tablo 5.2. Soğurma spektrumu ve fototepki ölçümlerinden türetilmiş Varshni parametreleri	57
Tablo 5.3. 600x600 μm^2 büyüklüğündeki diyotlara ait aktivasyon enerjileri ...	66

KISALTMALAR DİZİNİ

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
LWIR	: Uzun Dalga Boylu Kızılötesi
MBE	: Moleküler Demet Epitaksi
MCT	: Civa Kadmiyum Tellür
MWIR	: Orta Dalga Boylu Kızılötesi
PPMS	: Fiziksel Özellikler Ölçüm Sistemi
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
XRC	: X-Işını Sallantı Eğrisi
ΔC_1	: İletim Bandı Genişliği

1. GİRİŞ

Yarıiletken malzeme üretim tekniklerinin gelişmesiyle birlikte, yüksek performanslı yeni nesil yarıiletken aygıtlar üretiminin yolu açılmıştır. Malzeme üretimindeki gelişmeler, kızılötesi algılayıcı pazarında da yeni nesil algılayıcı teknolojilerinin geliştirilmesine imkân sağlamış ve alternatif algılayıcı malzeme üretimine yönelik çalışmalara olan ilgi artmıştır.

Orta ve uzun dalgaboyu kızılötesi bölgesinde gösterdiği yüksek performanstan dolayı uzun yıllardır yaygın olarak kullanılan Cıva Kadmiyum Tellür (Mercury Cadmium Telluride, MCT) tabanlı kızılötesi algılayıcı teknolojisinin; üretim maliyetlerinin yüksek olması ve malzeme üretimindeki zorluklar alternatif malzeme arayışını daha da arttırmıştır. Farklı bant aralığına sahip malzemelerin birbirleri üzerine büyütülebilmesi, taşıyıcılar üzerindeki kuantum sınırlamanın (quantum confinement) serbestliğini arttırmış ve düşük boyutlu (low-dimensional) yarıiletken aygıtların üretimine imkân sağlamıştır. Taşıyıcıların sınırlandırılmasında çeşitliliğin artmasıyla birlikte kuantum yapılı kızılötesi foto-algılayıcılar (Quantum Structured Infrared Photodetector, QSIP) olarak adlandırılan yeni bir algılayıcı sınıfı ortaya çıkmıştır.

QSIP sınıfındaki algılayıcıların gelişim sürecinde kuantum kuyulu kızılötesi foto-algılayıcılar (Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP), ilk sırada yer alan yapılardan biridir. Bu yapı, temel olarak; kuantum kuyu içerisindeki izinli seviyelerdeki taşıyıcıların, kızılötesi ışığa ile uyularak, kuyuyu sınırlayan potansiyel engeli aşarak, foto-akımı oluşturmasına dayanır. QWIP yapılarının karakteristik özelliği, optik soğurma miktarının gelen ışığın elektrik alan polarizasyon bileşeninin kuantum kuyuya olan normaliyle doğru orantılıdır [1]. Yapı yüzeyine dik doğrultuda gelen fotonların algılanabilmesi ve soğurmanın artırılabilmesi için kırınım ızgaralarına ihtiyaç duyulmaktadır. Kuantum verimlerinin MCT'ye kıyasla düşük olmasına karşın, malzeme üretiminin kararlı olması, geniş formatlı [2], birden fazla bantta [3] ve renkte [4] algılama yapabilen algılayıcıların üretilmesi, kızılötesi algılayıcı pazarında QWIP'lerin yer edinmesini sağlamıştır. Thales (Fransa), QmagiQ (Amerika), FLIR (Amerika), IRnova (İsveç)

gibi firmalar, ticari olarak QWIP teknolojisini kızılötesi algılama sistemlerinde kullanmaktadırlar.

QWIP yapıların normal doğrultuda soğurma yapamaması ve düşük sıcaklıklarda çalışma ihtiyacının olması, araştırmacıları kuantum nokta yapılar üzerinde çalışmaya yöneltmiştir. Uygun büyüme koşullarında, örgü uyumu olmayan malzemelerin birbirleri üzerinde büyütülmesi sırasında yapıda gerilme (strain) meydana gelir. Örgü sabiti büyük olan malzeme, kritik film kalınlığı aştığında yapıda biriken stres, üç boyutlu nokta benzeri yapılar oluşturarak rahatlar [5]. Kuantum nokta kızılötesi foto-algılayıcılarda (Quantum Dot Infrared Photodetector, QDIP), nokta içerisindeki altbantlar arasında foton soğurması gerçekleşir. Üç boyutlu bir matris içerisinde sınırlanan taşıyıcılar normal doğrultuda soğurma yapabilmektedir [6]. QDIP'lerin önemli bir avantajı ise fotonla uyarılan taşıyıcıların ömrünün uzun ve yapının yüksek sıcaklıklarda çalışabilme potansiyeli olmasıdır [6]. Buna karşın, QDIP'lerin sahip olduğu potansiyeli gösterebilmesi için, malzeme üretiminden kaynaklı problemlerin aşılması gerekmektedir [6-7]. Yapısal özelliklerinden dolayı günümüzde en çok çalışılan süperörgü (superlattice, SL) malzeme grubu InAs/GaSb tabanlı yapılarıdır. SL, çoklu kuantum kuyu yapılarına benzeyen periyodik ama daha ince katmanlardan oluşan çoklu-eklem (heterojunction) yapısıdır. Ancak, bariyer genişlikleri ince olduğu için kuyu içerisinde taşıyıcılar üzerindeki sınırlama azdır. Taşıyıcılar yerellikten uzaklaşarak (delocalized), diğer kuyulardaki taşıyıcılarla etkileşmektedir ve bu durum SL'de minibantların oluşumuna neden olur [8].

Üzerinde çok sayıda kuramsal çalışma yapılmış olmasına rağmen bu malzeme sistemi, moleküler demet epitaksi (molecular beam epitaxy, MBE) tekniğindeki son teknolojik ilerlemeler oluncaya kadar yüksek kalitede büyütülemediği [8]. Kırık bant yapısına sahip tip-II SL kızılötesi algılayıcı yapıyı içeren ilk deneysel çalışma Johnson ve ark. tarafından 1996 yılında yapılmıştır [9]. İlk fotoiletken yapı, Northwestern Üniversitesi'ndeki Center for Quantum Devices laboratuvarında Galyum Arsenik (GaAs) alttaş üzerine büyütülmüş ancak alttaş ile epitaksiyel katman arasındaki %7'lik örgü uyumsuzluğu nedeniyle büyütmede zorluklarla karşılaşmıştır [8]. 1990'ların sonuna doğru büyütme için hazır Galyum Antimon (GaSb) alttaşların yaygınlaşmasıyla birlikte, GaSb alttaşla kısmi örgü

uyumuna sahip tip-II SL yapıların büyütülmesinde dikkate değer bir şekilde iyileşme gözlenmiştir [8].

Hem teknolojik gelişmeler, hem de tip-II SL malzeme sistemi hakkındaki bilgi birikiminin artmasıyla birlikte farklı SL aygıt tasarımları ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda günümüz saha ihtiyaçlarını karşılamak için gereken performans özellikleri ifade eden *üçüncü nesil* olarak adlandırılan yeni bir algılayıcı tanımlaması getirilmiştir. Sınıflandırmadaki tanımlamalar genel olmakla birlikte, bu sınıfa giren kızılötesi görüntüleme sistemleri şunlardır [10]:

- İki veya üç renkli banda sahip yüksek çözünürlüklü ve yüksek performanslı soğutmalı sistemler,
- Orta ve yüksek performanslı soğutmasız sistemler,
- Düşük maliyetli, kullan-at soğutmasız sistemler.

Tablo 1.1. Farklı kızılötesi algılayıcı teknolojilerinin kıyaslaması [11].

Karakter	HgCdTe	QWIP	QDIP	Tip-II SL
Normal doğrultuda soğurma	Var	Yok	Var	Var
Çalışma sıcaklığı	Yüksek	Düşük	Yüksek	Yüksek
Kuantum verimi	Yüksek	Düşük	Düşük	Yüksek
Tepkisellik ve duyarlılık	Yüksek	Düşük	Düşük	Yüksek
Çoklu renk yeteneği	Var	Var	Var	Var
Homojenlik	Yok	Var	Yok	Var
Malzeme verimi	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek

InAs/GaSb SL malzeme sistemi, Bölüm 2’de bahsedilen yeteneklerinden dolayı üçüncü nesil kızılötesi algılayıcılar sınıfına aday olarak gösterilmektedir [10]. Günümüz kızılötesi teknolojilerinin genel özellikleri Tablo 1.1 ve Tablo 1.2’de özetlenmiştir.

Tablo 1.2. HgCdTe, QWIP, QDIP ve Tip-II SL foto-algılayıcıların orta ve uzun dalga boylu kızılötesi bölgesindeki (77 K) genel performans değerleri [11].

Parametre		HgCdTe	QWIP	QDIP	Tip-II SL
Kuantum verimi (%)	MWIR*	≥ 70	≤ 10	48	~ 70
	LWIR*	≥ 70	≤ 10	2,7	~ 70
R_{0A} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$\lambda_c = 5\mu\text{m}$	10^8	-	-	10^6
	$\lambda_c = 10\mu\text{m}$	300	10^4	-	100
Duyarlılık (FOV*=0) (Jones)	$\lambda_c = 5\mu\text{m}$	4×10^{15}	5×10^{11}	2×10^{11}	5×10^{12}
	$\lambda_c = 10\mu\text{m}$	2×10^{12}	2×10^{10}	2×10^{10}	5×10^{11}

*FOV (Görüş alanı), MWIR (Orta dalga boylu kızılötesi), LWIR (Uzun dalga boylu kızılötesi)

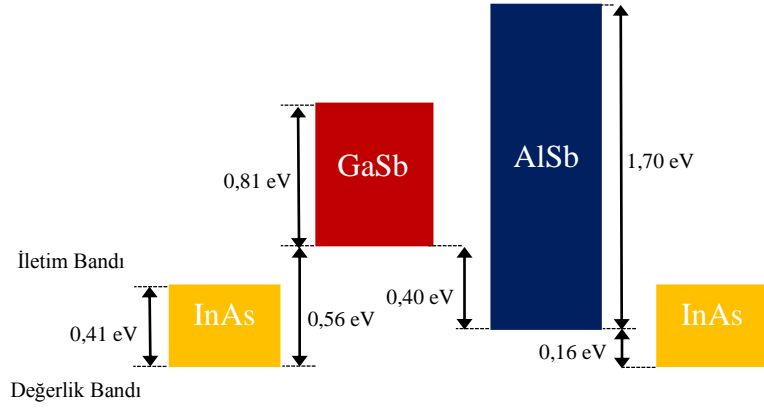
Bu tez çalışması, MBE sistemi ile büyütülmüş ve orta dalga boylu kızılötesinde çalışması için tasarlanan InAs/GaSb tip-II SL foto-algılayıcı yapıların, opto-elektronik karakterizasyonu üzerine odaklıdır. İlk giriş bölümü, yarıiletken kızılötesi teknolojisinin gelişim sürecinden ve mevcut kızılötesi algılayıcılarının genel özelliklerinden bahsedilmiştir. İkinci bölümde, genel olarak tip-II bant yapısından ve katman kalınlıklarındaki değişimin optik özelliklere olan etkisi anlatılmıştır. Ayrıca, farklı tasarımlara sahip tip-II kızılötesi algılayıcı yapıları ve bunların özelliklerinden bahsedilmiştir. Bir sonraki (üçüncü) bölümde, tez kapsamında büyütülen epikatman ve SL yapılar, fabrikasyon aşaması ve yapıların karakterizasyonlarında kullanılan teknikler anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, epikatman ve SL yapıların manyetik karakterizasyon sonuçlarına, beşinci bölümde ise tip-II SL foto-algılayıcı yapıların, optik ve elektronik karakterizasyon sonuçlarına yer verilmiştir. Altıncı bölümde, sonuçlar sunulmuştur.

2. TİP-II InAs/GaSb SÜPERÖRGÜ KIZILÖTESİ ALGILAYICILAR

Tip-II SL yapıların temelleri, 1977 yılında Leo Esaki ve arkadaşlarının yapmış oldukları teorik çalışmalara dayanmaktadır [12]. Tip-II bant yapısını temel alan ilk kızılötesi algılayıcı önerisi (1987), Smith ve Mailhiot tarafından InAs/Ga_{1-x}In_xSb malzeme çifti kullanılarak yapılmıştır [13]. Sadece yapıyı oluşturan malzemelerin kalınlıklarını ve Ga_{1-x}In_xSb kompozisyonunu değiştirerek, 4 - 25 µm kızılötesi bandı arasında algılama yapabilen algılayıcılar tasarlanmasının mümkün olabileceğini ve HgCdTe tabanlı algılayıcılara kıyasla, daha üstün elektriksel ve fiziksel özellikler gösterilebileceği öne sürülmüştür [13]. Tip-II SL üzerine yapılan araştırmalar, bahsedilen bu iki öncü çalışmayla başlamış ve günümüzde de, temeli bu bant yapısına dayanan birçok yeni algılayıcı yapısı tasarlanmakta, performanslarının artırılmasına yönelik çalışmalar devam etmektedir.

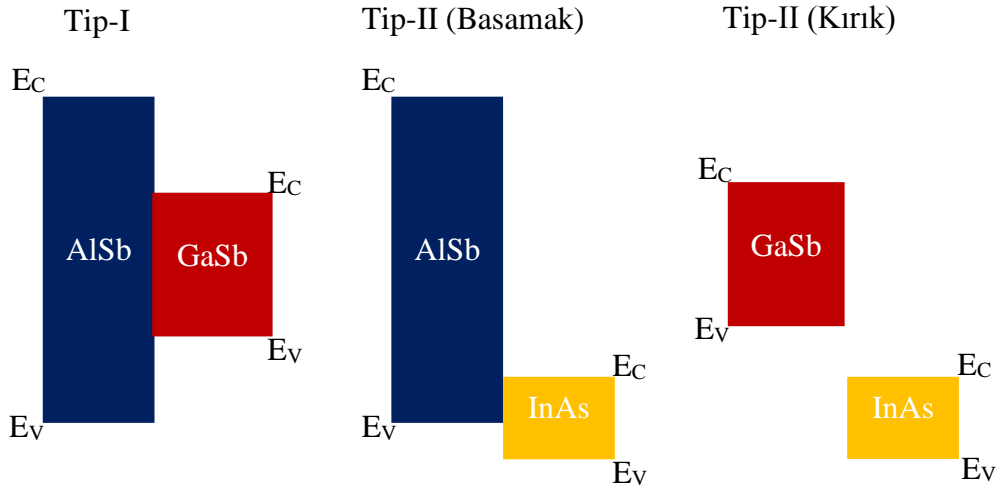
2.1. 6,1 Angström (Å) Ailesi ve Tip-II Bant Yapısı

6,1 Å ailesi, örgü parametrelerinin yakın olması ve birbirlerine göre bant seviyeleri karşılaştırıldığında birçok farklı aygıt tasarımına olanak tanımasından dolayı, III-V malzeme grubuna ait ikili bileşikler içerisinde önemli bir yere sahiptir. Örgü uyumlu InAs (a = 6,0584 Å), GaSb (a = 6,0959 Å) ve AlSb (a = 6,1355 Å) yarıiletken malzemelerden oluşan bu grubun, yasak bant aralıkları ve birbirlerine göre hizalanmaları Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. 6,1 Å malzeme grubu ve birbirlerine göre enerji bant seviyeleri [8].

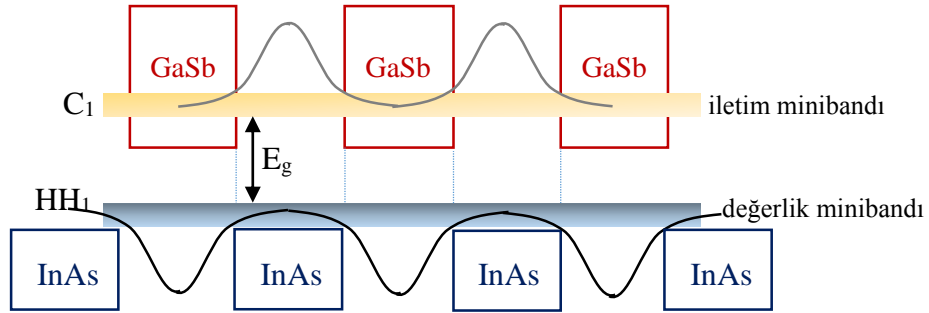
Yarıiletken çoklu-eklem yapılar, yapıyı oluşturan malzemelerin enerji seviyelerinin konumlarına göre, üç farklı grup altında toplanmışlardır. Şekil 2.2’de 6,1 Å malzemeleri kullanılarak oluşturulan, bu üç farklı çoklu-eklem yapı gösterilmiştir. Bu durum farklı tipte ve mekanizmada yeni tip aygıtların tasarlanmasını kolaylaştırır.



Şekil 2.2. InAs, GaSb ve AlSb ile oluşturulabilen 3 farklı bant dizilimi.

GaSb’nin yasak enerji aralığı, AlSb’ye göre daha küçük olup, bir araya getirildiğinde değerlik ve iletim bant kenarları AlSb’nin bant aralığı içerisinde kalmaktadır. Bu durumda AlSb, elektron ve boşluklar için bir potansiyel engel gibi

davranır. Tip-I bant yapısı olarak bilinen bu hizalanma şeklinde, adı geçen tabakaların ardışık ve çok tekrarlı sıralanmasıyla taşıyıcıları tek boyutta sınırlamak mümkündür. Bu tip bant hizalanması, QWIP'lerde ve lazer yapılarında sıklıkla kullanılmaktadır. Tip-II basamak (staggered) hizalanmasında ise, InAs'in iletim bant kenarı, AlSb'nin yasak bant aralığı içerisinde kalır, değerlik bant enerji seviyesi AlSb'in değerlik bandının altındadır. Son yıllarda, GaSb/AlSb ile InAs/AlSb eklem yapısı, yüksek sıcaklıklarda algılama yapmak için tasarlanan InAs/GaSb tabanlı SL kızılötesi algılayıcılarda, azınlık taşıyıcıların difüzyonu ile oluşan karanlık akımı önlemek amacıyla engel (barrier) olarak kullanılmaya başlanmıştır [14]. Diğer bir bant dizilimi olan tip-II kırık (broken) bant yapısında, InAs'in iletim bandı, GaSb'nin değerlik bandının altında yer aldığı için gerçek bir bant aralığı yoktur. Birkaç nanometre kalınlığındaki süperörgü yapıda, komşu ince katmanlar arasında, elektron ve boşlukları ifade eden dalga fonksiyonları, üst üste binerek sırasıyla iletim ve değerlik minibantlarını oluştururlar (Şekil 2.3) [11]. İletim ve değerlik minibantları arasındaki fark, yapının bant aralığına karşılık gelir.

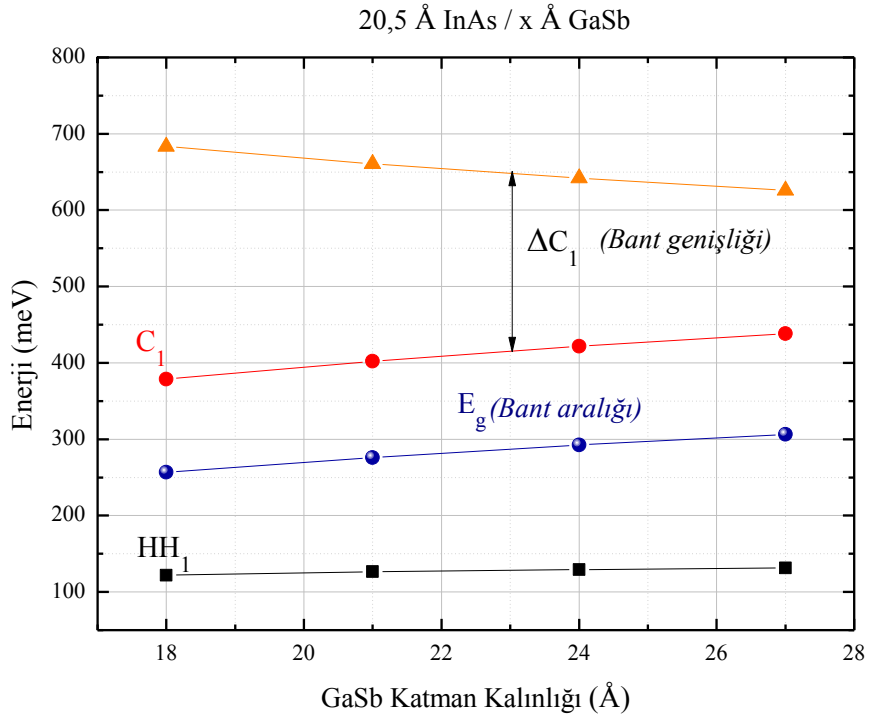


Şekil 2.3. InAs/GaSb SL dalga fonksiyonlarının oluşturduğu minibant yapısı.

2.2. Bant Aralığının InAs ve GaSb Kalınlığına Bağlı Olarak Değişimi

SL yapıdaki GaSb ve InAs katmanları, sırasıyla elektronlar ve boşluklar için bir potansiyel engel gibi davranarak, taşıyıcıları ayrı konumlarda sınırlandırır (Şekil 2.3). Elektron ve boşlukları sınırlayan katmanlar birbirlerinden farklı olduğu için, bu katmanların kalınlıklarındaki değişimin yaratacağı etki taşıyıcılara ve dolayısıyla da iletim ve değerlik bandına farklı şekilde yansır.

GaSb tabakası, boşluklar için kuantum kuyu tabanı gibidir. Değerlik bandındaki boşlukların etkin kütlesi, elektronlara kıyasla daha büyük olduğu için değerlik bant seviyesinin kuyu tabanındaki (GaSb tabakası) değişime olan bağlılığı daha zayıftır. Buna karşılık GaSb tabakasının iletim bandı üzerindeki etkisi daha fazladır. GaSb kalınlığı azaldıkça, elektron dalga fonksiyonları arasındaki örtüşme miktarı artıp, iletim bandının genişlemesine ve en alt enerji seviyesinin (C_1) düşüşüne neden olur. Bu düşüş, Şekil 2.4’de de görüleceği gibi değerlik bandının düşük enerji seviyesindeki azalmaya kıyasla daha fazla olduğu için bant aralığı (E_g) azalmaktadır [15].

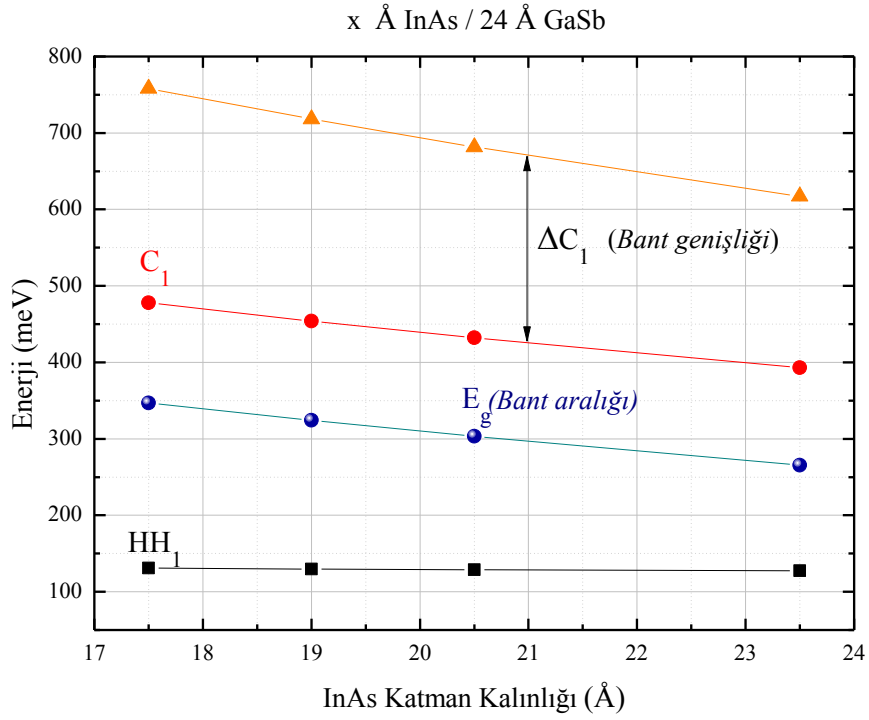


Şekil 2.4. GaSb kalınlığının, iletim bandı genişliğine (ΔC_1) ve bant aralığına (E_g) olan etkisi (Grafiklerdeki veriler Ref. [15]’deki Tablo II’den alınmıştır.).

SL yapıda, InAs katman kalınlığındaki değişimin iletim bandı enerji seviyesine olan etkisi GaSb’nin yarattığı etkiye kıyasla çok daha fazladır (Şekil 2.5). Bu nedenle bant aralığı, InAs kalınlığına daha duyarlıdır. GaSb tabaka kalınlığının iletim bandının genişliği (ΔC_1) üzerinde yarattığı etki, InAs tabaka kalınlığının yarattığı etkiye göre daha fazladır (Şekil 2.4). InAs kalınlığının

azalmasıyla, elektronlar üzerindeki sınırlamanın etkisi artmakta ve C_1 enerji seviyesi yukarıya doğru itilmektedir. Bu durum bant aralığını arttırmaktadır.

Haugan ve ark. fototepki ölçümlerinde elde edilen spektrumların, soğurma bant kenarının keskin olup olmamasının ΔC_1 'e bağlı olduğunu gözlemişler [15]. GaSb kalınlığı arttıkça, elektronlar üzerindeki sınırlama artmakta, ΔC_1 daralmakta ve soğurma bant kenarı daha keskin hale gelmektedir. Keskin bant kenarının da düşük enerjili fotonların yaratmış olduğu gürültüyü azalttığı ileri sürülmektedirler [15].



Şekil 2.5. InAs kalınlığının, iletim bandı genişliğine (ΔC_1) ve bant aralığına (E_g) olan etkisi (Grafiklerdeki veriler Ref. [15]'deki Tablo II'den alınmıştır.)

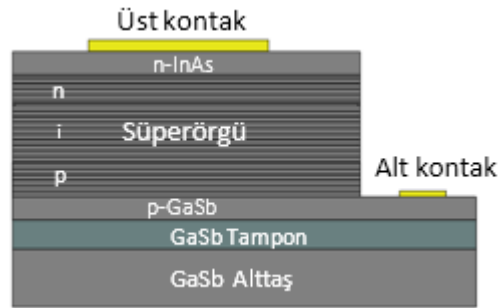
2.3. Tip-II InAs/GaSb SL Kızılötesi Algılayıcı Yapıları

InAs/GaSb tip-II SL yapılarında, sadece yapıyı oluşturan katmanların kalınlıklarının değiştirilmesiyle, farklı bant aralıkları tanımlanabilmektedir. Herhangi bir büyütme parametresini değiştirmeye ihtiyaç duymadan, SL yapıların kesim dalgaboyunun (cut-off wavelength) 3 μm ile 25 μm aralığında değiştirilebilmesi [16], ayrıca alternatif yapı tasarımlarıyla aygıt performanslarının iyileştirilmesi [14,17] bu yapıları üçüncü nesil kızılötesi algılayıcılar sınıfında yer edinmesini sağlayacak bilgi birikimi artmaktadır.

Bu bölümde, literatürde yer alan farklı bant yapılarına sahip tip-II SL kızılötesi algılayıcılardan kısaca bahsedilecektir.

2.3.1. P-i-n diyot yapısı

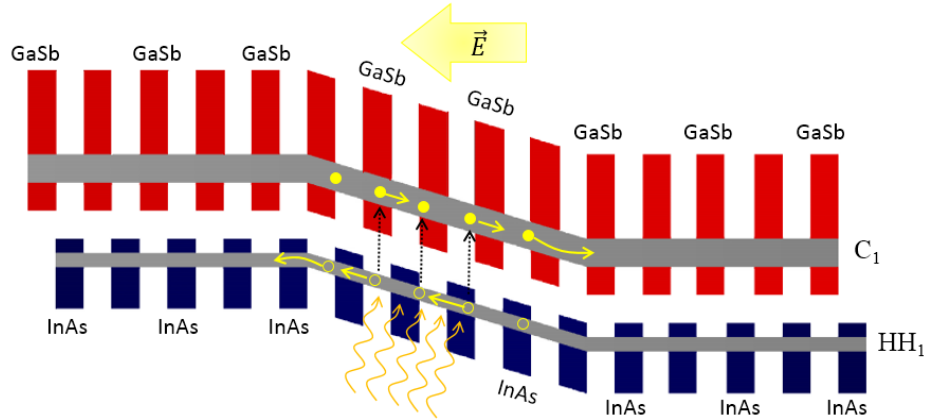
Tip-II InAs/GaSb p-i-n fotodiyotlar, hakkında en fazla araştırmanın ve yayının bulunduğu, en temel SL algılayıcı yapısıdır. Tasarımları, diğer karmaşık bant yapılarına sahip diyotlara kıyasla basit olmasına karşın, yüksek kuantum verimine sahip, çift renkte algılama yapabilen [18-19], kızılötesi algılayıcılar üretilmesine izin vermektedir.



Şekil 2.6. P-i-n diyot yapılı InAs/GaSb SL kızılötesi foto-algılayıcı aygıt yapısı.

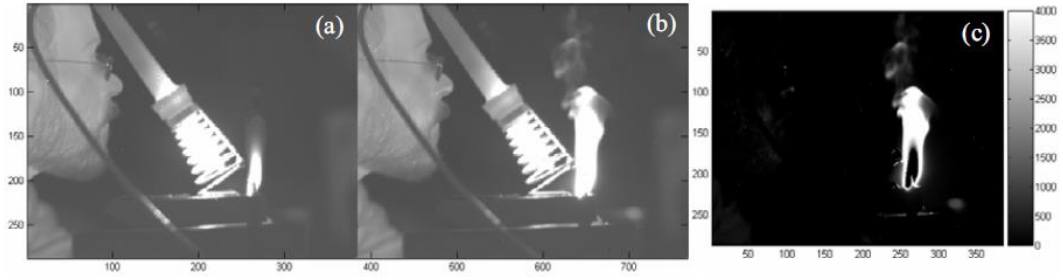
Standart bir p-i-n fotodiyot yapısı Şekil 2.6’da gösterilmiştir. Yapıdaki p-tipi bölgeler; GaSb bileşiğinin Be katkı atomuyla katkılanmasıyla, n-tipi bölgeler ise InAs bileşiğinin Si veya GaTe katkı atomuyla katkılanmasıyla elde edilmektedir. Alt ve üst kontak bölgeleri epikatman şeklinde (n-tipi InAs üst ve p-tipi GaSb alt kontak), n ve p-tipi SL katmanlar ise sırasıyla; n-InAs/GaSb ve InAs/p-GaSb çiftlerinin ardışık tekrarlarıyla oluşur.

P ve n-tipi SL katmanlar arasında kalan katkısız (i) SL yapı, kızılötesi ışımının soğurulduğu aktif bölgedir. Şekil 2.7’de gösterildiği gibi kızılötesi ışımının soğurulmasıyla yaratılan elektron-boşluk çiftleri foto-akım oluşturur: taşıyıcılar, yapı içinde kendiliğinden oluşan elektrik alan nedeniyle (veya dışarıdan ayrıca uygulanan yönlendirme voltajı yardımıyla) kontak bölgelerinde toplanarak elektrik sinyaline dönüştürülür.



Şekil 2.7. P-i-n süperörgü fotodiyot yapıda foto-akım mekanizması.

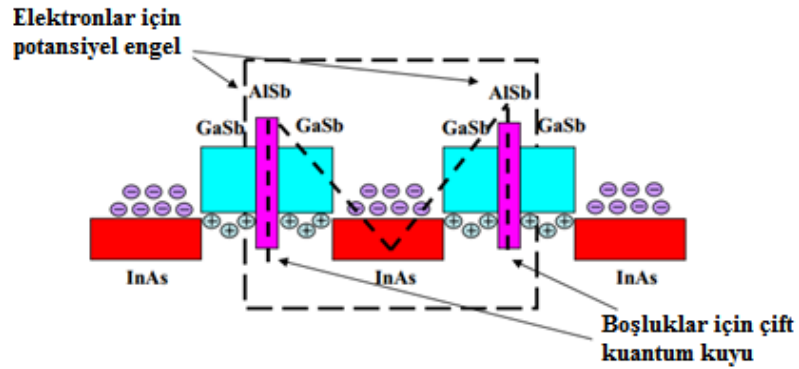
P-i-n diyot yapısını temel alıp, n-i-p-p-i-n şeklinde büyütürsek iki ayrı renkte (dual-color) duyarlılık gösteren algılayıcılar tasarlamak mümkündür [18-19]. Örneğin; CO₂ molekülü 4,3 µm civarında karakteristik bir soğurma yapar ve orta kızılötesi bölgesini (3-5 µm), iki ayrı spektral pencereye (veya renge) ayırır. Kesim dalga boyları bu iki bölgeye denk gelecek şekilde iki p-i-n diyodu arka arkaya büyütürsek, ortamdaki CO₂'in etkisini ortaya çıkarmak mümkündür (Şekil 2.8c) [20].



Şekil 2.8. 288x384 formatında çift renkli SL foto algılayıcı ile alınmış eş zamanlı görüntü a) kesim dalga boyu $\lambda_c= 4\mu\text{m}$, b) $\lambda_c= 5\mu\text{m}$ olan iki ayrı kanaldan alınan görüntü ve c) bu iki kanal arasındaki fark [20].

2.3.2. “M-Engel” diyot yapısı

“M-Engel”, InAs/GaSb SL içerisinde, GaSb katmanlar arasına AlSb bileşiğinin konulmasıyla elde edilen bir yapı tasarımıdır (Şekil 2.9). AlSb, GaSb’ye kıyasla daha büyük bant aralığına sahip olduğundan, iletim bandındaki elektronlar için potansiyel engel (potential barrier) gibi davranır. Bu durum ayrıca, InAs ile engellenen boşlukları, iki ayrı kuantum kuyusunda sınırlar ve değerlik bandında yeni enerji seviyeleri yaratır [21].



Şekil 2.9. “M-Engel” yapısının şematik gösterimi [21].

“M-Engel” yapısı, diyotların kuantum verimlerinden ziyade diferansiyel direncini iyileştirmektedir [22]. P-M-p diyot yapısında kullanıldığında, boşluk

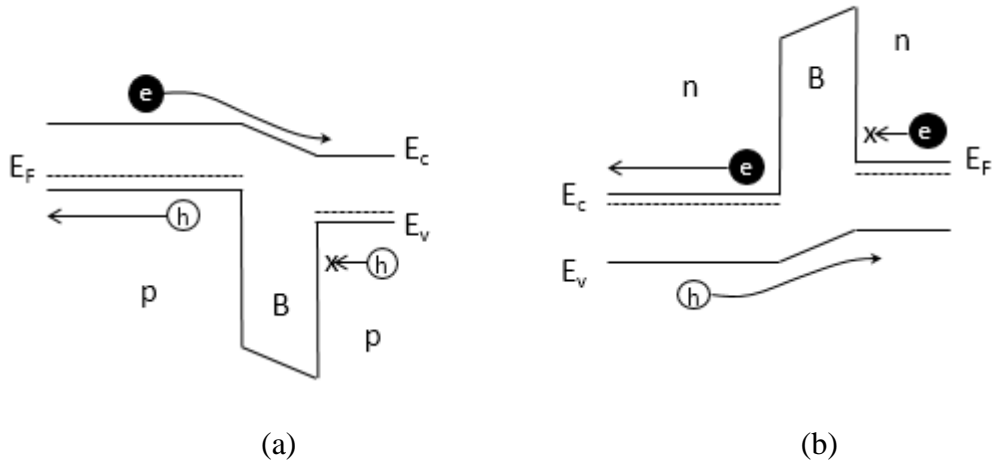
çoğunluk taşıyıcılarını (hole majority carriers) engellemekte [23], p- π -M-n diyot yapısında ise karanlık (difüzyon ve tünelleme) ve yüzey kaçak akımlarını azaltmaktadır. Bu yapıda direnç, potansiyel engelsiz yapılara kıyasla 10 kat daha yüksektir [22]. P-i-n yapılı standart InAs/GaSb süperörgülerde katman kalınlıkları, değerlik bandının seviyesinde ciddi bir değişiklik yaratmazken, “M-Engel” yapısında AlSb’nin etkisiyle bu bantta 150 meV’luk bir değişim yaratılabilmektedir [22].

2.3.3. pBp ve nBn algılayıcı yapısı

İlk olarak Maimon ve Wicks’in önerdiği nBn yapısı (n-InAs/AlAsSb/n-InAs) [24], Plis ve ark. tarafından pBp yapısında InAs/GaSb SL yapılara uygulanmış ve çift bantta duyarlılık gösteren algılayıcı üretilmiştir [25].

nBn ve pBp yapılarının (Şekil 2.10), p-i-n diyotlardan en temel farkı, yapı içerisinde potansiyel engel görevi gören, geniş bant aralığına sahip bir malzeme ($Al_{0.2}Ga_{0.8}Sb$) veya periyodik malzeme çiftinin (InAs/AlSb) bulunması ve tüketme bölgesinin olmamasıdır. Bariyer katman, nBn ve pBp yapılarının çoğunluk taşıyıcıları olan elektron ve boşlukların kontak tabakasına doğru difüzyonunu önlerken soğurucu tabakalarda yaratılan azınlık taşıyıcılar için bir engel oluşturmaz. nBn ve pBp yapılarında foto-akıma katkıda bulunan azınlık taşıyıcı tipi sırasıyla boşluk ve elektrondur [26-27].

Kızılötesi fotodiyotların yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesi, soğutma maliyetlerini azaltma ve daha küçük boyutlarda kamera sistemlerinin üretilmesine olanak tanımaktadır. Yapı içerisindeki karanlık akımın sıcaklıkla beraber artması, fotodiyotların yüksek sıcaklıklarda algılama yeteneklerini azaltmaktadır. pBp ve nBn yapıları sahip oldukları tasarımla, Shockley-Read-Hall (SRH) yaratma akımı ve yüzey kaçak akımlarını en aza indirip, algılayıcıları daha yüksek sıcaklıklarda çalıştırma imkânı sunmaktadır [24-27].

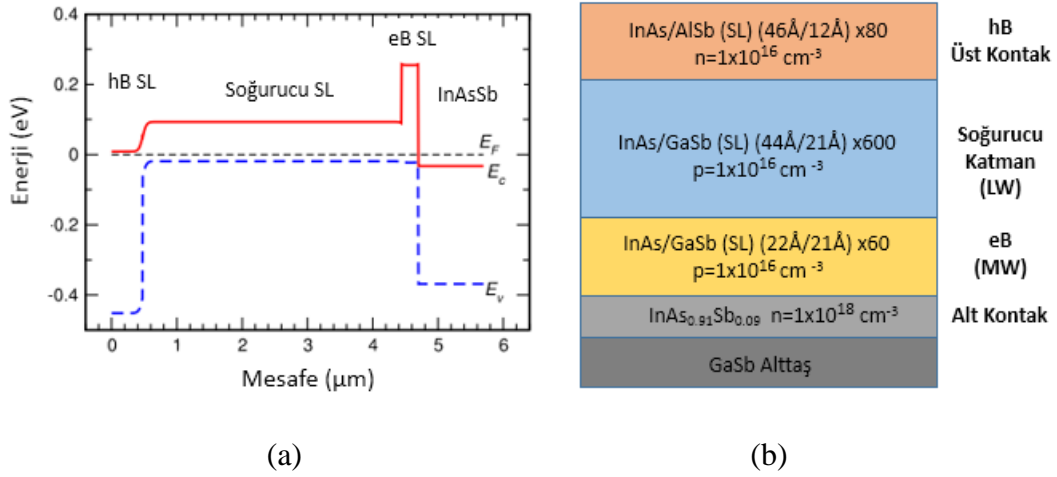


Şekil 2.10. a) pBp ve b) nBn diyotların ideal davranışı [26].

2.3.4. CBIRD ve pBiBn algılayıcı yapıları

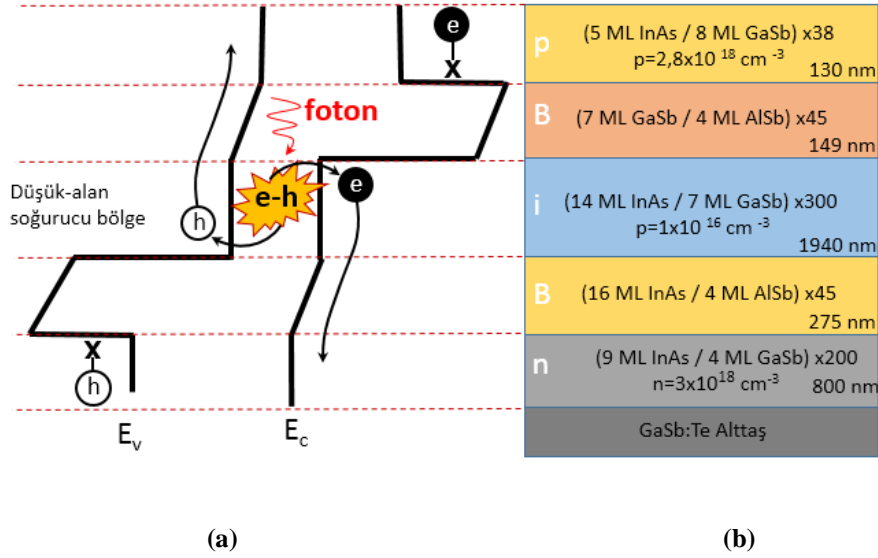
CBIRD (Complementary Barrier Infrared Detector), Ting ve ark. tarafından önerilmiş LWIR bölgeye duyarlı bir algılayıcıdır [17]. Yapıda, soğurucu katmanın alt ve üst kısmında elektron-engel (eB) ve boşluk-engel (hB) süperörgü yapıları bulunmaktadır. Üst kontağa pozitif beslem uygulandığında, voltaj ilk olarak soğurucu tabakadan uzakta, eB SL ve alt kontak eklemi üzerine düşer. Voltajın soğurucu tabaka yerine geniş bant aralığına sahip bölgeye düşmesi S-R-H karanlık akımını baskılamaktadır [17].

Şekil 2.11’de şematik olarak gösterilen yapıda $V_b \geq 0$ V olduğu durumda, soğurucu bölgede fotonla yaratılan azınlık taşıyıcıları (elektronlar), hB SL yapıya doğru sürüklenerek doğrudan üst kontakta toplanırlar. Aynı zamanda, fazlalık (excess) boşluk nüfusunun, alt kontakta soğurucu bölgeye doğru enjekte olan elektronlarla birleşmeleri sağlanarak (dielektrik rahatlama (dielectric relaxation)), bu bölgede yığılmaları önlenmektedir [17].



Şekil 2.11. CBIRD algılayıcının (a) enerji bant diyagramı ve (b) şematik aygıt yapısı [17].

Şekil 2.12'deki pBiBn algılayıcı yapısı, Gautam ve ark. tarafından önerilmiş bir tasarımdır [28]. Yapı CBIRD'dekine benzer eB ve hB SL katmanlarını içermektedir. Bariyerler, her iki kontak tabakasından difüzyona uğrayan azınlık taşıyıcıları bloke ederler. Fotonla yaratılan taşıyıcılar ise her hangi bir engelle karşılaşmadan foto-akımı oluştururlar. Elektrik alanın büyük bir kısmı soğurucu tabaka yerine (p-i-n diyotlardakinin aksine), geniş bant aralığına sahip eB ve hB katmanlarına düşmektedir. Elektrik alandaki bu azalma, tüketme bölgesini küçültmekte ve dolayısıyla da S-R-H akımı azalmaktadır [14]. Bu yaklaşım, süperörgüyü oluşturan katmanların (InAs ve GaSb'nin) kalınlığındaki değişimin, değerlik ve iletkenlik bandında yarattıkları enerji farklarının kullanılmasıyla oluşturulan eB ve hB katmanlarıyla InAs/GaSb SL yapısına da uyarlanmıştır [28]. Daha sonra pBiBn yapısı, pBinBiBp diyot yapısına dönüştürerek, çift bantta duyarlılık gösteren algılayıcı tasarlanmıştır [29].



Şekil 2.12. pBiBn yapısının a) ters besleme altındaki bant şekli ve b) diyot yapısı [14].

Bu bölümde bahsedilen farklı tipteki SL algılayıcı yapıların performans değerleri Tablo 2.1’de özetlenmiştir. Son on yılda, SL tasarımlarında yapılan değişiklikler ve iyileştirmeler, aygıt performanslarını mevcut kızılötesi algılama teknolojileriyle rekabet edebilir duruma getirmiştir. Günümüzde, AIM (Almanya), IRnova (İsveç), Santa Barbara Focal Plane (Amerika), QmagiQ (Amerika), Teledyne Scientific & Imaging (Amerika) gibi kızılötesi algılayıcı üretimi yapan firmalar, SL algılayıcılar üzerine araştırma-geliştirme faaliyetleri göstermekte ve son ürün haline getirmektedirler. Bu durum, tip-II SL yapılarının algılayıcı pazarındaki diğer malzeme sistemleriyle rekabet edecek performansa sahip olduğunun da bir göstergesidir.

Tablo 2.1. Farklı yapılardaki SL algılayıcılara ait performans değerleri.

Yapı	λ_c [μm]	Kuantum Verimi [%]	R.A [$\Omega.\text{cm}^2$]	Duyarlılık [Jones]	Ref.
p-i-n SL	4,2	~50	1×10^6	3×10^{13} (77 K)	[30]
p-i-n SL	12	~30	6	8×10^{10} (80 K)	[31]
p-M-p	14	17,5 (@9,6 μm)	10	4×10^{10} (77 K)	[23]
p- π -M-p	10,5	~27	200	-	[22]
p-B-p	5	39	-	5×10^{11} (77 K)	[25]
	10	17	-	$2,6 \times 10^{10}$ (77 K)	
n-B-n	5,2	18	-	1×10^9 (300 K)	[27]
CBIRD	10	~29	$1,4 \times 10^4$	$1,1 \times 10^{11}$ (77 K)	[17]
p-B-i-B-n	10,8	23	-	$8,7 \times 10^{10}$ (77 K)	[28]

3. DENEYSEL YÖNTEMLER

Bu bölümde, tez kapsamında çalışılan ve sonuçları sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak verilen örneklerin kısaca yapılarından bahsedildikten sonra, aygıt üretim süreci ve yapıların karakterizasyonunda kullanılan deneysel yöntemlerden bahsedilecektir.

Katkı mertebelerinin kontrolü amacıyla farklı hücre sıcaklıklarında epikatman katkı kalibrasyonu örnekleri, bir SL yapısındaki arka plan taşıyıcı miktarını ölçmek amacıyla katkısız SL örnekler ve InAs/GaSb SL yapıda katman kalınlıklarındaki değişimin performansa olan etkisini incelemek amacıyla da fotodiyot örnekler büyütülmüştür. Bu örneklerin aygıt fabrikasyonları yapılarak karakterizasyon aşamasına hazır haline getirilmiştir. Katkı kalibrasyonu ve katkısız SL örneklerin manyetik karakterizasyonları yapılmış, SL fotodiyotların elektriksel ve optik performansları test edilmiştir.

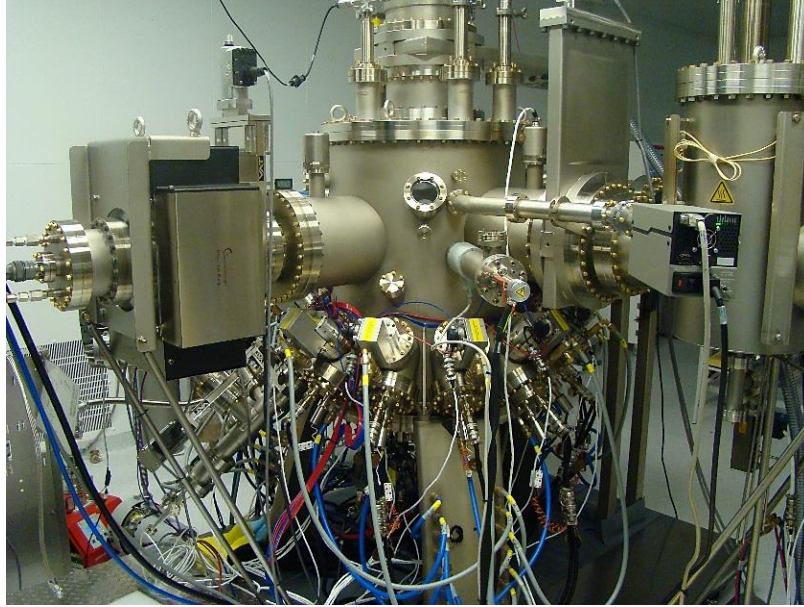
Yarıiletken kristal yapıların epitaksiyel olarak büyütülmesi, aygıt haline getirilmesi, optik ve elektronik karakteristiklerinin testi Anadolu Üniversitesi, Fizik Bölümü, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda yapılmıştır. InAs ve GaSb epikatman yapıların Hall çubuğu fabrikasyonunun bir kısmı Bilkent Üniversitesi İleri Araştırmalar Laboratuvarı'nda yapılmıştır. InAs ve GaSb epikatman yapıların Hall etkisi ölçümleri, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarında kurulu olan, fiziksel özellikler ölçüm sisteminde (Physical Properties Measurement System, PPMS), SL yapıların Hall etkisi ölçümleri ise ASELSAN Akyurt Tesisleri'ndeki Hall etkisi ölçüm sisteminde yapılmıştır.

3.1. Epitaksiyel Büyütme

MBE, atomik mertebede ve hassasiyette katman kalınlığı kontrolü sağlayan yarıiletken kristal büyütme tekniklerinden biridir. Bu yöntemde, yüksek saflıktaki malzemeler buharlaştırılarak, hedef alttaş üzerinde aynı kristal formda bileşik halinde büyümeleri sağlanmaktadır. Sahip olduğu yüksek vakum sayesinde,

buharlaşan atomların ortalama serbest yolu uzatılarak, diğer atomlarla etkileşmeden istenilen oranda ve kalınlıkta alttaş üzerinde bileşik oluşumu sağlanır [32].

Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu olan Veeco Gen20 MBE sisteminde (Şekil 3.1), İndiyum (In) ve Galyum (Ga) malzemeleri için çift filamanlı SUMO hücreleri, Arsenik (As) ve Antimon (Sb) malzemeleri için vana kontrollü kırıcı bölge (valved cracker) efüzyon hücreleri kullanılmaktadır. Katkı atomu olarak kullanılan Silisyum (Si) ve Berilyum (Be) malzemeleri için ise tek filamanlı efüzyon hücreleri kullanılmaktadır.



Şekil 3.1. Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu olan MBE sistemi.

3.2. MBE Sisteminde Büyütülen Epikatman ve Süperörgü Yapılar

Kızılötesi algılayıcı olarak tasarlanan SL yapıların üretilebilmesi için öncelikle MBE sisteminde yapılan büyütme işlemlerinde kullanılacak temel parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir. Örneğin, InAs ve GaSb malzemeleri için büyüme oranları ve bunlar için ihtiyaç duyulan efüzyon hücre sıcaklıkları, yapı içindeki katkı miktarının ayarlanabilmesi için katkı malzemesi barındıran efüzyon hücre sıcaklıkları öncelikli olarak belirlenmesi gereken parametrelerdir. Hem bu adı

geçen büyüklüklerin ayrıntılı olarak belirlenmesi hem de büyütülen yapıların kristal kalitelerinin anlaşılması için sistematik olarak tek katman GaSb ve InAs epikatman yapılar büyütülmüş ve karakterizasyonları yapılmıştır. Ancak, yapılan bütün çalışmaların ayrıntıları bu tez kapsamında olmadığından burada bahsedilmemiş, sadece katkı kalibrasyonu için yapılan çalışmalar ayrıntılı olarak verilmiştir.

Bu tez kapsamında çalışılan ve sonuçları verilen örnekler temel olarak iki grupta toplanabilir; (i) tek tabaka GaSb ve InAs epikatman yapılar ve (ii) InAs/GaSb süperörgü yapılar.

3.2.1. GaSb ve InAs epikatman yapılar

InAs/GaSb SL yapının, p-i-n fotodiyot haline getirilebilmesi için, elektron ve boşlukça zengin katmanlarının büyütülmesi gerekmektedir. Bu katmanlar, süperörgünün büyütüldüğü oranlarda uygun sıcaklıklarda safsızlık atomları ile katkılanarak, kontak ve eklem bölgeleri oluşturulmaktadır. Epikatman ve SL katmanların, p ve n-tipi davranması, GaSb ve InAs bileşiklerinin sırasıyla Be ve Si (veya GaTe) safsızlık atomlarıyla katkılanmasıyla gerçekleşir. Katkı kalibrasyon eğrilerinin oluşturulabilmesi için p-tipi GaSb:Be ve n-tipi InAs:Si epikatman tabakaları, alttaş ve katkı hücre sıcaklıkları değiştirilerek büyütülmüş ve örnek grupları oluşturulmuştur. Be ve Si katkılı olarak büyütülen örneklerin kodları ve büyütme parametreleri sırasıyla Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Be katkılı GaSb epikatman örnek grubu.

Örnek Adı	Alttaş	Epikatman Kalınlığı [μm]	Be Hücre Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]
Epi-01	GaSb	2	743
Epi-04	GaAs	2	743
Epi-05	GaAs	2	723
Epi-06	GaAs	2	693
Epi-07	GaAs	2	743
Epi-15	GaAs	1	720
Epi-16	GaAs	2	740

Tablo 3.2. Si katkılı InAs epikatman örnek grubu.

Örnek Adı	Alttaş	Epikatman Kalınlığı [μm]	Si Hücre Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]
Epi-02	GaSb	2	1092
Epi-03	GaAs	2	1092
Epi-08	GaAs	2	1092
Epi-09	GaAs	2	1086
Epi-10	GaSb	2	1086
Epi-11	GaSb	2	1080
Epi-12	GaSb	2	1092
Epi-13	GaSb	2	1086
Epi-14	GaAs	1	1100
Epi-15*	GaAs	7,2	-

* Katkı kalibrasyonu amacıyla yurt dışında büyütülmüştür.

3.2.2. InAs/GaSb süperörgü yapılar

Tez kapsamında, opto-elektronik karakterizasyonu yapılmak üzere, p-i-n diyot yapısında, InAs ve GaSb katman kalınlıkları sistematik olarak değiştirilerek beş ayrı SL büyütülmüştür (Tablo 3.3). SL yapı içerisindeki arka plan taşıyıcı yoğunluğunu ölçmek amacıyla SL-02 örneğiyle aynı büyütme koşullarına sahip katkısız (i) SL yapı, GaSb ve GaAs alttaş üzerine büyütülmüştür (HSL-01 ve HSL-02).

Tablo 3.3. Tez çalışmasında kullanılan InAs/GaSb SL yapıları örnekler.

Örnek Adı	Alttaş	InAs (ML)	GaSb (ML)	Yapı
SL-01	GaSb	9	9	p-i-n fotodiyot
SL-02	GaSb	8	9	p-i-n fotodiyot
SL-03	GaSb	7	9	p-i-n fotodiyot
SL-04	GaSb	7	8	p-i-n fotodiyot
SL-05	GaSb	7	7	p-i-n fotodiyot
HSL-01	GaSb	8	9	(i) SL
HSL-02	GaAs	8	9	(i) SL

Fotodiyot yapısındaki örnekler, 40/60/40 tekrarlı sırasıyla p, i ve n SL tabakalara sahiptir. SL yapıları oluşturan InAs ve GaSb tek-katmanları (monolayer-

ML) arasında 2,5 Å InSb benzeri ara yüzey geçişleri bulunmaktadır. Üst ve alt kontak tabakaları n-tipi InAs ve p-tipi GaSb epikatman yapısındadır (Şekil 3.2). Bu yapılara ait büyütme parametreleri ve kristal analizleri detaylı olarak Bülent Arıkan'ın tez çalışmasında yer alacaktır [33].

	20 nm InAs:Si	n
40x	InAs:Si/GaSb Süperörgü	n
60x	InAs/GaSb Süperörgü	i
40x	InAs/GaSb:Be Süperörgü	p
	1000 nm GaSb:Be	p
	500 nm GaSb Tampon	i
	GaSb:Te Altaş	n

Şekil 3.2. İncelenen InAs/GaSb p-i-n SL fotodiyot yapısının şematik gösterimi.

3.3. Aygıt Üretimi

MBE sisteminde büyütülen tek kristal yarıiletken yapıların, opto-elektronik ve manyetik karakterizasyonlarının yapılabilmesi için aygıt üretimleri yapılarak ölçümlere hazır hale getirilmeleri gerekmektedir.

SL algılayıcıların fabrikasyon sürecinde, mesa ve kontak desenleri, standart fotolitografi teknikleri kullanılarak yapılmıştır. Aygıt üretimi basamakları, SL fotodiyot üretiminde kullanılan büyüklükler üzerinden alt başlıklar halinde aşağıda kısaca anlatılmıştır.

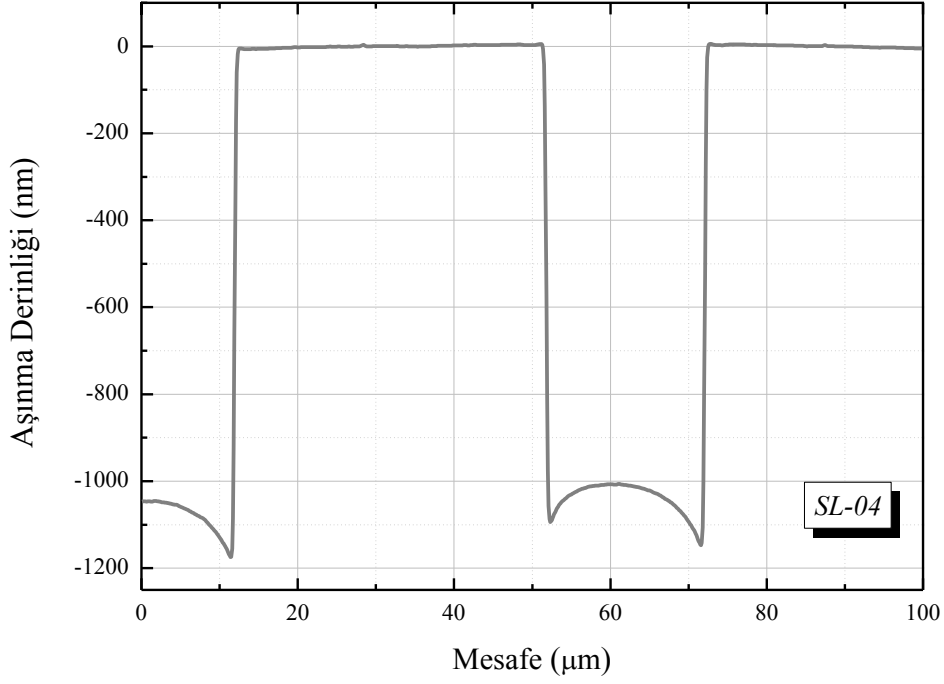
Örnek Temizliği; Numune yüzeyinde oluşan organik kirler, toz ve doğal oksit tabakası aygıtın performansını etkileyen önemli kusurlardır. Numune yüzeyindeki organik kirleri temizlemek için örnekler, sırasıyla aseton ve alkol (izopropanol) içinde 5'er dakika bekletilerek kimyasal olarak temizlenmiştir. Daha sonra 1 dakika deiyonize su ile kimyasal kalıntılardan arındırılmış ve yüksek saflıktaki azot gazı (N₂) ile kurutulmuştur. Örnekler 150°C'de 5 dakika ısıtılarak, yüzey üzerine tutunan su ve kimyasal kalıntıları buharlaştırılmıştır.

Fotolitografi; Temizlik işleminden sonra, örneklerin üzerine UV ışığa duyarlı olan AZ5214E-IR fotorezist kaplanmıştır (40 sn 3000 rpm). Fotorezistin yüzey üzerinde daha iyi tutunması için hafif ısıtma işlemi (110°C’de 1 dk) gerçekleştirilmiştir.

Maske hizalayıcısı (MIDAS, MDA-400M-6) yardımıyla, fotorezist kaplı örnekler üzerine mesa deseni hizalanarak 20 sn boyunca UV ışığa maruz bırakılmıştır. Daha sonra örnekler üzerindeki gizli mesa desenini ortaya çıkarmak için 1:4 oranında AZ400K:H₂O tab (developer) çözeltisi hazırlanmış ve örnekler çözelti içerisine daldırılmıştır. Örnek yüzeyinde mesa deseni belirgin hale geldikten sonra çözelti içerisinden çıkartılarak, deiyonize su ile arındırılmış ve azot (N₂) gazı ile kurutulmuştur.

Mesa deseni aktarılan örnek yüzeyindeki fotorezistin, kimyasal aşındırıcı içerisindeki dayanıklılığını arttırmak için 120°C’de 5 dk sert ısıtma (hard-bake) işlemi uygulanmıştır. Bu işlem sonucunda fotorezistin kalınlığı profilometre (KLA Tencor P 6) yardımıyla 1,6 µm olarak ölçülmüştür.

Islak aşındırma; Mesa deseni aktarılan örneklerin, kimyasal çözelti yardımıyla alt kontak bölgesine kadar aşındırılma sürecini kapsamaktadır. Islak aşındırıcı çözelti olarak, InAs/GaSb SL algılayıcıların fabrikasyonunda sıklıkla tercih edilen sitrik asit (C₆H₈O₇) ve orto-fosforik asit (H₃PO₄) karışımını içeren çözelti kullanılmıştır. Çözelti bileşimini sırasıyla 5 gr C₆H₈O₇ + 200 ml H₂O + 10 ml H₃PO₄ + 20 ml H₂O₂ oluşturmaktadır. Sitrik asit, GaSb malzemesini oldukça yavaş aşındırdığından, aşındırma sürecini kısaltmak için, çözeltiye güçlü bir aşındırıcı olan orto-fosforik asit eklenmektedir. Ancak bu çözelti, aşındırma sırasında mesa desenlerinin üzerinden aşındırılacak yüzeye doğru nüfuz ederek, mesa kenarlarını daha fazla aşındırır ve homojen olmayan bir aşındırma profiline sebep olur [34] (Şekil 3.3).

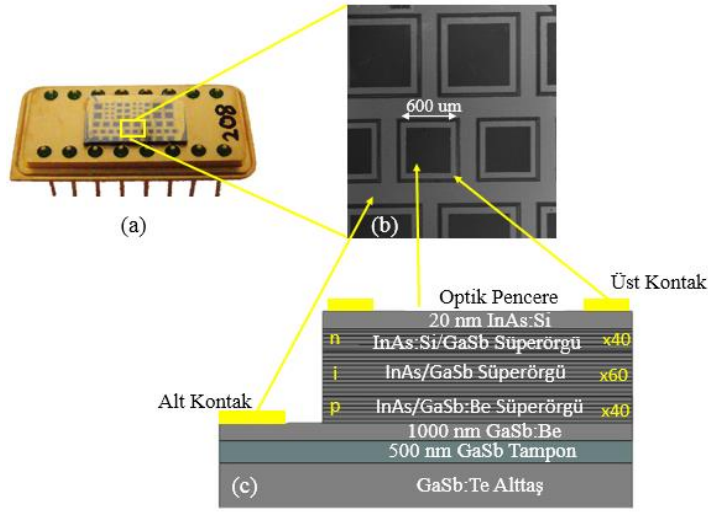


Şekil 3.3. Aşındırma işlemi sonucunda oluşan mesanın profili.

Alt kontak bölgesini de içerecek şekilde aşındırılarak mesa tanımlaması yapılan örneklerin, yüzeyindeki artık fotoresist kimyasal temizlik yapılarak (aseton, alkol, deiyonize su) uzaklaştırılmış ve kontak bölgelerinin litografisi işlemine geçilmiştir.

Alt ve üst metal kontak metalizasyonu; SL diyotun, alt (p-GaSb) ve üst (n-InAs) kontak bölgelerinin omik davranış göstermesini sağlayan metal (Ti/Au), her iki bölge için de aynıdır. Bu yüzden tek bir fotolitografi işlemi ile yüzey üzerine alt ve üst kontak deseni aktarılmıştır. Desen aktarıldıktan sonra, metal kaplanacak yüzeyler üzerindeki doğal oksit tabakasını kaldırmak için kısa süreli aşındırma işlemi gerçekleştirilmiştir (10 sn, 1:10 HCl:H₂O). Oksit kaldırma işleminden sonra örnekler üzerine, elektron demeti buharlaştırma (E-Beam Evaporation) yöntemiyle, sırasıyla 5 nm Ti ve 200 nm Au (biriktirme oranları: 0,1 Å/s ve 0,3 Å/s) kaplanmıştır [35]. Metalizasyon işleminden sonra, örnekler aseton içerisinde konularak ultrasonik titreştirici yardımıyla yüzey üzerindeki artık fotoresist ve metal kalıntıları giderilmiştir (lift-off).

Fotolitografi ve metalizasyon işleminden sonra örnekler kesilerek örnek taşıyıcı paket üzerine yapıştırılmış ve tel bağlayıcı ile alt ve üst kontak bağlantıları yapılarak karakterizasyon işlemlerine hazır hale gelmiştir. Taşıyıcı paket üzerine yerleştirilmiş örnek, farklı büyüklükteki diyotları gösteren SEM fotoğrafı ve şematik örnek yapısı Şekil 3.4’de gösterilmiştir.

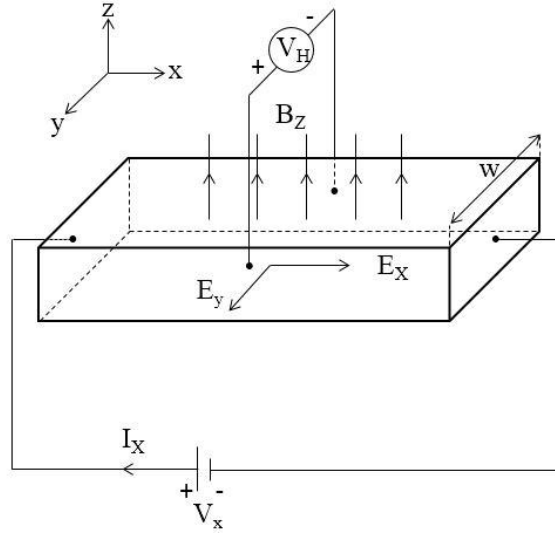


Şekil 3.4. a) Paketlenmiş tek piksel diyot, b) mesanın SEM görüntüsü ve c) mesanın temsili kesiti.

3.4. Hall Etkisi (Hall Effect)

Şekil 3.5’de gösterildiği gibi iletken bir malzeme içerisinde akan akıma dik yönde bir manyetik alan uygulandığında, manyetik alanın etkisiyle taşıyıcılar üzerine Lorentz kuvveti etki eder. Kuvvetin etkisiyle, taşıyıcılar akıma ve uygulanan manyetik alana dik yönde sürüklenerek, örneğin karşılıklı yanal yüzeylerinde birikmeye başlarlar. Yük birikmesi nedeniyle iki yüzey arasında bir potansiyel fark oluşturur ve buna Hall voltajı (V_H veya V_{Hall}) denir. Bu durum bir elektrik alan (E_y) yaratır (Şekil 3.5) ve kararlı-durum koşullarına ulaşıldığında, taşıyıcılar üzerine etki eden Lorentz kuvveti yeni oluşan elektrik alan ($F_y = -q.E_y$) ile dengelenir [36]. Taşıyıcıların yapı içerisindeki saçılmaları ihmal edildiğinde, oluşan Hall voltajı, uygulanan manyetik alan ve akımla doğru orantılıdır. Yarıiletken malzeme sistemlerinde, oluşan Hall voltajının polaritesi ve büyüklüğü,

yapı içindeki baskın taşıyıcı tipi ve miktarına bağlı olduğundan, Hall etkisi ölçümleri malzeme karakterizasyonu bakımından oldukça önemli bir yöntemdir. Bu amaçla, özellikle katman yapıların karakterizasyonlarında kullanılan farklı geometriler ve örnek hazırlama yöntemleri mevcuttur.

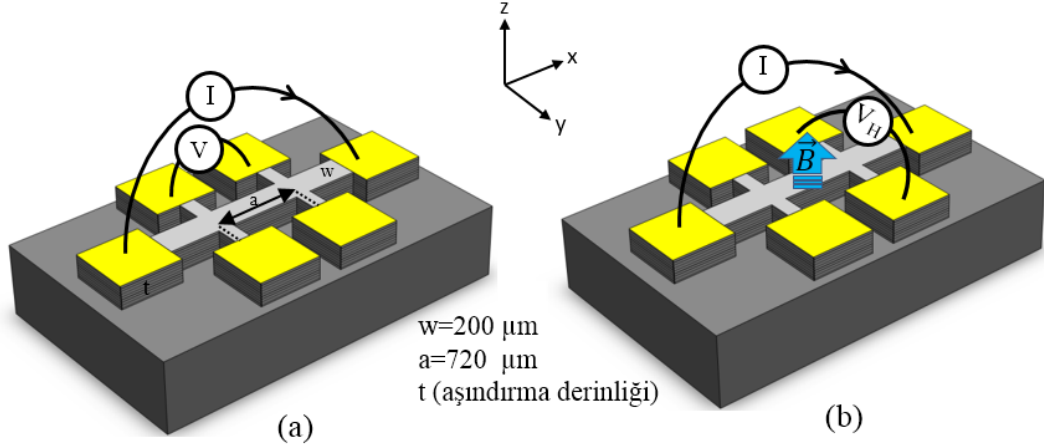


Şekil 3.5. İletken bir malzemedeki Hall olayı.

Hall Çubuğu (Bar) Geometrisi; Hall etkisi ölçümlerinde, örnek üzerinden uygun bir şekilde Hall voltajının okunabilmesi için farklı geometrilerde Hall çubuğu tasarımları mevcuttur. Bu yöntemde, kullanılacak Hall çubuğu desenlerinin yarıiletken örnek üzerinde aktarılması ve kimyasal aşındırma yapılarak akım kanallarının oluşturulması gerekmektedir. Hem çalışılacak yapının homojenliğini, hem de Hall çubuğu aygıt fabrikasyonunda bir hatanın olup olmadığını kontrol etmeye yarayan, bu tez kapsamındaki çalışmalarda kullanılan 1-2-2-1 geometrik yapısı Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Yarıiletken yapının öz direnci ve taşıyıcı yoğunluğunun ölçümünde kullanılan yöntem kısaca şöyle açıklanabilir:

Şekil 3.6a'da ifade edilen a , t ve w değerleri sırasıyla birbirine paralel kollar arasındaki mesafe, aşındırma derinliği (veya yapının kalınlığı) ve akım akan çubuğun genişliğidir. Öz direnç ölçümü için akım akan kanala paralel yöndeki kontak bölgelerinden voltaj okunur (Şekil 3.6a). Okunan voltaj sayısı uygulanan akımın yönü değiştirilerek artırılır ve ölçümden kaynaklı hata payı azaltılmış olur.

Aynı işlem karşı iki kontak bölgesi için yapılarak, öz direnç hesabı için voltaj okuması yapılır. Elde edilen iki öz direnç değerinin ortalaması alınarak yapının net öz direnci hesaplanır.



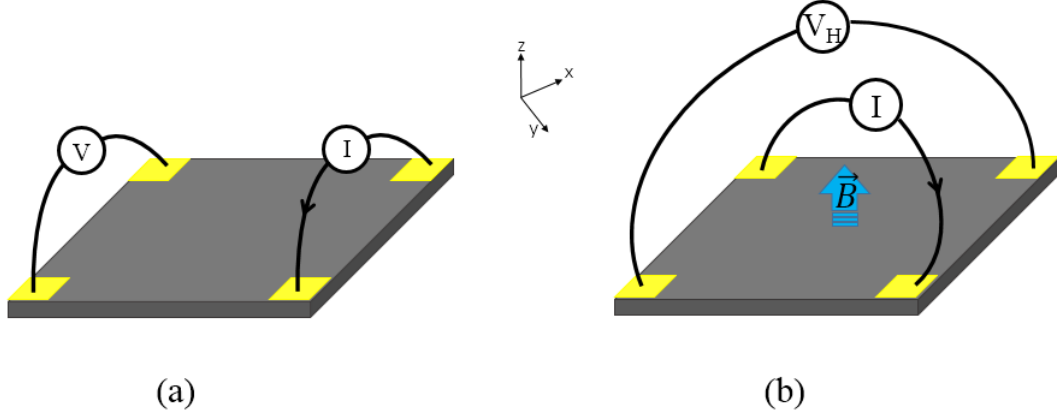
Şekil 3.6. (a) Hall çubuğu aygıtında boyuna direnç ve (b) manyetik alan altında Hall voltajı ölçümü.

Taşıyıcı yoğunluğunu ve mobilitayı hesaplamak için uygulanan akıma ve manyetik alana dik yönde oluşan Hall voltajından yararlanır (Şekil 3.6b). Manyetik alanın ve akımın her iki polaritesi için dört ayrı Hall voltajı değeri ile iki ayrı kol için Hall katsayısı hesaplanır. Ölçümlerden kaynaklanabilecek hata payının azaltılması için farklı iki koldan elde edilen Hall katsayısının ortalaması alınır.

Hall etkisi ölçümlerinden elde edilen sonuçlar, yapı içerisindeki taşıyıcıların ortalama etkisine karşılık gelmektedir. Ölçüm sonucuna, sayıca çok (baskın) olan taşıyıcıların karakteri yansır. Bulunan Hall katsayısının işareti, yapı içerisindeki baskın taşıyıcı tipini göstermektedir [37]. Bahsedilen hesaplamaların ayrıntıları Ek-1’de detaylı olarak verilmiştir.

van der Pauw Geometrisi; van der Pauw geometrisi, Hall çubuğu geometrisinde olduğu gibi bir aşındırma işlemine ihtiyaç duymadığından nispeten daha kolay bir ölçüm yöntemidir. Şekil 3.7’de gösterildiği gibi kare şeklindeki bir örneğin her

köşesine, örnek büyüklüğüne kıyasla küçük olan metal kontaklar hazırlanarak bunlar üzerinden ölçümler yapılır.



Şekil 3.7. Van der Pauw yöntemine göre (a) öz direnç ve (b) Hall etkisi ölçümü.

Ölçümden ve sistemden kaynaklanacak hata paylarının en aza indirilmesi için Hall çubuğu geometrisinde olduğu gibi, akım ve manyetik alanın farklı polaritelerinde ölçümler yapılır. Özdirenç ölçümlerinde Şekil 3.7a'da gösterildiği gibi akımın geçirildiği ve voltajın okunduğu doğrultu birbirine paraleldir. Sisteme manyetik alan uygulandığında ise akım kanalı ve Hall voltajının okunduğu doğrultu birbirine dik olacak şekilde ölçümler alınır (Şekil 3.7b). Özdirenç ve Hall voltajını ölçmek için kullanılan bağlantı şekillerine sadık kalınarak, örnek üzerindeki farklı kontak bölgelerinden ölçümler alınarak ölçüm hassasiyeti iyileştirilebilir [37].

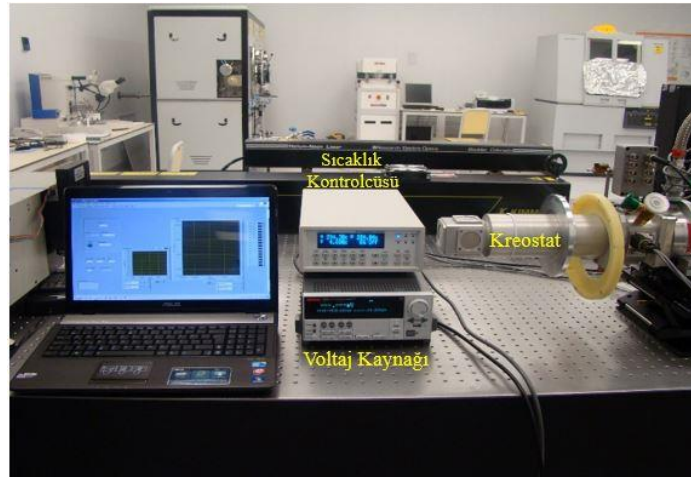


Şekil 3.8. ODTÜ Merkez Laboratuvarı'nda kurulu olan PPMS sistemi (Cryogenic Limited).

Epikatman yapıların Hall etkisi ölçümlerinin yapıldığı, PPMS sistemi Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Hall çubuğu ve van der Pauw geometrisinde taşıyıcı yoğunluğu ve mobilitesinin, nasıl hesaplandığı Ek-1’de yer almaktadır.

3.5. Karanlık Akım Ölçümleri

Karanlık akım, herhangi bir optik uyarma olmadan, diyot içerisinde oluşan akımı ifade eder. Üretilen diyotlardaki baskın karanlık akım mekanizmalarını tanımlayabilmek amacıyla sıcaklığa bağlı olarak akım-voltaj karakteristikleri incelenmiştir. Örnekler kapalı devre Helyum (He) kreostat (Cryostat) içerisine yerleştirildikten sonra, diyotların üzerine herhangi bir kızılötesi ışınımın düşmesini engellemek amacıyla, kreostatın soğuk bölgesiyle temas halinde olan soğuk kalkan (cold shield) yerleştirilmiştir. Sıcaklık bağımlı ölçümlerde, örneğin bulunduğu bölgenin sıcaklığı, iki ayrı kalibre sıcaklık sensörü ile kontrol (Lakeshore 331) edilmiştir. Ölçümler, Şekil 3.9’da gösterilen deney düzeneğinde, 6 - 300 K sıcaklık aralığında ve 50 mV’luk adımlarla voltaj (Keithley 2635A) uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Akım-voltaj (I-V) verileri, LabView tabanlı yazılım aracılığıyla alınmıştır.

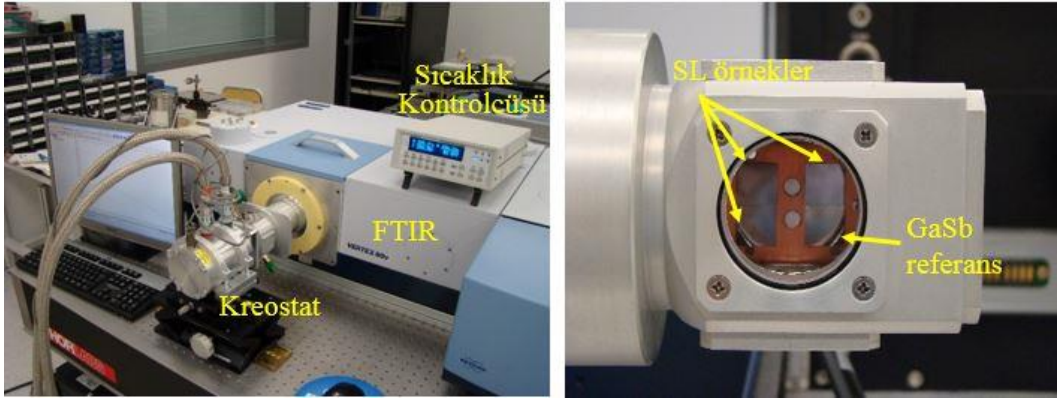


Şekil 3.9. Sıcaklık bağımlı karanlık akım ölçüm düzeneği.

3.6. Soğurma Spektrumu Ölçümleri

Tasarlanan SL diyot yapılarının, soğurma spektrumları Bruker Vertex 80V Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopi (FTIR) sistemiyle ölçülmüştür. Çıplak örnekler, soğurma ölçümü için tasarlanan ve gelen ışığın geçmesine imkân tanıyan delikli örnek tutucuya yerleştirilmiştir. Sıcaklık bağımlı soğurma spektrumu ölçümleri, Şekil 3.10'da gösterilen Kalsiyum Florür (CaF_2) pencerele kreostatta yapılmıştır. Ölçümlerde, Globar (MIR Source) ışık kaynağı, Potasyum Bromür (KBr) demet ayırıcı (beam splitter) ve MCT algılayıcı kullanılmıştır.

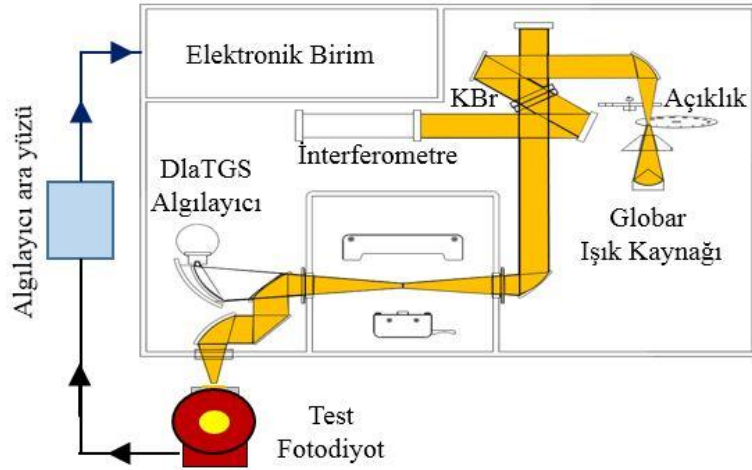
SL yapının soğurma spektrumu ile GaSb alttaşın soğurma spektrumunu birbirinden ayırmak için üzerine büyütme yapılmamış GaSb alttaş referans olarak kullanılmıştır. Referans alttaş ve SL örneğin soğurma spektrumları, her sıcaklık için ayrı ayrı kaydedilmiş ve SL yapının (SL) soğurma spektrumu, örnek (SL + alttaş) ile referansın (alttaş) spektrumu oranlanarak elde edilmiştir. Ölçümler üzerinde yapılan işlemlerin hepsi FTIR sistemine ait OPUS 7.0 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.10. Soğurma spektrumu düzeneği ve örneklerin kreostat içerisindeki yerleşimi.

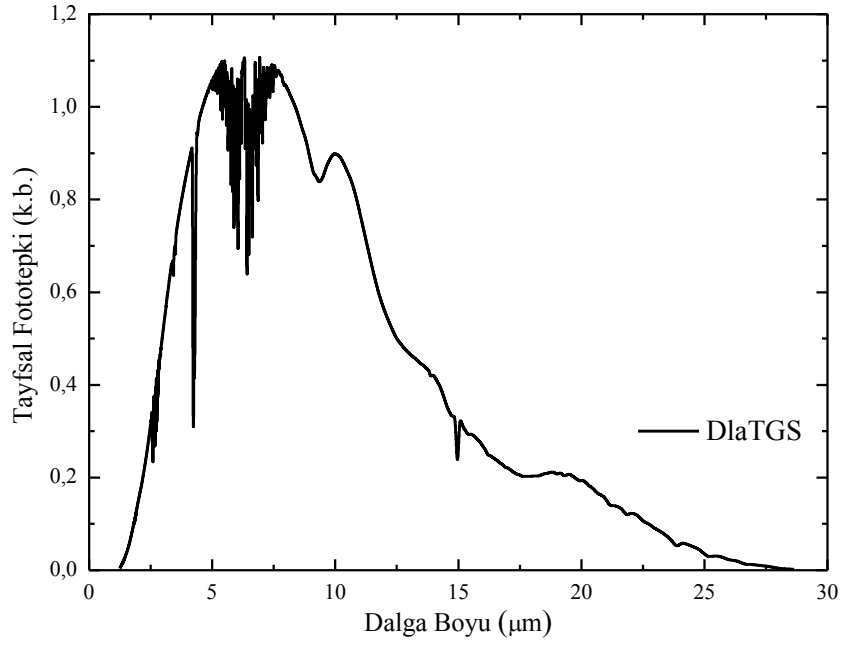
3.7. Tayfsal Fototepki Ölçümleri

Paketlenmiş tek piksel fotodiyotların tayfsal olarak hangi bölgede algılama yaptıkları ve kesim dalga boyları hakkında bilgi almak için, fototepki ölçümleri yapılmıştır. Fototepki ölçümlerinde, Şekil 3.11’de yer alan ölçüm düzeneği ve optik donanımlar kullanılmıştır. Test edilecek fotodiyotların 80 K’deki fototepki ölçümleri ZnSe pencereleli azot soğurmalı kap (dewar) içerisinde, sıcaklık bağımlı ölçümler ise CaF₂ pencereleli kreostat içerisinde yapılmıştır. Örneklerden alınan sinyal miktarı yüksek olduğu için, voltaj kaynağına ve voltaj ön yükselticisine (voltage preamplifier) ihtiyaç duyulmamıştır.



Şekil 3.11. Tayfsal fototepki ölçüm düzeneği.

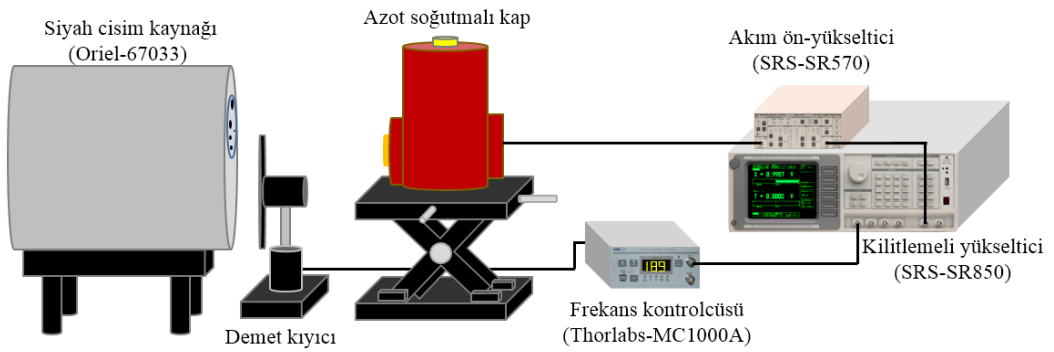
Ölçümlerde sadece örneğin gelen ışığa tepkisinin ortaya çıkartılabilmesi için, fototepkisi dalga boyu bağımsız olarak kabul edilen DlaTGS algılayıcı ile kullanılan sistemdeki optik yolun spektrumu (arkaplan) alınmıştır. Örnekten alınan ham spektrum, Şekil 3.12’deki referans spektruma bölünerek düzeltilmiştir.



Şekil 3.12. DLaTGS algılayıcının atmosfer ortamındaki fototepkisi.

3.8. Tepkisellik Ölçümleri

Foto-algılayıcıların, üzerlerine gelen kızılötesi ışınımına karşılık, ürettikleri foto-akımı belirleyebilmek amacıyla tepkisellik (responsivity) ölçümleri yapılmıştır. Tepkisellik ölçümlerinde, Şekil 3.13’de görüldüğü gibi kalibre siyah cisim kaynağı (blackbody), kilitlemeli yükseltici (lock-in amplifier), demet kıyıcı (chopper) ve akım ön yükseltici (pre-amplifier) kullanılmıştır.



Şekil 3.13. Tepkisellik ölçümleri için kullanılan düzenek.

Sabit sıcaklıkta, siyah cisim kaynağından yayılan birim alana düşen gücü hesaplayabilmek için Denklem 3.1 kullanılmıştır. Bu eşitlikte, M_k siyah cismin uyarıcılığı (exitance) ($\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{cm}$), k dalga numarası (cm^{-1}), k_B Boltzmann sabiti (erg/K), h Planck sabiti ($\text{erg} \cdot \text{s}$), c ışık hızıdır (cm/s).

$$M_k = \frac{(2\pi h c^2) k^3}{e^{(h c / k_B T) k} - 1} \quad (3.1)$$

Siyah cisim ışınımından, tepe-tepkisellik (peak responsivity) değerine geçiş yapabilmek amacıyla dönüşüm faktörü (conversion factor) olarak bilinen katsayının ve siyah cisim kaynağının tepkiselliğinin hesaplanması gerekmektedir. Denklem 3.2’de yer alan C dönüşüm faktörü, S_D foto-algılayıcıya ait FTIR’ dan elde edilmiş tayfsal tepki eğrisidir [38].

$$C = \frac{\int_0^{\lambda c} M_k \cdot dk}{\int_0^{\lambda c} S_D \cdot M_k \cdot dk} \quad (3.2)$$

Denklem 3.3’de siyah cisim kaynağının tepkiselliğinin (R_{BB}) hesaplamak için kullanılan parametreler yer almaktadır. Bu parametreler sırasıyla, V_L kilitlemeli yükselticiden okunan voltaj değeri, S_P akım ön-yükselticinin hassasiyeti (sensivity), E_{ESE} genişletilmiş kaynak etkisi, θ_{IA} demetin gelme açısı, T_W pencerenin geçirgenliği, R_S örnek yüzeyindeki yansıma miktarı ve A_D aktif diyot alanıdır.

$$R_{BB} = \frac{V_L \cdot S_P}{(\int_0^{\infty} M_k \cdot dk) \cdot E_{ESE} \cdot \theta_{IA} \cdot T_W \cdot R_S \cdot A_D} \quad (3.3)$$

Tepe tepkisellik değeri (R_P), dönüşüm faktörü ve siyah cisim kaynağının tepkiselliğinin çarpımıyla hesaplanır (Denklem 3.4). Tepe tepkisellik değeri ile

normalize edilmiş fototepki spektrumu değeri çarpılarak dalga boyuna bağlı olarak tepkisellik (A/W) spektrumu elde edilir [38].

$$R_p = C \cdot R_{BB} \quad (3.4)$$

Kuantum verimi (η), birim foton başına, algılayıcının çıkışından elde edilen foto-taşıyıcı miktarını gösteren bir parametredir ve

$$\eta = \frac{hc}{q\lambda} R_p \quad (3.5)$$

denklemlerle bulunur. Burada λ dalga boyu (m), q elektron yükü (C) 'dür. Planck sabiti ve ışık hızının birimleri MKS sistemindedir.

4. EPIKATMAN VE SÜPERÖRGÜ YAPILARDA HALL ETKİSİ ÖLÇÜMLERİ

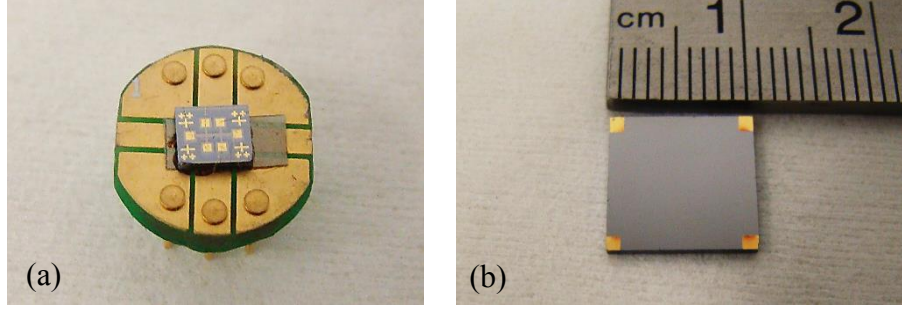
Bu bölümde katkı kalibrasyonu için büyütülen epikatman yapıların sabit manyetik alan altındaki ve değişen manyetik alana bağlı ölçüm sonuçları yer almaktadır. Ayrıca, kullanılan alttaşın SL yapıya olan etkisinin anlaşılabilmesi için; GaAs ve GaSb alttaş üzerine büyütülmüş katkısız SL yapıya ait ölçüm sonuçları ve tartışmalar yer almaktadır.

4.1. N ve P tipi Epikatman Yapılarda Hall Etkisi Ölçümleri

P-i-n yapıları tip-II SL fotodiyotların, p ve n-tipi katkılı bölgelerindeki taşıyıcı seviyesi kontrolü, MBE sisteminde kullanılan büyütme oranı ve katılanacak safsızlık atomları için kullanılan efüzyon hücrelerinin sıcaklıklarıyla yapılır. Katkı kalibrasyonu yapabilmek için farklı efüzyon hücre sıcaklıklarının kullanıldığı GaSb ve InAs epikatman yapılarda, taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite ölçümleri, oda sıcaklığında ve sabit manyetik alan altında gerçekleştirilmiştir.

Sabit Manyetik Alan Altındaki Ölçümler

Sabit manyetik alan altındaki ölçümler, 1 Tesla manyetik alan değerinde ve oda sıcaklığında (298 K) gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin yapıldığı sisteme uygun ve manyetik alandan etkilenmeyen örnek paketleri üzerine sabitlenen ve tel bağlantıları yapılan örnekler (Şekil 4.1a), ölçüm sistemine ait örnek tutucuya yerleştirildikten sonra ölçümler alınmıştır. Manyetik alanın olmadığı durumda, ana kol üzerinden 100 μA 'lık akım geçirilerek Hall çubuğundaki kollar arasında oluşan voltaj ölçülmüştür. Voltaj değerleri, akımın her iki yönü (+100 μA ve -100 μA) için de kaydedilmiştir.



Şekil 4.1. Hall ölçümünde kullanılan a) Hall çubuğu ve b) van der Pauw geometrili aygıtlar.

Yapı içerisindeki verici veya alıcı enerji seviyelerinde tuzaklanmış taşıyıcılar ısı enerjileri nedeniyle serbest hale gelerek taşınma katkıda bulunurlar. Sabit büyütme oranı koşulunda, katkı hücresi sıcaklığı yapı içerisindeki taşıyıcı miktarına etki eden en önemli parametredir. GaAs alttaş üzerine büyütülen Be katkılı GaSb epikatman örneklerin katkı hücresi sıcaklıkları ve Hall etkisi ölçümlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.1’de özetlenmiştir. Bu gruptaki Epi-01 kod numaralı örnek, diğerlerinden farklı olarak GaSb alttaş üzerine büyütülmüştür.

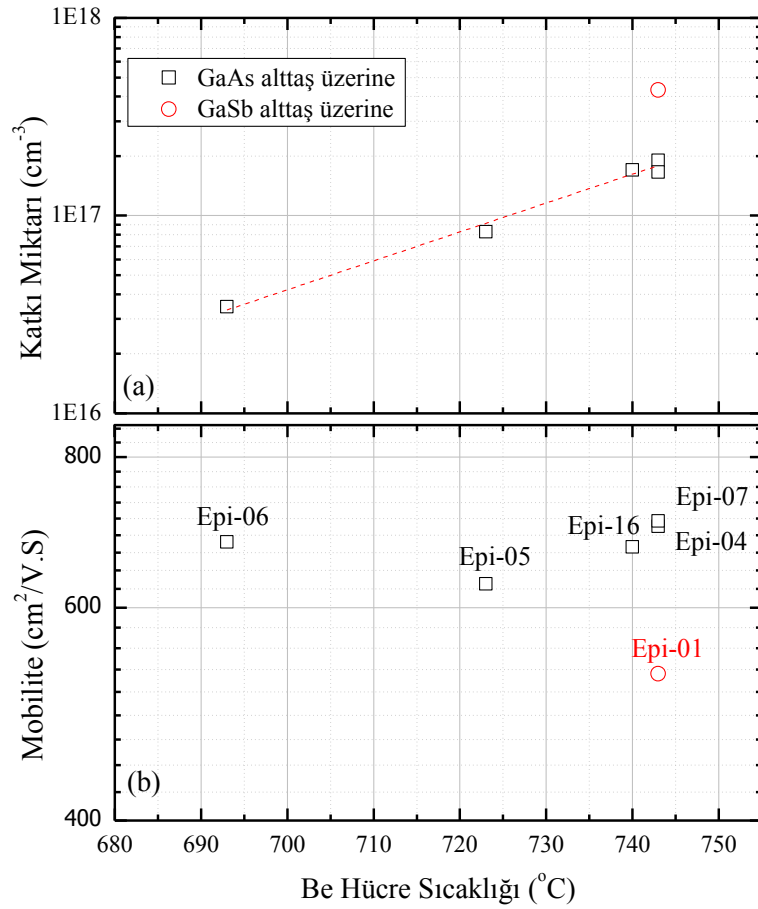
Tablo 4.1. GaAs alttaş üzerine büyütülen Be katkılı GaSb epikatman örneklerin katkı hücresi sıcaklığı ve Hall etkisi ölçüm sonuçları.

Örnek Adı	Be Hücre Sıcaklığı [°C]	ρ [$\Omega.cm$] ($\times 10^{-2}$)	μ [$cm^2/V.s$]	$ R_{H ort} $ [$cm^3.C^{-1}$]	P [cm^{-3}] ($\times 10^{17}$)
Epi-01*	743	2,74	529	14,50	4,30
Epi-04	743	4,68	701	32,85	1,90
Epi-05	723	11,94	628	75	0,83
Epi-06	693	26,50	680	180,20	0,35
Epi-07	743	5,32	708	37,67	1,66
Epi-16	740	5,45	674	36,75	1,70

*GaSb alttaş üzerine büyütülmüştür.

P-tipi GaSb alttaş ($\sim 2 \times 10^{17} cm^{-3}$) üzerine büyütülen Epi-01 örneği için taşıyıcı yoğunluğu, aynı sıcaklıkta Be ile katkılanarak GaAs alttaş üzerine büyütülen GaSb epikatmana kıyasla daha yüksek bulunmuştur (Şekil 4.2a). Bunun sebebi olarak, oda sıcaklığında GaSb alttaştaki taşıyıcıların, manyetik alan altında

epikatman içindeki taşıyıcılarla etkileşerek taşıyıcı Hall voltajına daha az katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Hall voltajının düşmesi, daha yüksek taşıyıcı yoğunluğunun ölçülmesine neden olur. Bu etkileşmeleri destekleyebilecek bir diğer veri ise yapının öz direncinin ve mobilitenin daha düşük olmasıdır. Efüzyon hücre sıcaklığının 743°C olduğu diğer örneklerin mobiliteleri Epi-01'den daha yüksektir (Şekil 4.2b).



Şekil 4.2. Berilyum katkılı GaSb epikatmanlar için (a) katkı miktarı ve (b) boşluk mobilitesinin efüzyon hücre sıcaklığına bağlı değişimi.

Benzer şekilde, GaAs ve GaSb alttaş üzerine büyütülen Si katkılı InAs epikatman örneklerin katkı hücresi sıcaklıkları ve Hall etkisi ölçümlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.2 ve 4.3'de özetlenmiştir.

Tablo 4.2. GaAs alttaş üzerine büyütülen Si katkılı InAs epikatman örneklerin katkı hücresi sıcaklığı ve Hall etkisi ölçüm sonuçları.

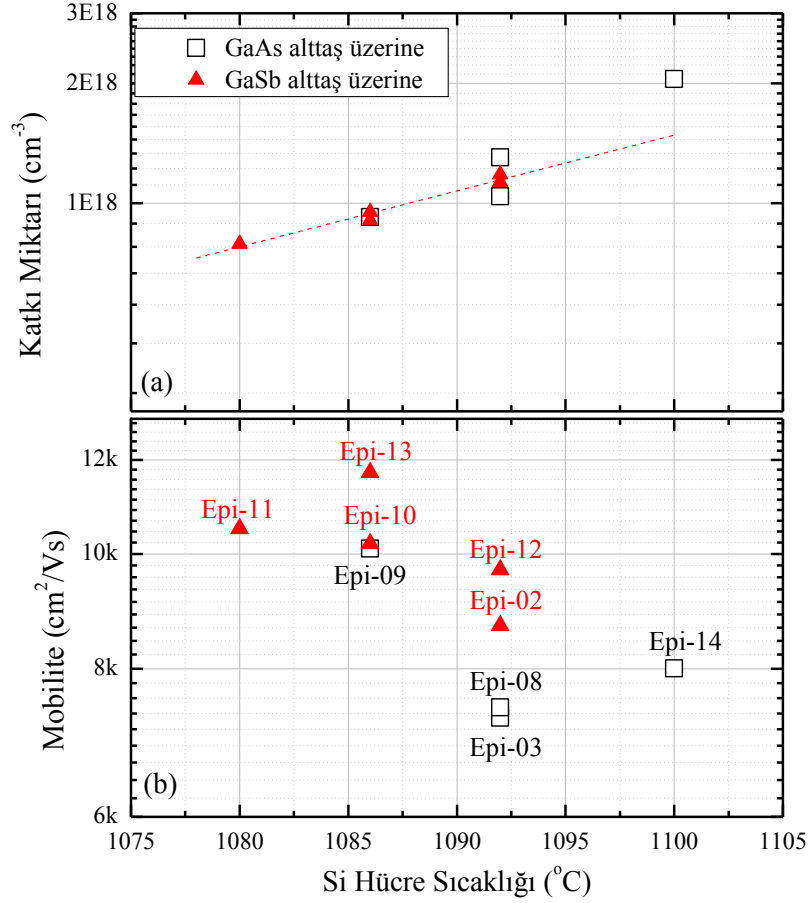
Örnek Adı	Si Hücre Sıcaklığı [°C]	ρ [$\Omega \cdot \text{cm}$] ($\times 10^{-4}$)	μ [$\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$]	$ R_{H \text{ ort}} $ [$\text{cm}^3 \cdot \text{C}^{-1}$]	n [cm^{-3}] ($\times 10^{18}$)
Epi-03	1092	6,60	7272	4,80	1,30
Epi-08	1092	8,07	7422	5,99	1,04
Epi-09	1086	6,73	10100	6,77	0,92
Epi-14	1100	3,81	8005	3,05	2,05

Tablo 4.3. GaSb alttaş üzerine büyütülen Si katkılı InAs epikatman örneklerin katkı hücresi sıcaklığı ve Hall etkisi ölçüm sonuçları.

Örnek Adı	Si Hücre Sıcaklığı [°C]	ρ [$\Omega \cdot \text{cm}$] ($\times 10^{-4}$)	μ [$\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$]	$ R_{H \text{ ort}} $ [$\text{cm}^3 \cdot \text{C}^{-1}$]	n [cm^{-3}] ($\times 10^{18}$)
Epi-02	1092	6,01	8700	5,30	1,18
Epi-10	1086	6,43	10200	6,55	0,95
Epi-11	1080	7,51	10500	7,91	0,79
Epi-12	1092	5,71	9700	5,54	1,13
Epi-13	1086	5,90	11711	6,91	0,90

Sonuçların grafik halinde gösterildiği Şekil 4.3'den de görüldüğü gibi GaSb ve GaAs alttaş üzerine büyütülen InAs epikatmanlardan birbirine oldukça yakın katkı miktarları ölçülmüştür (Şekil 4.3a). Epi-14 kod numaralı örneğin, diğerlerine kıyasla daha yüksek katkı miktarına sahip olduğu ve bu nedenle de grafiğin genelindeki lineer davranıştan ayrıldığı görülmektedir. Bu durumun sebebi, bahsi geçen örneğin grup içindeki diğer örneklerle kıyasla daha düşük büyüme oranıyla büyütülmüş olmasıdır. Bu nedenle, büyütme sırasında birim zamanda (aynı katkı atomu efüzyon hücre sıcaklığı için) yapı içerisine daha fazla Si katkı atomu yerleşmektedir. Ayrıca, GaSb üzerine büyütülen InAs tabakalardaki elektron mobiliteleri, GaAs üzerine büyütülenlere kıyasla daha yüksek bulunmuştur (Şekil 4.3b). Bu anlamda, her iki durumda da alttaşın farklı bir malzeme olan InAs epikatmana alttaşın etkisi, yukarıda bahsedilen GaSb'den farklıdır. GaSb alttaş

üzerine büyütülen katmanlardan elde edilen yüksek mobilitenin sebebi, InAs ile GaSb arasındaki örgü uyumsuzluğunun daha az olması ve bu nedenle de yapı içindeki kusurların dolayısıyla kusur kaynaklı saçılmaların daha az olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.3. Silisyum katkılı InAs epikatmanlar için (a) katkı miktarı ve (b) elektron mobilitesinin efüzyon hücre sıcaklığına bağlı değişimi.

InAs ve GaSb epikatman yapıları için kalibrasyonu eğrilerine bakıldığında (Şekil 4.2a ve Şekil 4.3a), hücre sıcaklığına bağlı olarak katkı miktarının logaritmik ekseninde lineer davranış gösterdiği görülmektedir. Aslında bu davranış, GaAs gibi diğer III-V malzeme grubundaki bileşiklerde de gözlenmektedir [39].

Manyetik Alan Taraması

Yapı içerisinde meydana gelen farklı saçılma mekanizmalarının (iyonize safsızlık saçılması, akustik fonon saçılması, piezoelektrik saçılması vb.) etkisini barındıran, katkı ve mobilite hesaplarında bir düzeltme katsayısı olan Hall faktörü (Hall factor, r_H)

$$r_H = \mu_H/\mu \quad (4.1)$$

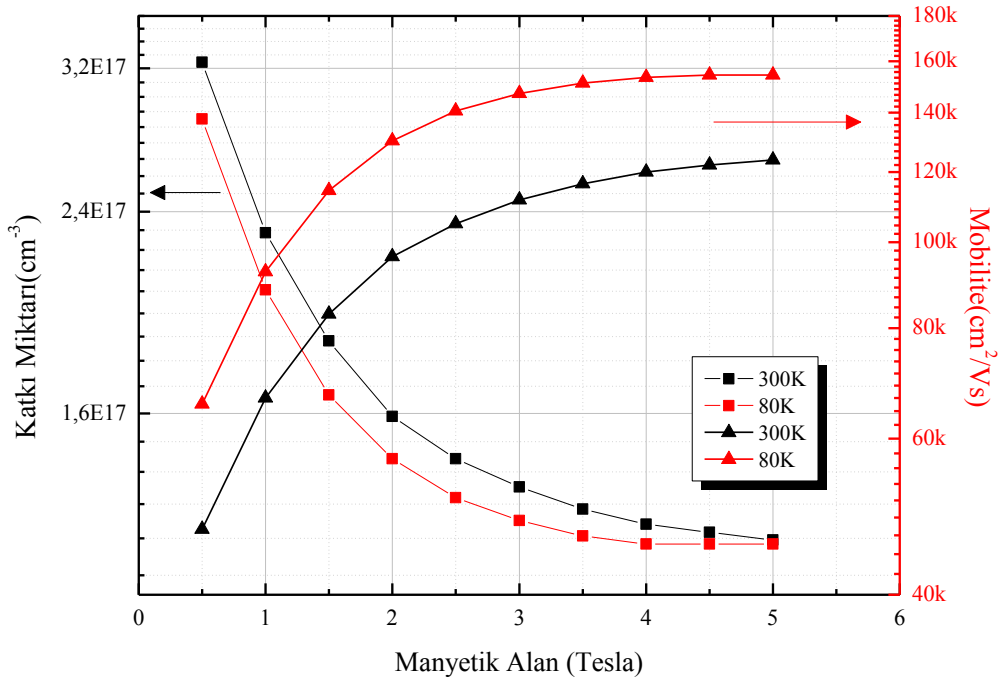
şeklinde ifade edilebilir [40]. Burada, μ_H Hall ölçümüyle elde edilen mobilite, μ ise taşıyıcıların sürüklenme (drift) mobilitesidir. Elektronların yüksek mobiliteye sahip oldukları yapılarda,

$$r_H = n_H(B = 0)/n_H(B = \infty) \quad (4.2)$$

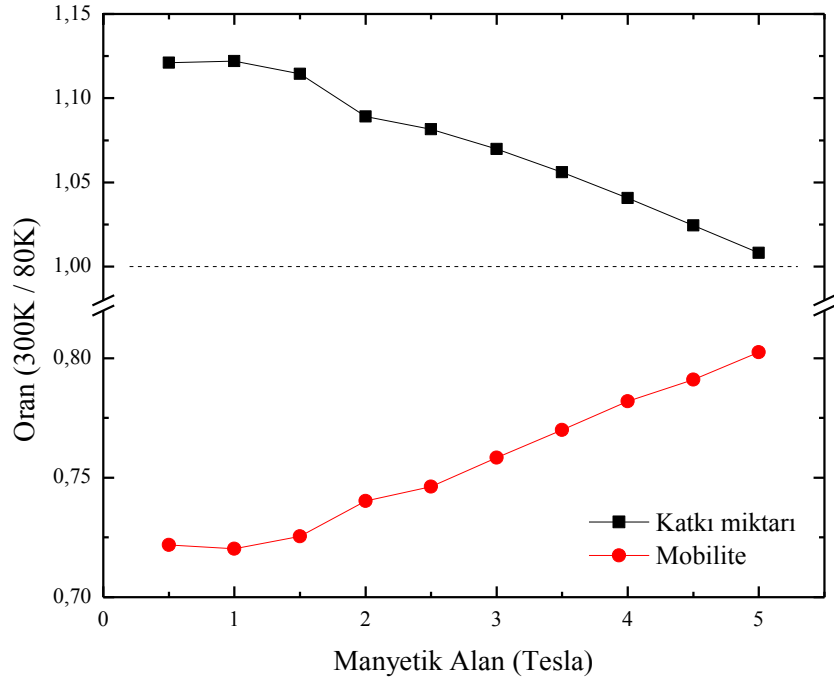
yaklaşımı yapılarak, r_H 'ın hesaplanması yoluna gidilebilir. Ayrıca, “B” manyetik alanının “ $B=\infty$ ” olma durumu manyetik alanla mobilitenin çarpımının “ $\mu.B \gg 10^8$ ” olmasını gerektirir. Burada ki μ mobilitesinin birimi $\text{cm}^2/\text{V.s}$, B manyetik alanının birimi ise Gauss'tur [41-42].

GaAs alttaş üzerine Si katkılı InAs epikatman olarak büyütülen Epi-15 kod numaralı örneğin Hall ölçümlerinden bulunan katkı miktarı ve mobilitesinin manyetik alana bağlı davranışı Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Yüksek manyetik alanlara doğru gidildikçe taşıyıcı yoğunluğunun azaldığı ve belli bir değere yakınsadığı gözlenmektedir. Örneklerden elde edilen mobilite değerleri ise, taşıyıcı yoğunluğuyla ters orantılı olduğundan, artan manyetik alan ile artmakta ve belli bir değere yaklaşarak sabitlenmektedir. Katkı miktarının ve mobilitenin manyetik alana bağlı bu değişimi, hem 300 K hem de 80 K'de yapılan ölçümlerde aynı şekilde bulunmuştur (Şekil 4.4). 80 K'de yapılan ölçümlerde bulunan mobilite değeri, 300 K'de bulunan değerlere kıyasla daha büyüktür. Bunun sebebi, sıcaklığın azalmasıyla yapıdaki fononların baskılanması ve böylece yapı içindeki taşıyıcı-

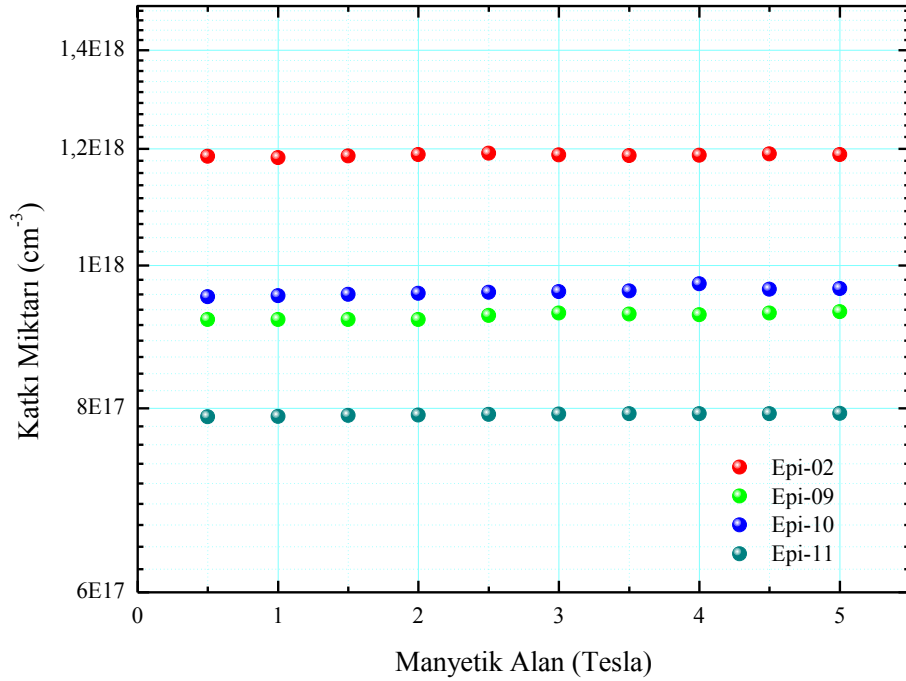
fonon etkileşmelerinin azalmasıdır. Aynı zamanda, ölçümlerin yapıldığı 80 K sıcaklığı, taşıyıcıların yapı kusurları ve iyonize safsızlık atomlarıyla etkileşmelerinin henüz yeterince baskın olmadığı kadar yüksek bir sıcaklıktır. Böylece, sıcaklığın 80 K'e düşmesiyle net saçılma kanallarında azalma olduğundan daha yüksek mobilite değeri elde edilmiştir. Ancak, düşük manyetik alan değerlerinde daha net olarak görünen bu iki sıcaklık arasındaki fark, manyetik alan değerinin artırılmasıyla azalmakta, değerler birbirlerine yaklaşmaktadır. Bu davranış, 300 K'de elde edilen mobilite ve katkı miktarlarının 80 K'deki değerlerine oranının gösterildiği Şekil 4.5'te açıkça görülmektedir. Bu durum, yüksek manyetik alanlarda yapı içerisindeki saçılma mekanizmalarının etkisinin daha az hissedilmesinden kaynaklanmaktadır [43]. Bu etkinin bir göstergesi olan Hall saçılma faktörü, Epi-15 kod numaralı örnek için oda sıcaklığında yaklaşık 2,61 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.4. Epi-15 örneğine ait manyetik alan taraması.

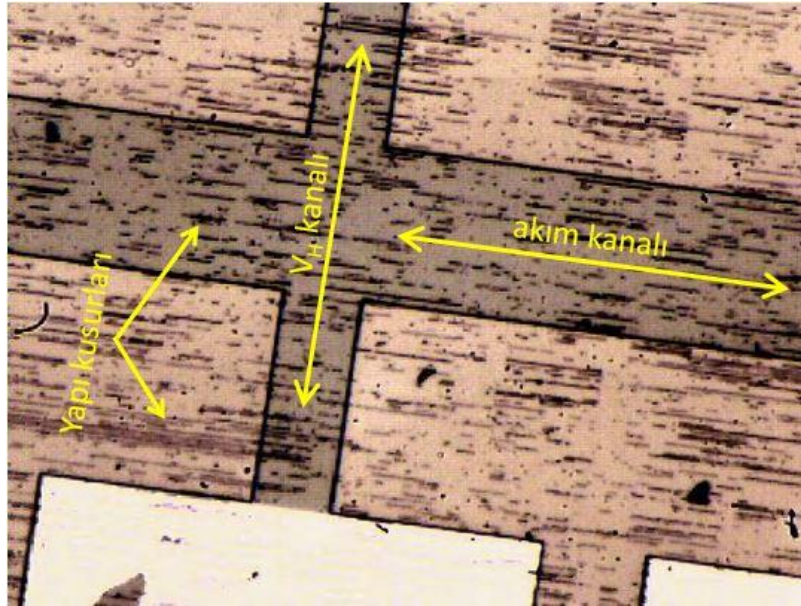


Şekil 4.5. Epi-15 örneğinin 300 K ve 80 K'deki katkı miktarı ve mobilitelerinin oranının manyetik alana göre değişimi.



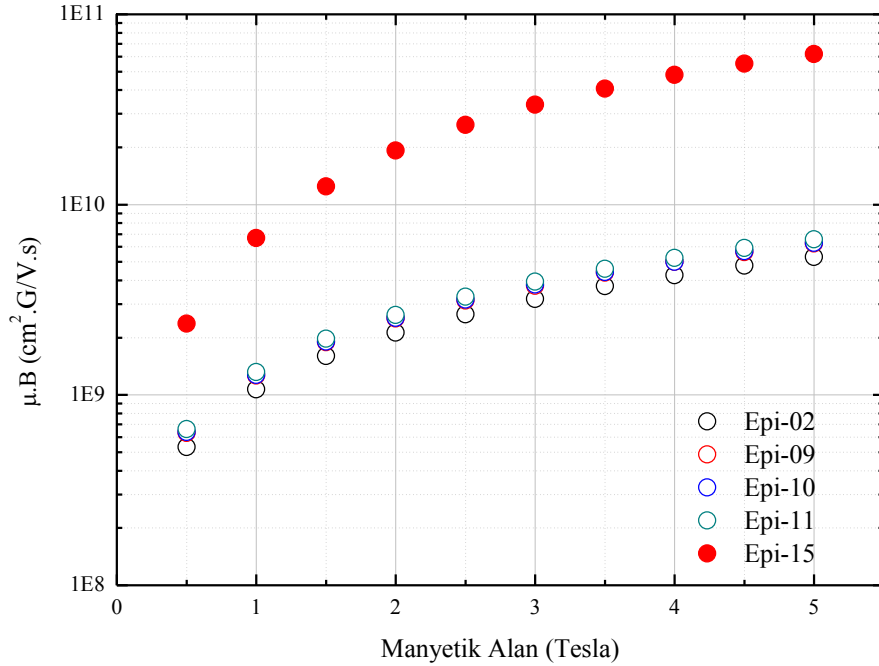
Şekil 4.6. Si katkılı InAs örneklerin, manyetik alana bağlı hesaplanan katkı miktarı.

Özellikleri Tablo 3.1’de verilen InAs:Si epikatman örneklerin 300K sıcaklıkta yapılan Hall etkisi ölçümleri sonucunda bulunan katkı miktarları manyetik alanın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Hall saçılma faktörlerinin belirlenmeye çalışıldığı bu örneklerde, yukarıda bahsedilen Epi-15 kod numaralı örnekten farklı olarak, taşıyıcı yoğunlukları manyetik alanın değişimine belirgin bir tepki göstermemektedir. Şekil 4.7’de Hall çubuğu geometrisinde hazırlanan örneğin yüzey görüntüsü verilmiştir. Yüzeyde kendini gösteren ve kristal yapıdan kaynaklandığı düşünülen kusurlar nedeniyle taşıyıcıların yeterince hızlanamadığı ve sürüklenme hızı seviyelerine ulaşamadığı düşünülmektedir. Epi-15 kod numaralı örnekte ise epikatmanın çok kalın ($7,2 \mu\text{m}$) olması nedeniyle ara yüzdeki uyumsuzluktan kaynaklanan kristal kusurlarının etkileri azalmış ve yüksek taşıyıcı mobiliteleri elde edilmiştir. Böylece, yüksek mobiliteli bu örnek artan manyetik alanın etkisiyle taşıyıcı yoğunluğunda değişim göstermektedir. Ayrıca bu örneğin (Epi-15), katkı miktarının diğer örneklere kıyasla daha düşük olması mobilite değerini yükselten önemli bir etkidir.



Şekil 4.7. Epi-12 örneğinin Hall çubuğu aygıtındaki yüzey kusurlarının görünümü.

Yüksek mobiliteye sahip elektronlarda $\mu.B$ çarpımının 10^8 'den çok büyük olması durumunda taşıyıcı mobilitelerinin sürüklenme seviyesine ulaştığından bahsedilmiştir. Şekil 4.8'de, InAs:Si örnekleri için bu çarpımın manyetik alanın bir fonksiyonu olarak değişimi gösterilmiştir: 5 T'da bu çarpım limitini, Epi-15 örneği yaklaşık olarak 650 kat, incelenen set içerisinde en yüksek mobiliteye sahip Epi-11 örneği ise 65 kat aşabilmektedir. Düşük mobiliteli yapılarda, saçılma faktörünü belirleyebilmek için elektrokimyasal kapasitans-voltaj (ECV) gibi taşıyıcı yoğunluğunun ölçülebildiği yöntemler kullanılabilir [42]. Hall ölçümü ile ECV yöntemi ile elde edilen taşıyıcı yoğunluklarının oranı saçılma faktörü olarak kullanılmaktadır [42].



Şekil 4.8. Manyetik alanın fonksiyonu olarak $\mu.B$ değerinin değişimi.

4.2. Katkısız Süperörgü Yapıların Manyetik Karakterizasyonu

InAs/GaSb SL yapılarda taşınım olayının incelenmesi ve taşıyıcı karakterizasyonunun doğru bir şekilde yapılabilmesi için hem bu yapılarla örgü uyumuna sahip hem de yalıtkan bir alttaş kullanılması gerekmektedir. Ancak,

büyütmelerde kullanılan örgü uyumlu GaSb alttaşlar, doğal p-tipi olduklarından Hall etkisi ölçümlerinden doğru sonuç almak mümkün olmamaktadır. Aynı zamanda, katkısız SL yapı içerisindeki taşıyıcıların yoğunluğu ve mobiliteleri, yapıdaki kusurlarla doğrudan ilişkili olduğundan, GaAs gibi yalıtkan ama örgü uyumsuz bir alttaş üzerine büyüme yapmak da, yapıdaki kusur yoğunluğunu arttırmaktadır. Bu durum yine elde edilen ölçüm sonuçları ile SL yapının analizini zorlaştırmaktadır.

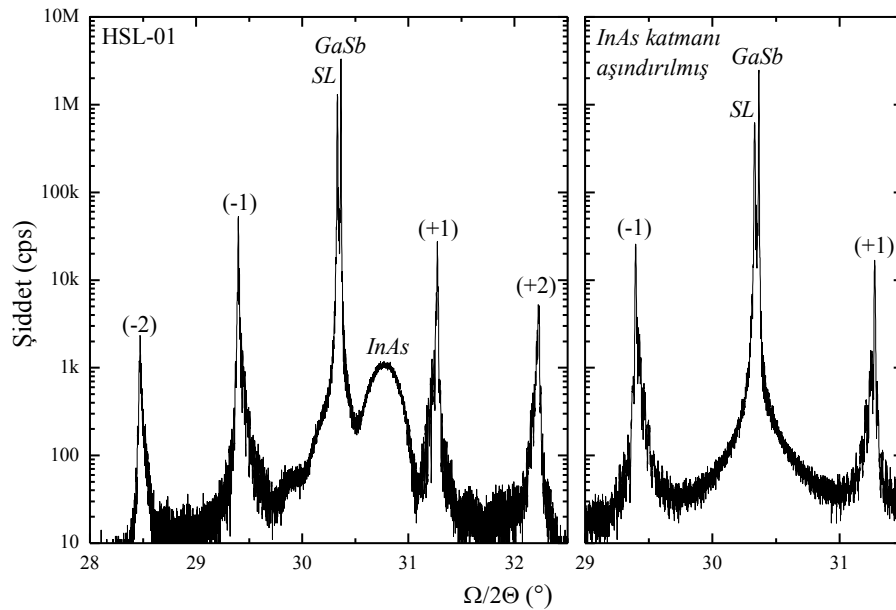
Katkısız SL yapıların, manyetik karakterizasyonu birçok grup tarafından incelenmiştir [44-47]. Ölçümlerde iletken GaSb alttaşın etkisini ortadan kaldırmak için farklı yöntemler kullanılmıştır. Kimi gruplar, SL yapılarını birbirleri ile kıyaslayabilmek için ölçümlerini, GaSb alttaştaki boşlukların SL yapıdaki taşınımına katılmadığı sıcaklıklarda (10 K) gerçekleştirmişler [44-45]. Bazı gruplar ise, ölçümleri GaSb alttaş kaldırarak ve SL yapıyı başka bir taşıyıcı yüzeye aktararak [46] veya SL yapılarını yarı-yalıtkan GaAs alttaş üzerine büyüterek [46-47] yapmışlardır. Raporlanan bu çalışmalar, SL yapıdaki InAs ve GaSb katman kalınlıklarının ve alttaşın yapıdaki net taşıyıcı miktarına doğrudan etki ettiğini göstermektedir [44-47]. InAs ve GaSb tabakalar doğal olarak sırasıyla n ve p-tipi davrandığından, yapıdaki kusurların da etkisiyle, süperörgüde hangi katmanın kalın olduğuna bağlı olarak baskın taşıyıcı tipi değişmektedir. Literatürde raporlanan katkısız InAs/GaSb SL yapılar ve Hall ölçümlerinden elde edilen sonuçlar Tablo 4.4'te özetlenmiştir.

Tablo 4.4. Literatürde yer alan sıcaklık bağımlı Hall ölçümleri.

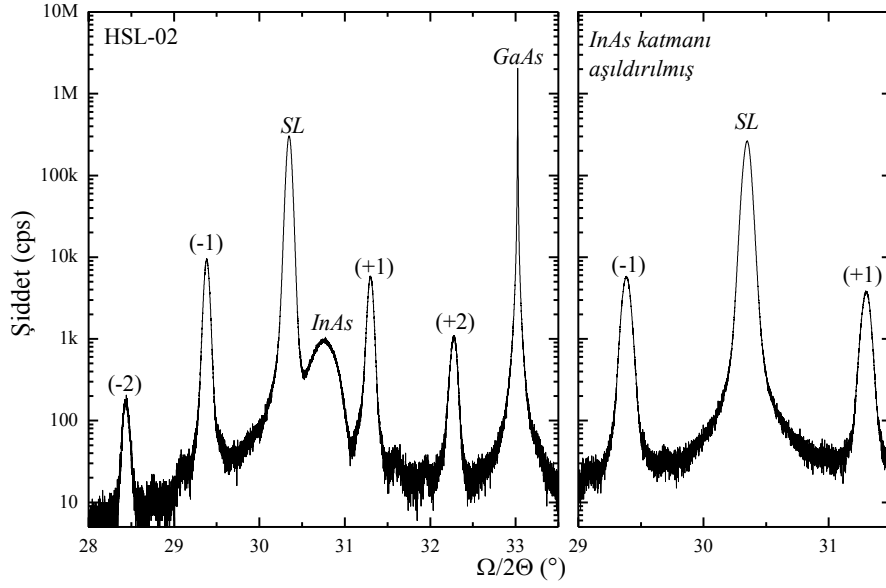
Yapı	Alttaş	Alttaş Kaldırma	Ölçüm Sıcaklığı	Taşıyıcı	Ref.
7 ML InAs / 8 ML GaSb	GaSb	Yok	10-300 K	p	[44]
21 Å InAs / 24 Å GaSb	GaSb	Yok	10-300 K	p	[45]
8 ML InAs / 8 ML GaSb	GaSb	Var	77- 300K	p (<125 K) n (>125 K)	[46]
8 ML InAs / 8 ML GaSb	GaAs	Var	77- 300K	p (<235 K) n (>235 K)	
8 ML InAs / 8 ML GaSb	GaAs	Yok	80-320 K	p (<200 K) n (>200 K)	[47]
13 ML InAs/ 7 ML GaSb	GaAs	Yok	80-300 K	n	

Katkısız SL yapı, p-i-n diyotlarda kızılötesi ışımının soğurulduğu aktif bölgedir. Fotodiyotların çalışma ilkesi gereği, foto-akım azınlık taşıyıcılar ile taşındığından, bu bölgedeki InAs ve GaSb tabakasının kalınlığı, fotonla yaratılan azınlık taşıyıcı tipini de belirlemektedir. Katkısız SL yapının n tipi davranması, azınlık taşıyıcıların boşluk; yapının p tipi olması durumunda ise azınlık taşıyıcıları elektron olmasına neden olur. Bu nedenle, özellikle LWIR bölgede çalışan fotodiyot yapılarında soğurulmanın olduğu aktif tabaka istemli olarak düşük mertebelerde (π) Be ile katkılanarak, azınlık taşıyıcıların elektron olması sağlanır [48-51].

HSL-01 ve HSL-02 kod numaralı örnekler, kızılötesi algılayıcı olarak tasarlanan p-i-n diyot yapısı (SL-02) referans alınarak ancak yapı içindeki tabakalar bilinçli olarak katkılanmadan büyütülmüştür. Bu örneklerin yüzeyindeki 20nm kalınlığındaki i-InAs tabakası, manyetik alan ölçümlerindeki etkisini ortadan kaldırmak amacıyla kimyasal olarak aşındırılmıştır. Aşındırma işleminin kontrolü, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da gösterildiği gibi HR-XRD ölçümüyle yapılmıştır: Grafikte yaklaşık $30,8^\circ$ 'de geniş bir tepe olarak kendisini gösteren sinyal, yapıdaki InAs şapka katmanından kaynaklanmaktadır. Kimyasal aşındırma işlemi yapılan örnekten alınan ölçümde bu sinyalin kaybolmuş ve sadece altta ve SL sinyalleri görünmektedir.



Şekil 4.9. GaSb alttaş üzerine büyütülmüş SL yapısı; InAs katmanın aşındırma öncesi ve sonrası.

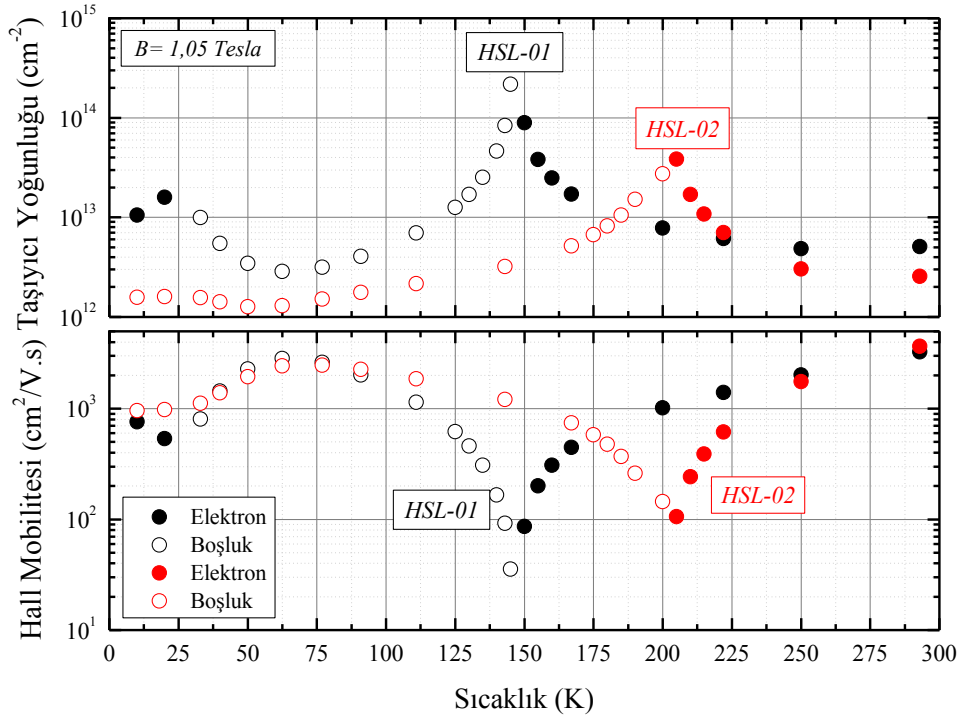


Şekil 4.10. GaAs alttaş üzerine büyütülmüş SL yapı; InAs katmanın aşındırma öncesi ve sonrası.

HSL-01 örneği için, sabit manyetik alanda ($B=1,05$ Tesla), sıcaklığa bağlı olarak taşıyıcı yoğunluğunun (cm^{-2}) değişimi Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Taşıyıcı tipi 20 K ve 145 K’de olmak üzere iki kez değişmektedir. 10 ve 20 K’de net taşıyıcı tipi elektrondur. Bu durumun, alttaşın n-tipi olmasından ve yapıdaki taşıyıcıların bu sıcaklıkta iletme katılamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte (20 K – 145 K arasında), GaSb’deki boşlukların elektronlara kıyasla daha fazla olması net taşıyıcıların boşluk olmasına neden olmaktadır. 145 K’den sonra ise InAs’dan kaynaklı elektronların, boşluklara kıyasla sayıca daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 4.11’de yer alan HSL-02 örneğinde net taşıyıcı tipindeki değişim sadece 205 K’de olmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalara bakıldığında (Tablo 4.5), net taşıyıcı tipindeki değişimin olduğu sıcaklık aynı kalınlık oranına sahip yapılar arasında farklılık göstermektedir. Bu durum büyütme koşullarına, kristal kalitesine ve büyütme sisteminden gelen arka plan katkıya bağlıdır.

GaSb ve GaAs alttaş üzerine büyütülen bu iki örneğin Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da verilen XRD sallantı eğrisi grafikleri karşılaştırıldığında, GaSb üzerine büyütülen HSL-01 kod numaralı örnekten alınan SL kırınım sinyallerinin daha keskin olduğu görülmektedir. Sinyallerdeki bu keskinlik aynı zamanda kristalin homojenliğinin de bir göstergesidir. HSL-02 örneğinde SL sinyallerinin geniş

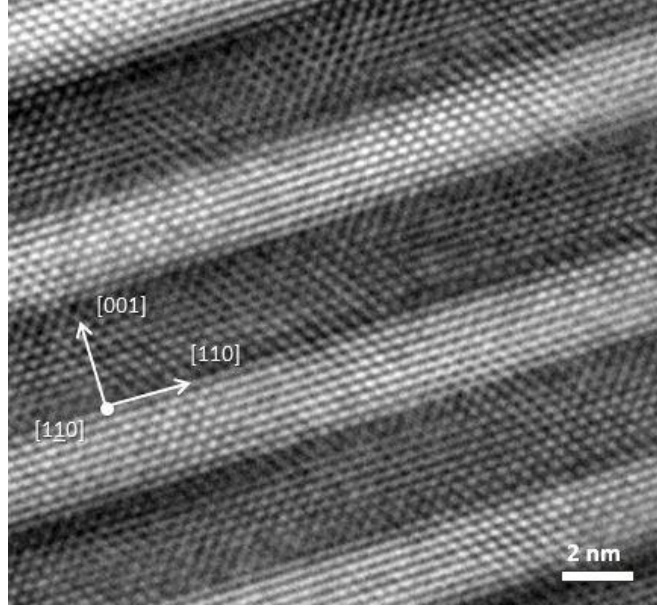
olması, alttaş ile SL arasındaki örgü uyumu arasındaki %7'lik farktan kaynaklanmaktadır. Mobiliteler arasındaki ilişki incelendiğinde, taşıyıcı tipinin değiştiği sıcaklıklarda farkın arttığı görülmektedir. Bu sıcaklık noktaları aynı zamanda taşıyıcı yoğunluklarının en fazla olduğu durumdur ve bu yüzden mobilite değerleri düşmektedir. Diğer bir önemli durum ise oda sıcaklığında taşıyıcı miktarlarının ve mobilitelerinin birbirine yakın olmasıdır. Bu durum şu şekilde açıklanabilir: GaSb alttaş üzerine büyütülen örneğin kristal kalitesinin GaAs üzerine büyütülen örnekten daha iyi olmasına karşın, alttaştaki taşıyıcıların taşınma etki ederek taşıyıcı yoğunluğunun artmasına sebep olup mobilitenin düşmesine neden olmaktadır. GaAs üzerine büyütülen SL'in mobilitesi ise kristal kalitesinden dolayı sınırlanmıştır. 80 K'de foto-algılayıcı olarak tasarlanan yapılar (SL-01 ve SL-05 grubu) için soğurma tabakasının çoğunluk taşıyıcılarının boşlukların olduğunu, dolayısıyla aktif foto-taşıyıcıların elektronların olduğu söylenebilir.



Şekil 4.11. SL örneklerin sıcaklığa bağlı olarak net taşıyıcı yoğunluğunun ve Hall mobilitesinin değişimi.

5. SÜPERÖRGÜ FOTODİYOTLARIN OPTO-ELEKTRONİK KARAKTERİZASYONU

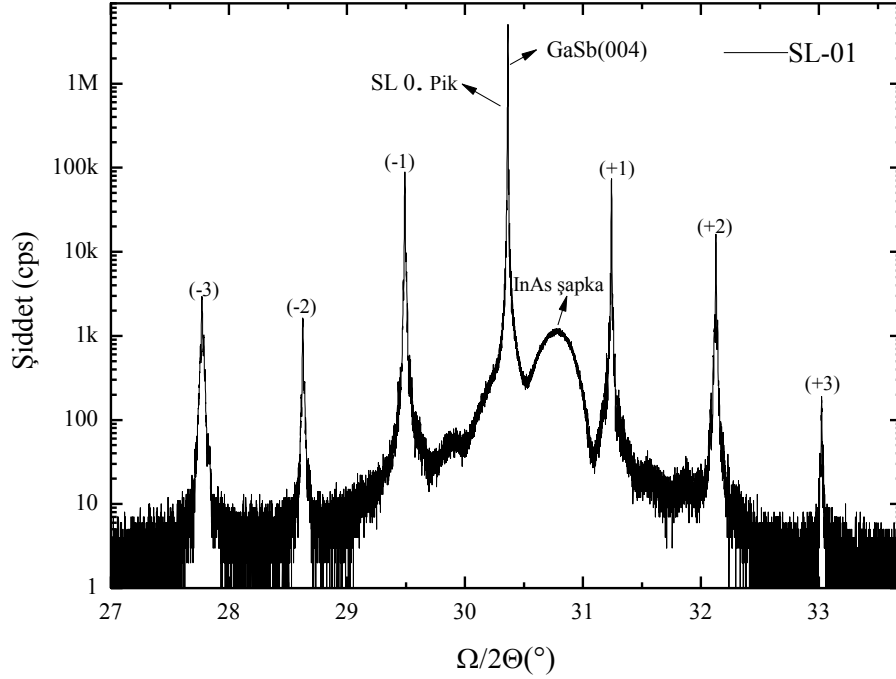
Bu bölümde, süperörgü yapıyı oluşturan InAs ve GaSb tabakaları sistematik olarak değiştirilen ve orta kızılötesi bölgede algılama yapmak üzere tasarlanan beş ayrı algılayıcıya ait soğurma spektrumu, tayfsal fototepki, tepkisellik, kuantum verimi ve karanlık akım sonuçları yer almaktadır. Yapılan karakterizasyonlar sonucunda, örnekler birbirleriyle kıyaslanmış ve sonuçlar kuramsal bilgilerle değerlendirilmiştir.



Şekil 5.1. InAs/GaSb süperörgünün HRTEM görüntüsü [52].

Süperörgü yapıların kristal kalitesi ve periyot kalınlık kontrolü, yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskopuyla (High Resolution Transmission Electron Microscopy, HRTEM) ve yüksek çözünürlüklü x-ışını sallantı eğrisi (X-Ray Rocking Curve, XRC) ölçümleriyle yapılmıştır. Özellikle HRTEM tekniği ile katmanlar arasındaki arayüz geçişlerini, kristal kusurlarını ve süperörgüyü oluşturan katmanların kalınlıklarını görmek bakımından önemli bilgi sağlamaktadır. Şekil 5.1’de InAs ve GaSb katman kalınlıkları 9 ML olarak hedeflenen SL’ye ait HRTEM görüntüsü yer almaktadır. Görüntüde, katmanlar arasındaki geçişlerin keskin ve

kalınlıkların hedeflenen değerlerde olduğu görülmektedir. Süperörgü yapıların HRTEM ile yapılan analizleri Yusuf Eren Suyolcu'ya ait yüksek lisans tezinde yer almaktadır [52].



Şekil 5.2. InAs/GaSb süperörgü yapının GaSb (004) civarında çift kristal X-ışını sallantı eğrisi [33].

X-ışını RC analiz tekniği, süperörgü yapılarda periyot kalınlığı, altaş ile süperörgü arasındaki org uyumsuzluğu, süperörgüyü oluşturan malzemelerin kristal kalitesinin belirlenmesinde oldukça kullanışlı bir tekniktir. lmler Panalytical XPert Pro MRD marka ve modeldeki yüksek znrlkl X-ışınları kırınım cihazı kullanılarak yapılmıştır. Tez kapsamında incelenen örneklere ait periyot kalınlıkları bu teknik kullanılarak yapılan ölümler sonucunda elde edilmiştir [33]. Tablo 5.1'de süperörgü foto-algılayıcılara ait periyot kalınlıkları yer almaktadır. Yapılardaki tekrar sayıları aynı olduğu için, bu sonuçlara göre en kalın ve en ince süperörgü yapı sırasıyla SL-01 ve SL-05 rnekleridir.

Tablo 5.1. Tez kapsamında incelenen foto-algılayıcı yapıların yüksek çözünürlüklü x-ışını sallantı eğrisi sonuçları [33].

Örnek Adı	SL Periyot [Å]
SL-01	58,4 ± 0,1
SL-02	54,4 ± 0,1
SL-03	51,3 ± 0,1
SL-04	47,8 ± 0,1
SL-05	44,8 ± 0,1

5.1. Optik Ölçümler

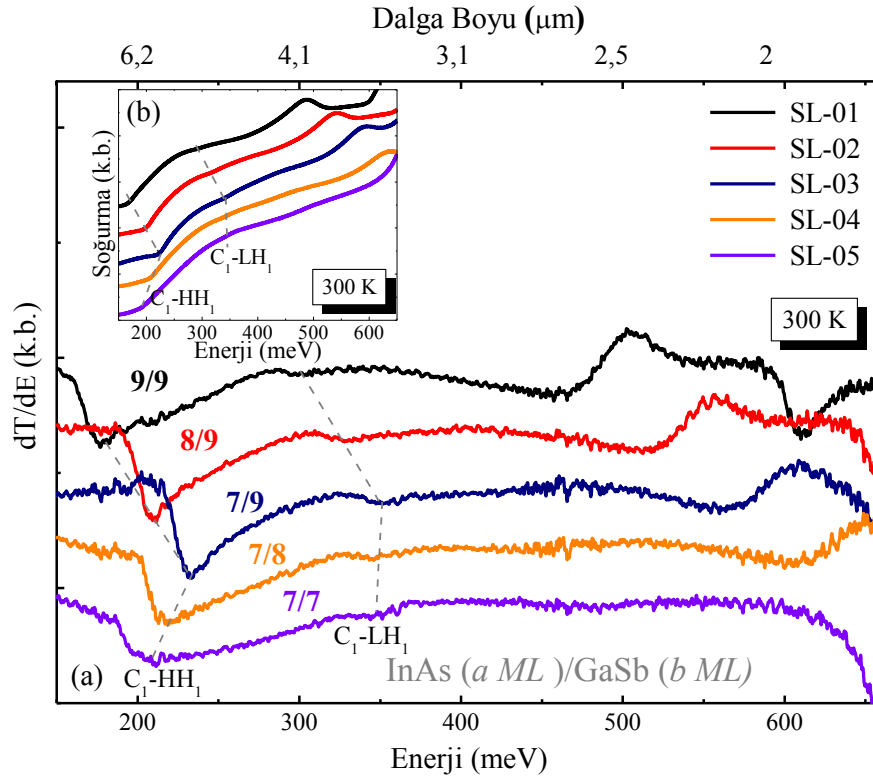
Soğurma Spektrumu ve Tayfsal Fototepki

InAs/GaSb süperörgü yapılarında, elektronlar ve boşluklar sırasıyla InAs ve GaSb tabakaları içerisinde konumlanmıştır. Bölüm 2’de bahsedildiği gibi, SL yapıyı oluşturan katmanların kalınlıkları birkaç nanometre olduğu için, taşıyıcıların varlığını ifade eden dalga fonksiyonları, birbirine komşu katmanlar arasında örtüşerek iletim ve değerlik mini bantlarını oluşturmaktadır (bkz. Şekil 2.3). Soğurma spektrumu ölçümleriyle, alt değerlik bantlarından (HH_1 , LH_1 , HH_2), iletim bandının alt enerji seviyesine (C_1) olan geçişler gözlenebilmektedir [53].

Soğurma spektrumunda, enerji seviyeleri arasındaki geçişlerin belirginliğine, özellikle elektronlar üzerindeki sınırlamanın etkisi daha büyüktür [53]. GaSb tabakası, SL’deki elektronları sınırlayan bir engel gibi davrandığı için, kalınlığındaki değişim örgüdeki elektronların sınırlamasını arttırmakta ve iletim bandı genişliğini daraltmaktadır. Aynı zamanda boşluklar için kuyu tabanı gibi davrandığından, kalınlığındaki artışla birlikte, soğurma spektrumunda yeni ağır boşluk enerji seviyelerine ait geçişler görülmektedir [53]. İletim bandının daralması, iletim bandındaki enerji süreksizliğini azaltarak, değerlik bandından olan geçişleri daha belirgin hale getirmektedir.

Bölüm 2.2’de bahsedildiği gibi InAs ve GaSb tabaka kalınlığındaki değişim enerji seviyelerinde farklı etki yaratmaktadır. InAs/GaSb SL HH_1 ile C_1 arasındaki geçişler bant aralığına karşılık gelmektedir. Boşlukların etkin kütlesi, elektronlara

kıyasla daha büyük olduğundan HH_1 enerji seviyesinde ciddi bir değişim gözlenmemektedir. Bu nedenle bant aralığının belirlenmesinde C_1 enerji seviyesinin konumu daha kritiktir.

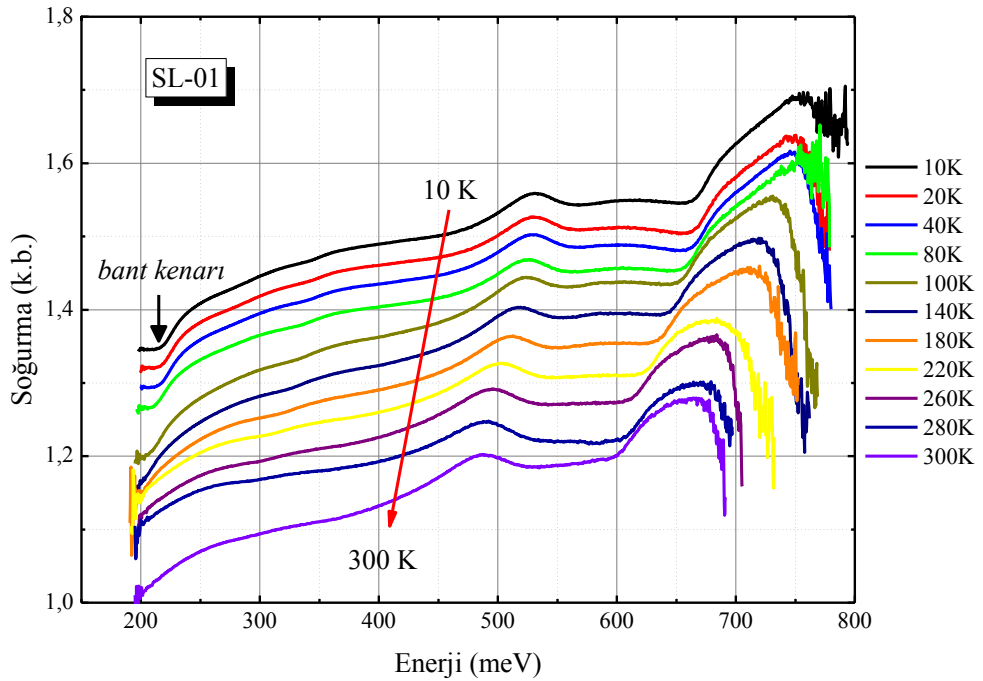


Şekil 5.3. InAs ve GaSb kalınlığına bağlı olarak, (a) geçirgenliğin enerjiye göre birinci türevinin ve (b) soğurmanın değişimi.

Şekil 5.3’de InAs ve GaSb tabaka kalınlığına bağlı olarak soğurma (ek grafik) ve geçirgenliğin enerjiye göre birinci türevi gösterilmektedir. Oda sıcaklığında yapılan ölçümlerde, referans olarak örneklerin üzerine büyütüldüğü GaSb alttaşlar ile aynı üretim grubuna ait bir GaSb alttaş kullanılmıştır. Bu ölçümlerde yüzey üzerindeki yansımalar ihmal edilip, OPUS yazılımı ile geçirgenlik ölçümünden soğurma eğrileri türetilmiştir. Enerji seviyelerine ait geçişleri daha belirgin hale getirmek için, Şekil 5.3b’de verilen soğurma ölçümünden, geçirgenlik türetilerek enerjiye göre birinci türevi alınıp Şekil 5.3a’da gösterilmiştir. Göze rehber olması bakımından kesikli çizgilerle gösterilen karakterlerin enerji değerleri, türev alma işlemi nedeniyle gerçek değerlere karşılık gelememekle birlikte kesinlikle yapı içindeki enerji seviyeleriyle ilişkilidir. InAs kalınlığı 9 ML’den 7 ML’ya azaltıldığında soğurma bant kenarı (Eg

veya C_1 - HH_1) yüksek enerjiye doğru kaymaktadır (blue shift). Bu davranış benzer şekilde C_1 ile hafif boşluk (LH_1) enerji seviyesindeki geçişlerde de gözlenmektedir. GaSb kalınlığı 9 ML'dan 7 ML'ya azaltıldığında ise bant aralığı ve C_1 - LH_1 enerji seviyesi düşük enerjiye doğru kaymaktadır (red shift).

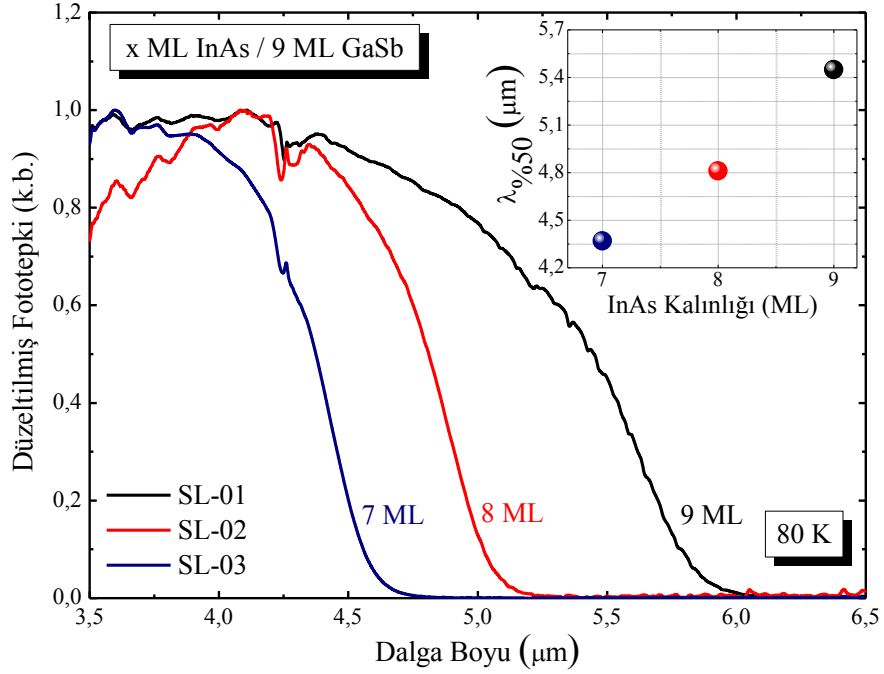
Oda sıcaklığında gözlenen geçişleri daha belirgin hale getirmek ve tanımlamaların doğruluğunu teyit etmek için sıcaklık bağımlı ölçümler yapılmıştır. SL-01 örneğine ait sonucun Şekil 5.4'de gösterildiği soğurma spektrumunda, geçiş enerji seviyeleri yüksek sıcaklıklarda düşük enerjiye doğru kaydığı gözlenmiş ancak karakterlerin belirginliklerinde bir iyileşme olmamıştır. SL-01 kod numaralı örnek için Şekil 5.4'de gösterilen bu davranış, diğer örnekler için de benzer şekilde gözlenmiştir.



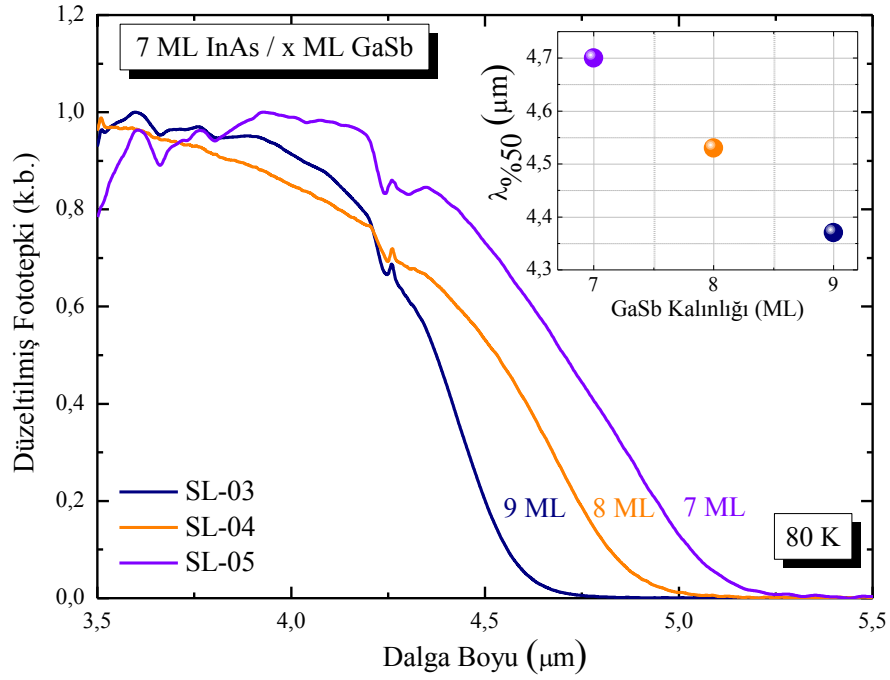
Şekil 5.4. SL-01 örneğine ait sıcaklık bağımlı soğurma ölçümü.

InAs kalınlığındaki değişim, C_1 enerji seviyesinde daha fazla fark yarattığından (bkz. Şekil 2.5), SL yapıların bant aralığının belirlenmesindeki etkisi GaSb tabaka kalınlığına kıyasla daha fazladır. Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da 80 K'de alınmış tayfsal fototepki ölçümleri yer almaktadır. Örneklerden alınan ham sinyaller, tayfsal tepkisi dalga boyu bağımsız olarak kabul edilen DLaTGS algılayıcının

spektrumu ile düzeltilmiştir. Her örnek için elde edilen spektrumun diğerleri ile kıyaslanabilmesi için normalizasyon yapılmıştır. 9 ML GaSb kalınlığı sabit tutularak, InAs kalınlığı 9 ML'dan, 7 ML'a kadar azalan ilk üç örnekte (Şekil 5.5), $\lambda_{\%50}$ kesim dalga boyu 5,45 μm 'den 4,37 μm 'ye azalmaktadır. InAs kalınlığında 2 ML'luk azalma, bant aralığında 56,23 meV'luk bir artışa sebep olmuştur. 7 ML InAs kalınlığı sabit tutularak, GaSb kalınlığı 9 ML'dan, 7 ML'a kadar azalan üç örnekte ise (Şekil 5.6) $\lambda_{\%50}$ kesim dalga boyu 4,37 μm 'den 4,70 μm 'ye artmaktadır. Bu durum bant aralığının 19,92 meV daralmasına neden olmaktadır.

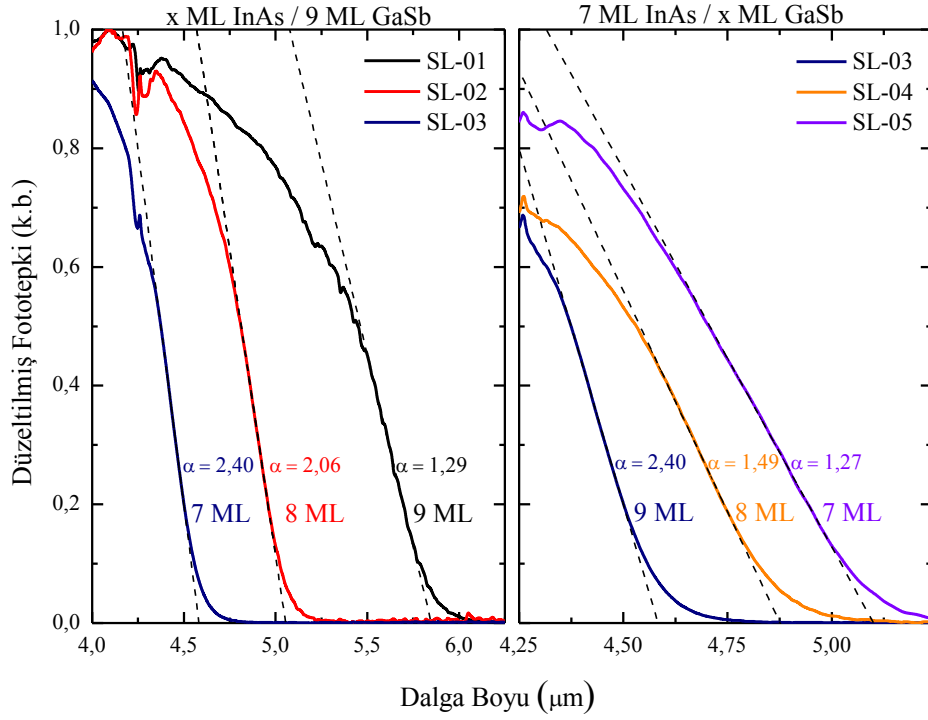


Şekil 5.5. InAs kalınlığına bağlı olarak kesim dalga boyunun değişimi.



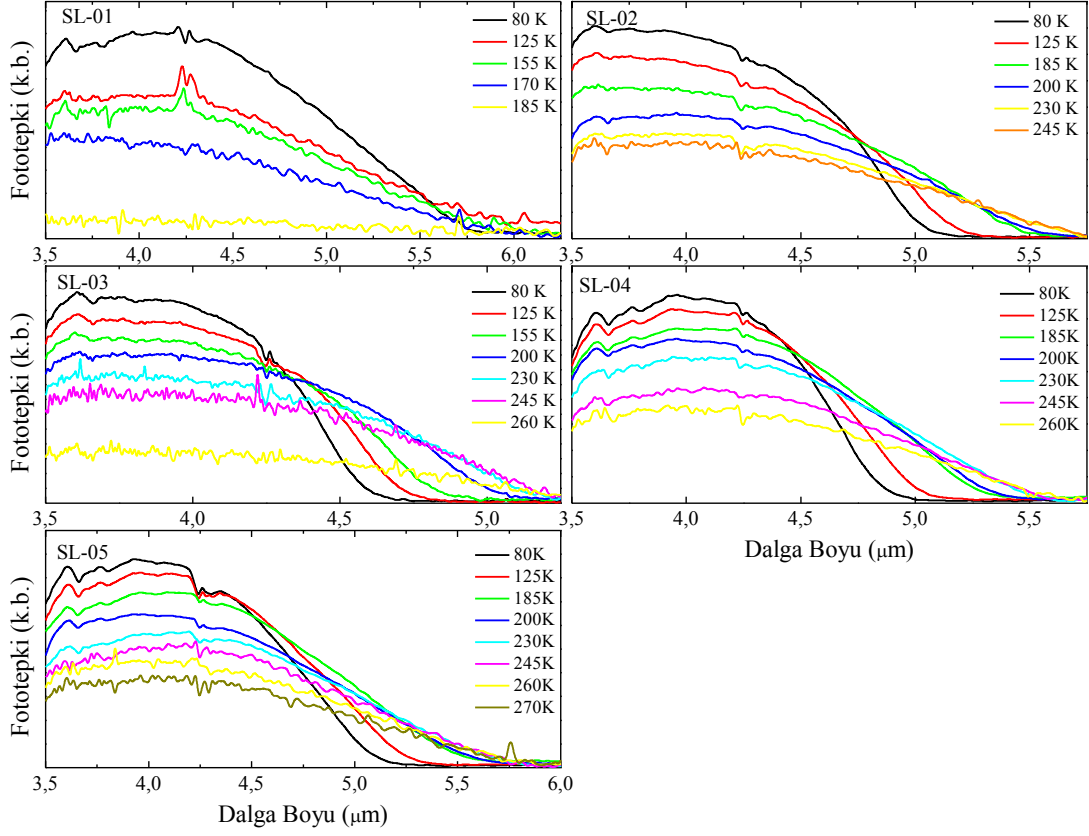
Şekil 5.6. GaSb kalınlığına bağlı olarak kesim dalga boyunun değişimi.

SL yapıyı oluşturan katmanların kalınlıkları, taşıyıcılar üzerindeki sınırlama etkisini ve dalga fonksiyonları arasındaki örtüşme miktarını doğrudan etkilediği için soğurma bant kenarındaki değişime bakarak bu etkiler gözlemlenebilir. Şekil 5.7’de, örneklerin bant kenarına karşılık gelen bölgelerine yapılan lineer fit sonucunda elde edilen farklı eğim değerleri gösterilmiştir: InAs ve GaSb katman kalınlıklarının azalması, bant kenarının eğimi üzerine ters yönde etki yapmaktadır. InAs kalınlığının azalması ile GaSb kalınlığının artması, elektronlar üzerindeki sınırlamayı arttırmakta ve bu durum bant kenarının eğimini arttırmaktadır.



Şekil 5.7. InAs ve GaSb kalınlığına bağlı olarak bant kenarı eğiminin (α) değişimi.

Sıcaklık bağımlı fototepki ölçümleri, fotodiyotların gerçek anlamda çalışabilecekleri en yüksek sıcaklık (tepkiselliğe (responsivity) kıyasla) hakkında kesin bir bilgi vermemesine karşın, sinyal/gürültü oranına bağlı olarak, yüksek sıcaklıklarda optik sinyalin izlenebilirliğinin bir göstergesidir. Bu amaçla, katman kalınlıkları değiştirilen iki örnek grubu sıcaklık bağımlı ölçümler yapılmıştır. Ölçümler esnasında, tek piksel fotodiyotların doyuma (saturation) ulaşmasını engellemek amacıyla, Globar ışık kaynağının geçtiği aralık (aperture) değiştirilmiş ve optik yola, demet zayıflatıcı (beam attenuator) konulmuştur. 80 K’de yapılan ölçümlerde olduğu gibi, diyotların tayfsal tepkisi DLaTGS algılayıcının spektrumu ile düzeltilmiş ve sonuçlar Şekil 5.8’de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Sıcaklığa bağlı olarak SL algılayıcıların fototepkilerinin değişimi.

Örneklerin sıcaklık bağımlı fototepkileri birbirleriyle kıyaslandığında SL-01 kod numaralı örneğin optik tepki verdiği en yüksek sıcaklığın, diğer dört örneğe kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Bu örnek için okunabilir mertebede optik tepkinin alınabildiği en yüksek sıcaklık 185 K iken, bu sıcaklık diğer örneklerde 270 K'e kadar yükselmektedir. Bunun nedeni olarak, SL-01 kod numaralı örneğin bant aralığının diğer dört örneğe kıyasla daha küçük olması ($\lambda_{%50}=5,45 \mu\text{m}$, 227,494 meV) ve yapıdaki kusurların etkisiyle G-R merkezlerinin sebep olduğu karanlık akımın artması gösterilebilir. Bunu destekleyen diğer parametre ise R.A değerinin bu örnekte diğerlerine kıyasla daha düşük olmasıdır. İncelenen bu grup örneğe ait karanlık akım sonuçları Bölüm 5.2'de detaylı olarak anlatılacaktır. Fabrikasyon aşamasında pasivasyon işlemi uygulanmamasına karşın, SL-01 kod numaralı örnek dışındaki dört örneğin, 245 K'ne kadar izlenebilir bir sinyale sahip olması bu diyotların yüksek sıcaklıklarda da çalışabileceğini göstermektedir.

Varshni Parametreleri: Bir fotodiyotun bant aralığındaki değişim, yapı içerisindeki kusur merkezlerinin yarattığı G-R karanlık akımını ve çoğunluk taşıyıcılarının difüzyonu ile oluşan karanlık akımın miktarını doğrudan etkilemektedir. Bu durum algılayıcıların, yüksek sıcaklıklarda çalışabilirliğinin sınırını da göstermektedir. Bir yarıiletkenin bant aralığının sıcaklıkla olan ilişkisi Denklem 5.1'deki Varshni denklemi ile ifade edilir [54]. Burada, $E_g(0)$ yarıiletkenin 0 K'deki bant aralığı (eV), α (eV K⁻¹) ve β (K) Varshni parametreleri olarak bilinen sabitlerdir.

$$E_g(T) = E_g(0) - (\alpha T^2 / \beta + T) \quad (5.1)$$

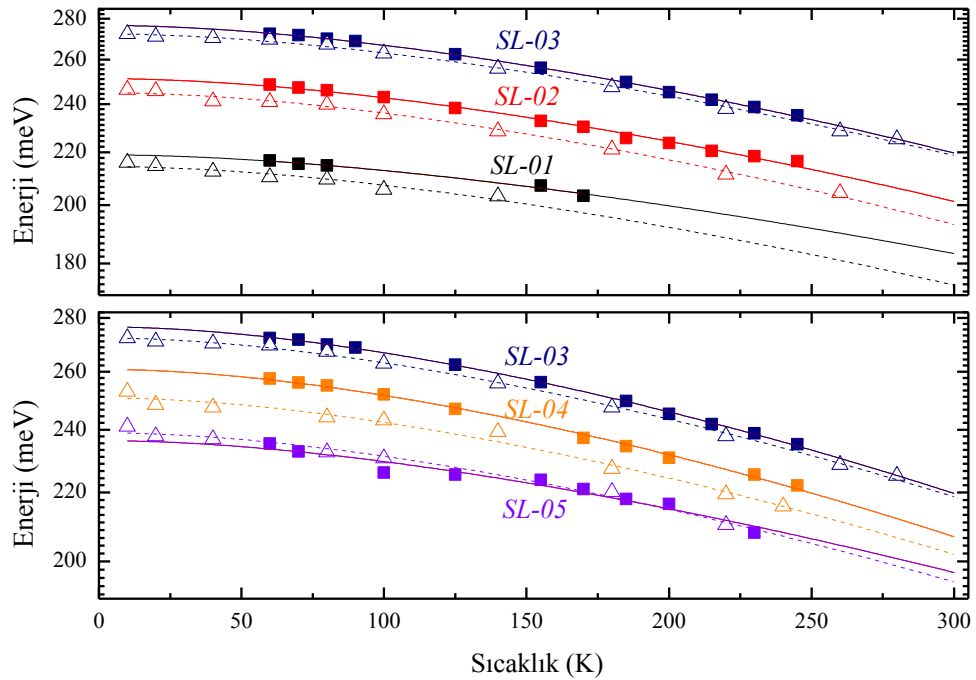
Tablo 5.2. Soğurma spektrumu ve fototepki ölçümlerinden türetilmiş Varshni parametreleri.

Örnek	$E_g(0)$ [meV]	α [meV/K]	Yöntem
SL-01	219 ± 0,57	0,226 ± 0,014	Fototepki
	214 ± 0,73	0,262 ± 0,033	Soğurma
SL-02	251 ± 0,58	0,316 ± 0,009	Fototepki
	245 ± 0,55	0,328 ± 0,009	Soğurma
SL-03	277 ± 0,23	0,360 ± 0,003	Fototepki
	272 ± 0,35	0,340 ± 0,005	Soğurma
SL-04	261 ± 0,47	0,341 ± 0,007	Fototepki
	251 ± 0,94	0,309 ± 0,016	Soğurma
SL-05	236 ± 1,26	0,249 ± 0,020	Fototepki
	239 ± 0,72	0,282 ± 0,015	Soğurma

SL yapılar için Varshni parametreleri türetilirken, bant aralığına karşılık gelen enerji seviyesinin belirlenebilmesinde fotoluminesans, tayfsal tepki ve soğurma spektrumundan elde edilen veriler kullanılmaktadır [55-58]. Soğurma ve fototepki ölçümleri sırasıyla kristal yapının foton soğurma miktarı ile soğurulan fotona karşılık yaratılan foto-taşıyıcıların birer göstergesinin olduğu iki ayrı fiziksel olgudur. Tez kapsamında çalışılan örneklerin bant kenarına (Şekil 5.4) karşılık gelen enerji seviyeleri üzerinden iki ayrı optik ölçüm (fototepki ve soğurma) için yapılan analizlerde fit parametresi olarak kullanılan $E_g(0)$ ve α için elde edilen değerler Tablo 5.2'de verilmiştir. Varshni denklemindeki “ β ” sabiti, Debye sıcaklığına yakın bir sıcaklıktır ve Debye sıcaklığı InAs ve GaSb için sırasıyla 280 K, 266 K'dir [59-60].

SL örneklerin bant kenarının sıcaklıkla değişimi incelenirken, “ β ” sabiti 270 K olarak alınmıştır. Şekil 5.9’da iki örnek grubunun sıcaklık bağımlı bant kenarının değişimi gösterilmiştir.

Farklı iki yöntemle elde edilen parametreler birbirleri kıyaslandığında (Tablo 5.2), $E_g(0)$ ve α değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Örnekler kendi aralarında kıyaslandığında ise, $E_g(0)$ parametresi, kesim dalga boyunun değişimiyle benzer oranda farklılıklar göstermektedir. “ α ” sabiti, 0,226 meV/K ile 0,360 meV/K arasında değişmektedir. Bu sabit, MWIR bölgede çalışan benzer SL yapılardan elde edilen sonuçlarla uyumluluk göstermektedir [55-56,58]. Varshni parametreleri doğrudan algılayıcıların performansları hakkında bilgi vermemesine karşın, bant aralığının sıcaklığın etkisiyle daralma hızı, G-R ve difüzyon karanlık akımı gibi mekanizmalarının yüksek sıcaklıklardaki davranışları hakkında yorum yapılmasını sağlayabilir.

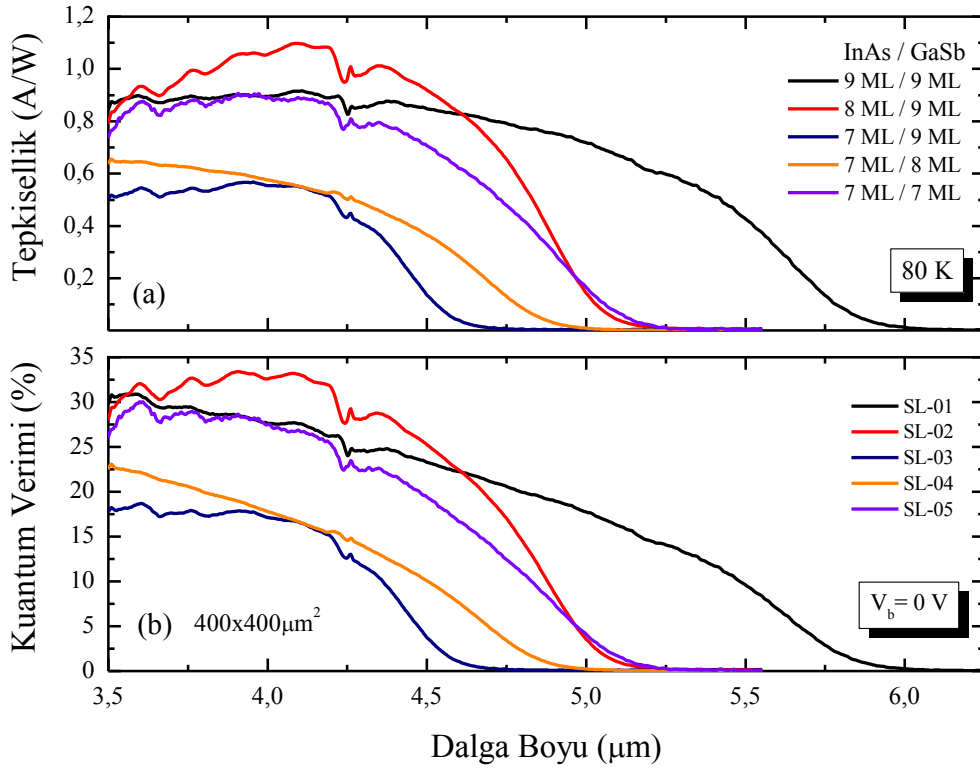


Şekil 5.9. a) InAs ve b) GaSb kalınlığı değiştirilen örnek setlerinin sıcaklığa bağlı bant kenarının değişimi. (Kare ve üçgen sembolleri fototepki ve soğurma spektrumu ölçümlerinden elde edilen, verilerle çizilmiştir.)

Tepkisellik ve Kuantum Verimi

SL yapıyı oluşturan katmanların kalınlıklarındaki değişimin kesim dalga boyuna etkisi soğurma spektrumu ve tayfsal fototepki ölçümlerinde gösterilmiştir. Bu durumun aygıt performansına olan etkisini incelemek amacıyla tepkisellik ölçümleri yapılmıştır. Tepkisellik hesapları yapılırken, örnek yüzeyindeki yansımalarından kaynaklanan kayıplar ihmal edilmiş (yansıma = % 0) ve bunun için bir düzeltme faktörü kullanılmamıştır. İncelenen aygıtların alt kontak bölgelerinin ışığın gönderildiği yüzey üzerinde olması, azot soğutmalı kap içerisinde ışığın yansımalarını arttıracak bir durumdur. Elde edilen tepkisellik ve kuantum verimi değerlerinin, bu yansımalarından dolayı olması gereken değerlerden daha yüksek hesaplandığı düşünülmektedir.

Şekil 5.10'da foto-algılayıcıların dalga boyuna bağlı olarak tepkisellik değerleri gösterilmiştir. Herhangi bir voltajın uygulanmadığı fotovoltajik durumda 4,1 μm 'deki tepkisellik değerleri örnek sırasına göre 0,916 A/W, 1,097 A/W, 0,549 A/W, 0,551 A/W ve 0,887 A/W'tır. Bulunan bu tepkisellik değerlerine karşılık gelen kuantum verimleri ise sırasıyla %27,6, %33, %16,5, %16,6 ve %26,7 'dir. GaSb katman kalınlığının azalmasıyla tepkiselliğin en yüksek olduğu değerlerde gözlenen artma, örneklerin Şekil 5.12'de gösterilen karanlık akım yoğunluğu davranışlarıyla açıklanabilir: karanlık akım yoğunluğunun incelen GaSb kalınlığıyla azalması ayrıştırılabilen foto-akım miktarını arttırmak ve optik tepkinin artmasına sebep olmaktadır. Benzer şekilde 3,5 μm 'deki kuantum veriminde de artış olmaktadır (Şekil 5.10b). GaSb katman kalınlığındaki azalışın kesim dalga boyunun düşük enerjiye doğru kaydırmasına rağmen bu durum verimin artışını engellememektedir ve bu da benzer şekilde karanlık akım yoğunluğunun azalmasının yarattığı etkiyle açıklanabilir.



Şekil 5.10. SL foto-algılayıcılara ait (a) tepkisellik ve (b) kuantum verimi grafikleri.

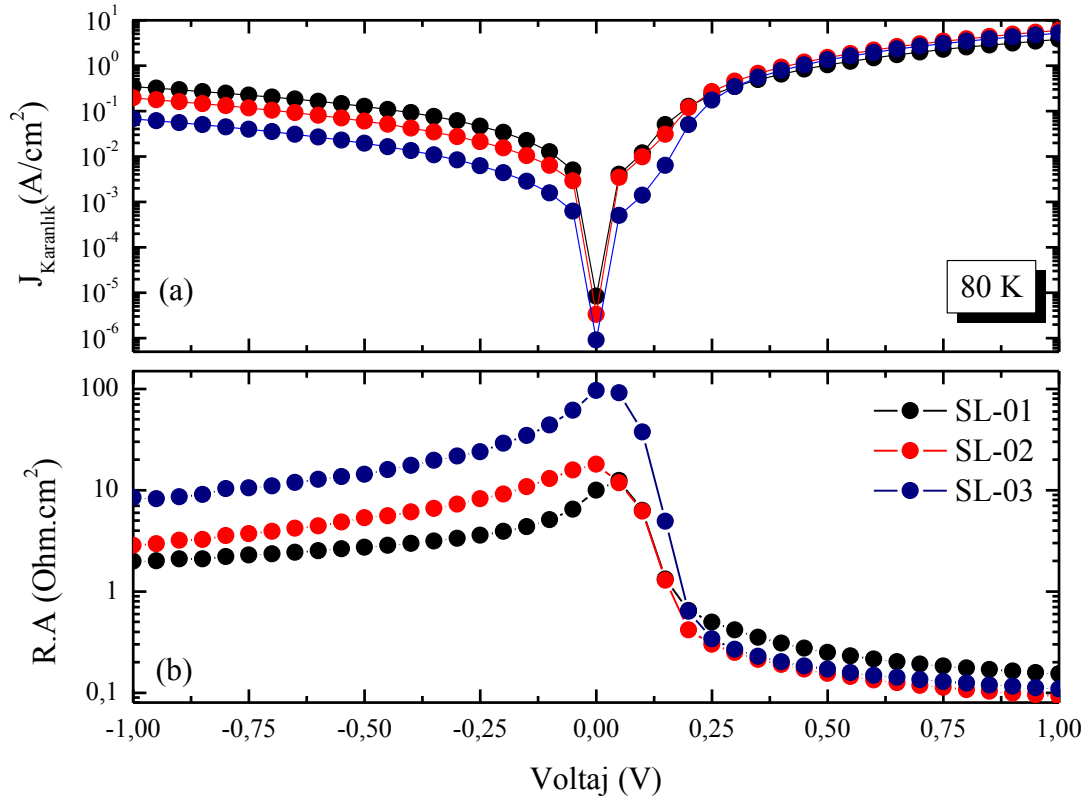
Kesim dalga boyunun yüksek enerjiye kayması ile algılayıcıların tepkilerinin artması beklenen bir davranıştır. Şekil 5.10 incelendiğinde, InAs katman kalınlığının azalması durumunda kesim dalga boyu azalmakta ancak bu durumun tepkiselliği iyileştirdiğine dair kesin bir yargıya varmak zordur. En düşük kesim dalga boyuna sahip SL-03 örneği, en düşük tepkisellik değerlerine sahiptir. Bu davranışın, aygıtlar arasında elektriksel özelliklerin kıyaslanabilirliğinin olmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

5.2. Karanlık Akım Ölçümleri

Bu bölümde diyotlara ait karanlık akım yoğunlukları, diferansiyel direnç ve aktivasyon enerjileri yer almaktadır.

5.2.1. Karanlık Akım Yoğunluğu ve Diferansiyel Direnç

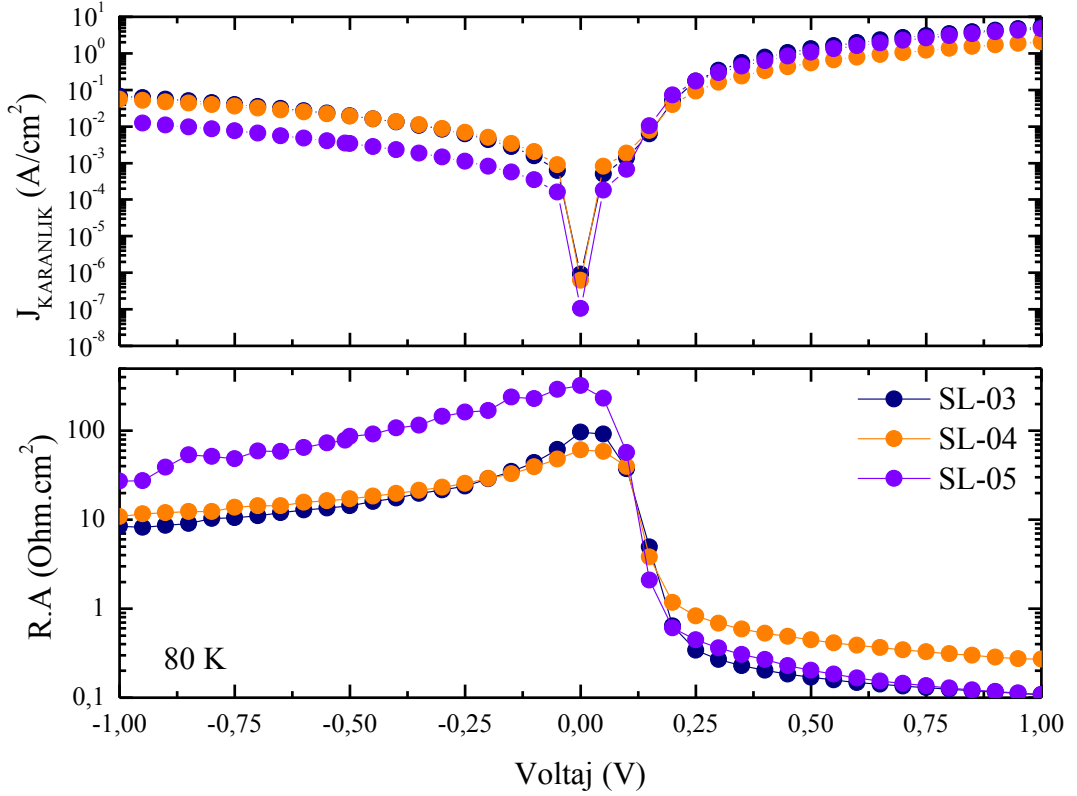
Yapı içerisinde geçen karanlık akımın, diyot alanıyla orantılı olarak artması ve karanlık akım yoğunluğunun ise diyot alanından bağımsız olması gerekir. Büyütme ve fabrikasyon süreci hakkında değerlendirme yapabilmek için farklı büyüklüklerdeki diyotlardan ölçümler alınmıştır. Ölçümler sonucunda örneklerdeki karanlık akım yoğunluklarının diyottan diyota farklılık göstermiştir. Bu durum, örneklerdeki kusur miktarının rastgele bir dağılıma sahip olup, diyot alanıyla doğrudan bir bağlantısının olmadığı göstermektedir.



Şekil 5.11. InAs kalınlığının değiştiği fotodiyotlara ait a) karanlık akım yoğunluğu ve b) R.A grafikleri.

Şekil 5.11’de yer alan InAs katman kalınlığının sistematik olarak azaltıldığı ilk foto-algılayıcı grubunda, 0 V değeri için karanlık akım yoğunlukları sırasıyla $8,4 \times 10^{-6}$ A/cm², $3,3 \times 10^{-6}$ A/cm², $9,1 \times 10^{-7}$ A/cm²’dir. Buna karşılık gelen R₀.A değerleri

ise $10 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $18 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $96 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 'dir. Orta kızılötesi bölgesinde algılama yapan InAs/GaSb SL yapılarda, InAs oranının artması R.A değerleri iyileştirdiği görülmüştür [58]. Ancak 1'er ML'lık azalma SL'de InAs ile GaSb oranını ciddi miktarda değiştirmedeği için böyle bir etki görülmemektedir.



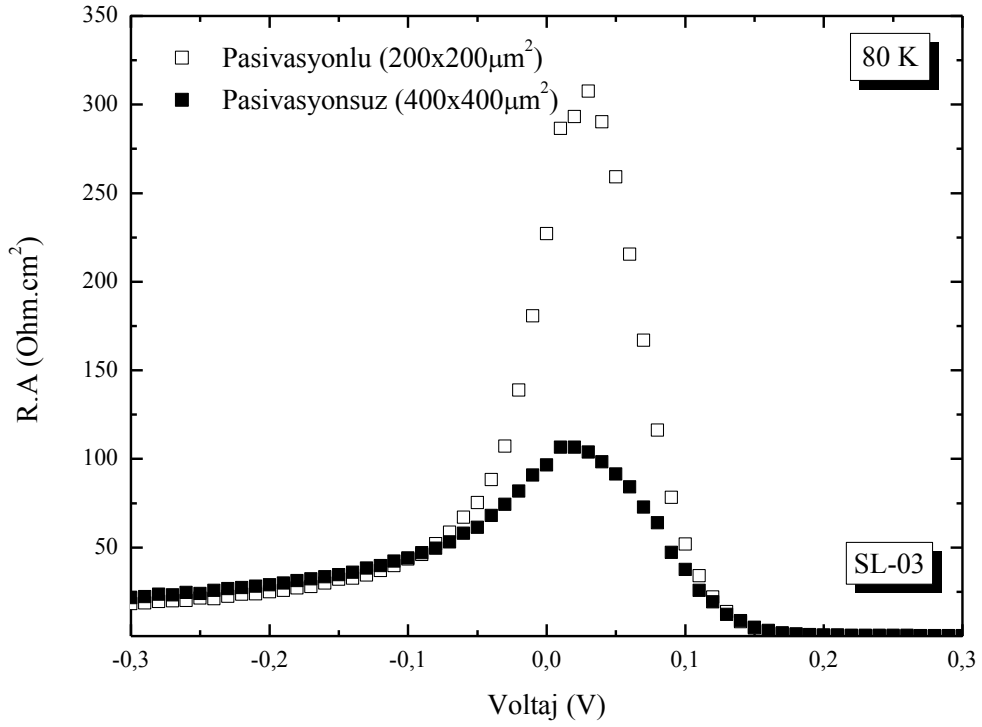
Şekil 5.12. GaSb kalınlığının değiştiği fotodiyotlara ait a) karanlık akım yoğunluğu ve b) R.A grafikleri.

GaSb katman kalınlığının değiştirildiği ikinci grupta ise (Şekil 5.12) SL-04 ve SL-05 örneklerinin 0 V'deki karanlık akım yoğunlukları $6,17 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ve $1,05 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 'dir. Buna karşılık gelen $R_0.A$ değerleri ise $61 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ve $322 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 'dir. Genel olarak iki gruptaki örneklerde elde edilen $R_0.A$ değerleri benzer kesim dalga boyuna sahip foto-algılayıcılara kıyasla düşüktür. Bunun temel sebebi yüzey pasivasyonu yapılmadığı için yüzey kaçak akımlarının yüksek olmasıdır. Bu durum, yapı direnci ile yüzeyin direncinin birbirine paralel olmasından dolayı ölçülen toplam direncin düşük çıkmasıyla açıklanabilir [61]. Yüzey kaçak akımları bastırıldığı

durumda yığın sınırlı (bulk limited) R.A değerine ulaşmak mümkün hale gelir. Diyotlara ait R.A değeri Denklem 5.2 ile hesaplanmıştır.

$$R.A = \left(\frac{dI}{dV} \right) . A \quad (5.2)$$

Yüzey kaçak akımlarının etkisini azaltarak yığın sınırlı R.A değerine ulaşabilmek amacıyla SL-03 örneğinin mesa yan duvarlarına rf-magnetron saçtırma (sputtering) tekniğiyle 120 nm SiO₂ kaplanmıştır. Pasivasyonun etkisini çok daha küçük mesa boyutlarında daha net görülebileceği düşüncesiyle daha küçük boyutlu aygıtlara bu işlem uygulanmış, sonuçlar Şekil 5.13'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Uygulanan pasivasyon işleminin bahsi geçen diyot için R₀A değerini (~100 Ω.cm²) yaklaşık olarak 3 kat (~300 Ω.cm²) iyileştirdiği görülmektedir. Ancak bu iyileşme yeteri kadar etkili değildir. Farklı büyüklüklerdeki diyotlardan alınan ölçümlerde de karanlık akım yoğunluğunun aynı olmadığı ve pasivasyonun istendiği kadar iyileşme yaratmadığı görülmüştür. Bunun muhtemel sebeplerinden birisi olarak mesa duvarlarının yeteri kadar SiO₂ ile kaplanamadığı ve kullanılan rf-magnetron yönteminin pasivasyon işlemi için uygun olmadığı düşünülmektedir. SL foto-algılayıcılarda, yüzey pasivasyonunun olmaması durumunda R₀.A değerinin zamanla azaldığı görülmüştür [62]. Bu yapılarda farklı pasivasyon teknikleri/malzemeleri çalışılmış olmasına rağmen [63-64], aygıt performanslarının iyileştirilmesi için araştırma konusu olarak güncelliğini korumaya devam etmektedir.

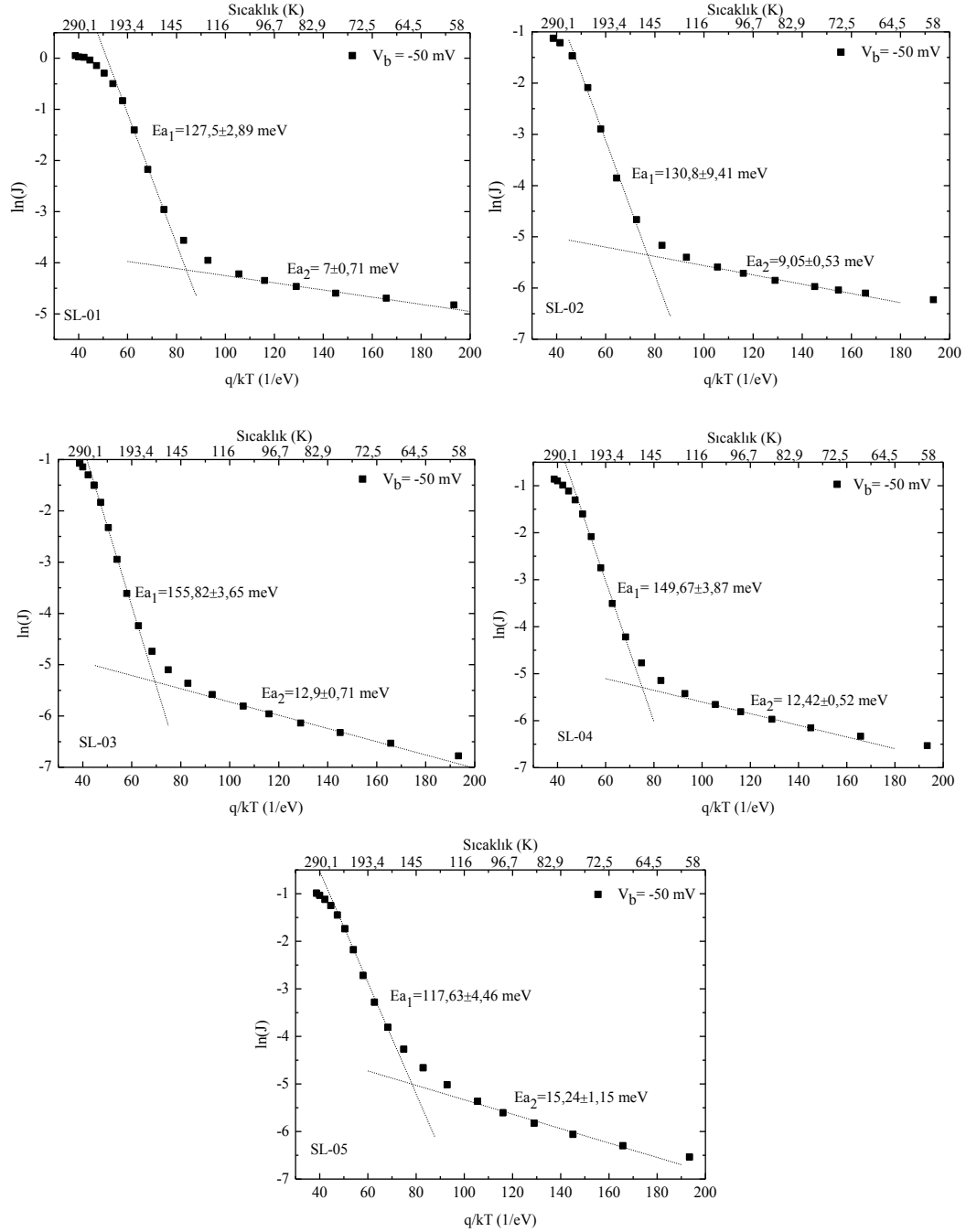


Şekil 5.13. Pasivasyon uygulanan ve uygulanmayan SL-03 örneğine ait R.A grafiği.

Aktivasyon Enerjisi: Yapı içindeki karanlık akıma neden olan mekanizmanın tanımlamasını yapmak için sıcaklık bağımlı karanlık akım ölçümleri yapılmış ve aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır. Yapı içindeki akım yoğunluğu

$$J \propto \exp\left(-\frac{Ea}{kT}\right) \quad (5.3)$$

ile ifade edilebilir [29]. Burada, J karanlık akım yoğunluğu (A/cm^2), Ea aktivasyon enerjisi (eV), k Boltzmann sabiti (eV/K) ve T ise Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Her bir örnek için yapılan sıcaklık bağımlı karanlık akım ölçümlerindeki -50 mV'a karşılık gelen akım değerleri kullanılarak $\ln(J) - q/kT$ grafikleri (Arrhenius grafikleri) çizilmiş ve Şekil 5.14'de gösterilmiştir.



Şekil 5.14. SL foto-algılayıcıların $\ln(\text{Akım yoğunluğu}) - q/kT$ grafiği ve aktivasyon enerjileri.

Şekil 5.14'de gösterildiği gibi eğrilerin farklı iki bölgesine yapılan lineer fit sonucunda iki farklı aktivasyon enerjisi elde edilmiş ve sonuçlar Tablo 5.3'te verilmiştir. E_{a1} aktivasyon enerjisi, bant aralığının yarısına yakın aktivasyon enerjisine karşılık gelmektedir. Bu seviye G-R kaynaklı bir enerji seviyesi olduğu düşünülmektedir ve tüm örnekler için yaklaşık olarak 145 K'nin üstünde baskın

karanlık akım mekanizması olmaktadır. E_{a2} aktivasyon enerjisi, 7 meV ile 15 meV arasında değişim göstermektedir. Bu enerji seviyesi, sığ enerji tuzaklarından veya yüzey kaçak akımlarından kaynaklandığı düşünölmektedir [26]. InAs/GaSb p-i-n diyotlarda, ters beslem bölgesinde, elektrik alanın etkisiyle G-R birleşme oranı artmakta ve baskın bir mekanizma olmaktadır. Aynı beslem bölgesinde sıcaklık arttıkça bant aralığı daralmakta ve çoğunluk taşıyıcılarının difüzyonu baskın hale gelmektedir. İncelenen örneklerde difüzyon sınırlı bir karanlık akımın görölmemesinin sebebi, yapı içerisindeki kusurların çoğunlukta olması ve/veya pasivasyon işlemi yapılmadığı için yüzey kaçaklarının yarattığı etki olabilir.

Tablo 5.3. 600x600 μm^2 büyüklüğündeki diyotlara ait aktivasyon enerjileri.

Örnek	$R_{0,A}$ (80 K) [$\Omega.\text{cm}^2$]	E_{a1} [meV]	E_{a2} [meV]	$\lambda_{\%50}$ [meV]
SL-01	9,97	127,50 \pm 2,89	7,00 \pm 0,71	227,50
SL-02	20,94	130,80 \pm 9,41	9,05 \pm 0,53	257,80
SL-03	31,81	155,82 \pm 3,65	12,9 \pm 0,71	286,30
SL-04	38,33	149,67 \pm 3,87	12,42 \pm 0,52	277,40
SL-05	23,18	117,63 \pm 4,46	15,24 \pm 1,15	266,60

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında 3-5 μm kızılötesi bant aralığında algılama yapan, InAs/GaSb süperörgü p-i-n fotodiyot yapıları için katkı kalibrasyonu, aygıt üretimleri, manyetik ve elektro-optik karakterizasyonları yapılmıştır.

InAs ve GaSb malzemeleri için Si ve Be katkı kalibrasyonları yapılarak, daha sonraki üretimlerde kullanılacak kalibrasyon eğrileri oluşturulmuştur. Manyetik alan bağımlı ölçümler yapılarak Hall saçılma faktörü bulunmaya çalışılmış ancak taşıyıcılar sürüklenme mobilitesi sınırına ulaşamadıkları için taşıyıcı miktarında manyetik alana bağlı olarak bir değişim gözlenmemiştir. GaAs ve GaSb alttaş üzerine katkısız olarak büyütülen süperörgü yapıların sabit manyetik alan altında yapılan sıcaklık bağımlı Hall ölçümlerinde, kullanılan alttaşın yapı içerisindeki arkaplan taşıyıcı yoğunluğu üzerine etkisinin olduğu görülmüştür. Yapılan ölçümlerde, GaSb alttaş içerisindeki taşıyıcıların süperörgü yapıda ilettime katılarak taşıyıcı yoğunluğunun, GaAs alttaş üzerine büyütülen yapıya kıyasla yüksek olduğu görülmüştür. Ancak, GaAs alttaş üzerine büyütülen süperörgü yapının alttaş ile örgü uyumunun olmaması, yapıda kusurlara neden olup taşıyıcı mobilitesinin düşmesine neden olmaktadır. GaSb alttaşın süperörgü yapıya olan katkısını daha net gözlemleyebilmek için alttaşın kaldırılarak geri kalan süperörgü yapının Hall ölçümlerinin yapılması gerekliliği görülmüştür.

Soğurma spektrumu ve fototepki ölçümlerinde, InAs ve GaSb kalınlığının kesim dalga boyuna ve soğurma bant kenarına olan etkileri incelenmiştir. InAs kalınlığı azaldıkça bant aralığının yüksek enerjilere; GaSb kalınlığı azaldıkça da bant aralığının düşük enerjilere doğru kaydığı gözlenmiştir. Kalınlık değişiminin yarattığı etkiler literatürdeki teorik yaklaşımlarla açıklanmaya çalışılmıştır. Her iki optik ölçümün sıcaklık bağımlı sonuçlarını kullanarak, Varshni parametreleri türetilmiş ve bant kenarının sıcaklığa bağlı olarak değişim hızının 0,226 meV/K ile 0,360 meV/K arasında değiştiği görülmüştür. Sıcaklık bağımlı fototepki ölçümlerinde, SL-01 haricindeki diğer dört örneğin 230 K sıcaklığa kadar iyi bir sinyal/gürültü oranında tepki verdikleri görülmüştür. SL-05 örneği 270 K'e kadar izlenebilir optik tepki vermektedir. Bu durum, tasarlanan yapıların pasivasyon

yapılmamasına karşın yüksek sıcaklıklarda da çalışabilme yeteneğine sahip olduklarını göstermektedir.

Tepkisellik ölçümlerinde örneklerin kalınlıklarındaki değişimle, tepkisellik değerleri arasında doğrudan bir ilişki olmadığı görülmüştür. Aygıtlara pasivasyon işleminin uygulanmamış olması, örneklerde yığın sınırlı limite ulaşamayıp, yüzey kaçaklarının etkisini arttırmaktadır. Bu durum, örneklerin birbirleriyle kıyaslanmasını zorlaştırmakta ve tepkisellik ölçümlerinde görülebilecek farkları gizlemektedir. Herhangi bir voltajın uygulanmadığı fotovoltaiik durumda 4,1 μm 'deki tepkisellik değerleri örnek sırasına göre 0,915 A/W, 1,097 A/W, 0,549 A/W, 0,551 A/W ve 0,889 A/W'tır. Bulunan bu tepkisellik değerlerine karşılık gelen kuantum verimleri ise sırasıyla %27,6, %33, %16,5, %16,6, %26,7'dir. Buna karşın foto-algılayıcıların kuantum verimlerinin, literatürdeki benzer yapı kalınlığında aynı dalga boyuna çalışan algılayıcılardan yüksek olduğu görülmüştür. Ölçüm sırasında örneklerin içinde bulunduğu haznedeki ikincil yansımaların, yeniden örnek üzerine gelerek ölçülen fotoakım değerinin ve bunun sonucu olarak da aygıtların kuantum verimlerinin olması gerekenden daha yüksek ölçülmesine sebep olduğu düşünülmektedir.

Fabrikasyon sürecinde yüzey pasivasyonu uygulanmadığı için karanlık akım ölçümlerinde yüzey kaçak akımlarının etkisi oldukça fazladır. Bu nedenle $R_0.A$ değeri oldukça düşük çıkmıştır. Test amaçlı yapılan pasivasyon işleminin daha küçük boyutlu aygıt kullanılmasına rağmen R_0A değerini yeterince iyileştirmediği görülmüştür. Bunlara ek olarak yapılan sıcaklık bağımlı karanlık akım ölçümlerinden aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır. Elde edilen aktivasyon enerjilerine bakıldığında, yaklaşık olarak 145 K'nin altında yüzey kaçak akımının, 145 K'nin üzerinde ise G-R kaynaklı karanlık akımın baskın olduğu görülmüştür. Karanlık akım ölçümlerinden elde edilen sonuçların analizlerinin daha doğru yapılabilmesi ve aygıt performansını iyileştirmek için, yüzey kaçak akımlarının baskılanıp yığın sınırlı limite ulaşılabilir daha kaliteli yüzey pasivasyonuna ihtiyaç olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Henini, M., Razeghi, M., *Handbook of Infrared Detection Technologies*, Elsevier, Oxford, 2002.
- [2] Gunapala, S.D., Bandara, S.V., Liu, J.K, Mumolo, J.M., Ting, D.Z, Hill, C.J., Nguyen, J., Rafol, S.B., “Demonstration of 1024x1024 pixel dual-band QWIP focal plane array” *Proc. SPIE* **7660**, 76603L, 2010.
- [3] Schneider, H., Maier, T., Fleissner, J., Walther, M., Koidl, P., Weimann, G., Cabanski, W., Finck, M., Menger, P., Rode, W., Zeigler, J., “Dual-band QWIP focal plane array for the second and third atmospheric windows” *Infrared Phys. Technol* **47**, 53-58, 2005.
- [4] McQuiston, B., Cho, E., Lim, W., Rafol, R., Gunapala, S. D, Bandara, S. V., Liu, J. K., “QWIP Chip Dual-Color and Multi-Color FPA’s for Military Applications” *Proc. SPIE* **5612**, 51, 2004.
- [5] Rogalski, A., “Infrared detectors: status and trends” *Prog. Quant. Electron.* **27**, 59-210, 2003.
- [6] Liu, H.C., “Quantum dot infrared photodetector” *Opto-Electron. Rev.***11**, 1-5, 2003.
- [7] Martyniuk, P., Rogalski, A., “Quantum-dot infrared photodetector: Status and outlook”, *Prog. Quant. Electron.* **32**,89-120, 2008.
- [8] Razeghi, M., *Technology of Quantum Devices*, Springer, New York, 2010.
- [9] Johnson, J.L., Samoska, L.A., Gossard, A.C., Merz, J.L., Jack, M.D., Chapman, G.R., Baumgratz, G.R., Kosai, K., Johnson, S.M., "Electrical and optical properties of infrared photodiodes using the InAs/Ga_{1-x}In_xSb superlattice in heterojunctions with GaSb" *J. Appl. Phys.* **80**, 1116, 1996.
- [10] Rogalski, A., Martyniuk, P., “InAs/GaInSb superlattices as a promising material system for third generation infrared detectors” *Infrared Phys. Technol* **48**, 39-52, 2006.
- [11] Plis, E., Rodriguez, J.B., Krishna, S., “InAs/(In)GaSb Type II Strain Layer Superlattice Detectors”, *Comprehensive Semiconductor Science and Technology*, Edited by Bhattacharya, P., Fornari, R., Kamimura, H., Elsevier, 229-264, 2011.

- [12] Sai-Halasz, G.A., Tsu, R. and Esaki, L., "A new semiconductor superlattice" *Appl. Phys. Lett.* **30**, 651, 1977.
- [13] Smith, D.L., Mailhiot, C., "Proposal for strained type II superlattice infrared detectors" *J. Appl. Phys.* **62**, 2545, 1987.
- [14] Eric, A.D., Meissner, G.P., Wijewarnasuriya, P.S., Gautam, N., Krishna, S., Dhar, N.K., Welser, R.E., Sood, A.K., "Long-wave type-II superlattice detectors with unipolar electron and hole barriers" *Opt. Eng.* **51**, 124001, 2012.
- [15] Haugan, H.J., Szmulowicz, F., Brown, G.J., and Mahalingam, K., "Band gap tuning of InAs/GaSb type-II superlattices for mid-infrared detection" *J. Appl. Phys.* **96**, 2580, 2004.
- [16] Wei, Y., Razeghi, M., "Modeling of type-II InAs/GaSb superlattices using an empirical tight-binding method and interface engineering" *Phys. Rev. B* **69**, 085316, 2004.
- [17] Ting, D.Z.-Y., Hill, C.J., Soibel, A., Keo, S.A., Mumolo, J.M., Nguyen, J. and Gunapala, S.D., "A high-performance long wavelength superlattice complementary barrier infrared detector" *Appl. Phys. Lett.* **95**, 023508, 2009.
- [18] Delaunay, P.-Y., Nguyen, B.-M., Hoffman, D., Hood, A., Huang, E.K.W., Razeghi, and M., Tidrow, M.Z., "High quantum efficiency two color type-II InAs/GaSb n-i-p-p-i-n photodiodes" *Appl. Phys. Lett.* **92**, 111112, 2008.
- [19] Rehm, R., Walther, M., Rutz, F., Schmitz, J., Wörl, A., Masur, J.M., Scheibner, R., Wendler, J., Ziegler, J., "Dual-Color InAs/GaSb Superlattice Focal-Plane Array Technology" *J. Electron. Mater.* **40**, 1738, 2011.
- [20] Rehm, R., Schmitz, J., Fleißner, J., Walther, M., Ziegler, J., Cabanski, W., Breiter, R., "InAs/GaSb type-II superlattices for single and dual-color focal plane arrays for the mid- infrared spectral range" *Phys. Stat. Sol. (C)* **3**, 435, 2006.
- [21] Nguyen, B.-M., Razeghi, M., "Type-II "M" Structure Photodiodes: An Alternative Material Design for Mid-Wave to Long Wavelength Infrared Regimes" *Proc. of SPIE* **6479**, 64790S, 2007.
- [22] Nguyen, B.-M., Hoffman, D., Delaunay, P.-D., and Razeghi, M., "Dark current suppression in type II InAs/GaSb superlattice long wavelength

infrared photodiodes with M-structure barrier" *Appl. Phys. Lett.* **91**, 163511, 2007.

- [23] Nguyen, B.-M, Bogdanov, S., Abdollahi Pour, S. and Razeghi, M., "Minority electron unipolar photodetectors based on type II InAs/GaSb/AlSb superlattices for very long wavelength infrared detection" *Appl. Phys. Lett.* **95**, 183502, 2009.
- [24] Maimon, S., Wicks, G.W., "nBn detector an infrared detector with reduced dark current and higher operating temperature" *Appl. Phys. Lett.* **89**, 151109, 2006.
- [25] Plis, E.A., Krishna, S.S., Gautam, N., Myers, S. and Krishna, S., "Bias Switchable Dual-Band InAs/GaSb Superlattice Detector With pBp Architecture" *IEEE, Photonics Journal*, **3**, 234, 2011.
- [26] Myers, S., Plis, E., Morath, C., Cowan, V., Gautam, N., Klein, B., Kutty, M. N., Naydenkov, M., Sandy, T.-S., and Krishna, S., "Comparison of superlattice based dual color nBn and pBp infrared detectors" *Proc. of SPIE* **8155**, 815507, 2011.
- [27] Rodriguez, J.B., Plis, E., Bishop, G., Sharma, Y.D., Kim, H., Dawson, L. R., and Krishna, S., "nBn structure based on InAs/ GaSb type-II strained layer superlattices" *Appl. Phys. Lett.* **91**, 043514, 2007.
- [28] Gautam, N., Kim, H.S., Kutty, M.N., Plis, E., Dawson, L.R., Krishna, S., "Performance improvement of longwave infrared photodetector based on type-II InAs/GaSb superlattices using unipolar current blocking layers" *Appl. Phys. Lett.* **96**, 231107, 2010.
- [29] Gautam, N., Krishna, S., Dhar, N.K., Welser, R.E., Sood, A.K., "Heterojunction bandgap engineered photodetector based on type-II InAs/GaSb superlattice for single color and bicolor infrared detection" *Infrared Phys. Techn.* **54**, 273-277, 2011.
- [30] Razeghi, M., Nguyen, B.-M., Delaunay, P.-Y., Pour, S.A., Huang, E.K.-W., Manukar, P., Bogdanov, S., Chen, G., "High operation temperature MWIR photon detectors based on Type II InAs/GaSb superlattice" *Proc. of SPIE* **7608**, 76081Q, 2010.

- [31] Hill, C.J., Li, J.V., Mumolo, J.M., Gunapala, S.D., “MBE grown type-II MWIR and LWIR superlattice photodiodes” *Infrared Phys. Techn.* **50**, 187-190, 2007.
- [32] Farrow, R.F.C., *Molecular beam epitaxy: applications to key materials*, Noyes Publications, New Jersey, 1995.
- [33] Arikan, B., *GaAs Alttaş Üzerine Tip-II InAs/GaSb Süperörgü Yapıların MBE Tekniği ile Büyütülmesi*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2014.
- [34] Arpapay, B., *GaAs/AlGaAs Tabanlı Yariletken Yapılardan Aygıt Üretimi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2010.
- [35] Salihoglu, O., Muti, A., Kutluer, K., Tansel, T., Turan, R., Kocabas, C., Aydinli, A., “Atomic layer deposited Al₂O₃ passivation of type II InAs/GaSb superlattice photodetectors” *J. Appl. Phys.* **111**, 074509, 2012.
- [36] Yu, P.Y., Cardona, M., *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties*, Springer, Berlin, 2010.
- [37] Lake Shore 7500/9500 Series Hall System User’s Manual, Ocak 2014.
http://www.physics.oregonstate.edu/~tate/TateLabWiki/lib/exe/fetch.php?media=hall:manual_app_a_hallmeasurementsystem.pdf.
- [38] Vincent, J.D., *Fundamentals of Infrared Detector Operation & Testing*, John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [39] Schubert, E.F., *Doping in III-V Semiconductors*, Cambridge University Press, Cambridge, 1993.
- [40] Ng, G., Vasileska, D., Schroder, D.K., ” Calculation of the electron Hall mobility and Hall scattering factor in 6H-SiC” *J. Appl. Phys.* **106**, 053719, 2009.
- [41] Stillmann, G.E., Wolfe, C.M., and Dimmock, J.O., "Hall Coefficient Factor For Polar Mode Scattering in n-Type GaAs" *J. Phys. Chem. Solids* **31**, 1199, 1970.
- [42] Look, D.C., Stutz, C.E., Sizelove, J.R., and Evans, K.R., "On Hall scattering factors for holes in GaAs" *J. Appl. Phys.* **80**, 1913, 1996.

- [43] Sze, S.M., *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons, New Jersey, 2007
- [44] Haugan, H.J., Elhamri, S., Szmulowicz, F., Ullrich B., Brown, G.J., and Mitchel, W.C., "Study of residual background carriers in mid infrared InAs/GaSb superlattices for uncooled detector operation" *Appl. Phys. Lett.* **92**, 071102, 2008.
- [45] Haugan, H.J., Elhamri, S., Brown, G.J., and Mitchel, W.C., "Growth optimization for low residual carrier in undoped midinfrared InAs/GaSb superlattices" *J. Appl. Phys.* **104**, 073111, 2008.
- [46] Cervera, C., Rodriguez, J.B., Perez, J.P., Ait-Kaci, H., Chaghi, R., Konczewicz, L., Contreras, S., and Christol, P., "Unambiguous determination of carrier concentration and mobility for InAs/GaSb superlattice photodiode optimization" *J. Appl. Phys.* **106**, 033709, 2009.
- [47] Khoshaklagh, A., Jaeckel, F., Hains, C., Rodrigues, J.B., Dawson, L.R., Malloy, K., and Krishna, S., "Background carrier concentration in midwave and longwave InAs/GaSb type II superlattices on GaAs substrate" *Appl. Phys. Lett.* **97**, 051109, 2010.
- [48] Hoffman, D., Nguyen, B.-M., Delaunay, P.-Y., Hood, A., Razeghi, M., Pellegrino, J., "Beryllium compensation doping of InAs/GaSb infrared superlattice photodiodes" *Appl. Phys. Lett.* **91**, 143507, 2007.
- [49] Rhiger, D.R., Kvaas, R.E., Harris, S.F., Kolasa, B.P., Hill, C.J., and Ting, D.Z., "Characterization of barrier effects in superlattice LWIR detectors" *Proc. of SPIE* **7660**, 76601N, 2010.
- [50] Terterian, S., Sharifi, H., Delaunay, P.-Y., Nosh, B., Roebuck, M., Rajavel, R., "Fabrication and performance of InAs/GaSb-based superlattice LWIR detectors" *Proc. of SPIE* **8012**, 801212, 2011.
- [51] Tian, Z.-B., DeCuir Jr., E.A., Gautam, N., Krishna S., Wijewarnasuriya, P. S., Pattison, J. W., Dhar, N., Welsler, R. E., Sood, A. K., "Hetero-engineering infrared detectors with type-II superlattices" *Proc. of SPIE* **8868**, 88680L, 2013.

- [52] Suyolcu Y.E., *Characterization of Epitaxially Grown III-V Nanostructures by Electron Microscopy*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2014.
- [53] Kaspi, R., Moeller, C., Ongstad, A., Tilton, M.L., Gianardi, D., Dente, G., Gopaladasu, P., "Absorbance spectroscopy and identification of valance subband transition in type-II InAs/GaSb superlattices" *Appl. Phys. Lett.* **76**, 409, 2000.
- [54] Varshni, Y.P., "Temperature dependence of the energy gap in semiconductors" *Physica* **34**, 149, 1967.
- [55] Lee, S.J., Noh, S.K., Plis, E., Krishna, S. and Lee, K.-S., "Subband transitions in dual-band n-B-n InAs/GaSb superlattice infrared photodetector identified by photoresponse spectra" *Appl. Phys. Lett.* **95**, 102106, 2009.
- [56] Klein, B., Plis, E., Kutty, M.N., Gautam, N., Albrecht, A., Myers, S. and Krishna S., "Varshni parameters for InAs/GaSb strained layer superlattice infrared photodetectors" *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44**, 075102, 2011.
- [57] Martyniuk, P., Wróbel, J., Plis, E., Madejczyk, P., Kowalewski, A., Gawron, W., Krishna, S. and Rogalski A., "Performance modeling of MWIR InAs/GaSb/B-Al_{0.2}Ga_{0.8}Sb type-II superlattice nBn detector" *Semicond. Sci. Technol.* **27**, 055002, 2012.
- [58] Taalat, R., Rodriguez, J.B., Delmas, M. and Christol, P., "Influence of the period thickness and composition on the electro-optical properties of type-II InAs/GaSb midwave infrared superlattice photodetectors" *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47**, 015101, 2014.
- [59] Anonim, InAs-Indium Arsenide, Ocak 2014.
<http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/InAs/basic.html>
- [60] Anonim, GaSb-Gallium Antimonide, Ocak 2014.
<http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/GaSb/index.html>
- [61] Razeghi, M., Wei, Y., Bae, J., Gin, A., Hood, A., Jiang, J., Nah, J., "Type II InAs/GaSb superlattices for high-performance photodiodes and FPAs", *Proc. of SPIE* **5246**, 501, 2003.

- [62] Cervera, C., Rodriguez, J.B., Chaghi, R., Ait-Kaci, H., Christol, P., “Characterization of midwave infrared InAs/GaSb superlattice photodiode” *J. Appl. Phys.* **106**, 024501, 2009.
- [63] Plis, E.A., Kutty, M.N., Krishna, S., “Passivation techniques for InAs/GaSb strained layer superlattice detectors” *Laser Photon. Rev.* **7**, 45-59, 2013.
- [64] Salihoglu, O., Muti, A., Aydinli, A., “A comparative passivation study for InAs/GaSb pin superlattice photodetectors” *IEEE J. Quant. Electron.* **49**, 661, 2013.
- [65] Experiment 14. Hall effect and resistivity measurements in doped GaAs, Ocak 2014.
<http://www.phas.ubc.ca/~phys409/?page=manuals>

Ek-1 Hall Çubuğu ve van der Pauw Yöntemine Göre Katkı ve Mobilitenin Hesaplanması

Hall Çubuğu (Bar) Geometrisi; Hall etkisi ölçümlerinde, örnek üzerinden uygun bir şekilde Hall voltajının okunabilmesi için farklı geometrilerde Hall çubuğu tasarımları mevcuttur. Hem yapının homojenliğini, hem de Hall çubuğu aygıt fabrikasyonunda bir hatanın olup olmadığını kontrol etmeye yarayan 1-2-2-1 geometrik yapısı Şekil E.1’de gösterilmektedir. Yarıiletken yapının öz direnci ve taşıyıcı yoğunluğunun ölçümünde kullanılan yöntem kısaca şöyle açıklanabilir:

Yapının öz direnci iki farklı kol için;

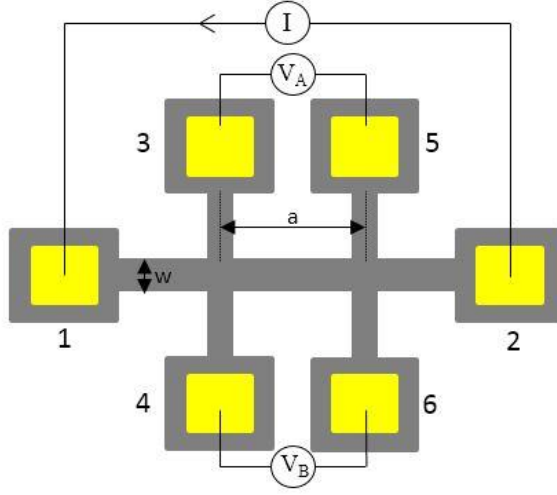
$$\rho_a = \frac{V_{12,35}^+(B=0) - V_{12,35}^-(B=0)}{I_{12}^+(B=0) - I_{12}^-(B=0)} \frac{w \cdot t}{a} \quad (\text{E. 1})$$

$$\rho_b = \frac{V_{12,46}^+(B=0) - V_{12,46}^-(B=0)}{I_{12}^+(B=0) - I_{12}^-(B=0)} \frac{w \cdot t}{a} \quad (\text{E. 2})$$

olarak ifade edilir. Denklem (E.1) ve (E.2)’de yer alan, t, w, a değerleri sırasıyla yapının kalınlığı, akım akan çubuğun genişliğini ve birbirine paralel kollar arasındaki mesafedir. İki ayrı kol üzerinden öz direnç değeri hesaplandıktan sonra yapının ortalama öz direnci

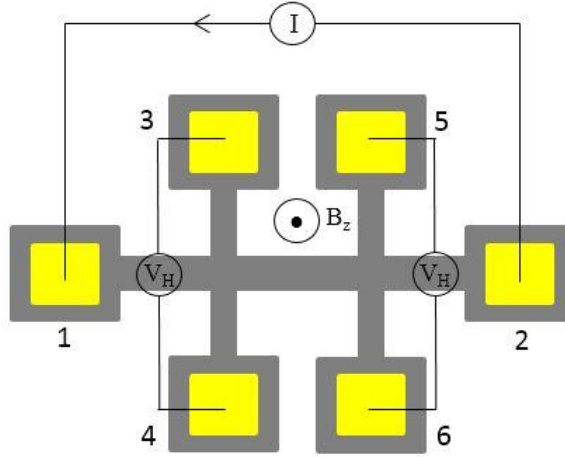
$$\rho_{ort} = \frac{\rho_a + \rho_b}{2} [\Omega \cdot \text{m}] \quad (\text{E. 3})$$

eşitliğiyle hesaplanır.



Şekil E.1. Hall çubuğu aygıtında boyuna direnç ölçümü.

Taşıyıcı yoğunluğunu ve mobilitayı hesaplamak için uygulanan akıma ve manyetik alana dik yönde oluşan Hall voltajından yararlanır (Şekil E.2). Manyetik alanın ve akımın her iki polaritesi durumunda oluşan dört ayrı Hall voltajı, Denklem (E.4) ve (E.5) kullanılarak, iki ayrı kol için Hall katsayısı hesaplanır.



Şekil E.2. Hall çubuğu aygıtında manyetik alan altında Hall voltajının ölçülmesi.

$$R_a = \frac{V_{12,34}^+(+B) - V_{12,34}^-(+B) + V_{12,34}^-(-B) - V_{12,34}^+(-B) t}{I_{12}^+(+B) - I_{12}^- (+B) - I_{12}^-(-B) + I_{12}^+(-B)} \frac{t}{B} \quad (\text{E. 4})$$

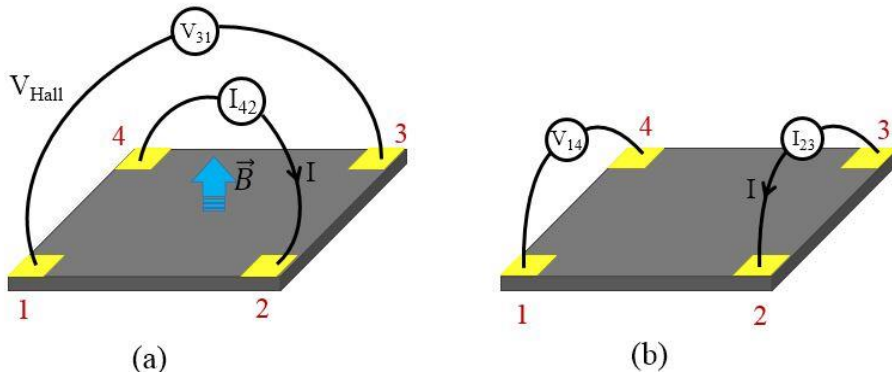
$$R_b = \frac{V_{12,56}^+(+B) - V_{12,56}^-(+B) + V_{12,56}^-(-B) - V_{12,56}^+(-B) t}{I_{12}^+(+B) - I_{12}^-(+B) - I_{12}^-(-B) + I_{12}^+(-B)} \frac{t}{B} \quad (\text{E. 5})$$

$$R_{H \text{ ort}} = \frac{R_a + R_b}{2} [m^3 \cdot C^{-1}] \quad (\text{E. 6})$$

Hall etkisi ölçümlerinde, yapı içerisindeki taşıyıcıların ortalama etkisi ölçülür ve ölçüm sonucuna, sayıca çok olan taşıyıcıların karakteri yansır. Yapılan ölçümlerde Hall katsayısının pozitif ve negatif değeri, yapı içerisindeki baskın taşıyıcı tipini göstermektedir. Pozitif ise baskın taşıyıcı tipi boşluklar (p-tipi), negatif ise elektronlardır (n-tipi). Hesaplanan ortalama Hall katsayısı (E.6) ve öz direnç (E.3) kullanılarak, yapıda net taşıyıcıların yoğunluğu ve mobilitesi hesaplanır (E.7) [37]

$$N_H = \frac{1}{q \cdot |R_{H \text{ ort}}|} [m^{-3}] , \quad \mu_H = \frac{|R_{H \text{ ort}}|}{\rho_{\text{ort}}} \left[\frac{m^2}{V \cdot s} \right] \quad (\text{E. 7})$$

van der Pauw Geometrisi; van der Pauw geometrisinde, her hangi bir aşındırma işlemine gerek duymadan, kare şeklindeki örneğin her bir köşesine yerleştirilmiş, yapıya kıyasla oldukça küçük kontaklar üzerinden ölçümler yapılır (Şekil E.3).



Şekil E.3. Van der Pauw yöntemine göre (a) Hall etkisi ve (b) öz direnç ölçümü.

Tıpkı Hall çubuğu geometrisinde ki ölçümlerde olduğu gibi, farklı polaritede akım ve manyetik alan uygulayarak, ölçüm yapılmaktadır. Manyetik alan bağımlı ölçümlerde, akım uygulanan ve Hall voltajının okunduğu doğrultu birbirine diktir. Özdirenç ölçümlerinde ise akım uygulanan doğrultu ile voltajın okunduğu doğrultu birbirine paraleldir. Hall voltajı ve özdirenç ölçmek için kullanılan bağlantı şekline sadık kalarak, ölçüm hassasiyetini arttırmak amacıyla, örnek üzerindeki farklı kontak bölgelerinden ölçüm alınmaktadır.

Özdirenç hesabı yapılırken; dört farklı şekilde voltaj ölçümü yapılarak direnç hesaplanır.

$$R_{12,43} \equiv \frac{V_{43}}{I_{12}}, \quad R_{14,23} \equiv \frac{V_{23}}{I_{14}}, \quad R_{21,34} \equiv \frac{V_{34}}{I_{21}}, \quad R_{41,32} \equiv \frac{V_{32}}{I_{41}} \quad (\text{E. 8})$$

Denklem (E.8)'de hesaplanan dört ayrı direnç değerleri kullanılarak (E.9) ve (E.10)'dan iki ayrı özdirenç değeri hesaplanır.

$$\rho_a = \frac{\pi t}{\ln 2} \left(\frac{R_{12,43} + R_{14,23}}{2} \right) \cdot f \left(\frac{R_{12,43}}{R_{14,23}} \right) [\Omega \cdot m] \quad (\text{E. 9})$$

$$\rho_b = \frac{\pi t}{\ln 2} \left(\frac{R_{21,34} + R_{41,32}}{2} \right) \cdot f \left(\frac{R_{21,34}}{R_{41,32}} \right) [\Omega \cdot m] \quad (\text{E. 10})$$

Özdirenç hesabı yapılırken kullanılan $f \left(\frac{R_{12,43}}{R_{14,23}} \right)$ ve $f \left(\frac{R_{21,34}}{R_{41,32}} \right)$ fonksiyonu, düzeltme faktörüdür. Bu faktör, Denklem (E.11) ile türetilerek, özdirenç hesaplanır [65].

$$\exp \left(-\frac{\ln 2}{f(x)} \right) \cdot \cosh \left(\left(\frac{x-1}{x+1} \right) \frac{\ln 2}{f(x)} \right) = \frac{1}{2} \quad (\text{E. 11})$$

Hall katsayısı, iki farklı şekilde Denklem (E.12) ve (E.13) ile hesaplanır. Elde edilen iki ayrı öz direnç ve Hall katsayısı değerinin ortalamaları alınır. Daha sonra, Hall çubuğu yönteminde olduğu gibi Denklem (E.6) ve (E.7) deki eşitlikler kullanılarak net taşıyıcı yoğunluğu ve mobilitesi hesaplanır.

$$R_a = \frac{V_{13,24}^+(+B) - V_{13,24}^-(+B) + V_{13,24}^-(-B) - V_{13,24}^+(-B) t}{I_{13}^+(+B) - I_{13}^-(+B) - I_{13}^-(-B) + I_{13}^+(-B)} \frac{t}{B} \quad (\text{E. 12})$$

$$R_b = \frac{V_{42,31}^+(+B) - V_{42,31}^-(+B) + V_{42,31}^-(-B) - V_{42,31}^+(-B) t}{I_{42}^+(+B) - I_{42}^-(+B) - I_{42}^-(-B) + I_{42}^+(-B)} \frac{t}{B} \quad (\text{E. 13})$$