

**KIZILÖTESİ DEDEKTÖR UYGULAMALARI
İÇİN InAsSb ve GaInAsSb BİLEŞİKLERİNİN
GaAs ALTTAŞ ÜZERİNE
MBE TEKNİĞİ İLE BÜYÜTÜLMESİ**

Mehmet ERKUŞ
Yüksek Lisans Tezi
Fizik Anabilim Dalı
Mart 2015

**Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje no: BAP-1301F038**

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Mehmet Erkuş'un "Kızılötesi Dedektör Uygulamaları için InAsSb ve GaInAsSb Bileşiklerinin GaAs Alttaş Üzerine MBE Tekniği ile Büyütülmesi" başlıklı **Fizik** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 18.02.2015 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. UĞUR SERİNCAN
Üye	: Doç. Dr. BÜLENT ASLAN
Üye	: Yard. Doç. Dr. SELÇUK YERCİ

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

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KIZILÖTESİ DEDEKTÖR UYGULAMALARI İÇİN InAsSb ve GaInAsSb BİLEŞİKLERİNİN GaAs ALTTAŞ ÜZERİNE MBE TEKNİĞİ İLE BÜYÜTÜLMESİ

Mehmet ERKUŞ

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Uğur SERİNCAN

2015, 131 sayfa

Bu tez çalışmasında, InAsSb ile GaInAsSb üçlü ve dörtlü bileşikleri GaAs alttaş üzerine yüksek kalitede MBE tekniği ile büyütülüp yapısal, optik ve opto-elektronik karakterizasyonları yapılmıştır. Örnekler, GaAs düzeltme katmanlı ve GaSb geçiş katmanlı olarak konsantrasyona bağımlı bir şekilde sistematik olarak büyütülmüş, kristal kaliteleri ve örnek konsantrasyonu yüksek çözünürlüklü X-ışınımı kırınımı tekniği ile incelenmiştir. Sitrik asit ve hidroklorik asit çözeltisi için $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ örneklerinin konsantrasyona bağlı aşındırma hızları belirlenmiştir. Raman spektroskopisi tekniği ile örgü dinamikleri hakkında bilgi edinilmiş ve $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($x \geq 0,55$) yapılarının iki-kipli InAs- ve InSb-benzeri boyuna optik fonon frekansına sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca, bu yapıların InSb-benzeri karmaşık-kipli akustik fonon frekansına sahip olduğu görülmüş ve Raman frekans doruklarının yerleri x konsantrasyonun bir fonksiyonu olarak sunulmuştur. Orta dalgaboylu kızılötesi bölgede algılama yapmak üzere tasarlanan $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ fotodedektör yapılarının, fototepki ölçümleriyle kesim dalga boyu ve bant aralığı enerjileri belirlenmiştir. Dedektör yapılarının sıcaklık bağımlı karanlık akım ölçümlerinden aktivasyon enerjileri elde edilmiş ve karanlık akıma etki eden mekanizmalar bulunmuştur. Yakın dalgaboylu kızılötesi bölgede algılama yapmak üzere tasarlanan $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ yapılarının bant enerjileri fotoluminesans ve fototepki ölçümleri sonucunda bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Moleküler Demet Epitaksi, InAsSb, GaInAsSb, GaAs
HRXRD, Kızılötesi Fotodedektörler

ABSTRACT

Master of Science Thesis

**GROWTH of InAsSb and GaInAsSb COMPOUNDS on GaAs SUBSTRATE
by MBE TECHNIQUE for INFRARED DETECTOR APPLICATIONS**

Mehmet ERKUŞ

Anadolu University

Graduate School of Science

Physics Program

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Uğur SERİNCAN

2015, 131 pages

In the scope of this thesis, high quality InAsSb/GaInAsSb ternary and quaternary compounds were grown on GaAs substrates by MBE technique and their structural, optical and opto-electronic properties were studied. The samples were grown systematically depending on the concentration by using either GaAs buffer layer or GaAs buffer layer with GaSb transition layer. Their crystal quality were investigated by means of high resolution X-ray diffraction technique. Etching rate of InAs_{1-x}Sb_x epilayers were determined depending on the concentration for citric and hydrochloric acid solution. By Raman spectroscopy, their lattice dynamics were examined and it was shown that InAs_{1-x}Sb_x ($x \geq 0,55$) structures exhibited two-mode InAs- and InSb-like longitudinal optical phonon frequencies. Furthermore, in acoustic phonon region these structures presented InSb-like mix-mode acoustic and all Raman frequency peak locations were defined by equations as a function of x concentration. The cutoff wavelengths and band gap energies of InAs_{1-x}Sb_x photodetectors were determined and designed that they have a detection in mid-wavelength infrared region. The activation energies were obtained from temperature-dependent dark current measurements of the detector structure and found the mechanisms that affect the dark current. Band gap energies of Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} photodetectors were identified by using photoluminescence and photoresponse measurements. It was observed that the diodes have a photoresponse in the near infrared region.

Keywords: Molecular Beam Epitaxy, InAsSb, GaInAsSb, GaAs, HRXRD, Infrared Photodetectors

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım ve yüksek lisans eğitimim boyunca tecrübelerinden, iş disiplininin yararlandığım, çalışmalarımın sunduğu imkanlar, özverili çabaları, cesaretlendirici ve arkadaşça tutumunu benden asla esirgemeyen değerli danışmanım Doç. Dr. Uğur Serincan'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım sırasında, değerli bilgi ve önerileriyle birlikte yorumlarını paylaşan, anlayışlı ve arkadaşça tutumuyla desteğini hiç eksik etmeyen değerli hocam Doç. Dr. Bülent Aslan'a çok teşekkür ederim.

Laboratuvardaki çalışmalarım sırasında bilgi, tecrübe ve yorumlarıyla çalışmalarımın destek olan, hoş sohbeti ve enerjisiyle zor anlarımda daima motivasyon sağlayan değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Mustafa Kulakçı'ya teşekkür ederim.

MBE ve XRD cihazlarını öğrenirken deneyim ve tecrübelerini paylaşan Bülent Arıkan'a ve Güven Korkmaz'a, aygıt fabrikasyonu öğrenim sürecinde yardımları ve tecrübelerini paylaşan ve aynı zamanda lisans öğreniminden de arkadaşım olan Seval Şahin'e, sarı oda ve FTIR konusunda bilgi ve deneyimlerini benden hiç bir zaman esirgemeyen Melih Korkmaz'a, laboratuvarda yaptığım çalışmalar sırasında yardımlarını ve arkadaşlıklarını hissettiğim Ayşe Şevik'e, laboratuvar çalışmalarımın önce de hayatımda yer alan değerli arkadaşlarım Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı üyeleri olan: Samet Özdemir'e ve Yusuf Eren Suyolcu'ya ayrı ayrı teşekkür ederim.

Raman ölçümlerinin alınmasına olanak sağlayan Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Atom ve Molekül Fiziği Araştırma grubuna ve bu ölçümlerde yer alan Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı üyesi Burcu Arpapay'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca sevgisini ve desteğini benden asla esirgemeyen, en zor anlarımda daima yanımda olan değerli arkadaşım Hasret Gülfırat'a çok teşekkür ederim.

Beni hiç bir zaman yalnız bırakmayan, her konuda desteklerini hissettiğim, varlıkları ve sevgileriyle yaşam kaynağım olan annem Necla Erkuş'a, babam Sefa Erkuş'a ve abim Saygın Erkuş'a çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
TABLOLAR DİZİNİ.....	xi
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. KIZILÖTESİ ALGILAMANIN TEMELİ VE KIZILÖTESİ DEDEKTÖRLER	5
2.1. Kızılötesi Dedektörlerin Tarihçesi	5
2.2. Kızılötesi Algılamanın Temeli	7
2.2.1. Kara Cisim Işıması	7
2.3. Atmosferik Pencere.....	9
2.4. Kızılötesi Dedektörler	10
2.5. Termal Dedektörler	11
2.6. Foton Dedektörleri	13
2.6.1. Fotoiletken Dedektörler	13
2.6.2. Fotovoltaik Dedektörler.....	15
3. InAs_{1-x}Sb_x ve Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} BİLEŞİKLERİNİN BANT YAPILARI	17
3.1. InAs _{1-x} Sb _x Bant Yapısı ve Bant Aralığı.....	17

3.2. $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ Bant Yapısı ve Bant Aralığı	21
4. DENEYSEL YÖNTEMLER.....	25
4.1. Moleküler Demet Epitaksi Sistemi	25
4.1.1. Katı Kaynaklı Kırıcı Bölge Efüzyon Hücreleri	30
4.1.2. Çift Filamanlı Efüzyon Hücreleri	35
4.1.3. Tek Filamanlı Efüzyon Hücreleri	36
4.2. Yüksek Çözünürlüklü X-Işınımı Kırınımı (HRXRD)	37
4.3. Aygıt Fabrikasyon Aşamaları	38
4.4. Opto-Elektronik Karakterizasyon Teknikleri	41
4.4.1. Karanlık Akım Ölçümleri	41
4.4.2. Tayfsal Fototepki Ölçümleri	42
4.4.3. Fotoluminesans Ölçümleri	43
4.5. Raman Spektroskopisi	45
5. EPİTAKSİYEL $InAs_{1-x}Sb_x$ FOTO-ALGILAYICILARIN BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU	48
5.1. $InAs_{1-x}Sb_x$ Foto-Algılayıcıların Büyütülmesi	48
5.2. $InAs_{1-x}Sb_x$ Epitaksi Yapılarının HRXRD Analizleri	54
5.3. Tavlamanın $InAsSb$ Epitaksi Yapılarına Etkileri	65
5.4. $InAs_{1-x}Sb_x$ Yapılarının Aşındırma Derinliklerinin Belirlenmesi ve Fabrikasyon Süreci	70
5.5. $InAsSb$ Foto-Algılayıcıların Tayfsal Fototepki Ölçümleri	76
5.6. $InAsSb$ Foto-Algılayıcıların Karanlık Akım Ölçümleri	78
5.7. $InAs_{1-x}Sb_x$ Epitaksi Yapılarının Raman Spektroskopisi Ölçümleri	82

6. Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} FOTO-ALGILAYICI YAPILARININ BÜYÜTÜLMESİ ve KARAKTERİZASYONU	88
6.1. Ga _x In _{1-x} As _y Sb _{1-y} Yapılarının MBE Sisteminde Büyütülmesi.....	88
6.2. Ga _x In _{1-x} As _y Sb _{1-y} Yapılarının HRXRD Analizleri.....	92
6.3. Ga _x In _{1-x} As _y Sb _{1-y} Foto-Algilayıcı Yapılarının Fabrikasyon Süreci.....	97
6.4. Ga _x In _{1-x} As _y Sb _{1-y} Foto-Algilayıcı Yapılarının Optik ve Opto-Elektronik Karakterizasyonu	99
7. SONUÇLAR	105
KAYNAKLAR.....	111

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

1.1. Yaygın kullanılan bazı III-V grubu yarıiletkenlerin 300 K'deki örgü sabiti ve bant enerji aralıkları (Kırmızı kareler 6,1 Å ailesine ait yarıiletkenler).....	3
2.1. Elektromanyetik spektrum	6
2.2. Kızılötesi dedektörlerin tarihsel gelişimi	7
2.3. Çeşitli sıcaklıktaki kara cisimlere ait dalgaboyuna göre spektral ışıyan foton yayılımı	8
2.4. Atmosferik iletim spektrumu ve soğuran moleküller (spektrumlar deniz seviyesinde ve yaklaşık 2 km'lik yatay bir güzergah üzerinde alınmıştır)	10
2.5. Bir fotoiletkten dedektörün şekil geometrisi.....	14
2.6. a-) Fotovoltaik dedektör ve elektriksel sembol. b-) Bir fotodiyot için karakteristik akım-voltaj eğrisi. c-) Bir fotovoltaik dedektörün eşdeğer döngüsü	16
3.1. $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ve $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ yarıiletkenlerin şematik bant yapısı	18
3.2. $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ 'nin x konsantrasyonuna bağlı (a) 300 K (b) 77 k (c) 0-10 K sıcaklık aralığında bant aralığı değişimi	20
3.3. $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 'nin bant aralığı - örgü sabiti ilişkisi.....	22
3.4. InAs altaş üzerine büyütülmüş $(\text{InAs})_{1-z}(\text{GaAs}_{0,08}\text{Sb}_{0,92})$ ve GaSb altaş üzerine büyütülmüş $(\text{InAs}_{0,91}\text{Sb}_{0,9})_{1-z}(\text{GaSb})_z$ dörtlü alaşımlarının, $T=300$ K sıcaklıkta z konsantrasyonun bir fonksiyonu olarak bant enerji değerleri (Nokta ile gösterilen yerler GaInAsSb'nin karışabilirlik bant aralığı bölgeleridir.).....	23
3.5. Konsantrasyon bağımlı a-) InAs altaş üzerine b-) GaSb altaş üzerine büyütülmüş $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ yapılarının X, L ve Γ vadilerinin enerjileri	24
4.1. Bir MBE sisteminde ana haznenin şematik gösterimi	27
4.2. Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu olan MBE sistemi	30
4.3. Sb efüzyon hücresinin şematik gösterimi	31
4.4. As efüzyon hücresinin şematik gösterimi	32
4.5. Çift filamanlı efüzyon hücresinin şematik gösterimi.....	36
4.6. Kristal düzleminde X-ışını kırınımının şematik gösterimi.....	38

4.7. Maske deseni aktarma işleminin şematik gösterimi.....	39
4.8. Alt ve üst kontakları alınmış örneğin şematik gösterimi.....	41
4.9. Sıcaklık bağımlı karanlık akım deney düzeneği	42
4.10. Tayfsal Fototepki Ölçüm düzeneği	43
4.11. PL spektrumu ölçümlerinde kullanılan deney düzeneği	45
4.12. Saçılan ışığın frekans spektrumu	47
5.1. GaSb alttaş üzerine büyütülen InAsSb-tabanlı nBn kızılötesi dedektör yapısının a-) şematik gösterimi b-) bant yapısı.....	52
5.2. a-) N ₁₂ ve b-) N ₁₃ örneklerinin şematik gösterimi.....	54
5.3. GaAs alttaş üzerine büyütülmüş Sb-tabanlı InAs _{1-x} Sb _x , InAs and InSb epikatman örneklerinin X-ışını spektrumları.....	55
5.4. GaAs alttaş üzerine büyütülmüş InAs _{1-x} Sb _x , InAs and InSb epikatman örneklerinin X-ışını spektrumları.....	57
5.5. GaAs alttaş üzerine GaSb geçiş katman ile büyütülmüş InAs _{1-x} Sb _x örnekler ile InAs ve InSb epikatman örneklerinin X-ışını ışını spektrumları.....	59
5.6. GaSb alttaş üzerine büyütülmüş AlAs _{1-x} Sb _x ve InAs _{1-x} Sb _x örneklerinin X-ışını spektrumları.....	61
5.7. GaSb alttaş üzerine büyütülmüş nBn (Bariod) kızılötesi dedektör yapısının X-ışını spektrumu.....	63
5.8. GaAs alttaş üzerine büyütülmüş InAs _{1-x} Sb _x foto-algılayıcı yapılarının X-ışını spektrumları.....	65
5.9. GaAs alttaş üzerine büyütülen N ₂ , N ₃ , N ₄ ve N ₅ örneklerinin tavlama öncesi ve 500 °C’de 5 dk tavlama sonrası X-ışını spektrumları.....	67
5.10. GaAs alttaş üzerine büyütülen N ₂ , N ₃ , N ₄ , N ₅ , S ₂ ve S ₃ örneklerinin tavlama öncesi ve 500 °C’de 30 dk tavlama sonrası X-ışını spektrumları.....	69
5.11. Farklı konsantrasyonlardaki InAs _{1-x} Sb _x örneklerinin aşındırma derinlikleri.....	71
5.12. Farklı konsantrasyonlardaki InAs _{1-x} Sb _x örneklerinin aşındırma hızları.....	72
5.13. HCl asit çözeltisi için N ₉ ve N ₁₀ numunelerinin aşındırma derinlikleri ve InAsSb aşındırma hızları.....	73

5.14. a-) N ₉ örneğinin 3. dakikadaki mesa görüntüsü b-) N ₁₀ örneğinin 3. dakikadaki mesa görüntüsü c-) İdeal bir ıslak aşındırma için olması gereken mesa görüntüsü (GaAs alttaş).....	74
5.15. N ₁₁ örneğinin a-) AlAsSb katmanını HCl asit çözeltisi ile aşındırma b-) AlAsSb'den sonra CA ile 5 dk aşındırma c-) AlAsSb'den sonra CA ile 12 dk aşındırma d-) AlAsSb'den sonra CA ile 25 dk aşındırma sonrası mesa görüntüleri.....	75
5.16. N ₁₂ ve N ₁₃ örneklerinin 80 K sıcaklıktaki düzeltilmiş fototepkileri ve kesim dalgaboyu değişimleri (Kesikli çizgiler kesim dalgaboyunu göstermektedir).....	76
5.17. Farklı sıcaklıklarda N ₁₂ ve N ₁₃ örneklerinin fototepki değişimleri.....	77
5.18. N ₁₁ örneğinin 77 K sıcaklıkta öngerilim voltajının bir fonksiyonu olarak karanlık akım yoğunluğu ve diferansiyel direnç.....	79
5.19. N ₁₂ örneğinin farklı sıcaklıklar için karanlık akım yoğunluğu ve diferansiyel direnç değerleri.....	80
5.20. N ₁₃ örneğinin farklı sıcaklıklar için karanlık akım yoğunluğu ve diferansiyel direnç değerleri.....	80
5.21. N ₁₂ ve N ₁₃ örneklerinin Arrhenius eğrileri ve aktivasyon enerjileri.....	81
5.22. Normalize edilmiş farklı Sb konsantrasyonlarında InAs _{1-x} Sb _x epikatman örneklerin Raman spektrumları.....	84
5.23. Normalize edilmiş farklı Sb konsantrasyonlarında InAs _{1-x} Sb _x epikatman örneklerin Raman spektrumları.....	86
5.24. InAs _{1-x} Sb _x alaşımlarının x konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak Raman frekanslarının bağımlılığı (■, Cherng ve ark.[68] verileri, nokta ile gösterilenler ise Li ve ark. [69]verileri).....	87
6.1. GaAs alttaş üzerine büyütülmüş Ga _x In _{1-x} As _y Sb _{1-y} epikatman yapılarının X-ışını spektrumları.....	92
6.2. GaAs alttaş üzerine büyütülmüş GaSb geçiş katmanlı Ga _x In _{1-x} As _y Sb _{1-y} örneklerinin X-ışını spektrumları.....	94
6.3. GaAs alttaş üzerine büyütülmüş Ga _x In _{1-x} As _y Sb _{1-y} foto-algılayıcı yapılarının X-ışını spektrumları.....	96

6.4. Ga _x In _{1-x} As _y Sb _{1-y} epikatman örneklerinin a-) aşındırma derinlikleri b-) aşındırma hızları.....	98
6.5. Ga _x In _{1-x} As _y Sb _{1-y} dörtlü bileşiklerin a-) 9 K'deki b-) 80 K'deki PL spektrumları.....	100
6.6. N ₂₀ ve N ₂₁ örneklerinin 80 K sıcaklıktaki düzeltilmiş fototepkileri ve kesim dalgaboyu değişimleri (Kesikli çizgiler kesim dalgaboyunu göstermektedir).....	101
6.7. N ₂₀ örneğinin farklı sıcaklıklar için karanlık akım yoğunluğu ve diferansiyel direnç değerleri.....	103
6.8. N ₂₁ örneğinin farklı sıcaklıklar için karanlık akım yoğunluğu ve diferansiyel direnç değerleri.....	103
6.9. N ₂₀ ve N ₂₁ foto-algılayıcı yapılarının Arrhenius davranışları ve aktivasyon enerjileri.....	104

TABLULAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Kızılötesi Dedektörlerin Karşılaştırılması	11
Tablo 3.1. $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ bant aralığı için farklı denklemler	20
Tablo 3.2. Farklı modeller için $\text{InAs}_{0,6}\text{Sb}_{0,4}$ bant aralığı ifadelerinin karşılaştırılması.....	21
Tablo 4.1. GaAs için epitaksiyel teknolojilerin karşılaştırılması	26
Tablo 4.2. 200cc Mark V Corrosive Series Valved Cracker® efüzyon hücresi özellikleri	33
Tablo 5.1. Malzeme kaynaklarının MBE'deki akı değerleri.....	49
Tablo 5.2. $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ bileşiklerinin temel büyütme değişkenleri	56
Tablo 5.3. As konsantrasyonları fazla olan $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ bileşiklerinin temel büyütme değişkenleri.....	58
Tablo 5.4. GaSb geçiş katmanlı $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ örneklerinin temel büyüme parametreleri.....	60
Tablo 5.5. $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x / \text{AlAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ çoklu katman örneklerinin temel büyüme parametreleri.....	62
Tablo 5.6. InAsSb -tabanlı $n\text{Bn}$ kızılötesi dedektör yapısı temel büyüme parametreleri.....	63
Tablo 5.7. N_{12} ve N_{13} foto-algılayıcı yapılarının temel büyütme değişkenleri	64
Tablo 5.8. Örneklerin tavlama öncesi ve sonrası temel değişkenleri.....	67
Tablo 5.9. N_2 , N_3 , N_4 , N_5 , S_2 ve S_3 örneklerinin tavlama öncesi ve sonrası temel değişkenleri.....	68
Tablo 6.1. Ga, In, As ve Sb kaynaklarının akı değerleri	89
Tablo 6.2. $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ epikatman yapılarının temel büyütme değişkenleri..	93
Tablo 6.3. GaSb geçiş katmanlı $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ epikatman örneklerin temel büyütme değişkenleri.....	95
Tablo 6.4. N_{20} ve N_{21} foto-algılayıcı yapılarının temel büyütme değişkenleri	97
Tablo 6.5. N_{18} , N_{19} , N_{20} ve N_{21} örneklerinin PL ölçümleriyle elde edilen bant aralığı enerjileri.....	100

KISALTMALAR DİZİNİ

AlGaAs	: Alüminyum Galyum Arsenik
Au	: Altın
BB	: Kara Cisim (black body)
Be	: Berilyum
CA	: Sitrik Asit (citric acid)
dk	: Dakika
FTIR	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi
FWHM	: Yarı Maksimum Genişlik
GaAs	: Galyum Arsenik
GaInAsSb	: Galyum İndiyum Arsenik Antimoni
GaSb	: Galyum Antimoni
h	: Plank Sabiti
HCl	: Hidroklorik
H₃PO₄	: Fosforik
HRXRD	: Yüksek Çözünürlüklü X-ışını Kırınımı
IA	: Karmaşık Akustik
InAs	: İndiyum Arsenik
InAsSb	: İndiyum Arsenik Antimoni
k	: Boltzmann Sabiti
K_{Sb}	: Antimoni Konsantrasyonu
LO	: Boyuna Optik
LPE	: Sıvı Faz Epitaksisi
MBE	: Moleküler Demet Epitaksi
MOCVD	: Metal Organik Kimyasal Buharlı Büyütme
MWIR	: Orta Dalgaboylu Kızılötesi
nm	: Nanometre
NWIR	: Yakın Dalgaboylu Kızılötesi
PL	: Fotoluminesans
Pt	: Platin

RHEED	:	Yansımali Yüksek Enerji Elektron Kırınımı
Si	:	Silisyum
sn	:	saniye
T	:	Sıcaklık
TA	:	Enine Akustik
Ti	:	Titanyum
TO	:	Enine Optik
µm	:	Mikrometre

1. GİRİŞ

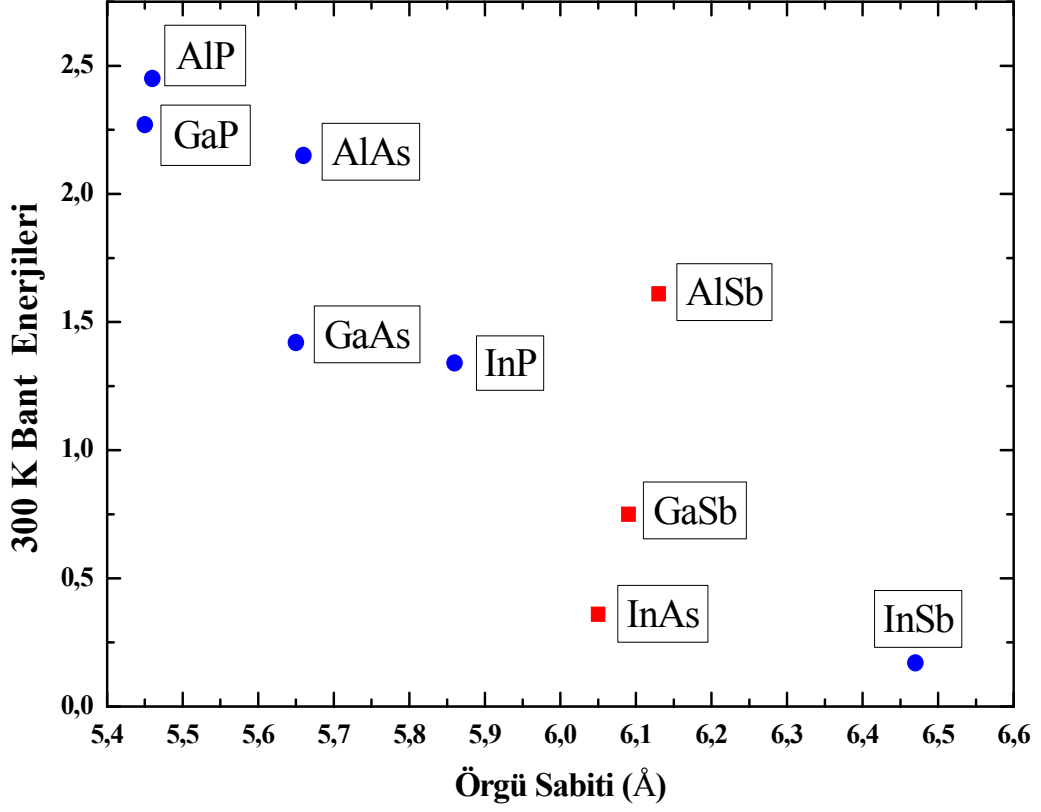
Kızılötesi dedektörler, üzerine düşen optik sinyali, elektrik sinyaline çevirerek algılama yapabilen sistemlerdir. Günümüzde, kızılötesi algılayıcıların uygulama alanları hızla artmakta olup özellikle gelişen büyütme teknikleri ve giderek ucuzlayan alttaş fiyatları, kızılötesi algılayıcı fiyatlarını etkilemiş ve günlük yaşamın içerisinde kullanılabilir noktaya getirmiştir. İlk olarak askeri alanda kullanılmaya başlanan kızılötesi algılayıcılar, günümüzde astronomi, sağlık ve enerji kontrolü gibi birçok alanda kullanılmaktadır [1-2]. Kızılötesi algılayıcıların kullanımındaki artışın devam etmesi üretim maliyetlerinin aşağıya çekilmesiyle doğrudan ilişkilidir.

Yüksek performansları nedeniyle kızılötesi algılayıcılar arasında en yaygın olarak kullanılan II-VI malzeme grubu ailesinden Cıva Kadmiyum Tellür (Mercury Cadmium Telluride, MCT) yapısıdır. Düzgün bir biçimde büyütülememesi, malzeme kaynaklarının kararsızlığından dolayı tekrarlanabilirlik oranının düşük olması, yüksek sıcaklık çalışmalarında Auger yeniden birleşme oranının fazla olmasından kaynaklı olarak soğutma gerektirmesi (77-200 K) ve yüksek maliyeti MCT'ye alternatif arayışı sürecini hızlandırmıştır. MCT'nin yerine düşünülen birçok yapı vardır. Bunların en önde gelenleri; Sb-tabanlı külçe yapılar (InSb, InAsSb, GaInAsSb vb.), Tip II süper örgü yapıları (InAs/GaSb, InAs/InAsSb vb.), Kuantum Kuyu Kızılötesi Foton Dedektör (QWIP) ve Kuantum Nokta Kızılötesi Foton Dedektörleri (QDIP)'dir.

Teknolojinin gelişmesi ve özellikle moleküler demet epitaksi (MBE) sisteminin kullanılmaya başlamasından sonra Esaki ve Tsu tarafından ileri sürülen yarıiletken süper örgü ve kuantum kuyulu dedektör yapılarına ilgi giderek artmış ve yeni malzeme sınıfı, özgün elektronik ve optiksel özellikli çoklu eklemler geliştirilmiştir [3]. Özellikle kuantum kuyu yapıların, taşıyıcıları kızılötesi uyarımla harekete geçirme prensibine odaklı aygıtlar üzerinde çalışılarak, onları daha kullanılabilir hale getirmek amaçlanmıştır. InGaAs/InAlAs, InAs/GaInSb, InSb/InAsSb gibi çeşitli yapılar çalışılsa da III-V malzeme sistemleri arasında bu güne kadar aralarında en çok çalışılan ve QWIP dedektörler arasında en fazla

uygulaması olan GaAs/AlGaAs malzeme sistemi olmuştur [1-2]. 1987 yılında ilk n-tipi QWIP, Levine ve arkadaşları tarafından iletim bandı içerisinde alt bantlar arası soğurma prensibine dayandırılarak, GaAs/AlGaAs malzeme sistemi üzerinde geliştirilmiştir [4]. Ayrıca ilk p-tipi QWIP 1991 yılında yine Levine ve ekibi tarafından geliştirilmiştir [5]. Aynı yıl Bethea ve ekibi, GaAs/AlGaAs malzeme sistemi için ilk kızılötesi görüntüyü elde etmeyi başarmıştır [6]. Kuantum verimleri ve dedektör performansları MCT ile karşılaştırıldığında düşük olmasına rağmen geniş formatlı, birden fazla bantta ve renkte algılama yapması QWIP'lerin kızılötesi algılayıcılar arasında önemli bir yer edinmesini sağlamıştır [1-3,7-8].

6,1 Å ailesi olarak bilinen ve oda sıcaklığında bant aralıkları 0,36 – 1,61 eV arasında değişen InAs, GaSb ve AlSb ikili III-V grubu yarıiletken bileşikleri dedektör tasarımında önemli bir yere sahiptir [9] (Şekil 1.1). Örgü parametrelerinin birbirlerine yakın olması büyütmede çok büyük bir avantaj sağlar. Ayrıca, 4 inç kadar büyüklükte GaSb ve InAs alttaşlar üzerine epitaksiyel büyütme yapabilme imkanı verir. Yeniden üretilebilirlik noktasında III-V malzeme grubu arasındaki kimyasal bağların MCT ile kıyaslandığında daha kararlı olması bu yapıları öne çıkaran özellikler arasındadır. Tip II InAs/GaSb süperörgü yapılar günümüzde üçüncü nesil kızılötesi dedektörler sınıfına aday olarak gösterilmektedir. Tip II süper örgü yapıları, kullanım amaçlarına göre farklı çeşitlerde olup en yaygın olarak bilineni kırık (broken) bant yapısı tipindekilerdir. InAs/GaSb tip II kırık bant yapılı süper örgülerde, InAs'ın iletim bandı GaSb değerlik bandının altında yer aldığı için gerçek bir bant aralığı enerjisine sahip değildir. Elektron ve boşlukları ifade eden dalga fonksiyonları, üst üste binerek sırasıyla iletim ve değerlik mini bantlarını oluştururlar [10].



Şekil 1.1. Yaygın kullanılan bazı III-V grubu yarıiletkenlerin 300 K'deki örgü sabiti ve bant enerji aralıkları (Kırmızı kareler 6,1 Å ailesine ait yarıiletkenler) [11]

1950'lerin sonlarına doğru keşfedilen InSb, diğer dar bant aralıklı bileşik yarıiletkenler gibi kızılötesi foto-algılayıcılar için ilgi çekici bir malzeme olmuştur. InSb, MWIR için yaygın olarak 77 K sıcaklıkta 5,4 µm kesim dalgaboyuna sahip bir foto-algılayıcıdır. 77 K sıcaklığına optimize edilmiş kuantum verimi, yaklaşık 160 K'e kadar olan sıcaklık aralığı için etkilenmez [12].

InAsSb, Sb-tabanlı III-V külçe yapıların arasında en küçük bant aralığına sahip malzemelerden biridir. MCT ile kıyaslandığında daha kararlıdır ve kompozisyona bağlı bant aralığı enerjisi değişimi daha azdır. Ayrıca, MCT'ye göre daha düşük dielektrik sabitine sahip olması (~11,5) ve oda sıcaklığında öz yayılım katsayısının (self-diffusion coefficient: $\sim 5,2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{s}$) daha düşük olması InAsSb'yi öne çıkaran özelliklerin başında gelmektedir [1]. InAsSb dedektör teknolojisindeki çalışmalar, ikinci nesil termal görüntüleme ve gelecek nesil çok düşük kayıplı fiber iletişim teknolojileri için kullanışlı aygıt olarak fotodiyotun gelişimine odaklanmış durumdadır [12-15]. InAsSb fotodiyotları

arasında şimdiye kadar elde edilen en iyi RoA değeri, yapı ile örgü uyumu çok iyi olan GaSb alttaş üzerine $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0,09 \leq x \leq 0,15$) aygıtları olmuş ve diyotlar, 1,7-4,2 μm dalgaboyu aralığında algılama yapan ve RoA değeri yaklaşık olarak $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ olan aygıtlardır [16]. Fakat, yüksek maliyet ve tekrarlanabilir bir üretim konusundaki sıkıntılar hala aşılabilmiş değildir. Özellikle, büyütme teknolojisinin gelişmesiyle beraber daha ucuz alttaşlar üzerine kaliteli kristal yapıların büyütülmesi konusundaki çalışmalar hala güncelliğini korumaktadır.

Bir diğer Sb-tabanlı külçe yapı olarak dörtlü GaInAsSb bileşikleri, özellikle NWIR ve MWIR uygulamaları mevcut olup, yüksek kaliteli külçe yapılar oda sıcaklığında yüksek algılayıcılığa (detectivity) sahiptir [17]. Ticari olarak seri üretimleri mevcut olmasa da 1,55 μm dalgaboylu uygulamaları fiber optik iletişim için güncelliğini korumaktadır [18]. Tıpkı InAsSb olduğu gibi, daha ucuz alttaşlar üzerine kaliteli kristal yapıların büyütülmesi konusundaki çalışmalar devam etmektedir.

Bu tez çalışması, GaAs alttaş üzerine III-V üçlü InAsSb ve dörtlü GaInAsSb kızılötesi dedektör yapılarının MBE ile büyütülmesi ve karakterizasyonunu içermektedir. Giriş bölümünde, MCT'ye alternatif durumdaki yarıiletken teknolojisinde öne çıkan kızılötesi dedektör yapıları, gelişim süreçleri ve InAsSb/GaInAsSb üçlü ve dörtlü bileşiklerinin buradaki yeri ve öneminden bahsedilmiştir. İkinci bölümde, kızılötesi algılamanın temelleri hakkında genel bilgiler verilmiş ve kızılötesi dedektör çeşitlerinden bahsedilmiştir. Bir sonraki bölümde, InAsSb/ GaInAsSb bileşiklerinin bant yapıları ve bant aralığı enerjileri anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, tez kapsamında çalışılan yapıların büyütülmesi, yapısal ve optik karakterizasyonu için kullanılan teknikler açıklanmıştır. Beşinci bölümde, Epitaksiyel olarak büyütülen katmanların büyüme parametreleri, yapısal ve optik karakterizasyondan elde edilen bulgulara yer verilmiş ve altıncı bölümde de sonuçlar sunulmuştur.

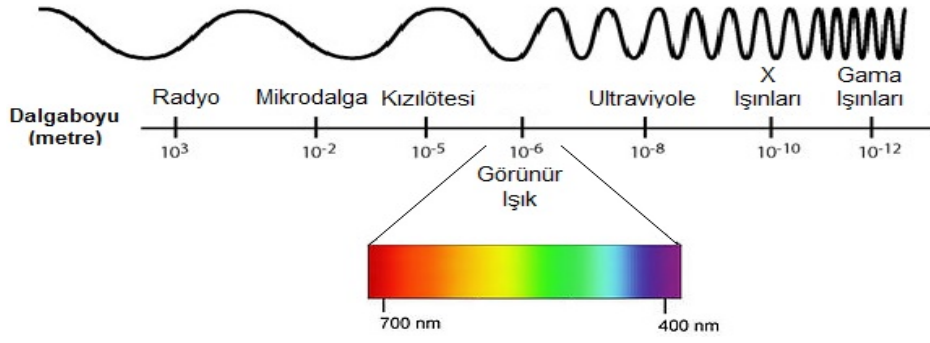
2. KIZILÖTESİ ALGILAMANIN TEMELİ VE KIZILÖTESİ DEDEKTÖRLER

Bu bölümde, kızılötesi kavramının nasıl ortaya çıktığı ve kim tarafından bulunduğu bahsedilecektir. Ayrıca, kızılötesi algılamanın temeli ve atmosferik pencerenin önemi vurgulanıp daha sonra kızılötesi dedektör çeşitleri, uygulama alanları ve algılama prensiplerinden kısaca bahsedilecektir.

2.1. Kızılötesi Dedektörlerin Tarihçesi

Geçtiğimiz bin yıla baktığımızda yaklaşık 212 yıl öncesine kadar bilinmeyen kızılötesi ışınım, ilk kez amatör gökbilimci Frederick William Herschel'in (1738–1822) basit bir cıva cam termometresi ve prizma yardımıyla gerçekleştirdiği deneyde ortaya çıkmıştır. Deneyde, bir prizma yardımıyla güneş ışığı renklerine ayrıştırılmış, her bir rengin sıcaklığı termometre ile ölçülmüş ve kızılötesi ışınımın var olduğu raporlamıştır [19].

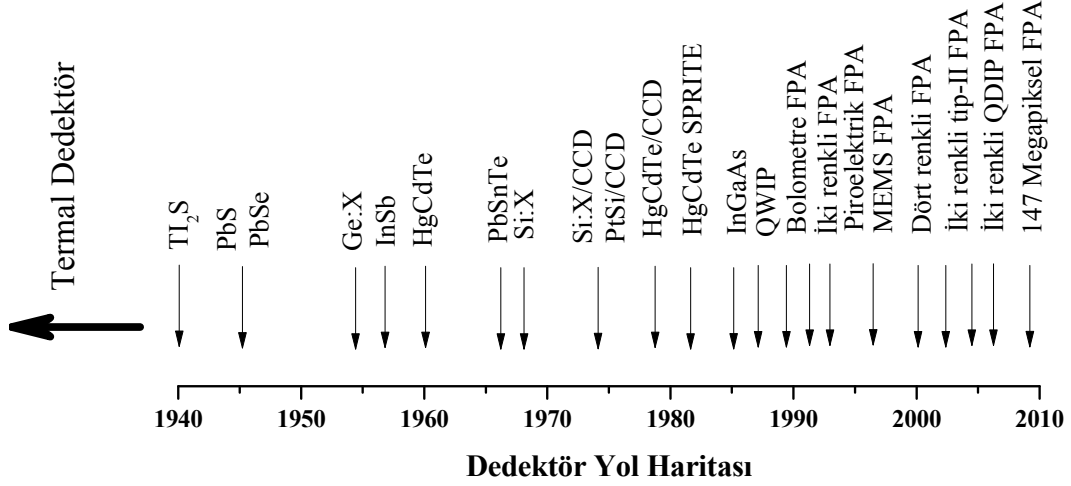
Mutlak sıfır sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa sahip olan her cisim, sıcaklığı ile orantılı olarak bir ışınım yapar. Bu olay *termal ışınım* olarak da bilinir. Bu ışınımın önemli bir bölümü yaklaşık 300 K sıcaklığına sahip cisimler için gözle görülemez, fakat ısı olarak fark edilebilirler. Kızılötesi ışınım yaklaşık 0,75 μm ile 1000 μm dalgalı boyları arasında değişen elektromanyetik dalgalardır (Şekil 2.1). Dalgalı boyu aralığı 0,75 μm ile 3 μm arasında olanlar yakın dalgalı boylu kızılötesi bölge (NWIR), 3 μm ile 5 μm dalgalı boyu arasında olanlar orta dalgalı boylu kızılötesi bölge (MWIR), 8 μm ile 12 μm dalgalı boyu arasında olan uzun dalgalı boylu kızılötesi (LWIR) ve 12 μm 'den büyük olup 1000 μm 'ye kadar olan bölge ise uzak dalgalı boylu kızılötesi bölgesini (FWIR) kapsamaktadır.



Şekil 2.1. Elektromanyetik spektrum [20]

1829 yılında İtalyan Fizikçi Nobili, çok sayıda ısılıçifti (termocouple) bağlayarak ilk termopili keşfetmiştir [21]. Ardından, 1830 yılında Alman Fizikçi Thomas Johann Seebeck tarafından keşfedilen termoelektrik etkiyle beraber çeşitli malzemelerin emilim ve yayılım spektrumları konusunda çalışmalar yapılmıştır [22]. 1839 yılında Fransız Fizikçi Alexandre Edmond Becquerel, platin tabakalar üzerinde yaptığı bilimsel çalışmalar sırasında ilk fotovoltajik etkiyi (Becquerel etkisi) keşfeden bilim adamı olmuştur [21]. 1873’de Willoughby Smith selenyum (Se) elementinin fotoiletkenliğini keşfetmiştir. Foton dedektör teknolojisi ise yirminci yüzyılda gelişmiştir. 1917 yılında Case, talanyum ve sülfürden (Tl_2S) oluşan bir maddenin değişken dirençli olduğunu keşfetmiş ve yüksek tepkiselliğe sahip ilk modern foton dedektörü geliştirmiştir [22].

Şimdiye kadar kızılötesi dedektör alanında birçok malzeme çalışılmıştır. Şekil 2.2’de kızılötesi malzemeler için önemli gelişmeler yaklaşık tarihleriyle beraber verilmiştir. II. Dünya savaşı sırasında modern kızılötesi dedektör teknolojisinin temelleri atılmıştır. Özellikle 3-5 ve 8-14 μm aralığındaki kızılötesi dedektör grubu en çok ilgiyi toplamıştır. Fakat, son yıllarda uydu ve uzay uygulamalarına ilginin artmasıyla beraber daha uzun dalga boylarına olan ilgi de giderek artmıştır [23].



Şekil 2.2. Kızılötesi dedektörlerin tarihsel gelişimi [22]

2.2. Kızılötesi Algılamamanın Temeli

Tüm maddeler, sıcaklığına bağlı olarak elektromanyetik ışınım yayar. Oda sıcaklığına sahip bir cisimden yayılan ışınımın dalgaboyu, elektromanyetik spektrumdaki kızılötesi bölgesine karşılık gelir ve bu ışınımın insan gözü ile görülemez. Cisim, sıcaklığı arttıkça hem daha fazla ışınım yayar hem de en fazla ışınımın yapıldığı dalgaboyu küçük değerlere kayar ve spektrumun baskınlık oranının değişmesiyle birlikte insan gözüyle görünür hale gelmeye başlar.

2.2.1. Kara Cisim Işıması

Kara cisim (black body, BB) kavramı varsayımsal bir kavramdır ve tüm enerjiyi soğurduğu (yansıtmanın olmadığı) kabul edilen cisimler için kullanılır. Mükemmel verimlilikle enerji yayan bu ışınım aslında cisimlerin belli sıcaklıklarda ışınım yayma özelliklerini incelemek için kullanılan teorik bir

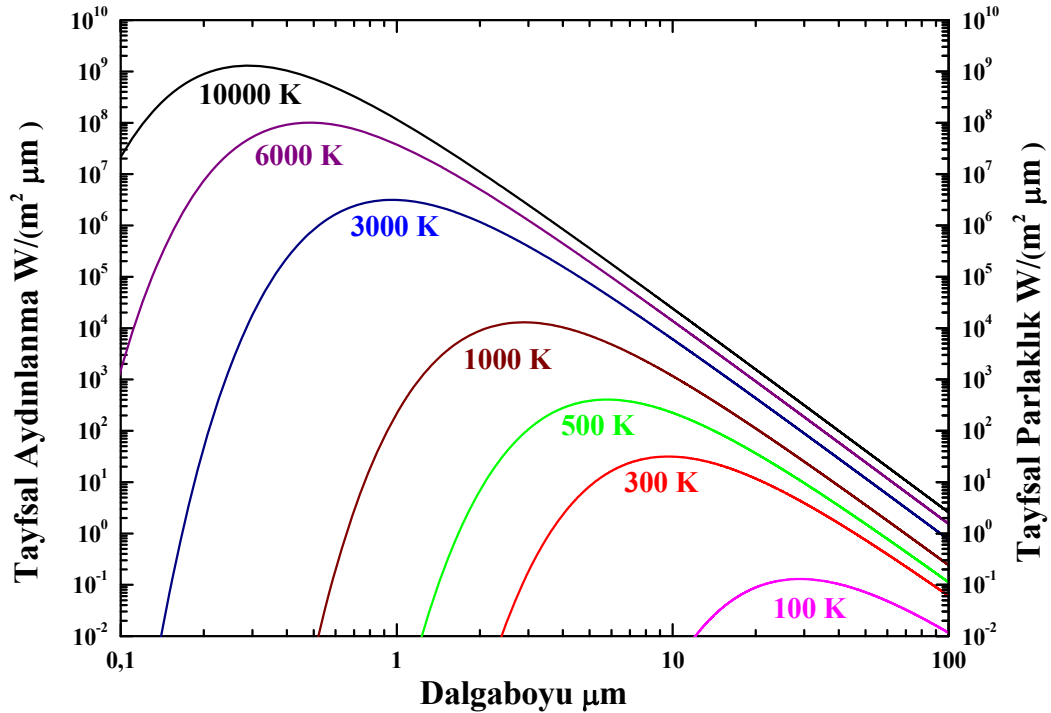
modeldir.. BB yayılımı, Planck yasası, Wien kayması ve Stephan-Boltzman yasası olarak bilinen eşitlikler kullanılarak belirlenebilir.

Plack yasası, cismin sıcaklığına bağlı olarak hangi dalgaboylarında ışımaya yapacağını tanımlar ve

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

formülü ile ifade edilir. Eşitlikte yer alan h Planck sabiti, k Boltzmann sabiti, c ışık hızıdır. Ayrıca tayfsal parlaklık $L(\lambda, T)$ 'nin birimi ($W/m^2 / \mu m$)'dir.

Şekil 2.3'de farklı sıcaklıktaki kara cisimlere ait Planck eğrileri gösterilmiştir. Kara cismin oda sıcaklığında (300 K) spektral ışınım yayma gücünün büyük bir kısmı kızılötesi bölgesinde olduğu görülmektedir, fakat daha yüksek sıcaklıklara gidildikçe (1000 K ve üzeri) spektrumlar görünür bölgelerde baskın olur.



Şekil 2.3. Çeşitli sıcaklıktaki kara cisimlere ait dalgaboyuna göre spektral ışınım foton yayılımı

Wien'in kayma yasası, kara cismin T sıcaklığıyla, ışımaya yoğunluğunun en fazla olduğu yerdeki dalga boyu (λ_{\max}) arasındaki ilişkiyi ifade eder. Sıcaklığın artmasıyla birlikte enerji artarken, dalga boyu azalır ve

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad (2.2)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada, λ_{\max} 'ın birimi μm , T'nin ise Kelvin'dir. Planck fonksiyonunun dorukları sıcaklık arttıkça kısa dalga boylarına doğru kayar.

Stefan-Boltzmann Yasası, kara cisimden yayılan gücün, cismin sıcaklığıyla olan ilişkisini ortaya koyar ve

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

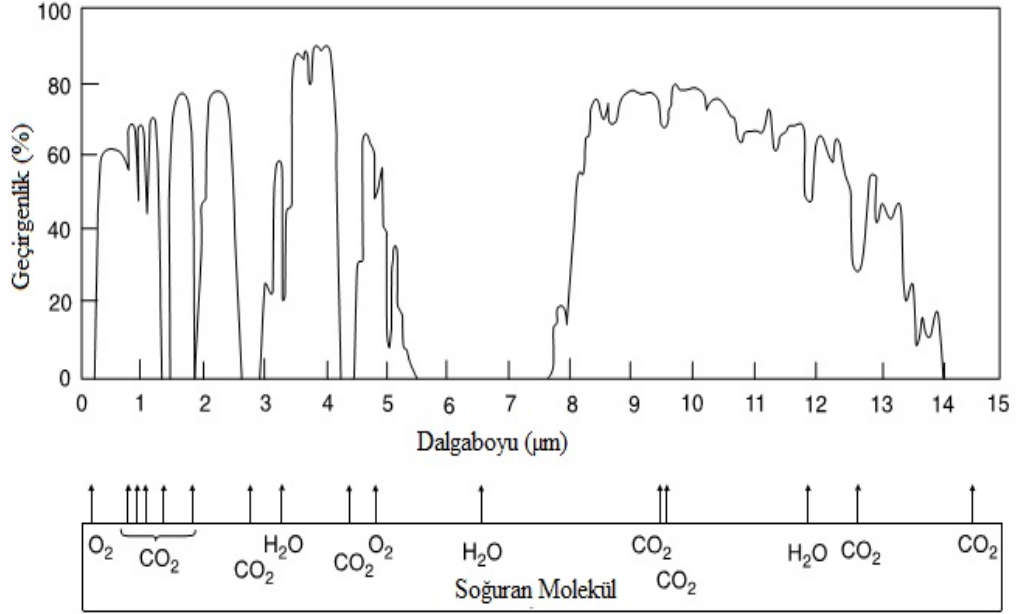
ifadesi ile tanımlanır. Bu eşitlikte, σ Stefan-Boltzmann sabitidir ve değeri ($5,67051 \times 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2\text{K}^4}$)

Kara cisim ışınım yasası, gerçek bir cisme salınan gücü (emissivite, ϵ) katsayısı belirlenerek uygulanabilir. Yayıma, kullanılan malzemelerin termal ışımaya enerjisiyle soğurma yeteneğinin ölçülmesidir. Bu yetenek her malzeme için farklılık gösterir. Eğer $\epsilon=0$ ise ışınım yok, $\epsilon=1$ ise de kara cisim, yani ışınım en fazla olduğunu belirtmektedir.

2.3. Atmosferik Pencere

Bir kaynaktan çıkan ışımaya spektrumunu belirlemek, elektromanyetik spektrumun yayılma ortamını bilmeden mümkün olamaz. Karbondioksit, su buharı ve ozon, atmosfer ortamında kızılötesi ışınımaları soğuran en önemli soğuruculardır. Bunların yanında, karbonmonoksit, metan ve nitrik oksit de bir miktar soğurmaya neden olur. Fakat, bunlar daha küçük bileşenlerden oluştuğu için karbondioksit, su buharı ve ozon kadar etkili değildirler (Şekil 2.4). Soğurma olayı özellikle ultraviyole ve kızılötesi bölgesinde baskın olup, görülebilir ışıkta çok azdır. Bu durum, atmosfer içersindeki soğurucu gazlardan kaynaklanmaktadır. Elektromanyetik spektrumda, soğurulmanın çok az olduğu veya hiç olmadığı

durumların meydana geldiği bölgeler atmosferik geçiş bölgesi olarak bilinir. Atmosfer, yaklaşık 3-5 ve 8-13 μm aralıklarda nispeten geçirgendir. Bu bölgeler, *atmosferik pencere* olarak tanımlanır ve kızılötesi dedektörler yaygın olarak bu bölgelerde çalışacak şekilde tasarlanır.



Şekil 2.4. Atmosferik iletim spektrumu ve soğuran moleküller (spektrumlar deniz seviyesinde ve yaklaşık 2 km'lik yatay bir güzergah üzerinde alınmıştır) [24]

2.4. Kızılötesi Dedektörler

Kızılötesi algılama teknolojisinin, askeri, sağlık, güvenlik, kalite kontrol, uzay çalışmaları başta olmak üzere birçok teknolojik ve endüstriyel alanlarda uygulamaları bulunmaktadır [22]. Kızılötesi dedektörler, termal ve foton dedektörler olmak üzere iki temel gruba ayrılmaktadırlar. Bir kızılötesi dedektör üzerine düşen ışımayı soğurabilmeli ve soğurulan ışımının yoğunluğuna bağlı olarak ölçülebilir bir sinyal vermelidir. Tablo 2.1'de foton dedektörler ile termal dedektörlerin bazı çeşitlerinin avantajları ve dezavantajları ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Tablo 2.1. Kızılötesi Dedektörlerin Karşılaştırılması [22]

Dedektör Tipi		Avantaj	Dezavantaj
Termal Dedektörler	Termopil, Bolometre, Piroelektrik	Güvenilir, düşük maliyet, dalgaboyundan bağımsız çalışır	Foton dedektörlerine göre daha düşük algılama
		Oda sıcaklığında çalışılabilir	Yavaş tepki süresi (ms mertebesi)
Foton Dedektörleri	IV-VI	Mevcut düşük bant aralıklı malzemelerle iyi çalışır	Mekanik olarak zayıf Yüksek dielektrik sabiti
	II-VI	Kolay ayarlanabilir bant aralığı Çok renkli dedektörler Yüksek kuantum verimliliği	Geniş bir yüzeye homojen büyütülmesi zor. Büyütme ve işlemede yüksek maliyet Yüzey istikrarsızlığı
	III-V	Kaliteli malzeme ve iyi katkı. İleri teknoloji	Çok katmanlı büyütmelelerde büyük örgü uyumsuzlukları
	Katkılı (Extrinsic)	Çok yüksek dalgaboyu uygulamaları. Nispeten basit teknoloji	Dedektörlerin düşük sıcaklığa soğutulması gerekir
	Serbest Taşıyıcılı	Düşük maliyet, yüksek üretim verimliliği. Geniş ve yakın paketli 2D dizinler	Düşük kuantum verimliliği. Düşük sıcaklıklarda çalışma
	Kuantum Kuyulu Tip I	Gelişmiş malzeme büyütme Geniş alanda homojenlik Çok renkli dedektörler	Düşük kuantum verimliliği
	Kuantum Kuyulu Tip II	Düşük burğu birleşme oranı. Kolay dalgaboyu kontrolü	Karmaşık tasarım ve büyütme

2.5. Termal Dedektörler

Termal dedektörler, soğurulan kızılötesi ışınlarla, dedektörün bazı fiziksel ve elektriksel özelliklerindeki değişimleri algılama prensibine göre çalışan dedektör tipleridir. Termal dedektör, gelen IR radyasyon ile ısınır ve bu durum dedektörün sıcaklığını artırır. Sıcaklıktaki değişim, voltaj veya direnç gibi sıcaklık bağımlı mekanizmalar yardımıyla ölçülür. Termal dedektörlerin en önemli avantajı, diğer birçok dedektörlerin aksine oda sıcaklığında herhangi bir soğutma mekanizmasına ihtiyaç duymadan çalışabilmesidir [25]. Bunun neticesinde, daha küçük ebatlarda, daha ucuz, daha az güç harcayan ve daha uzun ömürlere sahip sistemler olarak karşımıza çıkarlar. Bu özellikleri nedeniyle de uzay çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu tip algılayıcıların

olumsuzluğu birkaç milisaniye veya daha uzun tepki zamanına sahip olmalarıdır. Bu nedenle, yüksek veri hızı gerektiren uygulamalarda nadiren kullanılır. Yaygın olarak kullanılan termal dedektörlerin başında ısıçiftler ve termopiller, bolometreler, golay dedektörü ve piroelektrik dedektörler gelir.

Isıçiftler, birbirinden farklı iki metalin uç uca eklenmesi ile oluşturulur. IR radyasyon iki metalin eklem noktası tarafından soğurulduğunda sıcaklık değişimi ile ilişkilendirilebilecek olan bir voltaj üretilir. Birden fazla ısıçiftin seri (çok nadir olarak paralel) bağlanması ile de termopil adı verilen mekanizma oluşturulur. Isıçift bu iki nokta arasındaki sıcaklık farkını ölçer. Metallerin cinsine bağlı olarak, düşük ve yüksek sıcaklık ölçmek için özel tasarımları bulunmaktadır. Bunun neticesinde -200 °C'den +2300 °C'ye kadar geniş bir sıcaklık aralığında ölçüm yapabilirler.

Bolometre (direnç termometresi), bir çeşit dirençli termometre türüdür ve bir metal veya yarıiletken şerit üzerine düşen ışığın metali ısıtması ilkesine dayanarak çalışır. Bağlantı uçları arasına bir voltaj uygulandığında, bolometreden bir akım geçer ve akım geçmesiyle beraber ısı oluşur. Isınma sonucunda metalin elektrik direnci değişir ve bu değişiklik ölçülebilir. Bolometrenin ışınımlara olan duyarlılığı, direnç olarak kullanılan metalin cinsiyle doğrudan ilişkilidir. Bu amaçla direnç olarak sıcaklık katsayısı daha yüksek olan saf metaller seçilir. Fakat, metal alaşım dirençleri, sıcaklıkla çok daha yavaş değiştiğinden bu iş için uygun değildir. Özel yöntemlerle çok ince tel ya da şerit biçimine getirilen metal (genellikle platin), bir mika, haç ya da çubuk üzerine sarılır. Birtakım bolometre tiplerinde metal, bir kuvars cam içine eritilerek yerleştirilir. Bolometre yapılarında, bu metaller alttaştan ısı akışını en aza indirmek için soğurucu tabaka olarak kullanılır. Ayrıca, elektrik dirençleri soğurdukları ışın miktarıyla orantılı değişime uğrayan aygıtlardır.

Golay dedektörü, 1947 yılında Marcel J. E. Golay tarafından bir kızılötesi algılayıcı olarak geliştirilmiştir. Bugün bu dedektör, özellikle çok büyük dalga boylu ($\lambda > 300 \mu\text{m}$) kızılötesi için kullanılır. Oda sıcaklığında çok hassas çalışan uzak kızılötesi dedektörleri mevcuttur. Golay dedektörü, gaz haznesi, optik ve elektrik okuma devreleri olmak üzere üç kısımdan oluşur. Golay dedektöründe, küçük miktarda gaz ince metal film ile temas halindedir. Metal film, ışığı

soğurarak ısınır ve ısı gaza iletilir. Gaz genişler ve bu olay bir fotodiyot tarafından algılanır. Gazın hareketi, fotodiyotun sinyalinde bir değişiklik meydana getirir. Fotodiyot, zar üzerinden yansıyan ışığın yarattığı girişim desenindeki farklı algılar [26].

Piroelektrik dedektörde, soğurucu materyalin dielektrik sabiti, sıcaklıktaki artma veya azalma nedeniyle değişime uğrar. Piroelektrik materyal kutuplanmış kapasitör içerisinde yer almaktadır. Bu kapasitör, materyalin dielektrik sabitinin değişim hızı ile orantılı olan akım kaynağı olarak çalışır. Kapasitansın değerindeki değişim direkt olarak elektriksel sinyale çevrilmiştir [27].

2.6. Foton Dedektörleri

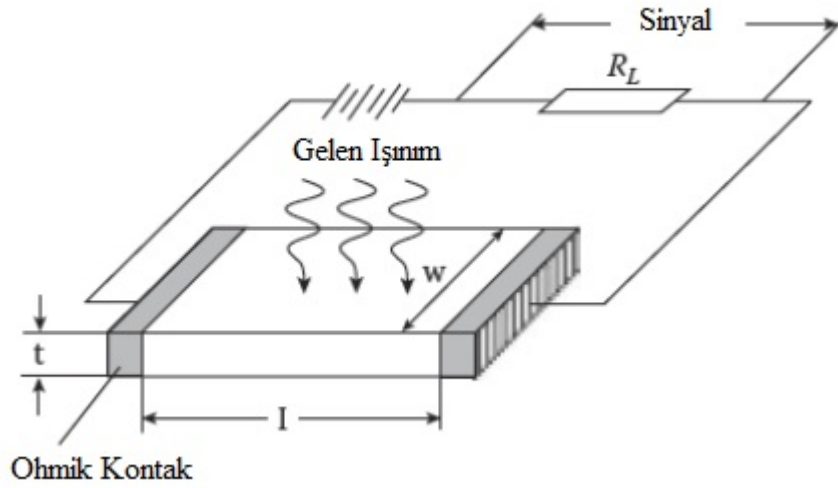
Foton dedektörlerinin çalışma prensibi, malzemenin atomik örgüsüyle optiksel ışımının doğrudan etkileşmesi esasına dayanır. Kızılötesi ışıma bir foton dedektörü tarafından soğurulduğunda, gelen fotonlar reaktif bir yüzeyle etkileşerek elektron üretir (fotoemisyon) veya elektronları bulunduğu enerji seviyesinden daha üst bir enerji seviyesine (fotoiletim) yükseltir. Foton dedektörlerinde, ışıma ile uyarımı baskın kılmak için kreojenik soğutma kullanılır ve böylece termal olarak uyarılan taşıyıcılar baskılanmış olur. Foto uyarımdan sonra, serbest taşıyıcılar bir elektrik alan yardımıyla kontak noktalarında toplanır.

Foton dedektörleri, fotoiletken ve fotovoltajik dedektör olmak üzere iki gruba ayrılırlar.

2.6.1. Fotoiletken Dedektörler

Fotoiletken kızılötesi dedektörler, fotonun soğurulmasıyla birlikte malzemenin iletkenliği yada direcindeki değişimin algılanması esasına dayanır. Bu tip dedektörler katkılı veya katkısız yarıiletken malzemelerden yapılabilir. Bir fotoiletkenin temel çalışma prensibi Şekil 2.5’de gösterilmektedir. Bant aralığı enerjisinden daha yüksek enerjiye sahip hu enerjili fotonlar yarıiletken tarafından

soğulur. Soğurma, değerlik bandındaki taşıyıcıların iletkenlik bandına geçerek burada serbest taşıyıcıların sayısında artışa neden olur ve böylece dedektörün iletkenliği değişir. Dedektörün iletkenindeki değişiklik, numuneye bağlı bir elektrot yardımıyla ölçülür. Düşük dirence sahip malzemeler için fotoiletken sabit akımlı devrelerde çalışır. Seri yük direnci, örnek direnciyle karşılaştırıldığında daha büyüktür. Numune üzerine bir voltaj uygulandığında sinyal bir değişim olarak algılanır. Yüksek dirençli fotoiletkenlerde ise sabit voltajlı devreler tercih edilir ve sinyal devredeki akımda bir değişime neden olur.



Şekil 2.5. Bir fotoiletken dedektörün şekil geometrisi [28]

2.6.2. Fotovoltaik Dedektörler

Fotovoltaik dedektörler, gelen optik ışımadan elektromotor kuvvet oluştururlar ve bu elektromotor kuvvet bir akım ve voltaj üretir. Bu tip dedektörler, fotodiyot olarak da bilinirler. Bir yarıiletken fotodiyot (p-n eklemi) ışığa karşı oldukça duyarlıdır. Şekil 2.6a'da iki uçlu elektriksel aygıt olarak bir p-n ekleminin yan kesit görüntüsü verilmiştir. Şekil 2.6b'de ise karakteristik bir diyotun akım-voltaj ilişkisi verilmiştir.

Bir foton tarafından üretilen akım (i_g)

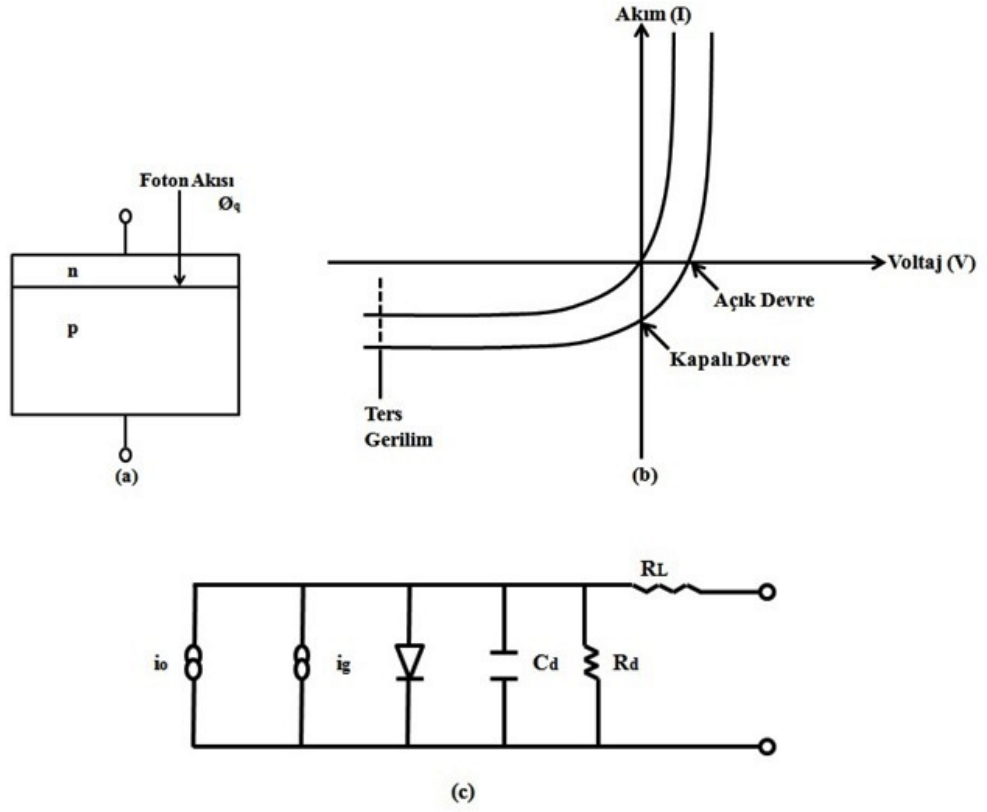
$$i_g = \eta \Phi_q q \quad (2.4)$$

burada η kuantum verimi, Φ_q gelen fotonların akı yoğunlukları, q ise elektronların yüklerini göstermektedir.

Şekil 2.6b'de karakteristik eğri için diyot denklemini yaratılan foto akıma ek olarak değiştirilmiştir:

$$i = i_0 (e^{qv/bkT} - 1) - i_g \quad (2.5)$$

burada i_0 ters doyum akımı, v diyot voltajı, T sıcaklık, k Boltzmann sabiti, b özdeşlik faktörünü ifade etmektedir. Şekil 2.6c'de gösterilen şekil ise bir fotovoltaik dedektör için elektriksel devre eşleniğidir.



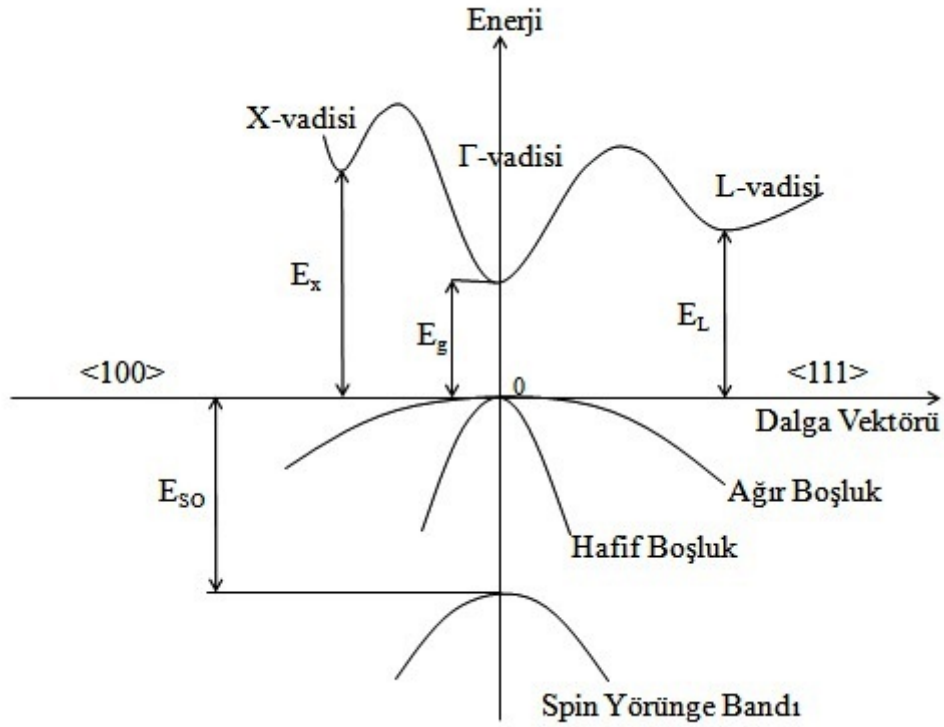
Şekil 2.6. a-) Fotovoltaik dedektör ve elektriksel sembol. b-) Bir fotodiyot için karakteristik akım-voltaj eğrisi. c-) Bir fotovoltaik dedektörün eşdeğer döngüsü [26]

3. InAs_{1-x}Sb_x ve Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} BİLEŞİKLERİNİN BANT YAPILARI

Bu bölümde, tez kapsamında kullanılan InAs_{1-x}Sb_x ve Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} üçlü ve dörtlü külçe malzeme sistemlerinin, kristal yapıları, bant yapıları ve bant aralığı enerjilerinin konsantrasyon ve sıcaklık bağımlılığı vurgulanıp, konuyla ilgili yapılmış çalışmalar hakkında bilgiler sunulacaktır.

3.1. InAs_{1-x}Sb_x Bant Yapısı ve Bant Aralığı

InAs_{1-x}Sb_x III-V grubu bileşik yarıiletkenlerde en yaygın olan çinkosülfür (zinc-blend) kristal yapıya sahiptirler. Kristal örgünün periyodikliği nedeniyle bir yarıiletken, izinli ve yasaklanmış olmak üzere bant enerji bölgelerine sahiptir. Bant enerjisi, bir yarıiletkenin birçok özelliğini tanımlamada kullanılan önemli bir parametredir. İzinli enerji bölgeleri, yasak enerji aralığının altında kalan bağlı elektronların oluşturduğu değerlik bandı ve üstündeki serbest elektronların oluşturduğu iletkenlik bandı olmak üzere konumlanmıştır. Değerlik bandını, ağır boşluk (heavy hole), hafif boşluk (light hole) ve yarıma (split-off) bandı oluşturur. Bütün III-V grubu yarıiletkenlerde değerlik bandının en büyük değerini oluşturan ağır boşluk (heavy hole) ve hafif boşluk (light hole) bantları Γ noktasında konumlanmaktadır [29]. İletim bandında ise Γ , L ve X vadileri olmak üzere üç minimum oluşmaktadır. Brillouin bölgesinde, değerlik bandının tepesi (ağır ve hafif boşluk bant tepeleri) ve iletkenlik bandının dibi aynı noktada oluşursa (Γ) *doğrudan* bant aralıklı yarıiletken, eğer oluşmazsa *dolaylı* (indirect) bant aralıklı yarıiletken olarak adlandırılır. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi InAs_{1-x}Sb_x ve Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} doğrudan bant aralıklı yarıiletkenlerdir.



Şekil 3.1. InAs_{1-x}Sb_x ve GaIn_{1-x}As_ySb_{1-y} yarıiletkenlerin şematik bant yapısı [30]

III-V yapay ikili (pseudobinary) yarıiletken alaşımlar, AB_{1-x}C_x ve A_{1-y}B_yC olmak üzere iki türden oluşmaktadır ve her iki yapının da, bant aralığının büyüklüğü ve özelliği konsantrasyona bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu alaşımların bant aralıkları çoğu zaman doğrusal değildir ve genellikle pozitif bir "b" eğrilik (bowing) parametresiyle ifade edilir (denklem 3.1). Örneğin, A_xB_{1-x}C alaşımının bant aralığı;

$$E_g (A_xB_{1-x}C) = E_g (BC) + x[E_g (AC) + E_g (BC)] - bx(1-x) \quad (3.1)$$

ifadesi ile verilir [31].

InAs_{1-x}Sb_x, AB_{1-x}C_x tipi yarıiletkendir ve bant aralığı, farklı x konsantrasyon ve sıcaklıklarda birçok araştırmacı tarafından ölçülmüştür. InAs_{1-x}Sb_x çoklu kristalinin (polycrystalline) optiksel özellikleri Woolley ve Warner tarafından $0 < x < 0,2$ ve $0,55 < x < 1$ konsantrasyon aralıkları için ölçülmüştür [32]. Fakat, InAs_{1-x}Sb_x $0,2 < x < 0,55$ aralığında büyütüldüğünde, bileşik homojen olarak büyüyemez ve bu aralıkta karışabilirlik bant aralıklı (miscibility band gap) olarak

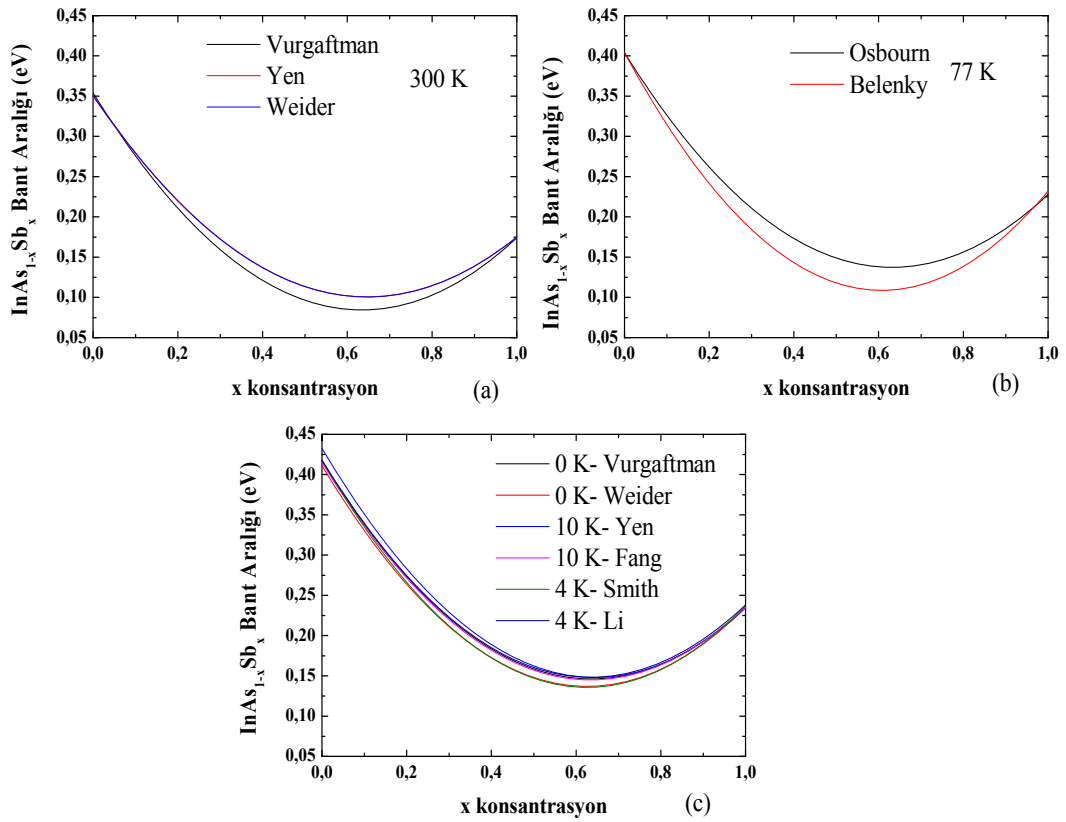
adlandırılır. Stringfellow ve Greene, LPE tekniği ile InAs alttaş üzerine büyüttükleri $0 < x < 0,35$ konsantrasyonlu $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ örnekleri ile InSb alttaş üzerine büyüttükleri $0,89 < x < 1$ konsantrasyonlu örneklerin 300 K'deki bant aralıkları Woolley ve Warner'ın verileriyle mükemmel derecede uyduklarını söylemişlerdir [33].

MBE ve MOCVD, denge dışı (non-equilibrium) büyüme teknikleri olduğu için tek kristal $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ karışabilirlik bant aralıklı olarak büyüyebilir. $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ için ilk sistematik çalışmayı Yen ve arkadaşları InAs alttaş üzerine MBE tekniği ile yapmışlardır ve InAsSb'nin en zor büyüdüğü konsantrasyon aralığını $0,3 < x < 0,8$ olarak bulmuşlardır [33]. In ve Sb akılarına bağlı olan ince filme As akısı da eklenerek $x=0,68$ konsantrasyonunda 300 K'de $12,5 \mu\text{m}$ 'lik kesim dalgaboyu elde etmişlerdir. Frang ve arkadaşları, MOCVD tekniği ile InAs alttaş üzerine büyüttüğü $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ $x < 0,3$ konsantrasyonlu örnekler için sıcaklıkla fotoluminesans (PL) doruk enerji seviyelerinde küçük kaymalar olduğunu raporlamışlardır [34].

Tablo 3.1'de $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ bant aralığı için çeşitli ifadeler verilmiştir. Tablo 3.2'de ise $\text{InAs}_{0,6}\text{Sb}_{0,4}$ bant aralığı için kullanılan farklı denklemlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Şekil 3.2a'da görüldüğü gibi 300 K'de Wieder ve Yen'in ifadeleri aynıdır fakat Vurgaftman'nın bulmuş olduğu değerden 16 meV daha büyüktür [33-35]. Düşük sıcaklıklarda (0-10 K) $\text{InAs}_{0,6}\text{Sb}_{0,4}$ bant aralığı değeri yaklaşık 170 meV seviyelerine gelir (Şekil 3.2c). $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ bant aralığı için en yeni veriler Belenky ve arkadaşları tarafından elde edilmiştir (Şekil 3.2b) [36].

Tablo 3.1. InAs_{1-x}Sb_x bant aralığı için farklı denklemler [36]

InAs _{1-x} Sb _x bant aralığı (eV)	T (K)	Ref.
$E_g = 0,354(1-x) + 0,174x - x(1-x)0,67$	300	18
$E_g = 0,417(1-x) + 0,235x - x(1-x)0,67$	0	18
$E_g = 0,235 - \frac{3,4 \times 10^{-4}T^2}{210+T} - (0,524 - 3,4 \times 10^{-4}T)(1-x) + (0,7 - 3,4 \times 10^{-4}T)(1-x)^2$	T	35
$E_g = 0,4324 - 0,8831x + 0,6853x^2$	10	37
$E_g = 0,415(1-x) + 0,235x - x(1-x)0,672$	10	34
$E_g = 0,35 - 0,771x + 0,596x^2$	300	33
$E_g = 0,418 - 0,903x + 0,722x^2$	4	38,39
$E_g = 0,418 - 0,851x + 0,671x^2$	4	38
$E_g = 0,288x^2 - 0,0363x(1-x) + 0,404(1-x)^2$	77	40
$E_g = 0,404(1-x) + 0,232x + x(1-x)0,8$	77	41



Şekil 3.2. InAs_{1-x}Sb_x'nin x konsantrasyonuna bağlı (a) 300 K (b) 77 k (c) 0-10 K sıcaklık aralığında bant aralığı değişimi [36]

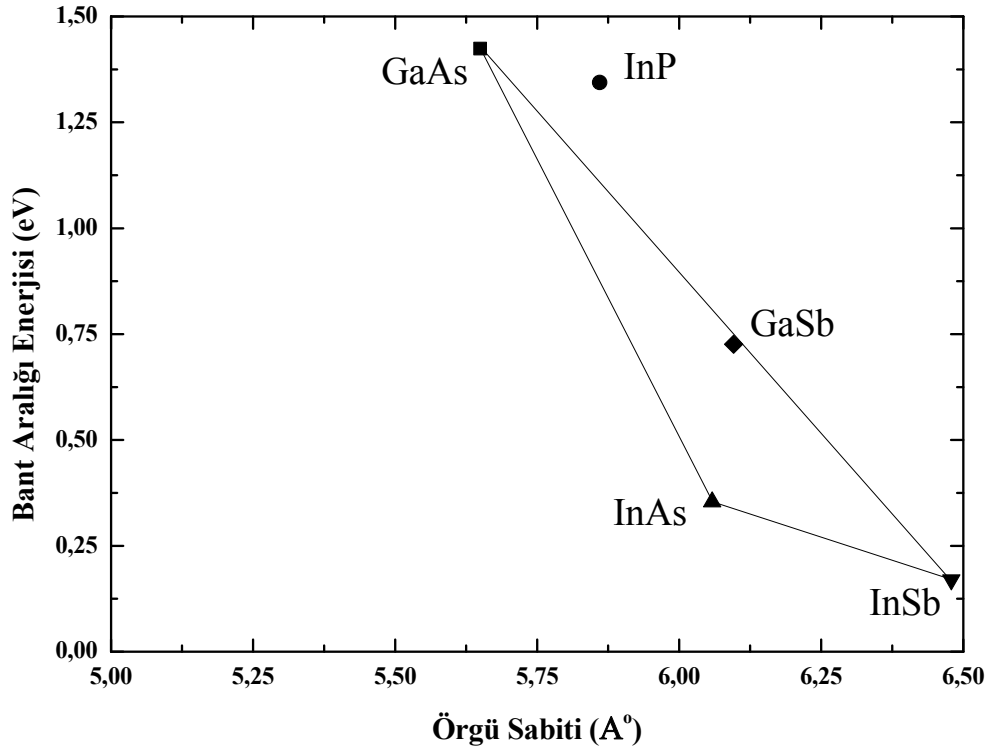
Tablo 3.2. Farklı modeller için $\text{InAs}_{0,6}\text{Sb}_{0,4}$ bant aralığı ifadelerinin karşılaştırılması [36]

	Sıcaklık (K)				
	300	77	10	4	0
Referans 18	121	175	-	-	183
Referans 33	137	-	-	-	-
Referans 35	137	-	-	-	173
Referans 37	-	-	189	-	-
Referans 38	-	-	-	172	-
Referans 40	-	173	-	-	-
Referans 41	-	143	-	-	-
Referans 42	-	-	-	185	-

3.2. $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ Bant Yapısı ve Bant Aralığı

$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, çinkosülfür (zinc-blend) kristal yapıya sahiptir. Değerlik bandının tepe noktası ile iletkenlik bandının en düşük değeri Γ ile aynı noktada konumlanması nedeniyle doğrudan bant aralıklı yarıiletken özelliği kazanmıştır.

$\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ 'de olduğu gibi $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}_{1-x}\text{Sb}_x$ 'de tüm konsantrasyonları için doğrudan bant aralığına sahip bir yarıiletkendir. Şekil 3.3'de bir $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{As}_{1-x}\text{Sb}_x$ yapısının, dörtlü alaşım konsantrasyonun değişken bir fonksiyonu olarak bant aralığı ve örgü sabitinin tahmini teorik değerlerinin ilişkisi verilmiştir [30]. Örgü sabiti Vegard kuralı ile hesaplanırken, bant aralığı ise bazı üçlü alaşımlardan türetilen eğrilik parametreleri ile konsantrasyon bağımlı olarak hesaplanmıştır [30]. M. Astles ve ark. [43], malzemeler arası geçişlerde doğrusal bir ilişki bulunduğunu belirtmişlerdir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ 'nin bant aralığı - örgü sabiti ilişkisi [30]

S. Adachi [44], $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ 'nin bazı alttaşlarla ilgili örgü uyumlarını konsantrasyona bağlı olarak

$$\text{GaSb alttaş için, } y = \frac{0,3835 - 0,3835x}{0,4210 + 0,216x} \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (3.2)$$

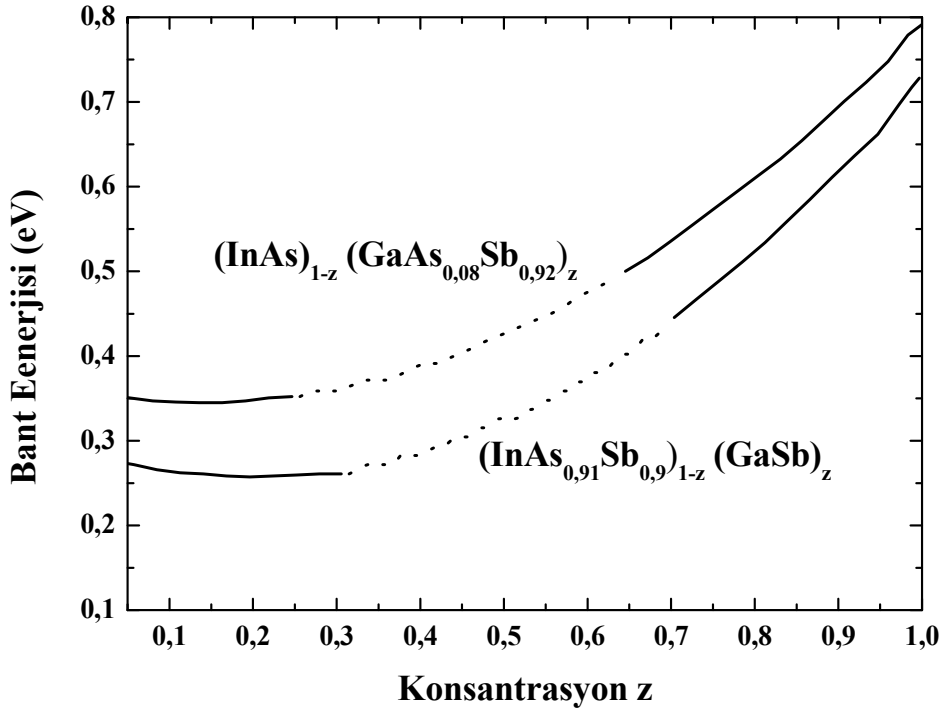
$$\text{InAs alttaş için, } y = \frac{0,4210 - 0,3835x}{0,4210 + 0,0216x} \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (3.3)$$

şeklinde ifade etmiştir. $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ dörtlü alaşımı, GaSb ve InAs alttaş için yaklaşık olarak $0,25 \leq x \leq 0,75$ konsantrasyonu arasında karışabilirlik bant aralıklıdır [45].

GaInAsSb ile InAs arasında örgü uyumu $((InAs)_{1-z} (GaAs_{0,08}Sb_{0,92})_z)$ birçok araştırmacı tarafından çalışılmıştır [43, 46, 47]. Doğrudan bant aralığı verileri az olmasına karşın, Mikhailova ve ark. [30]'nın çalışma verileri, nispeten büyük eğrilik parametreleri ($\sim 0,6$ eV) ile tutarlıdır. Vurgafman ve ark. [18] verilerine göre, InAs alttaş üzerine büyütülmüş bir $Ga_{1-y}In_yAs_{1-x}Sb_x$ yapısının T=0 K sıcaklığındaki bant aralığı enerjisi;

$$E_g(T=0) = [0,412z + 0,816(1-z) - 0,6z(1-z)] \text{ eV} \quad (3.4)$$

denkleminde göre verilir. InAs ile GaSb'nin örgü sabitleri birbirlerine çok yakın olduğu düşünüldüğünde, GaSb alttaş üzerine büyütülmüş GaInAsSb için de benzer eğilme parametreleri kullanılacağı için aynı denklemin kullanılması yanlış olmaz. Şekil 3.4'de 300 K sıcaklığında InAs alttaş üzerine büyütülmüş $(\text{InAs})_{1-z}(\text{GaAs}_{0,08}\text{Sb}_{0,92})_z$ ve GaSb alttaş üzerine büyütülmüş $(\text{InAs}_{0,91}\text{Sb}_{0,9})_{1-z}(\text{GaSb})_z$ dörtlü alaşımlarının z konsantrasyon bağımlı olarak bant enerjisi grafiği verilmiştir. GaSb üzerine büyütülen dörtlü alaşımın bant aralığı enerjisi yaklaşık olarak $0,3 \leq E_g \leq 0,71$ eV (4,1 - 1,7 μm), InAs üzerine büyütülenin ise $0,35 \leq E_g \leq 0,79$ eV'dur.



Şekil 3.4. InAs alttaş üzerine büyütülmüş $(\text{InAs})_{1-z}(\text{GaAs}_{0,08}\text{Sb}_{0,92})_z$ ve GaSb alttaş üzerine büyütülmüş $(\text{InAs}_{0,91}\text{Sb}_{0,9})_{1-z}(\text{GaSb})_z$ dörtlü alaşımlarının, $T=300$ K sıcaklıkta z konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak bant enerji değerleri (Nokta ile gösterilen yerler GaInAsSb'nin karışabilirlik bant aralığı bölgeleridir.) [18]

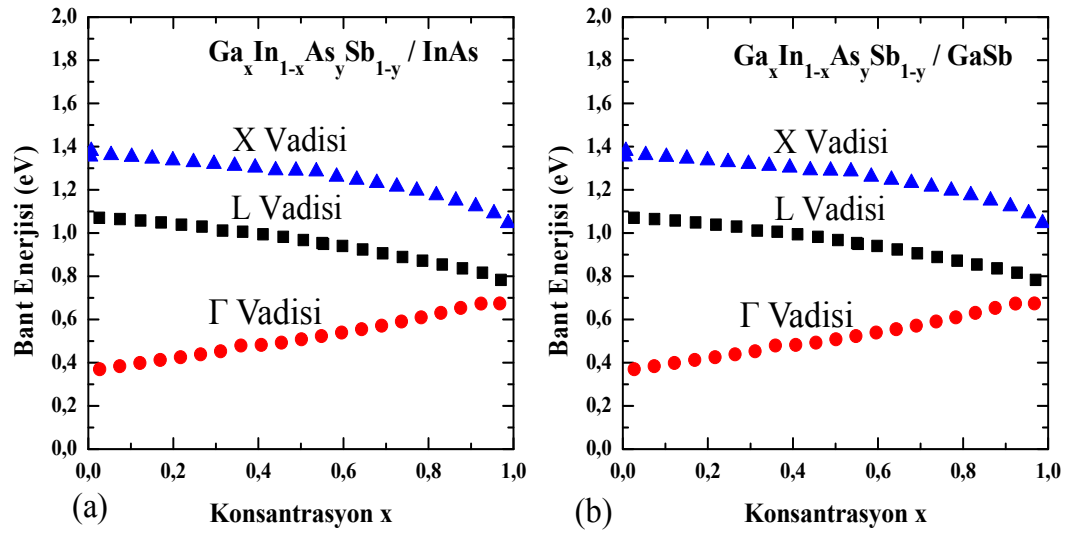
Vurgaftman ve ark. [18], GaSb üzerine büyütülen $(\text{InAs}_{0,91}\text{Sb}_{0,9})_{1-z}(\text{GaSb})_z$ dörtlü alaşımının bant enerjilerini;

$$E_g(T=0) = [0,812(1-z) + 0,346z - 0,75z(1-z)] \text{ eV} \quad (3.5)$$

$$E_g(T=300) = [0,727(1-z) + 0,283z - 0,75z(1-z)] \text{ eV} \quad (3.6)$$

z konsantrasyon bağı olarak bulmuşlardır.

Bouarissa [48], dolaylı (indirect) bant aralığı enerjilerinin x konsantrasyon bağımlı hesaplamaları $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{GaSb}$ ve $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{InAs}$ için Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Dolaylı geçişler, temel bant aralığının aksine x konsantrasyonu arttıkça azalmaktadırlar.



Şekil 3.5. Konsantrasyon bağımlı a-) InAs alttaş üzerine b-) GaSb alttaş üzerine büyütülmüş $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ yapılarının X, L ve Γ vadilerinin enerjileri [30,48]

Şekil 3.5’deki Γ ve L vadilerindeki enerjilerin en küçük kareler yöntemiyle fit edildiklerinde;

$$E_g^x = 1,36 - 0,82x + 0,43x^2 \text{ (eV)} \quad (\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{GaSb}) \quad (3.7)$$

$$E_g^x = 1,39 - 0,71x + 0,15x^2 \text{ (eV)} \quad (\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{InAs}) \quad (3.8)$$

$$E_g^L = 0,98 - 1,07x + 0,85x^2 \text{ (eV)} \quad (\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{GaSb}) \quad (3.9)$$

$$E_g^L = 1,10 - 1,05x + 0,6x^2 \text{ (eV)} \quad (\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/\text{InAs}) \quad (3.10)$$

denklemleri elde edilir [48].

4. DENEYSEL YÖNTEMLER

Bu bölümde, tez kapsamında çalışılan $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ve $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ külçe yapılarının büyütme ve karakterizasyon çalışmalarında kullanılan deney düzeneklerinden bahsedilecek ve kullanılan cihazlar hakkında bilgi verilecektir.

GaAs alttaş üzerine $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ve $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ üçlü ve dörtlü alaşımlarını MBE sisteminde büyütebilmek için literatürden elde edilen bilgilerle temel büyütme parametreleri belirlenmiş ve farklı konsantrasyonlarda önce GaAs düzeltme katmanlı daha sonra da geçiş katmanlı örnekler büyütülmüştür. Geçiş katmanlı örnekler, düzeltme katmanlı örneklerden elde edilen büyüme oranı ve konsantrasyon gibi parametrelere paralel olarak kızılötesi dedektör olarak tasarlanmış ve büyütülmüştür. Büyütülen yapılar standart fotolitografi ve ıslak aşındırma yöntemiyle aygıt haline getirilip opto-elektronik karakterizasyonları yapılmıştır. Kristal kalitesini belirlemek için yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınım (HRXRD) tekniği kullanılmıştır. Ayrıca, Sb konsantrasyonları yüksek $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ yapılarının Raman spektroskopisi ölçümleri yapılmıştır.

Kızılötesi dedektör yapıların büyütülmesi, aygıt haline getirilmesi, opto-elektronik ölçümleri ve HRXRD ölçümlerinin tamamı Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Raman spektroskopisi ölçümleri, Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü, Atomik Spektroskopi laboratuvarında alınmıştır.

4.1. Moleküler Demet Epitaksi Sistemi

MBE tekniği, çok yüksek vakum teknolojisi gerektiren karmaşık ve pahalı bir kristal büyütme yöntemidir. Milyar başına on parçacığın altında safsızlık seviyelerinde malzemeler tekrarlanabilir bir şekilde büyütülmesi ve yapıların katkı, kompozisyon ve katman kalınlıkları hassas bir biçimde ayarlanabilir bir yapıya sahip olması, bu tekniği diğer yarıiletken kristal büyütme yöntemlerinden ayıran en önemli özelliklerindedir. Yüksek saflıkta kullanıma hazır metal ve

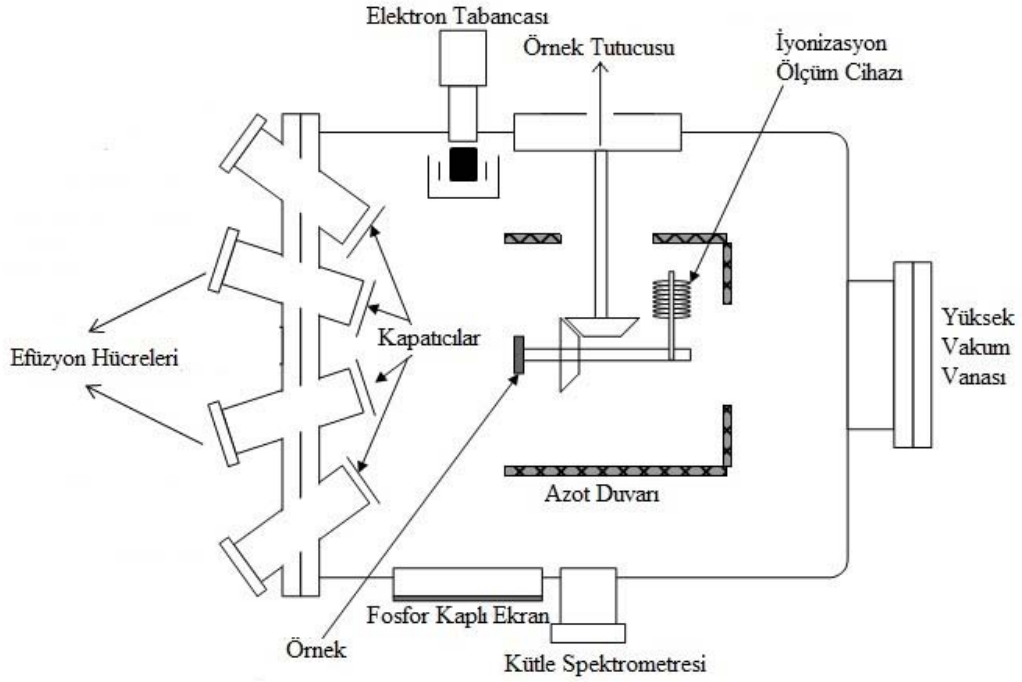
yarıiletken malzemelerin ısısal buharlaşmaları, düzgün bir şekilde kontrol edilebilir, bu nedenle örneklerdeki kusur seviyeleri oldukça azdır. Diğer epitaksiyel büyütme teknikleriyle kıyaslandığında, büyütme esnasında kullanılan alttaş sıcaklıkları MBE sistemlerinde daha düşüktür. Tablo 4.1’de GaAs’in MBE ile diğer epitaksiyel büyütme tekniklerinin karşılaştırıldığı tablo verilmiştir.

Tablo 4.1. GaAs için epitaksiyel teknolojilerin karşılaştırılması [49]

	LPE	Buhar Faz Epitaksisi		MBE
		CVD	MOCVD	
Büyüme Oranı ($\mu\text{m}/\text{dk}$)	~ 1	$\sim 0,1$	$\sim 0,1$	$\sim 0,01$
Büyüme sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	850	750	750	550
Kalınlık Kontrolü (nm)	50	25	25	0,5
Arayüz Genişliği (nm)	≥ 5	$\sim 6,5$	< 1	$< 0,5$
Katkı Miktarı Değişimi (cm^{-3})	$10^{13} - 10^{19}$	$10^{13} - 10^{19}$	$10^{14} - 10^{19}$	$10^{14} - 10^{19}$
Mobilite 77 K (cm^2/Vs) (n-tipi GaAs)	150 000 - 200 000	150 000 - 200 000	140 000	160 000

Tablo 4.1’de görüldüğü gibi, MBE tekniği GaAs’in epitaksiyel olarak büyütülmesinde özellikle düşük sıcaklık ve büyüme oranında büyütebilme olanağının yanı sıra kalınlık ve arayüz genişliğinin kontrolünün son derece hassas olması bu tekniği belirgin bir biçimde öne çıkarmaktadır.

Şekil 4.1’de herhangi bir MBE sisteminin büyütme haznesinin (ana hazne) şematik görünümü verilmiştir. Büyütme haznesi temel olarak, kaynak malzemelerin konulduğu efüzyon hücreleri, hazne içindeki vakum seviyesinin ölçüldüğü iyon vakum ölçer, büyütme esnasında örneğin yüzey morfolojisi hakkında anlık bilgi edinilen yansımali yüksek enerjili elektron kırınımını (RHEED) sisteminin temel parçalarından elektron tabancası ve fosfor kaplı ekran ve hazne içinde bulunan gazların tespiti için kütle spektrometre cihazlarını barındırmaktadır.



Şekil 4.1. Bir MBE sisteminde ana haznenin şematik gösterimi [50]

Tez kapsamında büyütülen yapılar Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'ndaki Veeco GEN20MC katı kaynaklı MBE sistemi kullanılarak yapılmıştır. MBE sistemi, büyütme (ana), hazırlık ve yükleme haznesi olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır.

Yükleme haznesi, büyütme çalışmalarında kullanılan alttaşların sistemden çıkarıldığı ve yeniden yüklendiği kısımdır. Alttaşların çıkarılma ve yükleme işlemine geçilmeden önce hazne atmosfere açılır. Haznede bu işlem olabildiğince hızlı olarak yapılmalıdır. Atmosfere açılan kapak kısmı vakum sızdırmaz silikon conta (o-ring) olması nedeniyle bu haznenin vakum seviyesi 10^{-8} Torr seviyelerinde kalmaktadır. Alttaş çıkarma ve yükleme işlemi sırasında hazne içine gaz azot verilerek haznenin su buharı ve diğer harici gazlardan en az derece etkilenmesi sağlanır. Alttaş çıkarma ve yükleme işi bittiğinde hazne tekrar vakuma alınır ve vakum seviyesi 10^{-8} Torr seviyelerine geldiğinde içerde bulunan su buharı ve artık gazlardan kurtulmak adına kusturma (degas) işlemi yapılır. Bu

işlem sırasında alttaşlar, haznenin yan duvarlarında bulunan ısıtıcılar sayesinde 150 °C'ye kadar ısıtılır ve haznenin vakum seviyesi kontrol edilerek vakum seviyesinin 10^{-7} Torr seviyesi altına düşmesi engellenir.

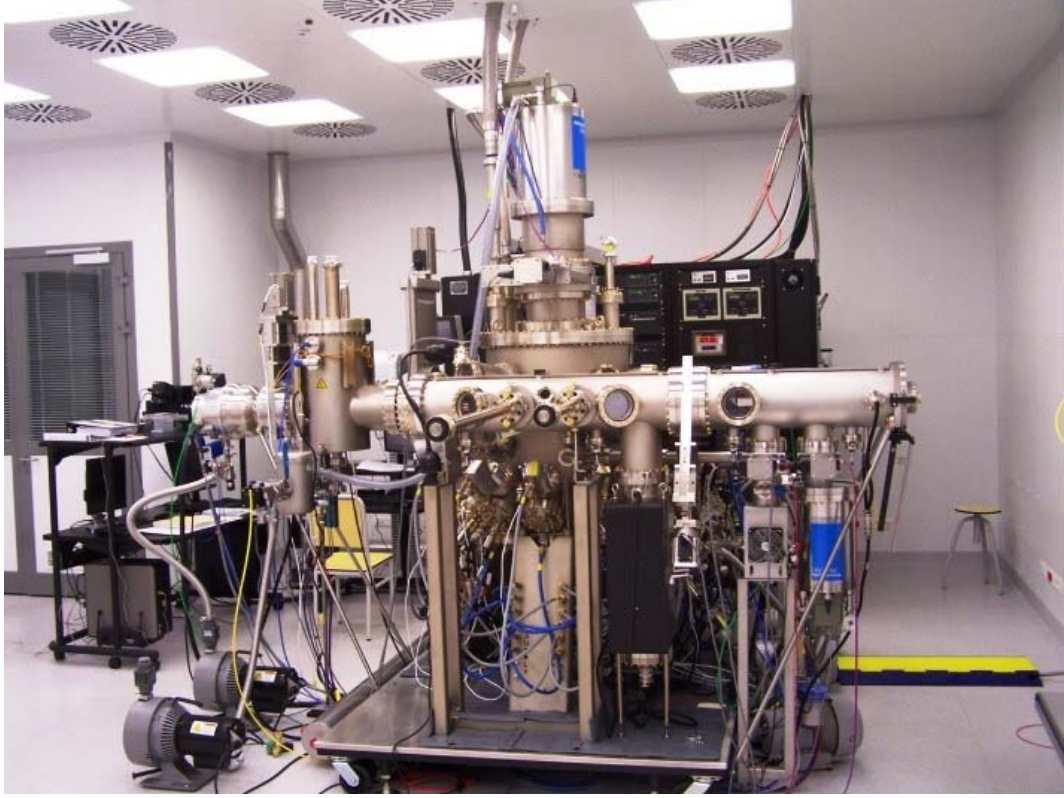
Hazırlık haznesi, alttaşlara yükleme haznesine göre daha yüksek sıcaklıklarda ısı işlem uygulandığı ve büyütme haznesine geçişin sağlandığı haznedir. Alttaşlar, yaklaşık 350-400 °C sıcaklıklara ısıtılarak üzerlerindeki karbon bazlı artık gazlar ve su bahaından arındırılarak büyütme haznesine hazır hale getirilir. Alttaşların ısıtıldığı sıcaklık değerleri, alttaşın cinsine bağlı olarak değişebilir. Örneğin, GaAs ve GaSb alttaşlar için yaklaşık 350 °C sıcaklığı baz alınırken, Si alttaş için bu değer 400 °C'ye çıkartılabilir. Hazırlık haznesinin vakum değeri, vakum sızdırmaz gümüş kaplı bakır contalar (gasket) sayesinde 10^{-10} Torr seviyelerindedir. Bu ultra yüksek vakum değeri, haznesinin büyütme haznesine açılması ve alttaşlara ısı işlem uygulanırken vakum seviyesinin ne kadar bozulduğunu görmek adına çok önemlidir. Isıl işlem sırasında vakum değeri kontrol edilerek yaklaşık olarak 10^{-8} Torr seviyelerinin altına düşülmemesi sağlanır. Bu işlem, her bir alttaş için ayrı ayrı yapıldıktan sonra vakum değerinin 10^{-10} Torr mertebesine gelmesinin ardından büyütme haznesine geçmeye hazır hale gelir ve iletim kolu yardımıyla üzerine büyütme yapılacak alttaş, büyütme haznesine alınır.

Büyütme haznesi, yüksek saflıkta bulunan kaynak malzemeler sayesinde alttaşlar üzerine epitaksiyel kristal büyütme yapılan bölmedir. Büyütme haznesinin taban vakum seviyesi yaklaşık olarak 10^{-11} Torr seviyelerindedir. Alttaş, hazırlık haznesinde bulunan iletim kolu ile büyütme haznesindeki örnek tutucuya yerleştirilir. Örnek tutucu, alttaşı ısıtabilme ve büyütme sırasında homojenliğini sağlayabilmek adına dönebilme kabiliyetine sahiptir.

Büyütme haznesine alınan alttaş tekrar ısıtma işlemine tabi tutulur. Alttaş üzerindeki bulunan doğal oksit tabakasını veya alttaşların yüzeyini korumak için üretici firmalar tarafından uygulanan ince oksit tabakasını kaldırmak amacıyla ısıtma işlemi uygulanır. Oksit kaldırma sıcaklığı, genellikle büyütme sıcaklığından daha büyük bir değerdir. Örneğin, GaSb alttaş için oksit tabakasının kaldırma sıcaklığı yaklaşık olarak 500 °C, GaAs alttaş için ise bu sıcaklık yaklaşık olarak

600 °C'dir. Fakat bu sıcaklık değerleri, sistemde alttaş sıcaklıklarının ölçüldüğü pirometre (pyro) veya bant kenarı termometresi (BandiT) cihazlarının kalibrasyonuna bağlı olarak değişebilmektedir. Alttaş, oksit kaldırma sıcaklığına ısıtılırken belirli sıcaklıktan sonra V grubu malzeme akısı altında olması gereklidir. Örneğin, GaAs alttaş, oksit kalkma sıcaklığı ısıtılırken, örnek tutucu sıcaklığı 400 °C'ye geldiğinde yüzeyi muhafaza etmek adına As akısı açılır. Oksit kaldırma işlemi yüzeyde bozulmalara neden olduğu için ilk olarak alttaş üzerine düzeltme katmanı büyütülür ve daha sonra örneği ısıtarak ya da soğutarak büyütülecek malzemenin sıcaklık değerine getirilerek büyütme işlemi başlatılır. Yapılan büyütme çalışmaları Bölüm 5'de detaylı olarak anlatılmaktadır.

Şekil 4.2'de Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'ndaki MBE sistemi verilmiştir. Büyütme haznesi, Ga, In, iki adet Al, As, Sb, Be, Si ve GaTe kaynak malzemelerin olduğu efüzyon hücrelerini barındırmaktadır. MBE sistemi, Ga, In ve Al malzemelerinin konulduğu çift filamanlı hücrelere, As ve Sb malzemelerinin konulduğu vana kontrollü kırıcı bölge (valved cracker) efüzyon hücrelerine ve katkı malzemeleri olarak kullanılan Si, Be, GaTe kaynaklarının konulduğu tek filamanlı katkı efüzyon hücrelerine sahiptir. Bunların yanında, malzeme akısı ölçümde kullanılan iyonizasyon ölçüm cihazı, ultra yüksek vakumda çalışmak için uyumlu bir kreo (cryo) pompa ve iyon pompa, büyüme sıcaklığını kontrol etmekte kullanılan optik pirometre ve bant kenarı termometre cihazları, büyütme esnasında yüzey morfolojisi hakkında bilgi veren yansımali yüksek enerjili elektron kırınımı (reflection high energy electron diffraction, RHEED) cihazı, sistem içinde bulunan gazlarının tanımlarının yapıldığı artık gaz analizi (residual gas analyzer, RGA) cihazını barındırmaktadır. RHEED cihazının bileşenleri olan elektron tabancası, fosfor kaplı ekran bu haznede yer almaktadır. Ayrıca, hazne içindeki örneğin kontrol ve güvenliğinin sağlanması için haznenin farklı yerlerinde bulunan görünüm pencereleri ve her bir efüzyon hücresinin ağız kısmında kapakları barındırmaktadır.



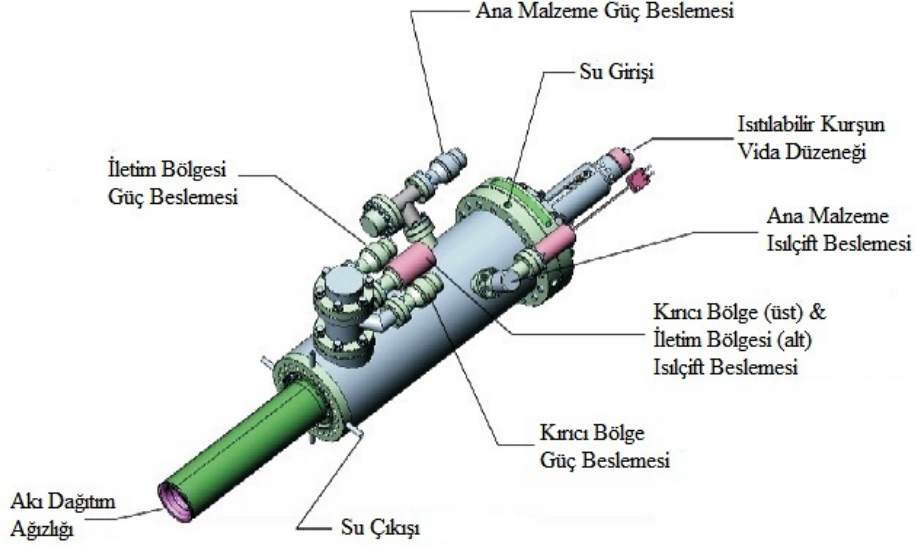
Şekil 4.2. Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu olan MBE sistemi

4.1.1. Katı Kaynaklı Kırıcı Bölge Efüzyon Hücreleri

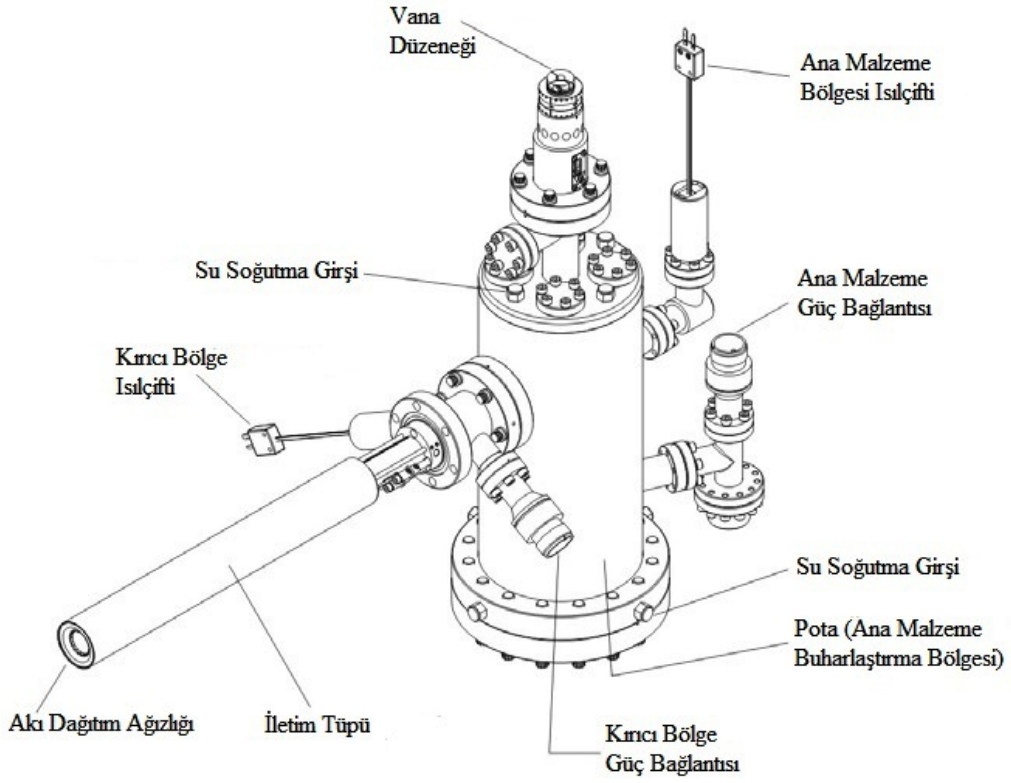
Arsenik, fosfor, antimoni, tellür, kükürt, sezyum vb. yüksek buhar basıncına sahip kaynak malzemeler büyük kapasiteli ve kontrol hassasiyeti son derece yüksek olan kırıcı bölge efüzyon hücrelerinde muhafaza edilmektedir. Geleneksel efüzyon hücrelerinde, büyüme oranını belirlemek malzemenin ısıl kararlılığına ve bu kararlılığın düzgün bir biçimde kontrol edilmesine bağlıdır. Yüksek buhar basıncına sahip malzemelerin sıcaklığındaki küçük dalgalanmalar büyüme oranında büyük değişikliklere yol açabilir. Bu sıcaklık dalgalanmaları malzemenin belirli hızlarda ısıtılması ve hücre önündeki kapağın açılıp kapanması sırasında görülebilir. Bu dalgalanmaları en az düzeye indirmek adına tasarlanan bu hücrelerin, en büyük avantajlarından biri malzeme akısını sınırlandırmak ve istenilen ölçüde akıya en doğru biçimde ulaşmak için mekanik bir vana (valf) kullanılmasıdır. Bu hücrelerde, malzemeler sabit bir sıcaklıkta muhafaza edilir ve vanaların konumu ile tekrarlanabilir bir büyüme oranı ve sabit bir akı elde etmek

mümkündür. Şekil 4.3 ve 4.4’de laboratuvarımızda bulunan As ve Sb malzeme kaynaklarının bulunduğu efüzyon hücrelerinin şematik olarak gösterimi verilmiştir. Her bir malzemenin kendi davranışına özgü olarak efüzyon hücresi tasarımları vardır.

Şekil 4.3’de görülen 200cc Mark V Corrosive Series Valved Cracker® Sb efüzyon hücresi, ultra yüksek vakumlarda oldukça reaktif olup yüksek buhar basıncına sahip malzemeleri buharlaştırmak için tasarlanmış bir hücredir. Malzemeyi, kırınım bölgesi sayesinde çoklu atomlardan daha basit atom hallerine dönüştürme seçeneği sağlar. Bu sayede, kullanıcı isteğine göre antimoni kaynağı Sb_2 , Sb_4 vb. formlarında kullanılabilir. Kırıcı bölgede bulunan iğne tipi vana sayesinde malzeme akışı üzerine mekanik kontrol sağlanır. Malzeme, tek parçalı bir piroliz boron nitrat (pyrolytic boron nitride, PBN) potanın (crucible) içerisine yüklenir. Bu sayede, ısıtıcı bölgelere malzeme sızıntısı olması olasılığı ortadan kaldırılmış olur.



Şekil 4.3. Sb efüzyon hücresinin şematik gösterimi [51]



Şekil 4.4. As efüzyon hücresinin şematik gösterimi [51]

Hücre, üç ayrı ısıtıcı bölgesinden oluşmaktadır:

- Ana malzeme buharlaştırıcı bölgesi (bulk evaporator zone), kaynak malzemenin konulduğu büyük hacimli bir potadan oluşmaktadır. Potayı dirençli bir ısıtmalı filaman çevreler. Sıcaklık hakkında bilgi, potanın arkasına temas eden C tipi bir ısılçift sayesinde alınır.
- Orta bölge (conductance zone), pota ile vana arasında iletken boruyu çevreleyen yerdir. Bu bölge, dirençli bir ısıtmalı filaman tarafından çevrenir. Sıcaklık bilgisi, C tipi bir ısılçift aracılığı ile alınır ve bu ısılçiftin bölgeye teması yoktur.
- Kırıcı bölge (cracker zone), akı dağıtım ağzığı (nozzle) ile birlikte bir vana düzeneği ve kırıcı bölge tüpünden oluşmaktadır. Dirençli bir ısıtmalı filaman tarafından çevrenir ve tıpkı orta bölge gibi temas yoktur. C tipi bir ısılçift ile sıcaklık bilgisi alınır.

Orta bölge tüpü, malzeme akısının büyütme haznesi geçişi için bir transfer bölge görevini görür ve iki durumda çalıştırılabilir. İlk olarak, malzeme sıcaklığı ile orta bölge tüpü sıcaklığı birbirine çok yakın olduğu durumda, dağıtım ağzı ve tüp arasında yoğunlaşma gerçekleşmez. Bu durum, moleküler türler arasında en ufak bir değişiklik yapmadan malzeme akısı geçişi sağlar. Diğer durumda ise, yeterince yüksek sıcaklıklarda, malzemeyi çoklu atomlardan basit tür atomlara dönüştürerek bu işlem sağlanabilir (600-1200 °C).

“200cc Mark V Corrosive Series Valved Cracker®” Sb efüzyon hücresi, otomatik olarak kontrol edilebilen ve vana kontrolünü kendiliğinden yapabilen güvenilir bir iğne vana kullanımı için tasarlanmıştır. Torkun ne kadar uygulandığı ekrandan izlenebilir. Ayrıca, otomatik tork ayarı sayesinde mükemmel vana sızdırmazlığı sağlar ve bu sayede, vananın aşırı sıkışması durumunda PBN vana düzeneğine zarar verebilecek etmenleri ortadan kaldırır. Sb efüzyon hücresine, kurşun vida düzeneği sayesinde ısıtma işlemi (bakeable) uygulanabilir ve üzerindeki otomatik motor ısıtma işlemi esnasında çıkarılır. Tablo 4.2’de Sb efüzyon hücresinin özellikleri genel hatlarıyla özetlenmiştir.

Tablo 4.2. 200cc Mark V Corrosive Series Valved Cracker® efüzyon hücresi özellikleri [51]

Malzeme Buharlaştırma Kapasitesi	245cc'den fazla
Yüklenebilecek Malzemeler	Sb, Te, Cd, Mg
Pota ve Orta Bölge Malzemesi	PBN
Gerekli Malzeme	PBN
Çalışma Sıcaklığı Aralığı	
Ana Malzeme Bölgesi	200-600 °C
Orta Bölge	600-1200 °C
Kırıcı Bölge	600-1200 °C
Kusturma Sıcaklığı Aralığı	
Ana Malzeme Bölgesi	800 °C
Orta Bölge	1300 °C
Kırıcı Bölge	1500 °C

Şekil 4.4’de görülen “500cc Mark V Arsenic Valved Cracker®” As efüzyon hücresi, tıpkı Sb efüzyon hücresi gibi ultra yüksek vakumlarda oldukça reaktif olup yüksek buhar basıncına sahip malzemeleri buharlaştırmak için tasarlanmış ve malzemeyi, ısılal kırınım bölgesi sayesinde çoklu atomlardan daha basit atom hallerine dönüştürme seçeneği sağlar. Malzeme akısı üzerine mekanik kontrol sağlayan iletim tüpü ile pota arasında bir iğne vanaya sahiptir (Şekil 4.4).

Efüzyon hücresi iki ısıtma bölgesinden oluşur:

- Ana malzeme bölgesinde, malzeme buharı yüklenen malzemenin büyük bir hacmini oluşturur. Potayı dirençli bir ısıtmalı filaman ısıtır ve sıcaklık bildirimini için bir ısıçift kullanılır. Ana malzeme buharlaştırıcı bölgesi ısı dağılım düzenini sağlamak için sıvı bir soğutma ceketini tarafından çevrelenmiştir.
- Kırıcı bölge, dirençli bir ısıtmalı filaman tarafından çevrelenen ısıya dayanıklı metal tüpten oluşur. Sıcaklık, bir ısıçift ile izlenir. Değiştirilebilir bir dağıtım ağzı (nozzle) kırıcı bölgedeki etkinliği ve homojenliği sağlamak için kullanılır. Bu bölgede, ısılal dağılımı sağlamak adına isteğe bağlı olarak sıvı soğutma bobini kullanılabilir.

İletim tüpü, ana malzemedan buharlaşan moleküllerin ana hazneye gitmesi için bir transfer tüpü görevi görür ve iki şekilde de çalıştırılabilir:

- Malzeme buharının iletim tüpü içersine yoğunlaşmasını önlemek amacıyla iletim tüpü sıcaklığı ana malzeme bölgesi sıcaklığında tutulur, fakat bu sıcaklık malzemeyi büyük moleküllerden daha küçük moleküllere parçalayama yetmez.
- Yeterince yüksek sıcaklıkta tutularak, çoklu moleküller daha basit moleküller haline dönüştürülebilir (600-1200 °C).

“500cc Mark V Arsenic Valved Cracker®” As efüzyon hücresi, Sb hücresinde olduğu gibi vana pozisyonunu otomatik olarak ayarlanabilecek yetkinliğe sahip bir biçimde üretilmiştir ve vana sızdırmazlığı mükemmeldir. İğne

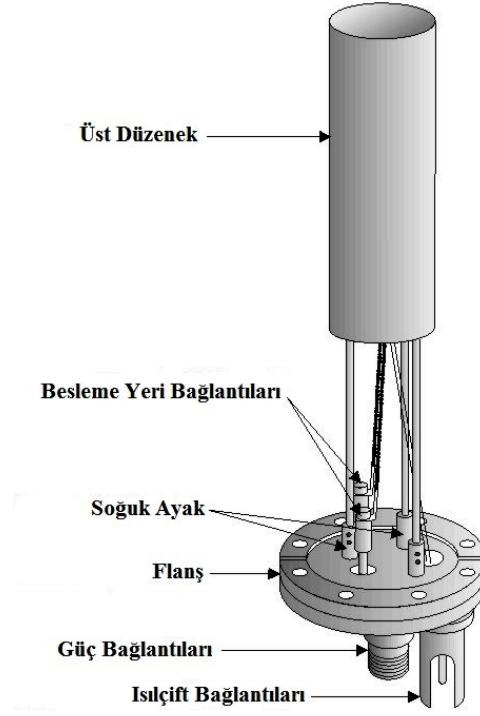
vana gerektiği durumlarda elle de kontrol edilebilecek şekilde tasarlanmış olup aynı zamanda motorları kolayca sökülüp takılabilecek bir yapıdadır.

4.1.2. Çift Filamanlı Efüzyon Hücreleri

Çift filamanlı efüzyon hücreleri, ultra yüksek vakumlarda çalışma özelliğine sahip, en yaygın haliyle Ga, In, Al gibi III grubu malzeme kaynaklarının kullanımı için tasarlanmıştır (Şekil 4.5). Fakat, malzeme yapısına göre soğuk ya da sıcak ağız seven herhangi bir malzeme kaynağı için kullanılabilir. Normal çalışma sıcaklığı 800 ile 1200 °C, düşük sıcaklıklarda çalışma sıcaklığı ise 100 ile 750 °C arasında değişmektedir. Su soğutmasız 300 °C'ye kadar çalışabilir.

Hücreye birbirlerinden bağımsız iki ayrı ısısal filaman eşlik eder. Bunlardan ilki, kaynak malzemenin konulduğu potanın üst (tip) kısmın, diğeri ise potanın alt (base) kısmın ısıtılmasını sağlar. Kaynak malzemenin özelliğine göre sıcak ağız (hot-lipped) ve soğuk ağız (cold-lipped) olmak üzere iki biçimde çalışabilir. Sıcak ağız biçiminde çalışan bir hücre için üst kısım alt kısımdan daima daha sıcaktır ve hücrenin ağız kısmında artan ışımsal ısı kaybının önüne geçilmiş olur. Bu sayede, buharlaşan malzemenin yeniden yoğunlaşmasının önüne geçilir ve düzgün, tekrarlanabilir bir malzeme akısı elde edilir. Hücrede, her bir filamana iyi ayrı ısıçift eşlik eder ve her biri için sıcaklık bilgisi C tipi bir ısıçift ile sağlanır.

Çift filamanlı hücrelerde, potanın çeşitleri kullanılacak kaynak malzemeye göre değişmektedir. Örneğin Ga ve In malzeme kaynakları için SUMO® pota kullanılırken, Al için ise konik pota kullanılmaktadır. Ga ve In soğuk ortamı seven malzeme kaynaklarıdır ve bu kaynakların bulunduğu hücrelerde üst kısım alt kısımdan daima daha sıcaktır, bu nedenle sıcak ağız biçimiyle çalıştırılır. Al ise sıcaklığı sever ve Al hücrelerinde alt kısım daima üst kısımdan sıcaktır ve soğuk ağız biçimiyle çalışır. SUMO® potanın en büyük avantajı, malzeme akısının zamanla malzeme miktarı değişiminden etkilenmemesidir.



Şekil 4.5. Çift filamanlı efüzyon hücresinin şematik gösterimi [51]

4.1.3. Tek Filamanlı Efüzyon Hücreleri

Tek filamanlı efüzyon hücreleri, standart filamanlı, değiştirilebilen filaman, alüminyum (soğuk ağız) ve katkı olmak üzere dört ayrı şekilde kullanımı mevcuttur.

Standart filamanlı hücre, bir filamana sahiptir ve potanın tümünü eşit bir şekilde ısıtır. Pota, 6 ile 150 cc hacim arasında değişen hacme sahiptir. Sıcaklık bilgisi bir ısılıçift ile ölçülür.

Değiştirilebilen filamanlı hücre, tek filamana sahiptir ve potanın ağız bölgesine ek bir ısıtma sağlayarak çalıştığı için sıcak ağız yöntemi ile çalışır. Bunun amacı ise malzemenin yoğunlaşma seviyesine en aza indirmektir ve yaygın şekilde Ga ve In malzeme kaynaklarında bulunan kusur seviyelerinin azaltılması amacıyla kullanılır ve çift filamanlı hücreye dönüştürülebilir.

Alüminyum soğuk ağız kaynağının özelliği, alüminyum malzeme kaynağının pota duvarına nüfus etmesini önleyerek malzemenin taşmasını önler.

Soğuk ağız biçiminde kullanılan hücreler, tüm pota şekli için kullanılabilir. Sıcaklık bilgisi bir ısılıçift sayesinde alınır.

Katkı kaynağı, diğer hücrelere göre küçük ve hafiftir. Pota şekli olarak konik pota kullanılır. Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda bulunan MBE sisteminde Si, Be ve GaTe katkı kaynak malzemesinin bulunduğu hücrelerdir. Normal hücre hacmi yaklaşık olarak 5cc'dir. Sıcaklık bilgisi bir ısılıçift vasıtasıyla sağlanır.

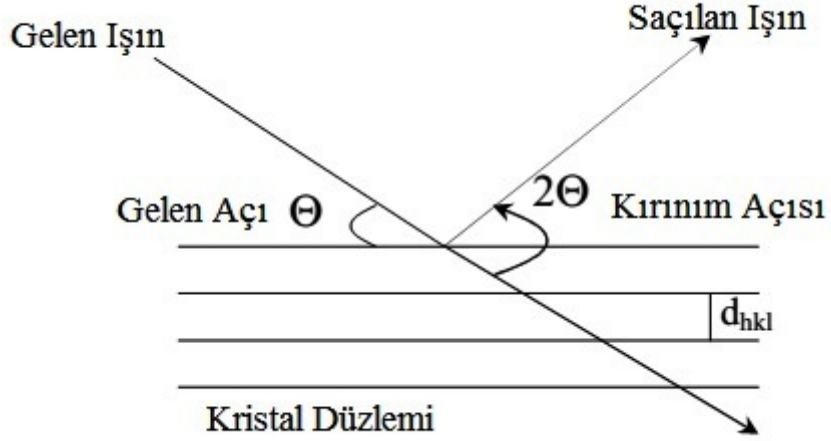
4.2. Yüksek Çözünürlüklü X-Işınımı Kırınımı (HRXRD)

HRXRD tekniği, ince film teknolojisi için tahribatsız (non-destructive) bir yapısal karakterizasyon tekniğidir. İnce film ve çok katmanlı yapıların kalınlıkları, yoğunlukları, bileşik yüzdeleri, örgü bozuklukları ve pürüzlülükleri hakkında bilgi sağlar. Kristal, amorf, organik ve organik olmayan malzemeler için de rahatlıkla kullanılabilir. X-ışınları, yüksek enerjili elektronların hedef malzemeye çarparak yavaşlatılması sonucunda oluşan elektromanyetik dalgadır ve dalgaboyu aralığı 0,01-100 Å arasında değişmektedir.

X-ışınları, ince filmdeki elektronlarla etkileşir ve atomik elektronlar tarafından çeşitli yönlere saçılır. Bu olay ara yüzler arasında saçılan dalgaların aynı fazda olduğu doğrultularda kırınım maksimum ve farklı olduğu doğrultularda ise minimum noktaları oluşturur. Kristal örgüdeki X-ışını kırınımı gözlemleyebilmek için denklem 4.1'de verilen Bragg koşuluna uyması gerekmektedir. Bragg koşulu, gelen X-ışını demetinin açısına bağlıdır.

$$2d_{hkl} \cdot \sin\theta = n\lambda \quad (4.1)$$

Burada, d_{hkl} atom düzlemleri arasındaki mesafe (h,k,l Miller indisleri), θ ışın demetinin gelen açısı, n kırınım mertebesi ($n=1,2,3...$), λ X-ışınının dalgaboyunu göstermektedir. Yapıcı girişimin oluşması için farklı düzlemlerden saçılmalar arasındaki yol farkının dalga boyunun tam katlarına eşit olması gerekir. Gelen demet doğrultusu ile saçılan demet arasındaki açı Şekil 4.6'dan görüldüğü üzere 2θ 'dir.



Şekil 4.6. Kristal düzleminde X-ışını kırınımının şematik gösterimi

4.3. Aygıt Fabrikasyon Aşamaları

Yarıiletken aygıt teknolojisinde, opto-elektronik ölçümler yapılarak aygıt performansının belirlenmesi büyük önem arz eder. Bu aşamaya geçmeden, büyütülen yapıların aygıt üretimlerinin yapılması, ölçümlere hazır hale getirilmesi gereklidir. InAsSb örneklerinin fabrikasyon sürecinde, mesa ve kontak desenleri, standart fotolitografi teknikleri kullanılarak yapılmıştır. Bu teknik, temizlik, yüzey kaplama, hafif ısıtma, desen aktarma, tab etme ve sert ısıtma, ıslak aşındırma ve kontak metalizasyonu basamaklarından oluşur.

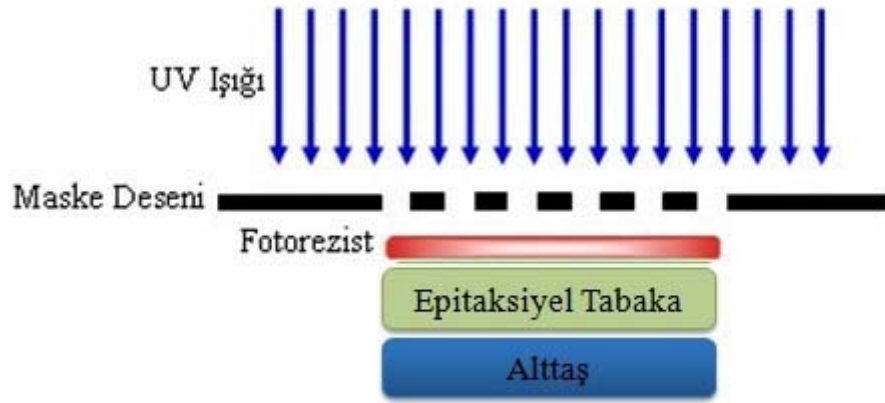
Temizlik: Aygıt performansını etkileyen en önemli unsurların başında örneklerin yüzeylerinde oluşan organik kirler, kesim sırasında oluşan küçük kristal parçaları, toz ve doğal oksit tabakasıdır. Yüzeyinden kirliliklerin temizlenmesi için örnekler sırasıyla 70 °C sıcaklığında 5 dk aseton ve asetonun yüzeyde oluşturduğu kalıntıyı temizlemek için 5 dk alkol (izopropanol) içerisinde bekletilmiştir. Ardından, direnci yüksek ve iyonlarından arındırılmış saf su (deionize) ile kimyasal kalıntılardan arındırılmış ve yüksek saflıktaki azot gazı (N_2) ile kurutulmuştur.

Yüzey Kaplama: Bu aşamada, morötesi (Ultraviolet-UV) ışığa karşı duyarlı olan “AZ5214E-IR” fotorezist malzemesi kullanılmıştır. Örnek üzerine,

şırınga yardımıyla üç damla damlatılarak, Laurell WS-400BZ-6NPP döner kaplayıcı (spin coater) ile 40 sn süreyle 3000 rpm hızında döndürülerek fotorezist örnek yüzeyine homojen bir şekilde dağıtılmıştır.

Hafif Isıtma (soft bake): Fotorezistin örnek yüzeyine daha iyi tutunması ve kuruması için ısıtıcıda 110 °C’de 1 dk ısıtma işlemi uygulanmıştır.

Maske deseni aktarma: MIDAS, MDA-400M-6 model maske hizalayıcı yardımıyla maske üzerindeki aygıt deseni (BÜDAM) hizalanarak üzeri fotorezist kaplı örnek yüzeyine aktarılmıştır (Şekil 4.7). Aygıt deseni, yaklaşık 15 sn UV ışığa maruz bırakılarak örnek üzerine aktarılmıştır.



Şekil 4.7. Maske deseni aktarma işleminin şematik gösterimi [52]

Tab Etme: Aktarılan mesa desenini açığa çıkarma işlemine tab etme denir. Tab etme işlemi, yüksek enerjili UV ışığa maruz kalan fotorezist bölümlerinin, uygun bir çözelti (AZ400K:H₂O, 1:4) içine konularak maske hizalayıcıda aktarılan desenin örnek yüzeyinde belirmesidir. Örnek, hazırlanan tab çözeltisinde yaklaşık olarak 20 sn kadar bekletilmiştir. Çözeltiden çıkartılan örnekler deiyonize su ile durulanmış ve kuru azot ile kurutulmuştur.

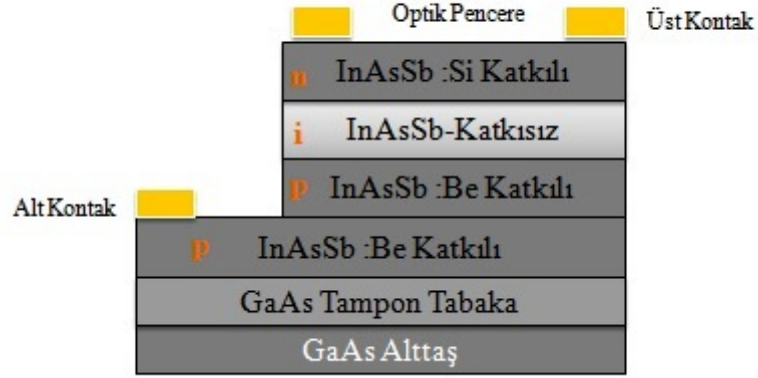
Sert Isıtma (hard bake): Sert ısıtma, ışık görmeyen fotorezistin örnek yüzeyine daha iyi tutunması ve kimyasal aşındırmaya karşı direnç kazanması için uygulanan bir işlemdir. Fotorezistin kimyasala karşı olan direncini artırma için 120 °C’de 6 dk sert ısıtma işlemi uygulanmıştır. Sert ısıtma uygulanan örneklerin

kalınlıkları bir profilometre yardımı ile ölçülür ve böylece örnekler ıslak aşındırmaya hazır hale getirilmiş olur.

Islak Aşındırma: Mesa desenleri aktarılan örneklerin, kimyasal çözelti yardımıyla alt kontak bölgelerine kadar olan aşındırma süreci kapsamaktadır. InAsSb epikatman örneklerini aşındırmak amacıyla organik bir asit olan sitrik asit (CA, C₆H₈O₇) çözeltisi kullanılmıştır. Çünkü, sitrik tabanlı aşındırma çözeltiler ile diğer çözeltilerle karşılaştırıldığında düzgün ve pürüzsüz yüzeyler elde edilmiştir. Ayrıca, InAsSb ile GaAs arasında seçici aşındırma sağlanması bu çözeltiyi tercih etmemizdeki en büyük nedendir. C₆H₈O₇:H₂O:H₂O₂ (1:1:1) oranında bir sitrik asit çözeltisi hazırlanmış ve çözeltinin 25 dakika kararlı hale gelmesi beklenmiştir (çözelti sıcaklığı 19 °C). Çözelti birleşimi sırasıyla 100 ml C₆H₈O₇ + 100 ml H₂O + 100 ml H₂O₂ kullanılmıştır. Aşındırma işlemi, kontrollü bir şekilde yapılarak alt kontak bölgesine gelindiğinde işlem tamamlanır. Aşındırma işlemi uygulanan örneğe yeniden temizlik prosedürü uygulanarak metalizasyon işlemine hazır hale gelir.

Metalizasyon İşlemi: InAsSb diyot yapısının kontak bölgelerinin omik davranış göstermesini sağlayan metal Titanyum/Platin/Altın (Ti/Pt/Au), her iki bölge için de aynıdır ve tek bir litografi işlemi ile örnek yüzeyine alt ve üst metal kontakları aktarılabilir. Ti/Pt/Au metalleri örnek yüzeyine sırasıyla 50 nm/50 nm/300 nm olacak şekilde kaplanmıştır. Metalizasyon işleminden sonra, örnekler aseton içerisine konularak ultrasonik titreştirici yardımıyla yüzey üzerindeki artık fotoresist ve metal kalıntıları giderilmiştir (lift-off).

Fabrikasyon işlemleri sonlandırılan örnekler kesilerek örnek taşıyıcı paket üzerine yapıştırılmış ve tel bağlayıcı ile alt ve üst kontak bağlantıları yapılarak karakterizasyon işlemlerine hazır hale getirilmiştir. Şekil 4.8'de tel bağlantısı yapılan InAsSb örneğin yan kesitinin şematik bir gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.8. Alt ve üst kontaktları alınmış örneğin şematik gösterimi

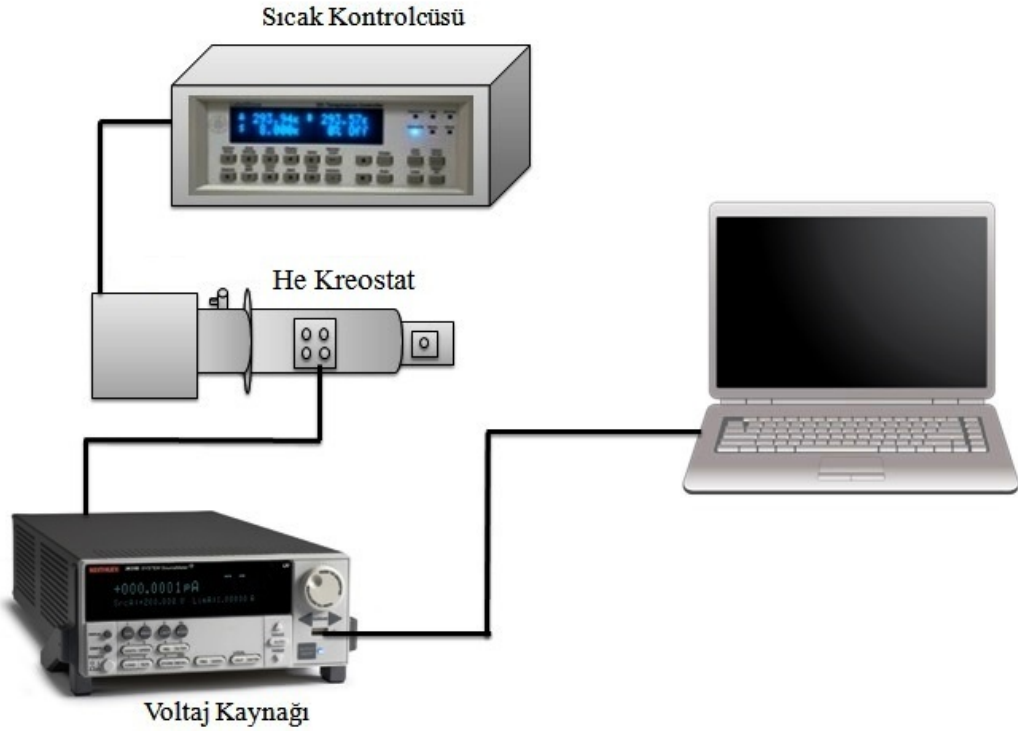
4.4. Opto-Elektronik Karakterizasyon Teknikleri

Opto-elektronik ölçümlerde, InAsSb-tabanlı nBn yapısı için karanlık akım, p- π -n InAs_{1-x}Sb_x için karanlık akım ve tayfsal fototepki ve p-i-n Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} dedektör yapıları karanlık akım, fotoluminesans, tayfsal fototepki ölçümlerini kapsamaktadır. Tez kapsamında büyütülen dedektör yapılarının opto-elektronik karakterizasyonu için kullanılan cihazlar hakkında genel bilgi, deneylerin kurulum aşamaları ve deneylerin yapıları hakkında detaylı bir şekilde bahsedilmiştir.

4.4.1. Karanlık Akım Ölçümleri

Karanlık akım, herhangi bir optik uyarma olmadan, diyot içerisinde oluşan akımı ifade eder. Eğer p-n ya da p-i-n fotodiyot yeterli enerjiye sahip bir foton ile uyarılırsa, diyotta serbest hale geçen bir elektron ve elektronun oluşturduğu pozitif yüklü bir boşluk oluşur. Serbest taşıyıcıların elektrik alan sayesinde hareketi ile bir fotoakım meydana gelir. Diyotun performansını belirleyen toplam fotoakım, karanlık akım ile kısıtlanmaktadır. Bu nedenle, aygıt hassasiyetini artırmak adına karanlık akım mümkün olduğunca küçük değerde tutulmalıdır.

Üretilen diyotların karanlık akım mekanizmalarını tanımlayabilmek için Şekil 4.9'daki deney düzeneği kurulmuş ve sıcaklık bağımlı akım-voltaj karakteristikleri incelenmiştir. Örnekler kapalı devre helyum kreostat içerisine yerleştirildikten sonra, aygıt üzerine herhangi bir kızılötesi ışınım düşmesini engellemek amacıyla kreostatın soğuk bölgesine temas edecek şekilde bir radyasyon kalkanı (radiation shield) yerleştirilmiştir. Sıcaklık bilgisi, birbirinden bağımsız iki ayrı sıcaklık sensörü bulunan Lakeshore 331 sıcaklık kontrolcüsü yardımıyla yapılmış ve 6-300 K sıcaklık aralığında ve Keithley 2635A voltaj kaynağı ile 50 mV adımlarla ölçümler alınmıştır. Akım-voltaj verileri, LabView tabanlı yazılım kullanılarak alınmıştır.

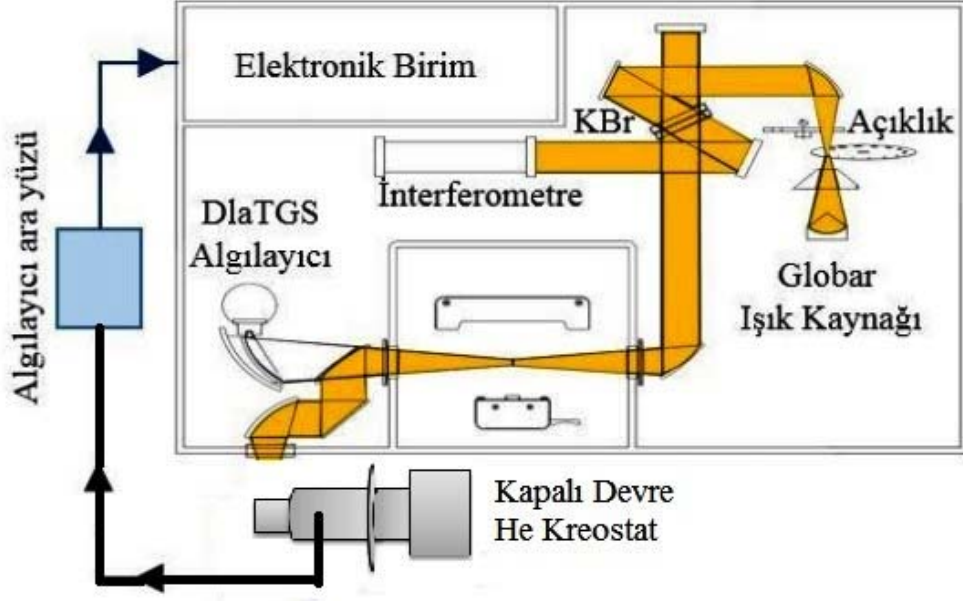


Şekil 4.9. Sıcaklık bağımlı karanlık akım deney düzeneği

4.4.2. Tayfsal Fototepki Ölçümleri

Bir dedektörün tayfsal fototepkisi, genellikle hangi bölgede algılama yaptıkları, kesim dalgaboyları ve bant enerjileri hakkında bilgiler verir. Tayfsal fototepki ölçüm düzeneği ve kullanılan donanımlar Şekil 4.10'da gösterilmiştir

[53]. Test edilecek diyotlardan sıcaklık bağımlı ölçüm alınacağı için kapalı devre helyum kreostat sistemi kullanılmıştır. Ölçümlerde ZnSe pencere kullanılmış olup, örneklerden alınan sinyalin yüksek miktarda olması nedeniyle voltaj ön yükseltici kaynağına ihtiyaç duyulmamıştır.



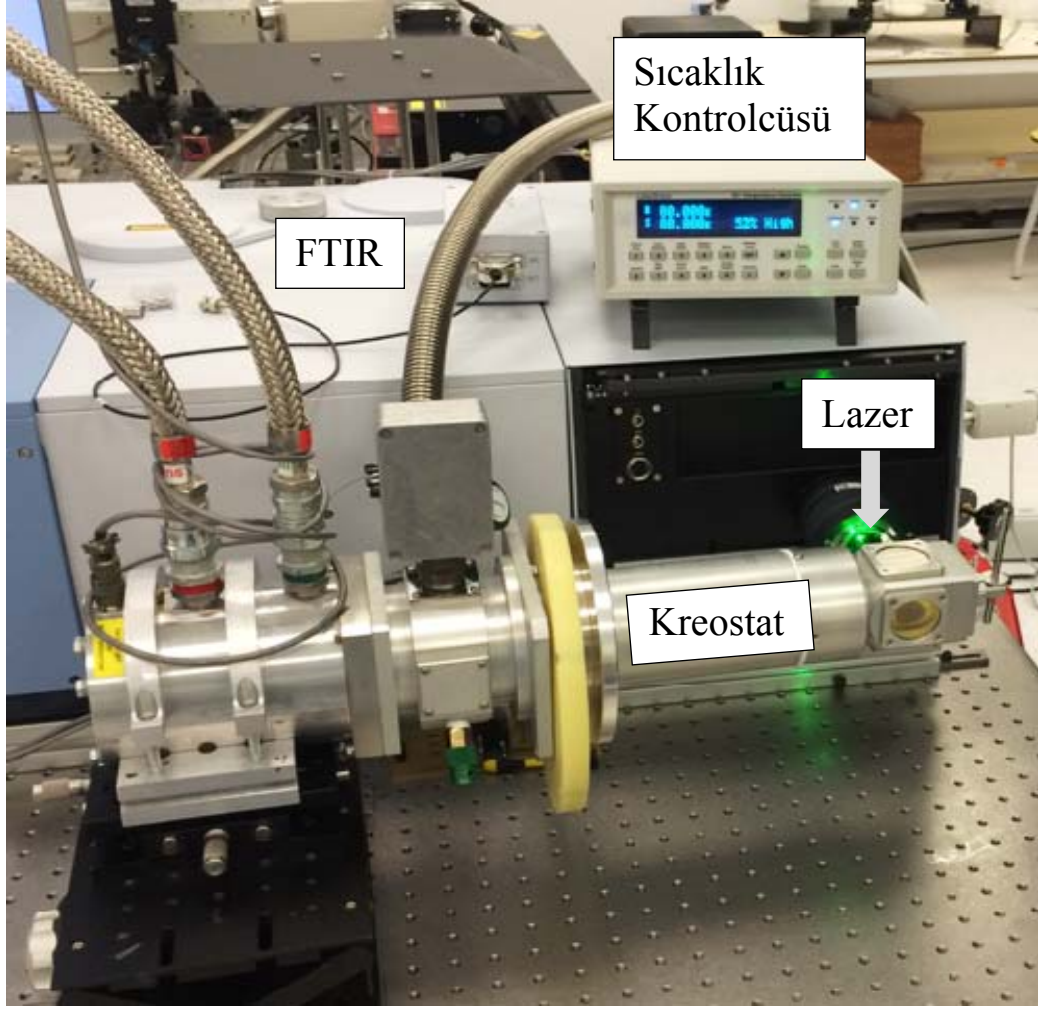
Şekil 4.10. Tayfsal Fototepki Ölçüm düzeneği [53]

4.4.3. Fotolüminesans Ölçümleri

Fotolüminesans (photoluminescence, PL), yarıiletken fiziğinde, doğrudan bant aralıklı malzemelerin temassız ve zarar vermeden elektronik yapısını anlamamızı sağlayan bir yöntemdir. PL, yüksek enerjili foton ile uyarma ve yapıda meydana gelen ışımali yeniden birleşmeyi ele alan bir süreçtir. Örnek üzerine, bant enerjisinin üzerinde bir enerjiye sahip foton gönderildiğinde, değerlik bandında bulunan elektronlar, daha üst seviyede bulunan iletim bandına çıkarlar ve böylece elektron-boşluk çifti oluştururlar. Fotonlar ile üretilmiş bu taşıyıcılar, kazandıkları bu enerjiyi hızlı bir şekilde kaybederler (0,2-100 ps) ve düşük enerjili duruma tekrar geri dönerler.

PL, aynı zamanda yayılan ışık olarak da adlandırılır. PL spektrumu, elektronik enerji seviyelerini ayırımı belirlemek için kullanılan geçiş enerjisi hakkında bilgi sağlar. Yarıiletkenlerdeki en yaygın geçiş, bant aralığı enerjisine eşit olan iletim ve değerlik bantlarındaki durumlar arasındakilerdir. Işıma olmayan süreç, yerel kusur seviyeleriyle ilgili olanlarla ilişkilidir ve malzemenin kalitesine ve aygıt performansına olumsuz bir şekilde katkıda bulunur. Ayrıca, PL şiddeti, ışınımlı ve ışınımsız yeniden birleşmelerin göreceli olarak bir ölçümüdür ve bu nedenle malzeme kalitesinin de bir göstergesi niteliğindedir. Sonuç olarak, PL şiddeti, yapının kristal kalitesi ve PL doruğunun FWHM değeri bizlere katman kalınlığının homojenliği konusunda bilgi sağlar [10].

PL ölçümleri için deney düzeneği Şekil 4.11'de verilmiştir. Ölçümler, FT-IR Bruker VERTEX 80v sistemi kullanılarak yapılmıştır. Bu sistemde, 100 mW maksimum güç çıkışı olan 532 nm lazer kullanılmıştır. Demet bölücü olarak CaF₂ ve dedektör olarak, sıvı azot soğutmalı InSb dedektör kullanılmıştır.



Şekil 4.11. PL spektrumu ölçümlerinde kullanılan deney düzeneği

4.5. Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi, molekülden veya kristalden tek frekanslı ışığın esnek olmayan saçılmasını inceler. Bu şekilde madde ile gönderilen ışığın karşılıklı etkileşmesi sağlanarak titreşimler incelenir. Günümüzde Raman spektroskopisi tekniği, yarıiletken katmanların ara yüzeylerin ve farklı yapıların incelenmesinde çok yaygın olarak kullanılan bir teknik haline gelmiştir. Yarıiletkenlerin örgü dinamik özelliklerini yani materyallerin yapısal bilgilerini, ara yüzeylerdeki faz etkileşmelerini ve kristal yapılarını yansıtır. Bu bilgiler,

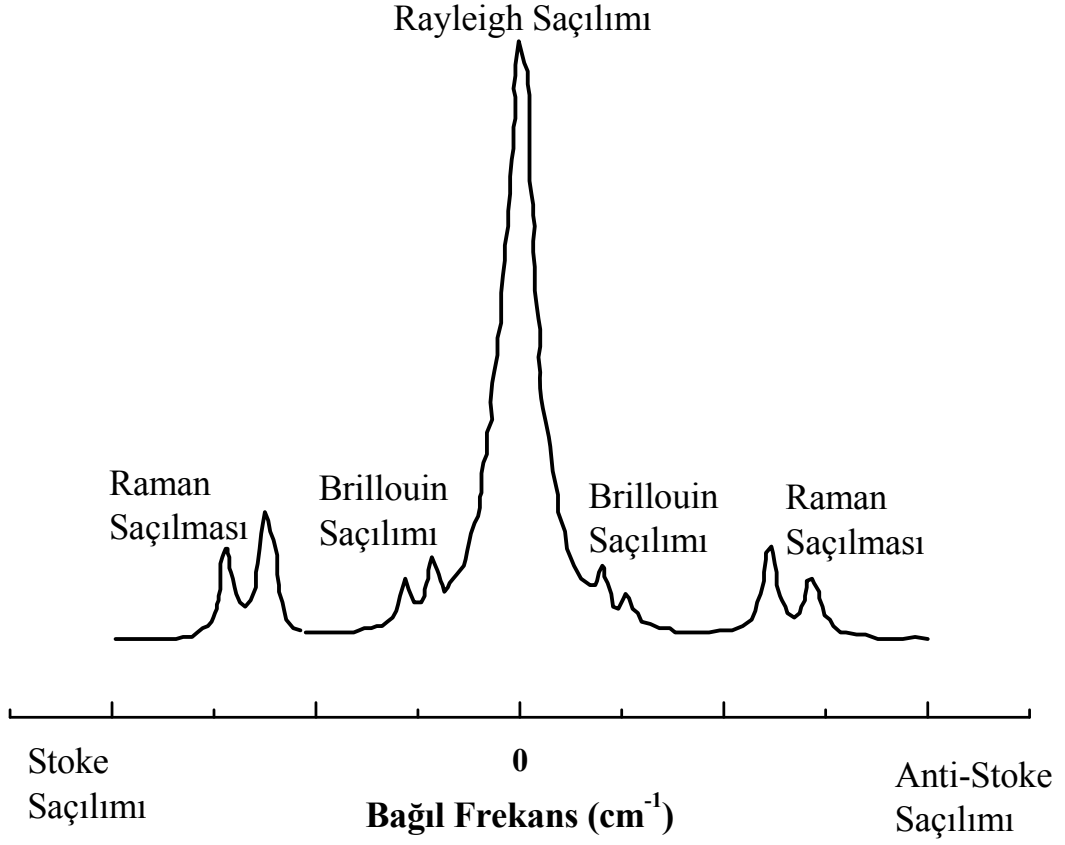
Raman spektrumundaki; fonon frekans değerlerinden ve doruk yarı genişliğinden elde edilebilir. Örgünün dinamik özellikleriyle birlikte aynı zamanda elektronik bant yapısı, kirlilik oranı, serbest taşıyıcı konsantrasyonu ve ara yüzeylerdeki bant katlanması gibi elektronik özellikler hakkında da bilgi elde edinilebilir [54].

Şiddetli monokromatik (tek frekanslı) ışın ile etkileşen moleküller, ışığı soğurmuyorsa ışık saçılıma uğrar. Işık saçılması sırasında saçılan ışığın büyük bir kısmının enerjisi madde ile etkileşen ışığın enerjisine eşit olur bu tür elastik saçılma olayına *Rayleigh Saçılması* denir (Şekil 4.12). Elastik saçılma olayının yanı sıra saçılan ışığın çok az bir kısmı elastik olmayan saçılma olayı ise Raman saçılması adını alır. Gelen ışığın frekansı, saçılan ışığın frekansından daha küçükse buna *Stokes* saçılması denir. Eğer gelen ışığın frekansı, saçılan ışığın frekansından daha büyükse *anti-Stokes* saçılması olarak adlandırılır.

$$v = \frac{c}{\lambda} = \frac{w}{2\pi} \quad (4.2)$$

Burada λ , dalgaboyu cm biriminde ifade edilir. c, ışık hızı ve w, açısal frekanstır. Raman saçılımı, yaklaşık 10-3000 cm^{-1} bağıl frekans arasında gözlenir.

Raman spektroskopisi ölçümleri, Bruker Optics FT-Raman Scope III cihazıyla yapılmıştır. Uyarıcı kaynak olarak 532 nm dalga boyuna ve 2mW gücüne sahip lazer kullanılmış ve geri saçılım geometrisinde 100X büyütmeli objektif merceği ile odaklanmıştır. $25 \times 1000 \mu\text{m}^2$ optik aralığından geçen sinyal, bir CCD dedektör yardımıyla toplanmıştır.



Şekil 4.12. Saçılan ışığın frekans spektrumu [55]

5. EPİTAKSİYEL $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ FOTO-ALGILAYICILARIN BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

Tez kapsamında, $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ foto-algılayıcı yapıları farklı konsantrasyonlarda sistematik olarak büyütülmüştür. Büyütülen örneklerin kristal kalitelerini değerlendirebilmek adına farklı karakterizasyon yöntemleri kullanılmış ve alınan sonuçlar neticesinde, yapısal ve opto-elektronik karakterizasyonlar birbirleriyle ilişkilendirilmiştir. MBE sisteminde, GaAs alttaş üzerine kaliteli $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ epikatman yapılarının düzgün bir şekilde büyütüldüğü gözlemlenmiş ve kristal kalitelerinin literatür ile uyumlu olduğu gösterilmiştir. Örnek fabrikasyonu için, sitrik asit ve HCl asit çözeltilerinin $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ epikatmanların aşındırma derinliklerine bakılmış ve CA çözeltilisinin konsantrasyon bağımlı aşındırma hızı bulunmuştur. Ayrıca, InAsSb -tabanlı nBn dedektör yapısı GaSb alttaş üzerine düzgün bir şekilde büyütülmüş ve 77 K sıcaklıkta karanlık akım ölçümü alınıp farklı iki mesa için karanlık akım yoğunluğu ve R_0A değerleri incelenmiştir. $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ foto-algılayıcı yapılarının sıcaklığa bağımlı karanlık akım ve fototepki ölçümleri alınmıştır. Foto-algılayıcı yapılarına etki eden karanlık akım mekanizmaları tanımlamasını yapabilmek için örneklerin Arrhenius grafikleri çizilip iki farklı doğrusal fit yapılarak farklı aktivasyon enerjileri elde edilmiştir.

5.1. $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ Foto-Algılayıcıların Büyütülmesi

Büyütme çalışmalarına başlanmadan önce, temel büyütme değişkenlerinin belirlenmesi gereklidir. Bu temel değişkenleri anlayabilmek adına ilk olarak In, As ve Sb kaynaklarının akı ölçümleri yapılmıştır. III ile V grubu malzeme sistemlerinin efüzyon hücreleri birbirinden farklı olduğu için akı ölçümü yapılırken dikkat edilmesi gereken bazı noktalar vardır. III grubu malzemelerin önünde sadece kepenk varken, V grubu malzemelerde ise kepengin yanı sıra malzemeyi muhafaza etmek için bir de vana bulunmaktadır. Bu nedenle, akı ölçümleri III grubu malzemelerde sıcaklığa göre yapılırken, V grubu için hem

sıcaklığa göre hem de vana açıklığına göre yapılmaktadır. Tablo 5.1’de In, As ve Sb’nin arka plan basıncı (background pressure, BP), net demet basıncı (beam equivalent pressure, BEP) ve demet akı basıncı (beam flux monitor, BFM) değerleri verilmiştir. Tablodaki BEP değerleri, BFM ile BP farkından bulunmuştur.

Tablo 5.1. Malzeme kaynaklarının MBE’deki akı değerleri

Malzemeler	Sıcaklık (Uç/Taban) (Kırıcı/Orta/Ana) (°C)	Vana Açıklığı (mil)	Akı Değeri (Torr)	
In	932/732	-	BFM	$7,42 \times 10^{-8}$
			BP	$1,38 \times 10^{-10}$
			BEP	$7,40 \times 10^{-8}$
As	900/350	50	BFM	$7,62 \times 10^{-8}$
			BP	$1,95 \times 10^{-9}$
			BEP	$7,42 \times 10^{-8}$
		70	BFM	$1,56 \times 10^{-7}$
			BP	$2,64 \times 10^{-9}$
			BEP	$1,53 \times 10^{-7}$
Sb	900/520/750	80	BFM	$3,66 \times 10^{-7}$
			BP	$3,53 \times 10^{-10}$
			BEP	$3,65 \times 10^{-7}$
		95	BFM	$4,86 \times 10^{-7}$
			BP	$3,55 \times 10^{-10}$
			BEP	$4,85 \times 10^{-7}$

Gao ve ark., yaklaşık %6 hata payı ile $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ üçlü bileşiğinin "1-x" değerini $(1-x) = \text{BEP}[\text{As}/(\text{As}+\text{Sb})]$ eşitliğinden faydalanarak belirlemişlerdir [56]. $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ için konsantrasyon değerleri, bu bilgiden yola çıkılarak belirlenmiş ve konsantrasyondaki hata paylarının %6’dan daha az olduğu gözlemlenmiştir.

InAs_{1-x}Sb_x yapıları, yarı yalıtkan GaAs (100) alttaş üzerine büyütülmüştür. V grubu efüzyon hücrelerinin kırıcı bölgesinde malzemeler As₂ ve Sb₂ demetine dönüştürülmüştür. Alttaş sıcaklık kalibrasyonu IRCON pirometre (pyrometer) kullanılarak yapılmıştır. Kalibrasyon için GaSb (1 × 3) → (2 × 5) yüzey yeniden yapılanma geçişi baz alınmıştır [57]. Büyütmeye başlamadan önce GaAs alttaşın As₂ akısı altında yaklaşık 600-605 °C sıcaklık arasında oksit kaldırma işlemi yapılmıştır. Oksit kaldırma işlemi tamamlandıktan sonra, alttaş sıcaklığı büyütmeye sıcaklığı olan 450 °C'ye kadar düşürülmüştür. Ardından, As₂ kaynağının vana değeri istenilen seviyeye getirilip yaklaşık 10 sn'ye beklenmiştir. Daha sonra, In kaynağının kepenği açılmış, 10 sn sonra Sb₂ kaynağının kepenk ve vanası açılmıştır. InAs_{1-x}Sb_x örnekleri, farklı As-Sb BEP oranı, farklı kompozisyonlarda ve her bir örnek için 100 dk olacak şekilde herhangi bir düzeltme katmanı veya geçiş katmanı olmadan katkısız olarak örnekler büyütülmüştür (S₁, S₂, S₃, S₄ ve S₅).

GaAs düzeltme katmanlı örnekler (N₁, N₂, N₃, N₄ ve N₅), oksit kaldırma işlemi tamamlandıktan sonra, yüzeyi bozulan alttaş için GaAs düzeltme katmanı büyütülmüştür (büyütme sıcaklığı 585 °C). Düzeltme katmanını büyütmek için, As₂ kaynağının vana değeri 250 mil'e getirilmiştir. Ardından, Ga hücresinin kepenği açılmış ve 35 dk (~200 nm) GaAs düzeltme katmanı büyütülmüştür (N₂, N₃). Düzeltme katmanı bazı örnekler için alttaş yüzeyinin gereğinden fazla bozulma olması nedeniyle 60 dk (~400 nm) büyütülmüştür (N₁, N₄ ve N₅). Düzeltme katmanı büyütüldükten sonra, sıcaklık 450 °C'ye getirilmiştir. As₂ vana değeri düşürülerek 10 sn'ye beklenmiştir. Daha sonra, In kaynağının kepenği açılmış ve 10 sn sonra Sb₂ kaynağının kepenk ve vanası açılmıştır. Bu şekilde farklı konsantrasyonlarda beş adet InAs_{1-x}Sb_x katmanı büyütülmüştür. N₁, N₂ ve N₃ örnekleri için In hücre sıcaklığı (üst/alt kısım) 930/730 °C iken N₄ ve N₅ örnekleri için ise 950/750 °C kullanılarak farklı V/III oranlarında büyütmeye yapılmıştır.

GaSb geçiş katmanı, düzeltme tabakasından sonra büyütülür. Bu katman, genellikle alttaş ile ana yapı arasında örgü uyumsuzluğunun fazla olması nedeniyle tercih edilmektedir ve ana yapıya daha hafif bir giriş yapmayı sağladığından yapıdaki zorlamayı (stress) azaltmaktadır. InAs_{1-x}Sb_x ile GaSb

arasında özellikle $0,06 < x < 0,12$ konsantrasyon değerlerinde, neredeyse örgü uyumu bulunmaktadır. Direk olarak alttaş üzerine büyüyen yapılarla karşılaştırıldığında, geçiş katmanlı yapılar genellikle daha iyi kristal kalitesine sahip olduğu bilinmektedir.

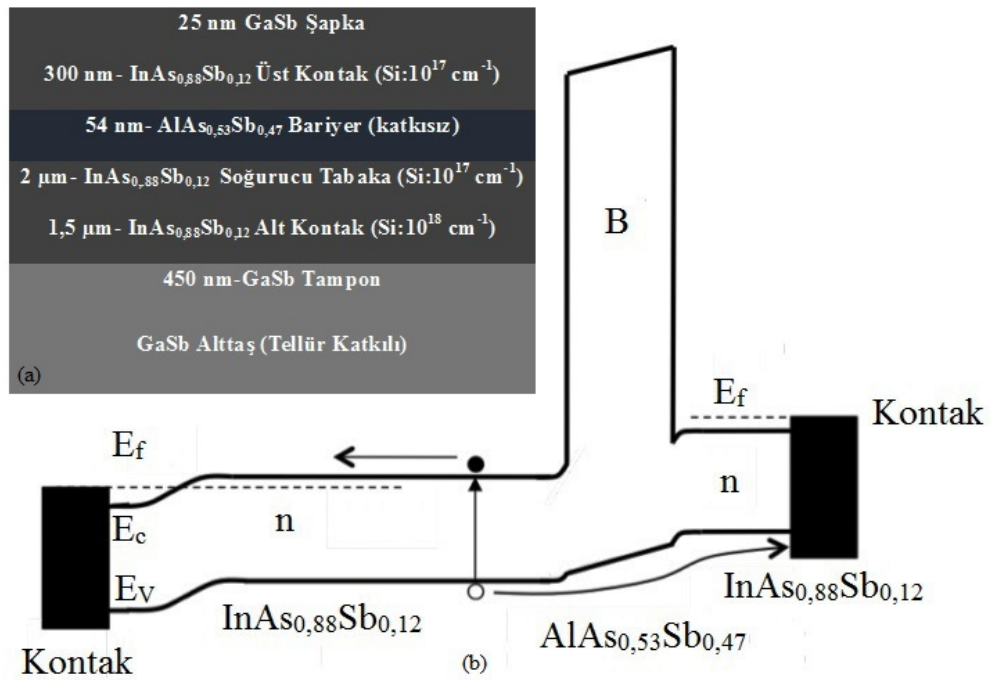
N₆, N₇ ve N₈ örnekleri, GaAs düzeltme katmanından sonra GaSb geçiş katmanı kullanılarak büyütülmüştür. GaAs düzeltme katmanı büyütüldükten sonra alttaş sıcaklığı GaSb büyüme sıcaklığı olan 495 °C'ye As₂ akısı altında düşürülmüştür. Sıcaklık 495 °C'ye geldiğinde, As₂ kaynağının kepenk ve vanası kapatılmış ve yerine Sb₂ kaynağının kepenk ve vanası açılmıştır. 5 s sonra Ga hücresinin kepenği açılarak 60 dk (~400 nm) GaSb geçiş katmanı büyütülmüştür. Ardından sıcaklık, InAsSb'nin büyütme sıcaklığı olan 450 °C'ye düşürülmüştür. Sb₂ kaynağının vanası istenilen seviyeye getirilmiş, 10 sn sonra In hücresinin kepenği açılmış ve sonra As₂ kaynağının kepenk ve vanası kapatılmıştır. Yapıların 10¹⁸ taşıyıcı/cm³ mertebesinde katkılı olabilmesi için, 10 sn sonra Si hücresinin kepenği açılmıştır (Si sıcaklığı 1080 °C). Bu şekilde, farklı konsantrasyonlu üç adet InAsSb örneği 100 dk süresince büyütülmüştür.

InAsSb-tabanlı nBn (n-tipi katkılı/bariyer/n-tipi katkılı) kızılötesi dedektör yapısı büyütülmesi için GaSb alttaş kullanılmıştır. Bu yapıyı büyütmeden önce, ilk olarak AlAsSb bariyer tabakasının büyüme oranı belirlenmiştir. Bunun için GaSb alttaş üzerine InAsSb oranları aynı olan iki tane farklı konsantrasyonlu AlAsSb örnekleri büyütülmüştür (N₉ ve N₁₀).

GaSb alttaşın oksidi yaklaşık 540 °C'de Sb₂ akısı altında kaldırılmış ve daha sonra sıcaklık 495 °C'ye düşürülerek GaSb düzeltme katmanı büyütülmüştür (60 dk). Ardından, sıcaklık 450 °C'ye düşürülmüş, 50 dk InAsSb katmanı büyütülmüştür. Bu katman, sıcaklığı 1100 °C olan Si katkı malzemesiyle katkılanmıştır. Daha sonra, Si, In, As₂ kaynakları kapatılmıştır. Sb₂ kaynağı istenilen vana seviyesine getirilmiş, 10 sn sonra Al hücresinin kepenği açılmıştır. Son olarak, 10 sn sonra As₂ kaynağının kepenği ve vanası açılmıştır. Bu şekilde, farklı konsantrasyonlara sahip olan iki adet AlAsSb katmanı katkısız bir şekilde 45 dk büyütülmüştür. Büyütme sonunda, AlAsSb katmanının oksitlenmesini önlemek amacıyla bu katman üzerine 3 dk GaSb (~25 nm) şapka (cap) katmanı

büyütülmüştür. Bu örnekle $\text{AlAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ 'nin büyüme oranı ve konsantrasyonları belirlenmiştir.

InAsSb-tabanlı nBn yapılarının en büyük avantajlarından biri çoğunluk taşıyıcılarının akmasını (tünellemesini) önleyerek, karanlık akımı önemli ölçüde bastırmasıdır [56]. Bu tünellemeyi önleyecek tabakanın yaklaşık 50-100 nm kalınlıkta olması yeterlidir [56]. Bu bilgilerden yola çıkılarak, GaSb alttaş üzerine Şekil 5.1a'daki yapı büyütülmüştür.



Şekil 5.1. GaSb alttaş üzerine büyütülen InAsSb-tabanlı nBn kızılötesi dedektör yapısının a-) şematik gösterimi b-) bant yapısı

Şekil 5.1'deki yapıyı büyötmek için, ilk olarak GaSb alttaşın oksidi kaldırılmış ve ardından GaSb düzeltme katmanı büyütülmüştür. Daha sonra, sıcaklığı 1100 °C olan Si katkıları olarak yaklaşık 192 dk alt kontak tabakası büyütülmüştür. Ardından, Si sıcaklığı 1070 °C'ye düşürülerek 336 dk soğurucu tabaka büyütülmüştür. 15 dk katkısız bariyer tabakası büyütüldükten sonra, üst kontak tabakasına geçilmiştir. Soğurucu tabaka ile aynı sıcaklıkta olacak şekilde

50 dk üst kontak büyütülmüş ve üzeri ~25 nm kalınlığa sahip katkısız GaSb şapka ile kapatılmıştır.

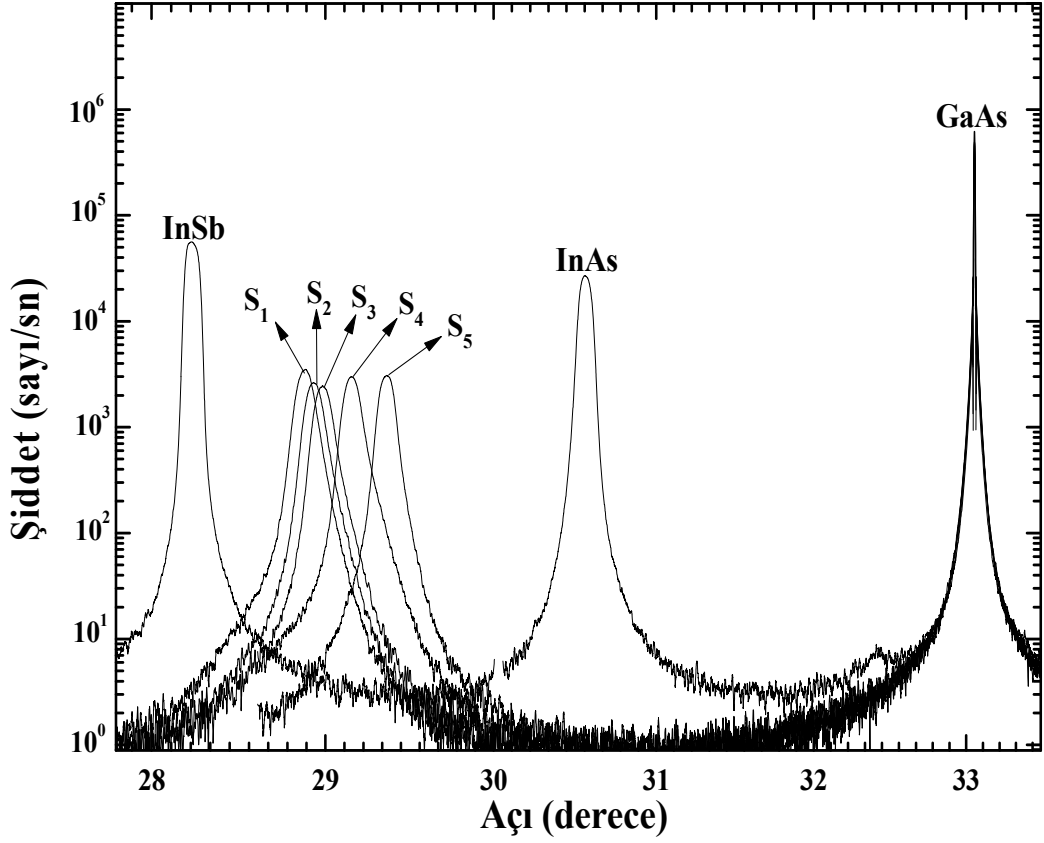
InAs_{1-x}Sb_x foto-algıyıcı yapıları (N₁₂ ve N₁₃), GaAs alttaş üzerine büyütülmüştür. Her bir örnek için yaklaşık 603 °C'de 10 dk süre ile oksit kaldırma işleminden sonra 60 dk GaAs düzeltme katmanı büyütülmüştür (~530 nm). GaAs düzeltme katmanı, N₁₂ örneği için Si (n-tipi) ile, N₁₃ örneğinde ise Be (p-tipi) ile katkılanmıştır. N₁₃ örneğinde, GaAs düzeltme katmanından sonra 120 dk Be katkılı GaSb geçiş katmanı büyütülmüştür (~1340 nm). Ardından, her iki yapı için de alt kontak tabakasına geçilmiştir. N₁₂ ve N₁₃ örnekleri için alt kontak tabakası ~10¹⁸ taşıyıcı/cm³ mertebesinde olacak şekilde sırasıyla Si ve Be ile katkılanmıştır. N₁₂ örneği, GaAs düzeltme katmanı büyütüldükten sonra Si hücrenin kepengi kapatılarak, As akısı altında InAsSb büyütüldüğü sıcaklık olan 450 °C'ye soğutulmuştur. Daha sonra, As vanası istenilen değere ayarlanıp 10 sn beklenmiştir. Bu sırada, Sb hücrenin vanası istenilen değere ayarlanmış fakat hücrenin kepengi açılmamıştır. 10 sn'nin sonunda In hücrenin kepengi açılmış ve 10 sn sonra da Sb ve Si hücrelerinin kepenkleri eş zamanlı olarak açılmıştır. N₁₃ örneğinde, GaSb geçiş katmanı büyütüldükten sonra Be hücrenin kepengi kapatılmış ve Sb akısı altında 450 °C'ye soğutulmuştur. Daha sonra, Sb ve As vana değeri istenilen seviyeye ayarlanmış fakat As hücrenin kepengi açılmamıştır. 10 sn'nin sonunda In hücrenin kepengi açılmış ve 10 sn sonra As hücrenin kepenk ve vanası, Be hücrenin kepengi açılmıştır. 140 dk alt kontak tabakası büyütüldükten sonra, 150 dk soğurucu bölge büyütülmüştür. Soğurucu bölge için düşük katkılı (~10¹⁶ taşıyıcı/cm³) Be kullanılmıştır. Çünkü, InAsSb doğası gereği n-tipi bir malzemedir (özellikle yüksek As konsantrasyonuna sahip yapılar) ve katkı seviyesi yaklaşık olarak 10¹⁶ taşıyıcı/cm³ mertebelerindedir [57]. Bu nedenle, soğurucu tabakaya Be ile katkılanarak has (intrinsic) yapıya sahip olması için çok düşük katkı (π katkı) uygulanmıştır. Soğurucu bölgeden sonra, üst kontak tabakası büyütülmüştür. Üst kontak tabakası, N₁₂ örneği için ~10¹⁸ taşıyıcı/cm³ seviyesinde Be ile katkılanmıştır. N₁₃ örneği için ise için üst kontak tabakasına geçildiğinde Be hücre kepengi kapatılıp Si hücrenin kepengi açılmış ve ~10¹⁸ taşıyıcı/cm³ seviyesinde Si ile katkılanmıştır. Şekil 5.2'de büyütülen foto-algılayıcılar için örnek yapılarının şematik gösterimi verilmiştir.

1090 nm InAs _{0,9} Sb _{0,1} :Be Katkılı Üst Kontak (Be 10 ¹⁸ cm ⁻³)	1090 nm InAs _{0,9} Sb _{0,1} :Si Katkılı Üst Kontak (Si 10 ¹⁸ cm ⁻³)
1170 nm InAs _{0,9} Sb _{0,1} :Be Katkılı Soğurucu Tabaka (Be 10 ¹⁶ cm ⁻³)	1170 nm InAs _{0,9} Sb _{0,1} :Be Katkılı Soğurucu Tabaka (Be 10 ¹⁶ cm ⁻³)
1090 nm InAs _{0,9} Sb _{0,1} :Si Katkılı Alt Kontak (Si 10 ¹⁸ cm ⁻³)	1090 nm InAs _{0,9} Sb _{0,1} :Si Katkılı Alt Kontak (Be 10 ¹⁸ cm ⁻³)
530 nm GaAs:Si Katkılı Düzeltilme Katmanı (Si 10 ¹⁷ cm ⁻³)	1350 nm GaSb:Be Katkılı Geçiş Katmanı (Be 10 ¹⁷ cm ⁻³)
GaAs Alttaş	530 nm GaAs:Be Katkılı Düzeltilme Katmanı (Be 10 ¹⁷ cm ⁻³)
	GaAs Alttaş

Şekil 5.2. a-) N₁₂ ve b-) N₁₃ örneklerinin şematik gösterimi

5.2. InAs_{1-x}Sb_x Epikatman Yapılarının HRXRD Analizleri

Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınım analizi, büyütülen yapıların kristal kalitesi ve malzeme konsantrasyonu hakkında bilgi edinebilmek için en pratik yöntemlerden biridir. HRXRD ölçümleri, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu PANalytical X'Pert PRO Materials Research Diffractometer (MRD) cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.3'de gösterilen HRXRD (004) sallantı eğrisi (rocking curve) ölçümü bileşik kompozisyonunu belirlemek için yapılmıştır. Bu ölçüm CuK α ışınımı, dört sekmeli Ge hibrit monokromatör ve 1/8° sabit aralıklı (divergence slit) çubuk kullanılarak elde edilmiştir. Bütün X-ışını spektrumları, 45 kV voltajda ve 40 mA akım altında alınmıştır.



Şekil 5.3. GaAs alttaş üzerine büyütülmüş Sb-tabanlı $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, InAs and InSb epikatman örneklerinin X-ışını spektrumları

Şekil 5.3’de GaAs alttaş üzerine büyütülmüş herhangi bir düzeltme katmanı ya da geçiş katmanı kullanılmadan büyütülen $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ epikatman örneklerinin X-ışını spektrumları verilmiştir. Büyütülen üçlü bileşiklerin yanında referans olması açısından InAs ve InSb örnekleri de büyütülmüştür. Eğer, $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ örnekleri düzgün şekilde büyümüşse, X-ışını kırınımı doruk konumları InAs ile InSb arasında ve konsantrasyona göre InAs veya InSb’ye açılal olarak belli bir mesafede olacak şekilde sıralanmaları gerekmektedir. Tablo 5.2’de Sb konsantrasyonları verilenler örneklerin buna uygun olarak davrandıkları açık bir şekilde görülmektedir. Bu bağlamda, Sb konsantrasyonu en fazla olan S_1 örneğinin doruk tepesi InSb doruk tepesine daha yakın, en az olan S_5 örneğinin doruk tepesinin ise en uzak olduğu saptanmıştır.

Tablo 5.2. InAs_{1-x}Sb_x bileşiklerinin temel büyütme değişkenleri

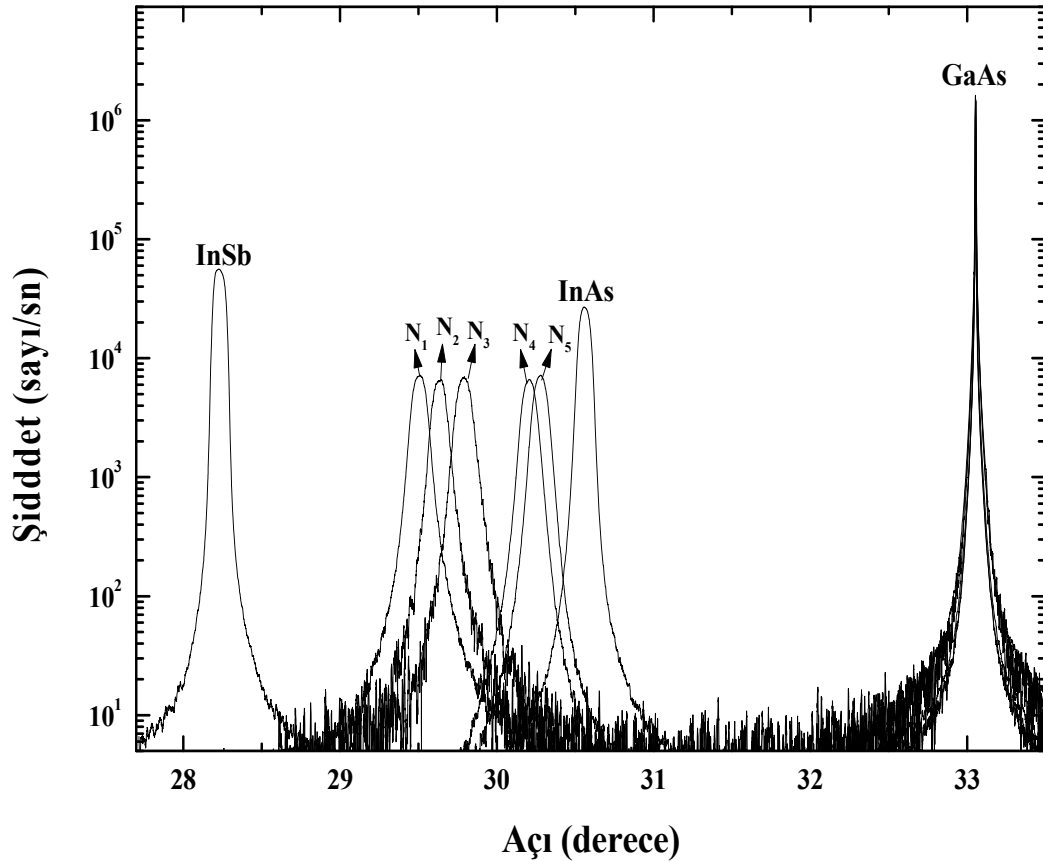
Örnek Numaraları	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
InAs _{1-x} Sb _x Büyüme Sıcaklığı (°C)	445-453	447-451	448-453	443-458	448-452
InAs _{1-x} Sb _x Doruk Yeri (Açıderece)	28,88	28,93	28,99	29,15	29,35
Sb Konsantrasyonu	0,78	0,76	0,73	0,65	0,55
InAs _{1-x} Sb _x FWHM Değeri (Açısanıye)	409,2	406,2	390,0	382,7	358,8
InAs _{1-x} Sb _x Kalınlığı (nm)	592	571	569	567	550
InAs _{1-x} Sb _x Büyüme Zamanı (dk)	100	100	100	100	100

GaAs alttaşın belirgin doruk yeri 33,05 açıderece, InSb ve InAs doruk yerleri sırasıyla 28,22 ve 30,56 açıderece olarak Şekil 5.3’de görülmektedir. Elde edilen veriler şimdiye kadar raporlanmış olan çalışmalardakilerle karşılaştırıldığında, büyütülen örneklerin yüksek kalitede kristal yapıya sahip olduğu görülmektedir, özellikle 550 nm kalınlıkta olan S₅ örneği, şimdiye kadar raporlanmış en iyi FWHM değerine sahiptir [58-61].

Tablo 5.2’de görüldüğü gibi örnekler aynı sürelerde büyümelerine rağmen farklı kalınlıktadır. Çünkü, tüm örnekler aynı In sıcaklığı ve akısında fakat farklı As ve Sb akılarında büyümüştür. InAs için tek bir tabaka oluşturmak için gereken kalınlık yaklaşık olarak 3,0292 Å iken InSb için bu kalınlık yaklaşık olarak 3,2397 Å’dur. Bu nedenle, InAs_{1-x}Sb_x yapısında Sb konsantrasyonu arttıkça yapı kalınlığı artmakta olup, konsantrasyon azaldıkça kalınlık azalmaktadır.

Kalınlık ölçümleri spektroskopik elipsometri yardımıyla yapılmış olup, elde edilen değerlerin teyidi ise taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. SEM’de, örneklere yan kesitten (cross-section) bakılarak katman kalınları tespit edilmiştir ve bunlar elipsometreden elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında gayet uyumlu oldukları gözlemlenmiştir [62].

Sb konsantrasyonu yüksek $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ epikatman örneklerinden sonra, Şekil 5.4'de görüldüğü gibi GaAs alttaş üzerine As konsantrasyonu fazla olan örnek grubu büyütülmüş (N_1, N_2, N_3, N_4 ve N_5) ve tüm örneklerin temel büyütme parametreleri belirlenmiştir. Örneklerin doruk yerleri, x konsantrasyonu ile uyumlu olarak InAs ve InSb arasında sıralanmıştır. GaAs alttaş ile $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ arasında ($7,2\% < \Delta a/a < 14,6\%$) örgü uyumsuzluğu vardır [58-59]. Bu nedenle, Sb konsantrasyonu düşükçe kristal kalitesinin artması ve buna bağlı olarak da FWHM değerlerinin düşmesi beklenir. Fakat, birbirleriyle kıyaslanabilirlik ilişkisiyle N_1, N_2 ve N_3 örnekleri baz alınabilir. Çünkü, N_4 ve N_5 örnekleri diğer örneklerle göre farklı In akılarında büyütülmüştür ve bu da kristal kalitesini önemli ölçüde etkileyen etmenlerin başında gelir. Ayrıca, bu yapıların epikatman kalınlığı da diğerlerine göre daha fazla olması onları bu set örneklerin dışında tutmaktadır.



Şekil 5.4. GaAs alttaş üzerine büyütülmüş $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, InAs and InSb epikatman örneklerinin X-ışını spektrumları

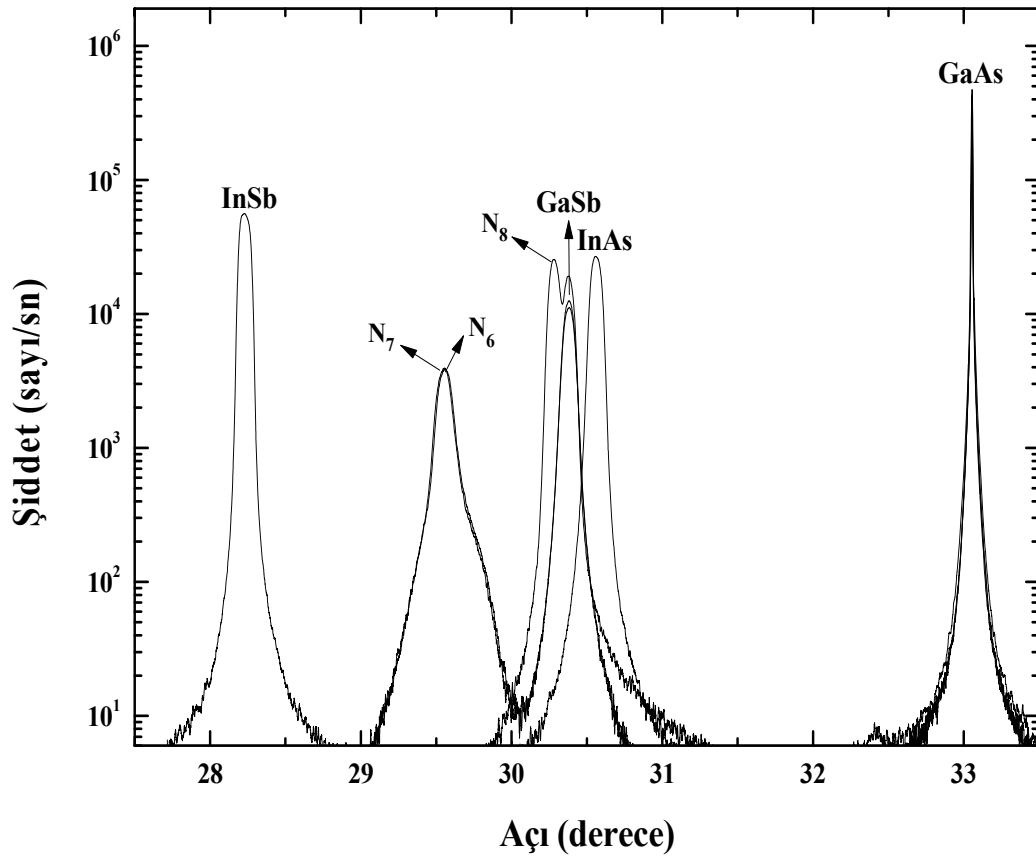
N_3 örneğinin FWHM değeri, diğer iki örneğe göre daha düşük bir değerde olması beklenir. Fakat, kalınlığının diğerlerine göre daha az olması nedeniyle FWHM değeri N_2 'ye göre daha yüksektir. Örnekler aynı kalınlıklarda olsaydı FWHM değeri N_2 'nin FWHM değerinden daha düşük olurdu. Örneklerin istenilen konsantrasyonda büyütülmesi adına her bir örnek farklı akılarda büyütülmüştür. Tablo 5.3'de görüldüğü gibi, V/III oranları farklı N_4 ve N_5 örnekler ise kendi aralarında kıyaslandığında Sb konsantrasyonu en az olan N_5 FWHM değeri en düşüktür. Beklendiği gibi N_5 örneğinin kristal kalitesinin N_4 'den daha iyi durumda olduğunu göstermektedir.

Tablo 5.3. As konsantrasyonları fazla olan $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ bileşiklerin temel büyütme değişkenleri

Örnek Numaraları	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5
$\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ Büyüme Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	450	450	450	450	450
$\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ Doruk Yerleri (Açıderece)	29,49	29,63	29,78	30,20	30,28
Sb Konsantrasyonu	0,48	0,42	0,35	0,17	0,13
$\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ FWHM Değerleri (Açısanıye)	366	330,9	349,7	372,6	369,9
$\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ Kalınlıkları (nm)	550	527	518	657	640
$\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ Büyüme Zamanı (dk)	100	100	100	100	100
$\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ Büyüme Zamanı (dk)	100	100	100	100	100

Şekil 5.5'de N_4 ve N_5 ile aynı In sıcaklıklarına sahip N_6 , N_7 ve N_8 olmak üzere üç tane GaSb geçiş katmanlı $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ örneklerinin X-ışını spektrumları verilmiştir. N_6 ve N_7 'nin Sb konsantrasyonları birbirine çok yakın olduğu için çakışık bir şekilde görülmektedir. Bunun temel nedeni, Sb akısının zamanla azalmasından kaynaklanmaktadır. N_6 örneğinin As ve Sb vana açıklıkları sırasıyla 100 ve 90 iken, N_7 örneğinde ise bu açıklıklar sırasıyla 100 ve 95'dir. Sb akısının zamanla azalması, vana açıklıkları arasındaki akı farkını zamanla kapatmış olup,

örnekler neredeyse aynı konsantrasyonda büyüyecek duruma gelmişlerdir. N₆ ve N₇ örneklerinin ana doruklarının sağında omuzlar bulunmaktadır ve örneklerin çift konsantrasyonlu büyüme eğiliminde olduğunu göstermektedir. N₈ örneği, GaSb doruğu ile bitişik olarak çıkmıştır. Bunun nedeni, InAs_{1-x}Sb_x örneğinin x=0,13 konsantrasyonundan doruk yerinin GaSb doruk yerine yakın olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.5. GaAs alttaş üzerine GaSb geçiş katman ile büyütülmüş InAs_{1-x}Sb_x örnekler ile InAs ve InSb epikatman örneklerinin X-ışını ışını spektrumları

N₆ ve N₇ örnekleri için, GaSb geçiş katmanı (1:20) III:V oranında büyütülmüştür. Fakat, zamanla Sb akısının azalmasından dolayı muhtemel III:V oranı 1:20'den daha az olduğu düşünülmektedir. Tablo 5.4'deki N₆, N₇ ve N₈ örnekleri için GaSb geçiş katmanının FWHM değerleri sırasıyla 295, 302,5 ve 263,6 açısanıye'dir. Bu değerler, GaAs alttaş üzerine GaSb epikatman yapıları için

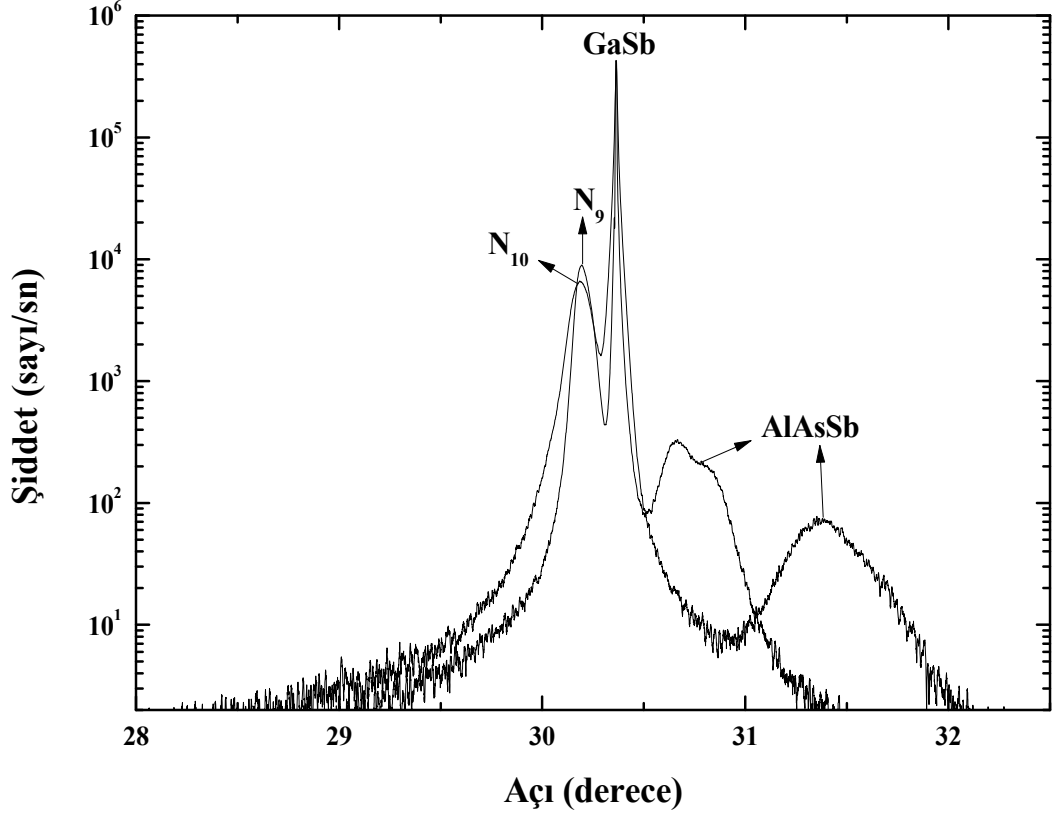
özellikle ~350 nm'lik kalınlıklarda literatür ile uyumludur [63]. GaSb geçiş katmanı, InAsSb katmanına rahat bir geçiş sağlamıştır. FWHM değerleri çıkan omuzlara rağmen gayet iyi değerlerdedir [59-61]. N₆ ve N₇ örnekleri için bulunan FWHM değerleri sırasıyla 413,4 ve 400,9 açısanıye'dir. N₈ örneğinde ise GaSb doruğu ile neredeyse içe içe olması nedeniyle ters evrişim (deconvolution) yapılarak doruklar ayrıştırılmış ve InAsSb katmanının FWHM değeri 301 açısanıye elde edilmiştir.

Tablo 5.4. GaSb geçiş katmanlı InAs_{1-x}Sb_x örneklerinin temel büyüme parametreleri

Örnek Numaraları	N ₆	N ₇	N ₈
InAs _{1-x} Sb _x Büyüme Sıcaklığı (°C)	450	450	450
Sb Konsantrasyonu	0,47	0,46	0,13
InAs _{1-x} Sb _x FWHM Değeri (Açısanıye)	413,4	400,9	301
InAs _{1-x} Sb _x Kalınlığı (nm)	546	538	597
InAs _{1-x} Sb _x Büyüme Zamanı (dk)	100	100	100
GaSb Büyüme Sıcaklığı (°C)	495	495	495
GaSb FWHM Değeri (Açısanıye)	295	302,5	263,6
GaSb Kalınlığı (nm)	333	334	302
GaSb Büyüme Zamanı (dk)	60	60	60

InAsSb-tabanlı nBn kızılötesi dedektör yapısını büyütmeden önce AlAsSb'nin konsantrasyon ve büyüme oranını belirlemek için N₉ ve N₁₀ örnekleri büyütülmüştür. InAs_{1-x}Sb_x konsantrasyonları Şekil 5.6'da verilen X-ışını spektrumları ile belirlenmiştir. N₉ ve N₁₀ örnekleri, InAs_{1-x}Sb_x katmanı için aynı x konsantrasyonuna sahip olarak büyütülmüş olup, AlAs_{1-x}Sb_x katmanları farklı konsantrasyonlarında büyütülmüştür (Tablo 5.5). N₁₀ örneğinin büyütme sırasında

Sb akısının zamanla değişmesinden dolayı, doruk yerinden kayma olduğu tespit edilmiş ve çift konsantrasyonda büyüme eğilimi olduğu gözlenmiştir.



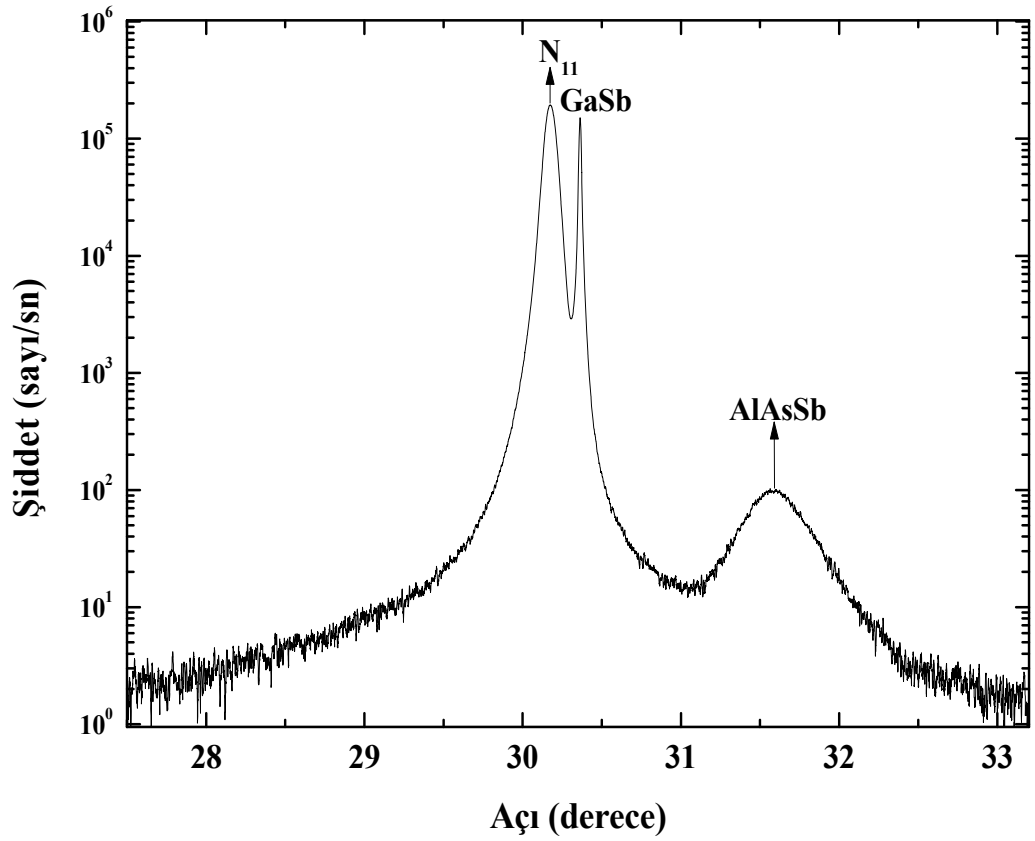
Şekil 5.6. GaSb alttaş üzerine büyütülmüş $AlAs_{1-x}Sb_x$ ve $InAs_{1-x}Sb_x$ örneklerinin X-ışını spektrumları

Tablo 5.5’de görüldüğü gibi $InAs_{1-x}Sb_x$ örneklerinin FWHM değerleri bu kalınlıklara göre oldukça makul değerlerdir. $AlAs_{1-x}Sb_x$ örneklerinde büyüme oranı ve konsantrasyon hakkında bilgi edinilmiştir. N₉ örneğinin FWHM değeri 902,6 açısanıye olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.5. InAs_{1-x}Sb_x / AlAs_{1-x}Sb_x çoklu katman örneklerinin temel büyütme parametreleri

Örnek Numaraları	N ₉	N ₁₀
InAs _{1-x} Sb _x Büyüme Sıcaklığı (°C)	450	450
InAs _{1-x} Sb _x Sb Konsantrasyonu	0,12	0,12
InAs _{1-x} Sb _x FWHM Değeri (Açı saniye)	384,5	259,4
InAs _{1-x} Sb _x Kalınlığı (nm)	298	238
InAs _{1-x} Sb _x Büyüme Zamanı (dk)	50	45
AlAs _{1-x} Sb _x Büyüme Sıcaklığı (°C)	460-465	460-465
AlAs _{1-x} Sb _x Sb Konsantrasyonu	0,54	0,77
AlAs _{1-x} Sb _x FWHM Değeri (Açı saniye)	902,6	-
AlAs _{1-x} Sb _x Kalınlığı (nm)	179	221
AlAs _{1-x} Sb _x Büyüme Zamanı (dk)	45	45

InAsSb-tabanlı nBn kızılötesi dedektör yapısı (N₁₁), N₉ ve N₁₀ örneklerinin temel büyütme parametreleri baz alınarak GaSb alıtış üzerine büyütülmüş ve yapının X-ışını spektrumu Şekil 5.7’de verilmiştir. Ayrıca, Tablo 5.6’da yapının temel büyüme parametreleri verilmiştir. GaSb ile InAs_{1-x}Sb_x katmanlarının dorukları birbirinden tam olarak ayrılmamasına rağmen InAsSb’nin FWHM değeri 276 açı saniye olarak belirlenmiştir. Bu değer, literatürdekilerle karşılaştırıldığında oldukça iyi bir değerdir ve yapının yüksek kalitede büyütüldüğünün göstergesidir [59-61]. AlAsSb’nin kalınlık hedefi, N₉ ve N₁₀ örneklerine bakılarak yapılmıştır ve kalınlık 100 nm olarak hedeflenmiştir. Fakat, taramalı elektron mikroskopunda N₁₁ örneğine yan-kesit olarak bakıldığında bunun 54 nm’de kaldığı gözlemlenmiş ve 54 nm’lik kalınlığa rağmen FWHM değeri 699,2 açı saniye olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.7. GaSb alttaş üzerine büyütülmüş nBn (Bariod) kızılötesi dedektör yapısının X-ışını spektrumu

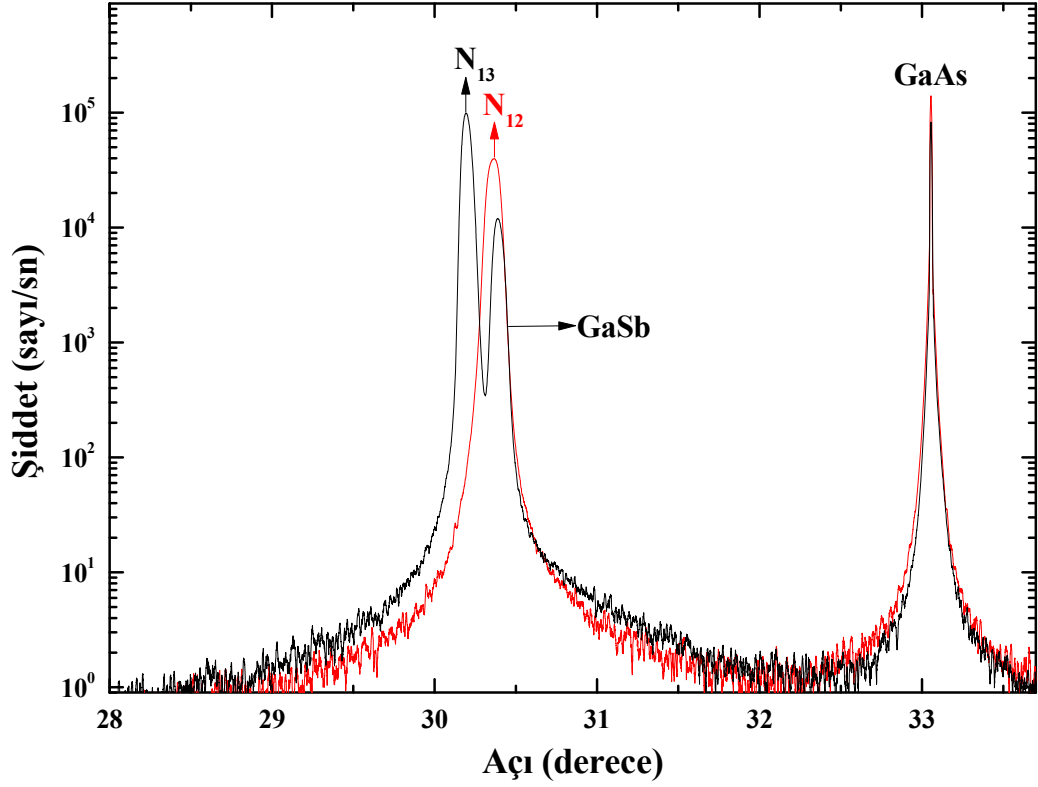
Tablo 5.6. InAs_{1-x}Sb_x-tabanlı nBn kızılötesi dedektör yapısı temel büyüme parametreleri

Örnek Numarası	N ₁₁
InAs _{1-x} Sb _x Büyüme Sıcaklığı (°C)	450
InAs _{1-x} Sb _x Sb Konsantrasyonu	0,12
InAs _{1-x} Sb _x FWHM Değeri (Açı saniye)	276
InAs _{1-x} Sb _x Kalınlığı (nm)	3500
InAs _{1-x} Sb _x Büyüme Zamanı (dk)	578
AlAs _{1-x} Sb _x Büyüme Sıcaklığı (°C)	467-470
AlAs _{1-x} Sb _x Sb Konsantrasyonu	0,47
AlAs _{1-x} Sb _x FWHM Değeri (Açı saniye)	699,2
AlAs _{1-x} Sb _x Kalınlığı (nm)	54
AlAs _{1-x} Sb _x Büyüme Zamanı (dk)	15

InAs_{1-x}Sb_x foto-algılayıcı yapıları, GaAs alttaş üzerine GaAs düzeltme katmanlı ve GaAs düzeltme/GaSb geçiş katmanlı olarak büyütülmüştür. N₁₂ ve N₁₃'ün X-ışını spektrumu Şekil 5.8'de verilmiş olup, örneklerin temel büyütme değişkenleri Tablo 5.7'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Örneklerin konsantrasyonları, X-ışını sallantı eğrisi ölçümleri ile belirlendi. Bu sonuçlara göre, N₁₂ örneği InAs_{0,90}Sb_{0,10}, N₁₃ örneği ise InAs_{0,83}Sb_{0,17} konsantrasyona sahip olduğu saptandı. Tablo 5.7'den görüldüğü gibi N₁₃ foto-algılayıcı yapısının As konsantrasyonu N₁₂ örneğine göre daha düşük olmasına rağmen kristal kalitesi daha iyi olduğu sonucuna ulaşıldı. Çünkü, N₁₃ örneğinin FWHM değeri N₁₂'ye göre daha düşük değere sahiptir ve bu da kristal yapısının daha iyi olduğunun göstergesidir. Kristal yapının iyileşmesindeki en önemli etken GaSb geçiş katmanı tabakasıdır. GaAs ile GaSb arasındaki örgü uyumu, InAs_{1-x}Sb_x'ye göre çok daha iyidir. GaAs alttaş üzerine GaSb geçiş katmanı büyütülmesi, InAs_{1-x}Sb_x yapısına geçişte yapıda oluşan zoru (stress) azaltmış ve daha rahat bir geçiş yapmayı sağlamıştır. Yapının yüksek kalitede kristal olarak büyümesi de As konsantrasyonundaki azlığa rağmen FWHM değerinde yaklaşık olarak 100 açısaniye iyileşme sağlamıştır (Tablo 5.7).

Tablo 5.7. N₁₂ ve N₁₃ foto-algılayıcı yapılarının temel büyütme değişkenleri

Örnek Numaraları	N ₁₂	N ₁₃
InAs _{1-x} Sb _x Büyüme Sıcaklığı (°C)	450	450
Sb Konsantrasyonu	0,10	0,17
InAs _{1-x} Sb _x FWHM Değeri (Açısaniye)	318,4	215
InAs _{1-x} Sb _x Kalınlığı (nm)	3332	3350
InAs _{1-x} Sb _x Büyüme Zamanı (dk)	430	430
GaSb Büyüme Sıcaklığı (°C)	-	498
GaSb FWHM Değeri (Açısaniye)	-	238
GaSb Kalınlığı (nm)	-	1347
GaSb Büyüme Zamanı (dk)	-	120



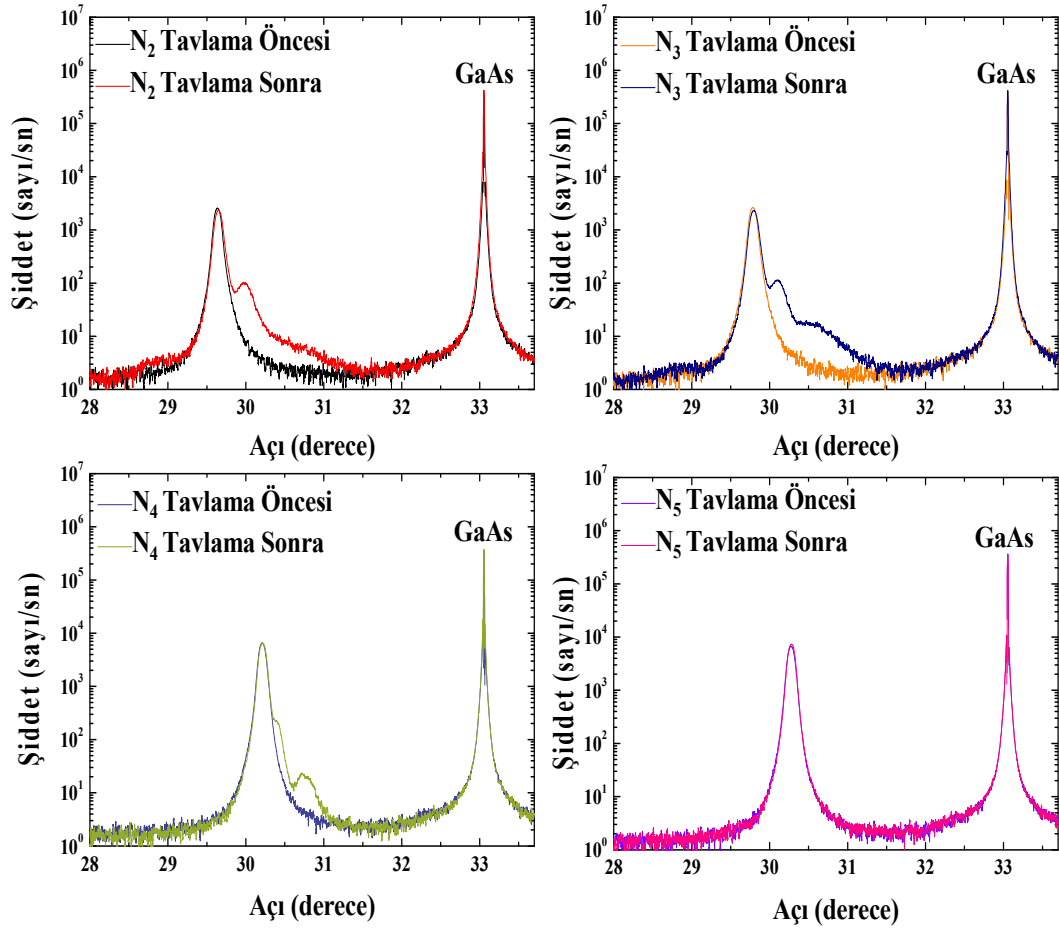
Şekil 5.8. GaAs alttaş üzerine büyütülmüş $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ foto-algılayıcı yapılarının X-ışını spektrumları

5.3. Tavlamanın InAsSb Epikatmanlara Etkileri

Büyütme tekniklerinde, alttaş ile yapı arasındaki örgü uyumsuzluğunun fazla olduğu durumlarda üçlü ve dörtlü bileşiklerin büyütmesi oldukça zor bir iştir. Çünkü, büyütme sırasında örneğin ısınması, akı oranlarının kontrolü gibi etmenler konsantrasyon kontrolünü güçleştirmektedir. Örneklerin istenilen konsantrasyonda büyütülmesi ve çift bant algılama yapabilecek fotodiyot geliştirebilme hedefi, araştırmacıları bu konuda çözüm aramaya itmiştir. Bu nedenle, $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ örneklerinin tavlama yoluyla konsantrasyonlarının değiştirmesi ve iki veya daha fazla bantta algılama yapabilecek fotodiyot üretilmesi hedeflenmiştir. Tavlama etkisini gözlemleyebilmek ve sonuçlarını inceleyebilmek amacıyla örneklerden kesilen küçük parçalar, çabuk ısıl tavlama (Rapid Thermal Annealing, RTA) işlemine tabi tutulmuştur. Yukarıda büyüme verileri verilen örneklerden seçilerek farklı sürelerde yapılan tavlama etkisi HRXRD ölçümleri ile incelenmiştir. Bütün örneklerin ilk olarak HRXRD sallantı

eğrisi ölçümü alınmış ve ardından belirlenen sürelerde RTA'da tavlansak tekrar HRXRD ölçümleri alınarak karşılaştırılmıştır. Bu ölçümler için özellikle farklı konsantrasyondaki örnekler seçilmiştir.

$\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ örneklerinin büyüme sıcaklığı yaklaşık olarak 450 °C'dir. Örnekler, büyüme sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklık olan 500 °C'de tavlansak zayıf bağların koparılıp, konsantrasyonda bir değişime yol açması ve yapıların kristal kalitesinde iyileşmelerin olması amaçlanmıştır. Bu bağlamda, tavlama öncesinde N₂, N₃, N₄ ve N₅ örneklerinden kesilen parçaların tavlama öncesi ve sonrası X-ışını spektrumları alınmış, ölçüm tutarlılığının sağlanması adına her ölçümde GaAs altaş referans örneği de bu ölçümlere eklenmiştir. Örnekler ilk olarak 500 °C'de 5 dakika tavlansak (Şekil 5.9). Tavlama sonucunda, bazı örneklerin yüzeyinde hafif şekilde karartılar ve kirlilikler meydana gelmiştir. Ayrıca, N₂, N₃ ve N₄ örneklerinin X-ışını spektrumlarında omuzlar oluşmuş, N₅'de ise herhangi bir değişiklik olmamıştır. Temel değişkenler hakkındaki bilgi Tablo 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.9. GaAs alttaş üzerine büyütülen N₂, N₃, N₄ ve N₅ örneklerinin tavlama öncesi ve 500 °C'de 5 dk tavlama sonrası X-ışını spektrumları

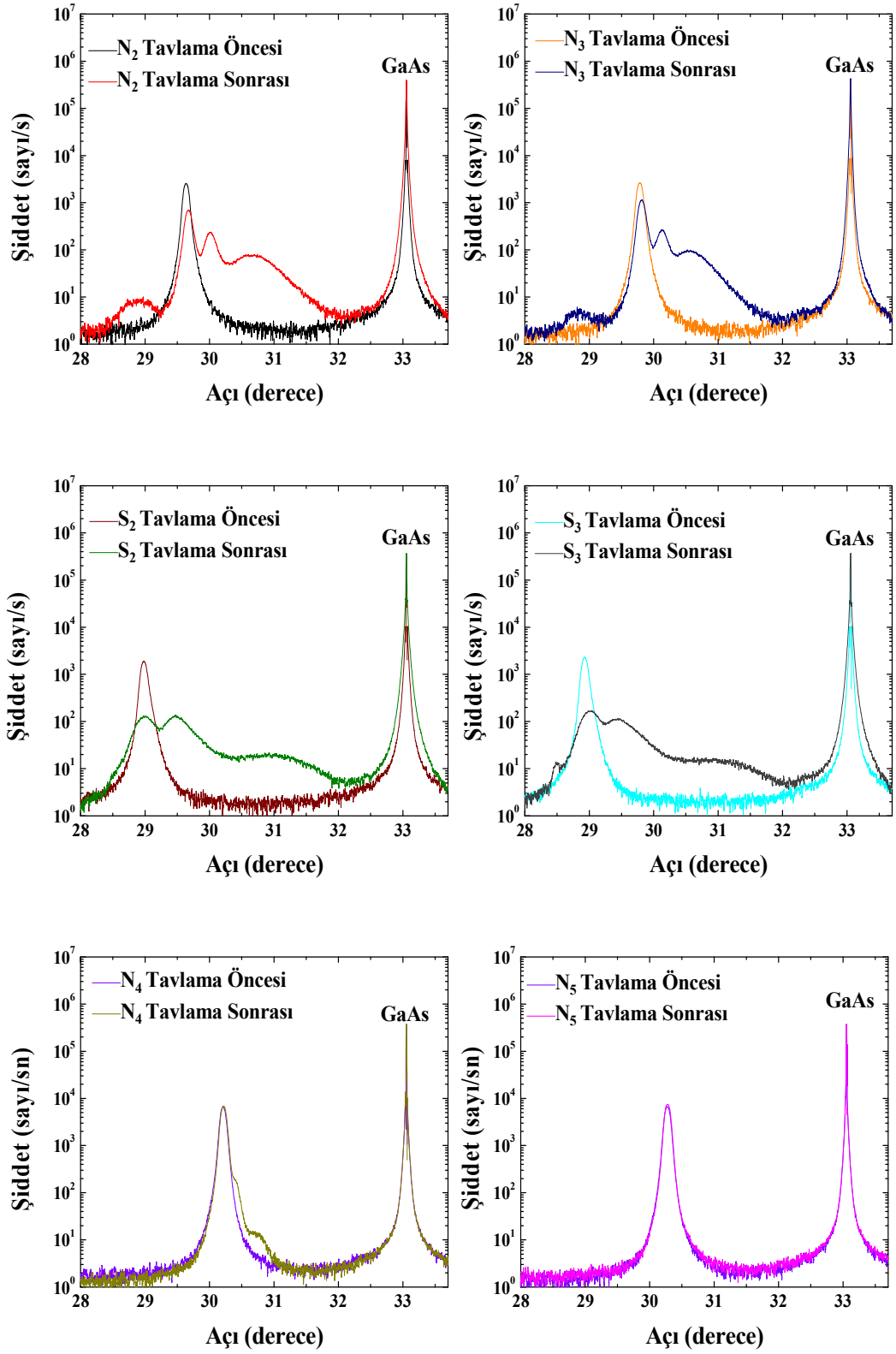
Tablo 5.8. InAs_{1-x}Sb_x örneklerinin tavlama öncesi ve sonrası temel değişkenleri

Örnek	K _{Sb}	Tavlama Öncesi		Tavlama Sonrası	
		FWHM (Açı saniye)		FWHM (Açı saniye)	
		GaAs	InAs _{1-x} Sb _x	GaAs	InAs _{1-x} Sb _x
N ₂	0,42	10,2	355,9	19,2	375,1
N ₃	0,35	9,9	388,0	17,9	400,4
N ₄	0,17	10,1	364,6	11,9	369,6
N ₅	0,13	10,3	375,2	10,3	364,8

İlk bakışta, tavlama ile N₂, N₃ ve N₄ örneklerinden Sb bağları koparak InAs'e doğru kayma eğilimi olduğu gözlemlenmiştir. Fakat, çıkan omuzların Sb bağlarının kopması sonucunda yeni oluşan InAs_{1-x}Sb_x kristal yapıdan kaynaklandığı, sadece yüksek ısı ile birlikte oluşmuş olan oksit tabakası veya başka bir yapının olup olmadığını kestirebilmek oldukça güçtür. N₂ örneğindeki mevcut omuz sayısı bir belirgin, bir de zayıf iken, bu durum N₃ ve N₄ örneklerinde iki belirgin omuz halini almıştır. Ana yapı ile birlikte GaAs FWHM değerlerinin yükselmesi, kristal yapının bozulma eğiliminde olması kanısını kuvvetlendirmektedir. Sb konsantrasyonu en az örnek olan N₅'de ise durum biraz farklıdır. Tavlama öncesi 375,2 açısaniye olan N₅ örneğinin FWHM değeri, tavlama sonrası 364,8 açısaniye değerine düşmüştür. Bu değer farkı küçük sayılabilecek bir değer farkıdır. Fakat, GaAs alttaşın FWHM değerinde yükselme olmaması (kristal yapısını koruması), InAs_{1-x}Sb_x yapısının daha iyi bir kristal yapıya sahip olduğunu söyleyebilmeyi güç kılmaktadır. Bu durumların teyidini yapmak amacıyla bu örnek setine Sb konsantrasyonu yüksek olan S₂ ve S₃ örnek grupları dahil edilip tavlama süresi 30 dk'ya çıkartılarak X-ışını spektrumları ölçümleri tekrarlanmıştır (Şekil 5.10). Tavlama öncesi ve sonrasında örneklerden elde edilen temel değişkenler Tablo 5.9'de verilmiştir.

Tablo 5.9. N₂, N₃, N₄, N₅, S₂ ve S₃ örneklerinin tavlama öncesi ve sonrası temel değişkenleri

Örnek	K _{Sb}	Tavlama Öncesi FWHM (açısaniye)		Tavlama Sonrası FWHM (açısaniye)	
		GaAs	InAs _{1-x} Sb _x	GaAs	InAs _{1-x} Sb _x
S ₂	0,76	9,6	406,2	16,1	1058,4
S ₃	0,73	10,7	389,3	15,7	966,2
N ₂	0,42	10,2	355,9	22,9	403,7
N ₃	0,35	9,9	388,0	28,9	427,5
N ₄	0,17	10,1	364,6	11,9	376,8
N ₅	0,13	10,3	375,2	10,3	368,6



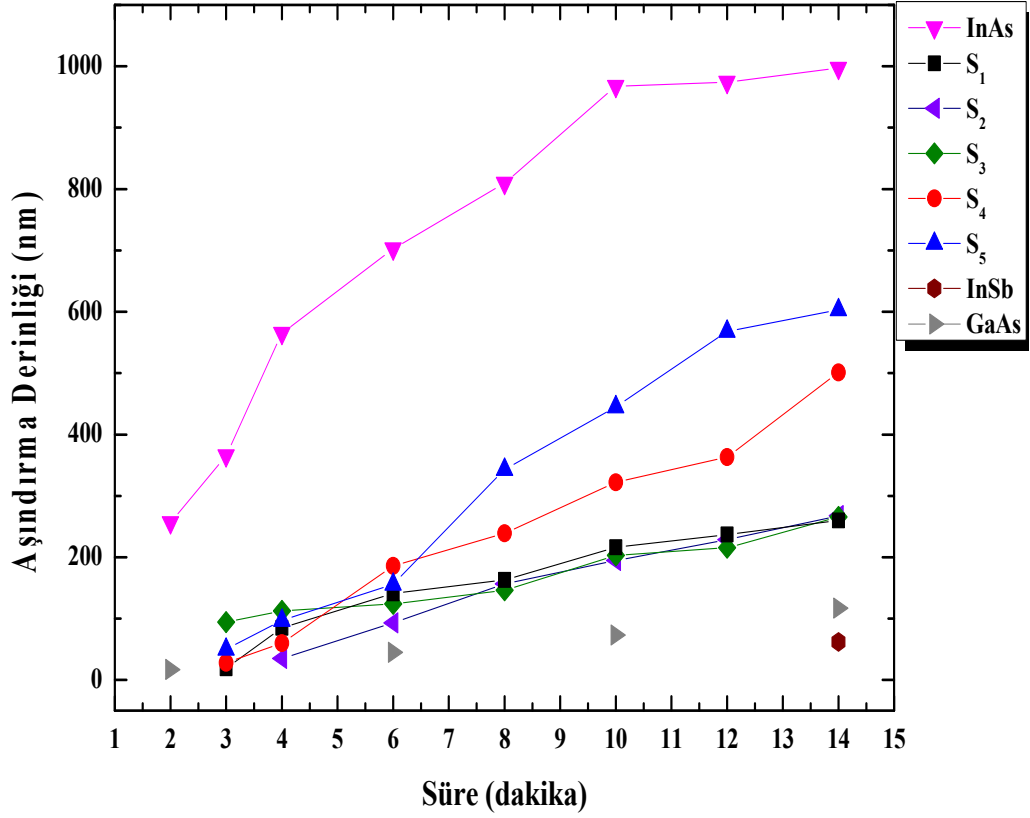
Şekil 5.10. GaAs alttaş üzerine büyütülen N_2 , N_3 , N_4 , N_5 , S_2 ve S_3 örneklerinin tavlama öncesi ve 500 °C’de 30 dk tavlama sonrası X-ışını spektrumları

30 dk tavlanan tüm örneklerin yüzeylerinde kararmalar daha artmış olup, örnek yüzeyindeki kusurlar gözle görülür hale gelmiştir. Özellikle N₂, N₃, S₂ ve S₃ örneklerinin yüzeyinde kararmaların yanı sıra, yüzeyin farklı yerlerinde sarı, yeşil ve mavi renkler oluşmuş ve bunun yanı sıra gözle görülebilecek düzeyde kusurlar meydana gelmiştir. Bu kararma ve kusurlardan en az etkilenen N₅ örneği olmuştur.

Tablo 5.9’da görüldüğü gibi, örneklere verilen enerji ile Sb bağları kopartılmış, özellikle Sb konsantrasyonu yüksek olan örneklerde FWHM değerleri artmış ve buna bağlı olarak kristal kalitesinde bozulmalara yol açmıştır. Bu bozulmalar, Sb konsantrasyonu ile ilişkili olup, örneklerin FWHM değerlerinde değişim konsantrasyon bağımlı olarak ortaya çıkmıştır. As konsantrasyonu arttıkça tavlama öncesi ve tavlama sonrası FWHM değerleri arasındaki fark giderek azalmış ve hatta N₅ örneğinde tavlama öncesi değerden daha düşük bir değer elde edilmiştir.

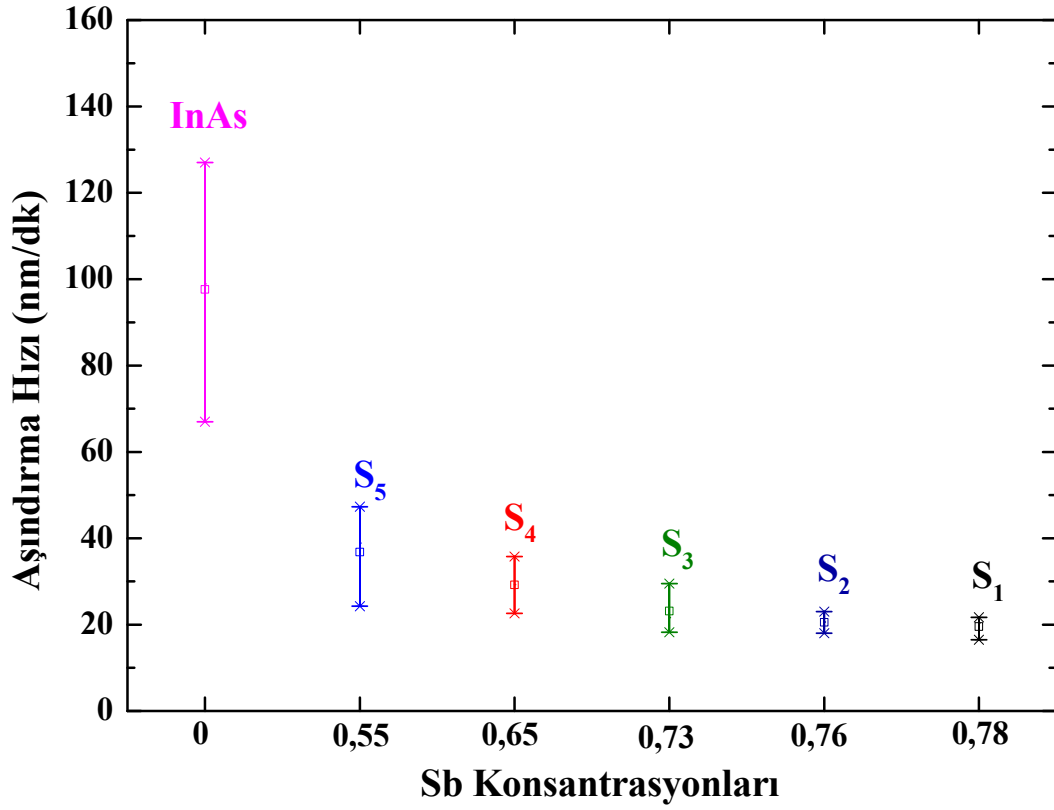
5.4. InAs_{1-x}Sb_x Yapılarının Aşındırma Derinliklerinin Belirlenmesi ve Fabrikasyon Süreci

InAsSb ile GaAs arasındaki seçici aşındırma özelliğine sahip sitrik asit, pürüzsüz ve düzgün yüzeyler elde etmede yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, diğer çözeltilere göre fotoreziste daha az etki etme özelliğine sahiptir. InAsSb epikatman örneklerini aşındırmak amacıyla organik bir asit olan sitrik asit çözeltisi kullanılmıştır. C₆H₈O₇:H₂O:H₂O₂ (60:60:60 ml) oranında bir sitrik asit çözeltisi hazırlanmış ve çözeltinin 25 dk kararlı hale gelmesi beklenmiştir (çözelti sıcaklığı 19 °C). Şekil 5.11’de görüldüğü gibi her bir numuneden 8 adet kesilerek aynı anda çözeltiliye koyulmuş ve farklı sürelerde çıkarılarak aşındırma derinlikleri ve hızları hakkında bilgi edinilmiştir. Ayrıca, GaAs referans örneği kullanılarak çözeltinin kararlılığı hakkında bilgi sağlanmıştır.



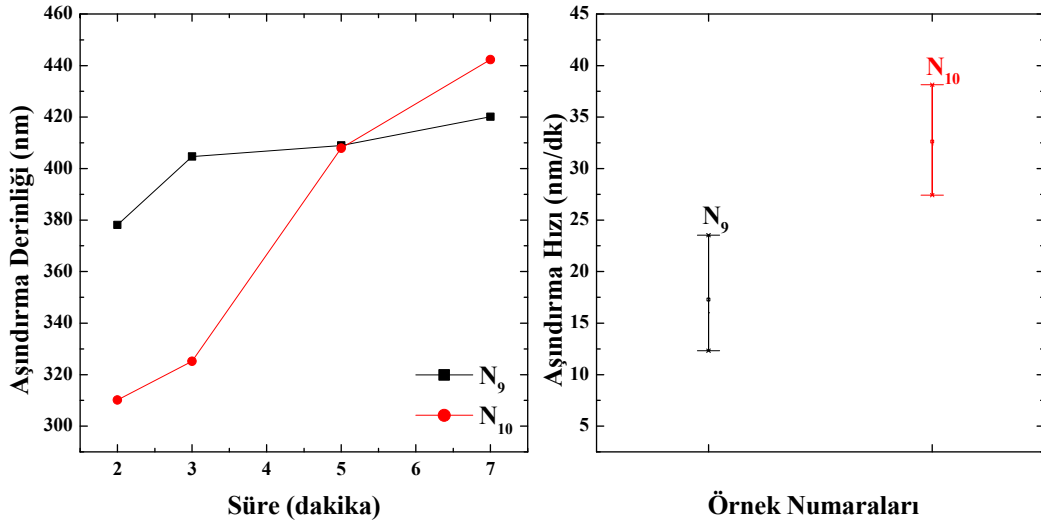
Şekil 5.11. Farklı konsantrasyonlardaki InAs_{1-x}Sb_x örneklerinin aşındırma derinlikleri

Sitrik asit çözeltisinin InAs'ı 14 dk'da ~1000 nm aşındırdığı, InSb'ı ise 14 dk'da sadece ~62 nm aşındırdığı gözlenmiştir. InAs_{1-x}Sb_x örneklerinde bu durum, Sb konsantrasyonuna uyumlu bir şekilde aşındırma hızlarının değiştiği görülmüştür. Fakat, S₃ örneğinde 3. ve 4. dakikalarda bir sapma olduğu saptanmıştır. Bu sapmanın nedeni olarak, örnek yüzeyindeki bir kusurdan kaynaklandığını düşünülmektedir. Ayrıca, çözelti tutarlılığını test etmek ve InAsSb katmanı ile seçici aşındırma özelliği olduğunu doğrulamak için örneklerle beraber çözeltiye konulan GaAs örneği, 14 dk'da 117 nm aşındırıldığı gözlemlenmiştir. Şekil 5.12'de, CA çözeltisinde InAs yaklaşık olarak dakikada 98 ± 30 nm, S₅ 43 ± 23 nm, S₄ 30 ± 12 nm, S₃ 21 ± 12 nm, S₂ 19 ± 4 nm ve S₁ 17 ± 5 nm aşındırma hızlarına sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 5.12. Farklı konsantrasyonlardaki InAs_{1-x}Sb_x örneklerinin aşındırma hızları

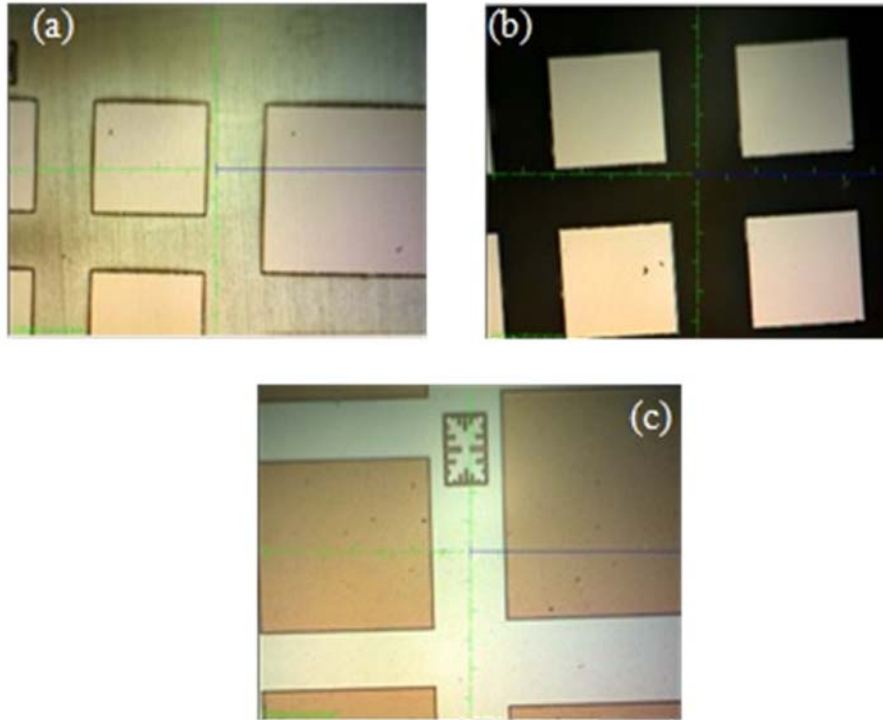
InAsSb-tabanlı nBn (Bariod) kızılötesi dedektör yapısının fabrikasyonunda HCl ve CA olmak üzere iki adet asit kullanılmıştır. Bu yapıda bulunan AlAsSb ve GaSb katmanlarının HCl asitteki aşındırma oranları bilinmediği için N₉ ve N₁₀ örnekleri için HCl asit aşındırma oranı belirlenmesi hedeflenmiştir. N₉ ve N₁₀ örneklerinden 5x5 mm²'lik dörder tane kesilmiş ve 100 ml HCl: 1 ml H₂O₂ : 100 ml H₂O ile HCl asit çözeltisi hazırlanmıştır. Çözeltinin kararlı hale gelmesi için 30 dakika beklenmiştir (çözelti sıcaklığı 21 °C). Her bir numuneden alınan parçalar aynı anda çözeltilmeye daldırılmış ve farklı sürelerde çıkarılarak aşındırma derinlikleri hakkında bilgi edinilmiştir (Şekil 5.13). Aşındırma derinliği belirleme işlemi aynı koşullarda üç kez tekrarlanarak, elde edilen verilerin ortalaması alınarak belirlenmiştir.



Şekil 5.13. HCl asit çözeltisi için N₉ ve N₁₀ numunelerinin aşındırma derinlikleri ve InAsSb aşındırma hızları

HCl asit izotropik olmayan son derece güçlü asitlerin başında gelmektedir. Aşındırma sırasında örnek yüzeyinde kararmalar, kirlilik ve tahribat meydana gelebilmektedir. Oliver Dier ve ark. [64], AlAs_{1-x}Sb_x, GaSb ve InAs_{1-x}Sb_x yapılarının aşındırma hızlarını sırasıyla 14 ile 25 nm arasında değişen hata payları ile dakikada yaklaşık olarak 1371, 281 ve 50 nm olarak saptamışlardır. N₉ ve N₁₀ örneklerinin AlAsSb kalınlıkları 179 ve 221 nm olduğunu göz önüne alınırsa, dakikada 1371 nm aşındırma hızına sahip HCl asit çözeltisi için elimizdeki örneklerin AlAsSb'nin aşındırma hızını belirlemek mümkün olmamıştır. N₁₀ örneğinin AlAsSb kalınlığı, N₉ örneğinde daha fazla olduğu için ilk iki dakikada daha fazla aşındırılmış olması ve daha sonra aşınma hızı giderek yavaşlaması beklenmektedir. Fakat, Şekil 5.13'de görüldüğü gibi bu durumun tam aksi bir durum ortaya çıkmıştır. Yapılan üç tekrar sonucunda, yaklaşık aynı değerlerin elde edilmesi N₁₀ örneğinde aşınmayı engelleyici bir yapı kusurunun olduğunu öne çıkarmaktadır. Çünkü, 3. ve 5. dakikalar arasında bu engelin aşılar aşınmaya devam edildiği gözlemlenmiştir. Her iki örnek için de yavaşlamanın nedeni olarak yapı içerisindeki kusur ve kirliliğin etkin olduğu düşünülmektedir. Yapı, GaSb alttaş üzerine InAsSb/AlAsSb çoklu eklemi ve en üst tabakada GaSb şapka olarak büyütülmüştür. Çözeltinin ilk olarak temas ettiği yüzey GaSb ve AlAsSb katmanlarıdır. N₉ ve N₁₀ örnekleri için bu katmanların kalınlıkları toplamı

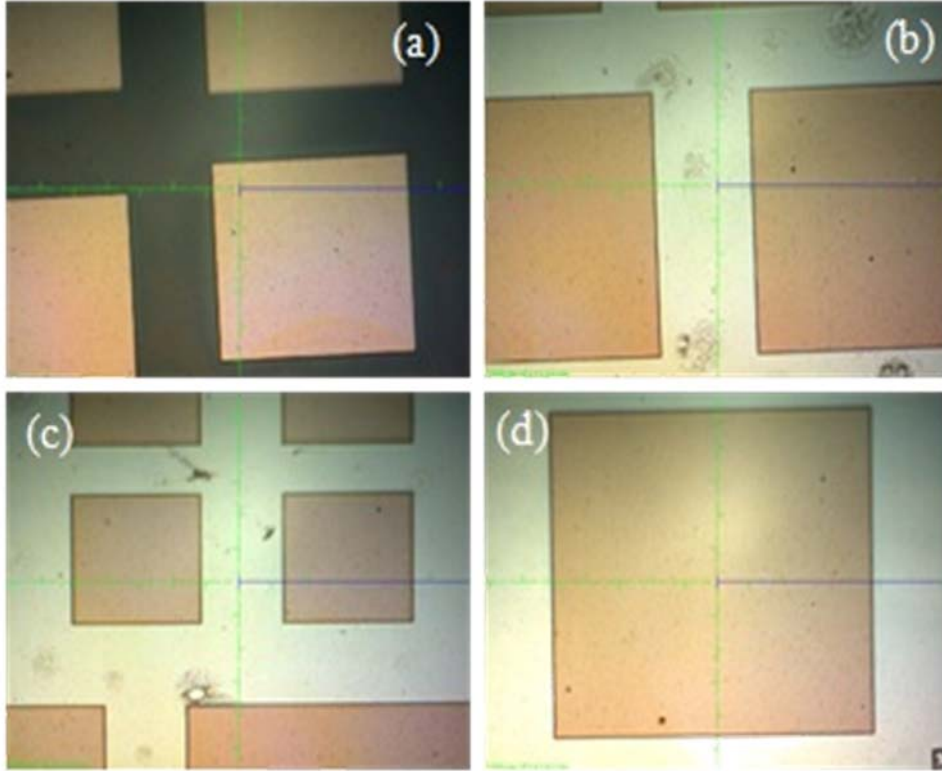
sırasıyla 204 ve 246 nm'dir. İki dakikalık süreçte bu iki katmanı geçip InAsSb tabakasına indiği gözlemlenmiştir. InAsSb tabakası yaklaşık olarak dakikada 50 nm hızla aşındırması beklenmektedir [64]. Fakat, yapılan ölçümler neticesinde her iki örnek için de aynı konsantrasyona sahip InAsSb katmanına geçildikten sonra aşındırma hızlarının farklı olduğu ve hatta bazı yerlerde durduğu gözlenmiştir. Bu da yapıda aşınmayı engelleyici bazı etmenler olduğunu açık bir şekilde göstermektedir. Şekil 5.14'de görüldüğü gibi özellikle üçüncü dakikadan sonra örneklerin yüzeylerinde kendiliğinden oluşan kararmalar ve çizikler bunu destekler niteliktedir.



Şekil 5.14. a-) N_9 örneğinin 3. dakikadaki mesa görüntüsü b-) N_{10} örneğinin 3. dakikadaki mesa görüntüsü c-) İdeal bir ıslak aşındırma için olması gereken mesa görüntüsü (GaAs alttaş)

InAsSb nBn dedektör yapısının (N_{11}) fabrikasyon sürecinde HCl ve CA çözeltileri kullanılarak yaklaşık 2,7 μm aşındırılmış ve alt kontak tabakasına inilmiştir. Bariyer tabakası AlAsSb'ye gelindiğinde N_9 ve N_{10} örneklerinde olduğu gibi HCl asit çözeltisi kullanılmış, örnek yüzeyinde kararmalar ve kusurlar

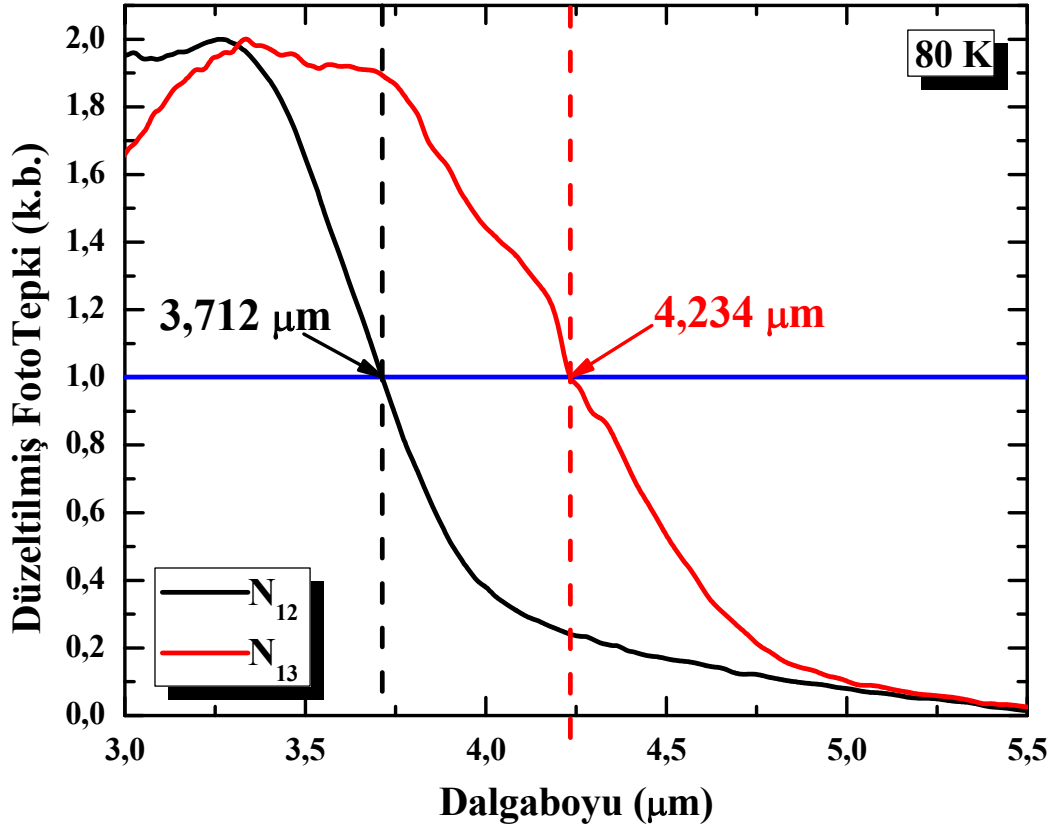
oluşmuştur. Ardından, CA asit ile aşındırmaya devam edildiğinde kararmalar kalkmış fakat kusurlar tamamen yok edilememiştir. Şekil 5.15’de N₁₁ örneğinin ıslak aşındırma sürecinden görüntüler sunulmuştur. Bu görüntüler, aşındırma sırasında oluşan kusurların HCl asit çözeltisinden kaynaklandığını, kusur ve karartıların bir kısmının CA ile giderildiğini göstermektedir. Ayrıca, HCl asit çözeltisinin oluşturduğu kusurların rastgele bir dağılım gösterdiği bilgisine ulaşılmaktadır. Yüzeydeki kararmaların, kimyasal tepkimenin gerçekleşmesi sırasında meydana geldiği ve aşınmanın yavaşladığı durumlarda ortaya çıktığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.15. N₁₁ örneğinin a-) AlAsSb katmanını HCl asit çözeltisi ile aşındırma b-) AlAsSb’den sonra CA ile 5 dk aşındırma c-) AlAsSb’den sonra CA ile 12 dk aşındırma d-) AlAsSb’den sonra CA ile 25 dk aşındırma sonrası mesa görüntüleri

5.5. InAsSb Foto-Algılayıcıların Tayfsal Fototepki Ölçümleri

Tayfsal fototepki ölçümleri ile $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ foto-algılayıcı yapılarının kesim dalgaboyu belirlenmiştir. 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. Şekil 5.16'da 80 K sıcaklıkta örneklerin düzeltilmiş fototepkileri ve kesim dalgaboyu değişimleri verilmiştir.

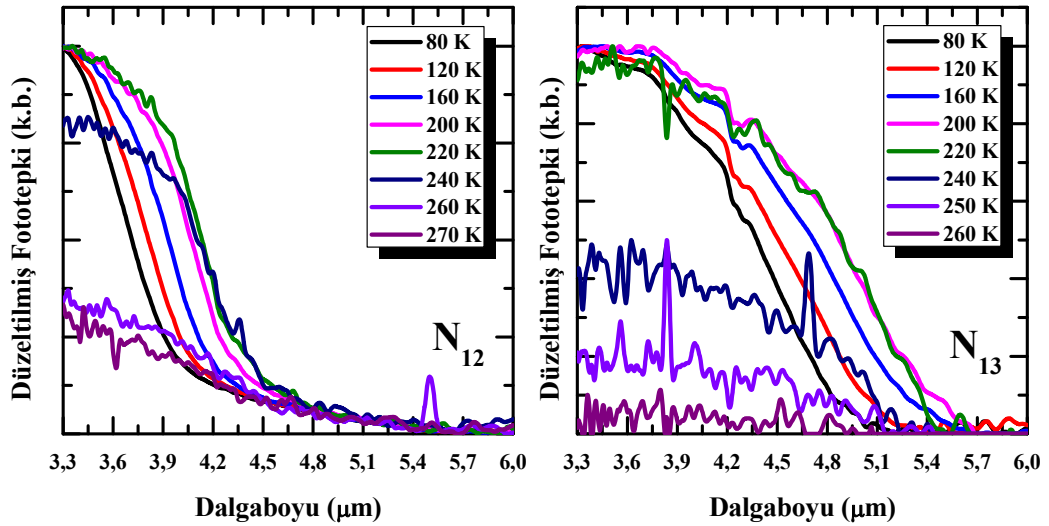


Şekil 5.16. N_{12} ve N_{13} örneklerinin 80 K sıcaklıktaki düzeltilmiş fototepkileri ve kesim dalgaboyu değişimleri (Kesikli çizgiler kesim dalgaboyunu göstermektedir)

$\text{InAs}_{0,90}\text{Sb}_{0,10}$ konsantrasyonuna sahip N_{12} örneğinin λ_{50} kesim dalgaboyu 3,712 μm iken, $\text{InAs}_{0,83}\text{Sb}_{0,17}$ konsantrasyonlu N_{13} örneğinin ise 4,234 μm 'dir. Bu değerlere göre, N_{12} ve N_{13} örneklerinin bant aralığı enerjileri sırasıyla 334 ve 292 meV değerlerine karşılık gelmektedir. Bulunan bant enerjileri, Bölüm 3, Tablo

3.1’de verilen Wieder ve Clawson’un [35] tanımlamış olduğu denklemlerle (2. ve 3. denklemler) karşılaştırıldığında, N_{12} ve N_{13} örnekleri için hesaplanan bant enerjisi değerleri sırasıyla 326 ve 278 meV’dir. Hesaplanan değerler ile ölçülen λ_{50} değerlerinin hemen hemen uyum içinde olduğu anlaşılmaktadır.

Sıcaklık bağımlı fototepki ölçümleri, diyotların çalışabilecekleri en yüksek sıcaklığın tam olarak bir göstergesi değildir. Fakat, yüksek sıcaklıklara doğru gidildiğinde optik sinyalin izlenebilirliği konusunda bilgi edinmemize yardımcı olur. Şekil 5.17’de, N_{12} ve N_{13} örneklerinin sıcaklık bağımlı fototepki ölçümleri verilmiştir. Alınan ölçümler, DLATGS algılayıcının spektrumu ile düzeltilmiş ve tüm ölçümlerde Global ışık kaynağının geçtiği aralık (aperture) sabit tutulmuştur.



Şekil 5.17. Farklı sıcaklıklarda N_{12} ve N_{13} örneklerinin fototepki değişimleri

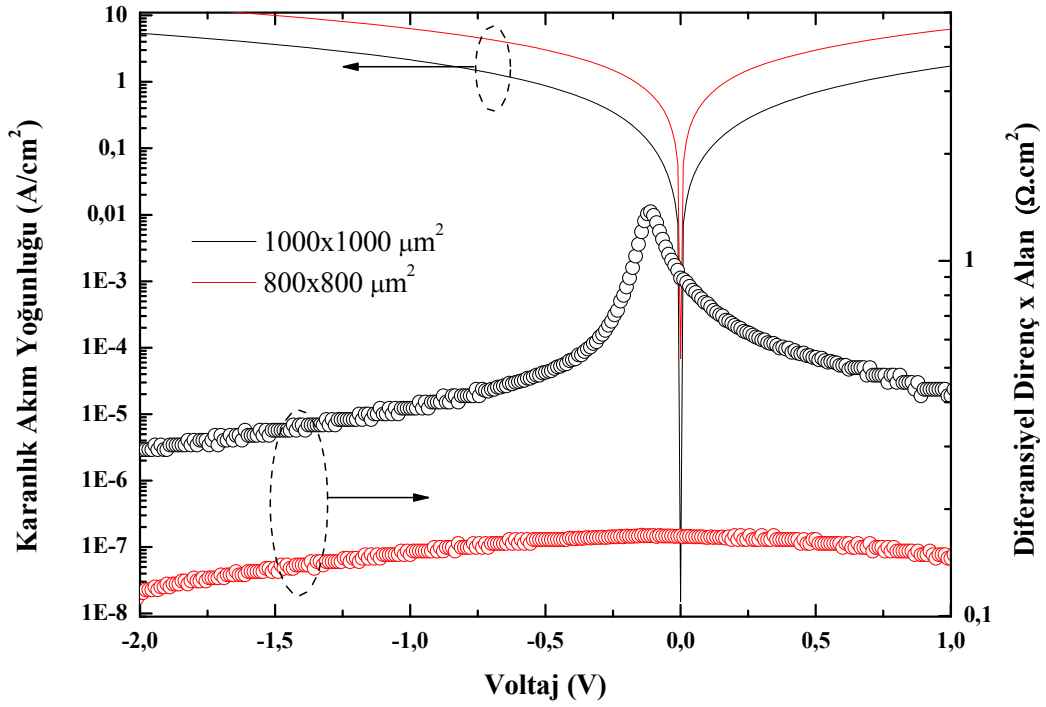
Alınan ölçümler, N_{12} örneğinin N_{13} ’e göre daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilme yeteneğine sahip bir fotodiyot olduğunu göstermiştir. Bunun temel nedeni, N_{12} örneğinin N_{13} örneğine göre bant enerjisinin daha büyük olmasıdır ($N_{13}=293$ meV, $N_{12}=334$ meV). Yüksek sıcaklıklara doğru gidildiğinde, karanlık akım mekanizmalarından difüzyon akımı etkin hale geçer. Özellikle bant aralığı enerjileri küçük olan aygıtlarda, taşıyıcıların difüzyonu daha da kolaylaşır. Bu nedenle, N_{12} örneğinin N_{13} ’e göre daha yüksek sıcaklıklarda çalışabiliyor olması gayet doğaldır. Ayrıca, diyotların 270 ve 250 K sıcaklarında fototepkilerinin

izlenebilir olması aygıtların yüksek sıcaklıklarda çalışabileceğinin bir göstergesidir.

5.6. InAsSb Foto-Algılayıcıların Karanlık Akım Ölçümleri

Karanlık akım, herhangi bir ışık ya da optiksel uyarma gibi dışarıdan müdahale olmadan, diyot içerisinde oluşan akımı ifade eder. Karanlık akıma; yaratma-yeniden birleşme (generation-recombination, G-R), çoğunluk taşıyıcıların difüzyonu, tuzak-destekli tünelleme (trap-assisted tunneling, TAT), yüzey kaçak akımı gibi birçok mekanizmanın etkisi vardır. Yüzey kaçak akımlarını, yüzey yalıtımı (passivation) uygulamalarıyla baskılamak mümkünse de, diğer karanlık akım mekanizmalarına yapıya müdahale etmeden azaltmak mümkün değildir.

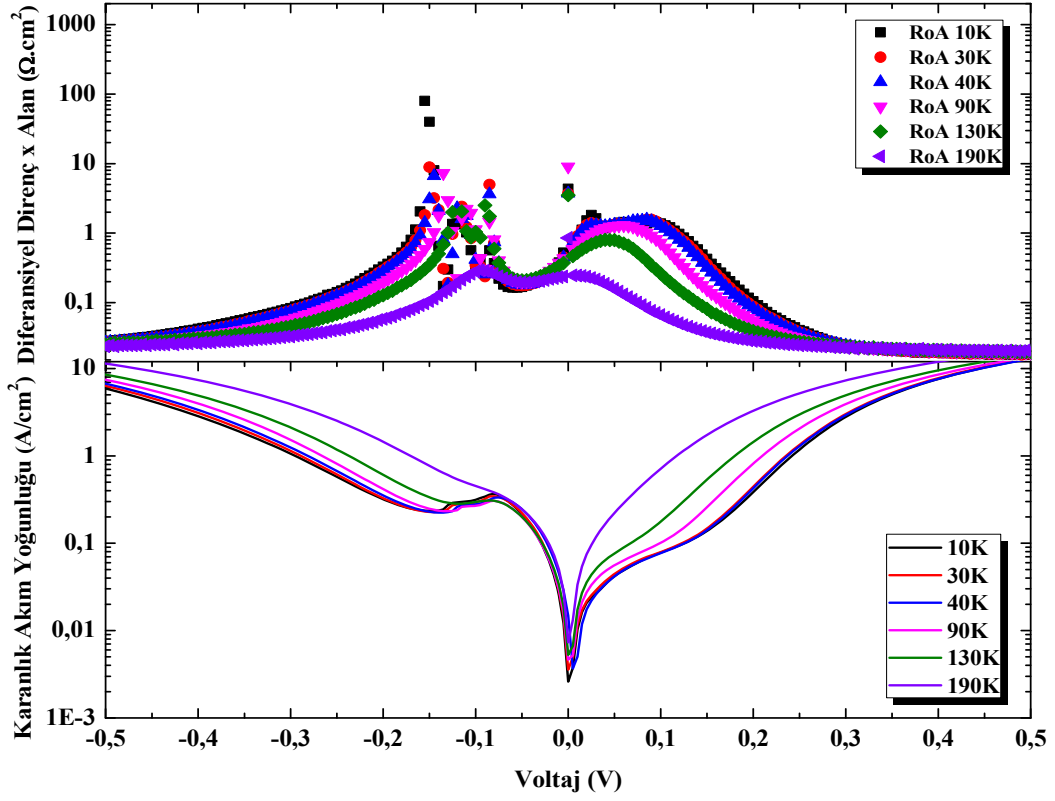
İncelenen N₁₁ örneğinin karanlık akım ölçümleri sıvı azot sıcaklığında (~77 K) yapılmış ve sonuçlar Şekil 5.18'de gösterilmiştir. Büyütmenin homojen olup olmadığı ve fabrikasyon süreci hakkında bilgi alabilmek için farklı büyüklükteki iki mesadan ölçümler alınmış ve bu ölçümler arasında kıyaslama yapılmıştır. Karanlık akımın, mesa büyüklüğü ile doğru orantılı olarak artması beklenir. Yani, mesa boyutu en fazla olan 1000 μm^2 'lik mesada en fazla karanlık akım, en az olan 800 μm^2 'lik mesada ise en az karanlık akımın olması beklenir. N₁₁ örneğinde, 800 μm^2 'lik mesada en fazla karanlık akım çıkmıştır. Bu, fabrikasyon aşamasında bu mesada sorun olduğunu göstermektedir. Şekil 5.18'de mesalardaki akım yoğunluklarının aynı olmadığı görülmüştür. Bu durum, örneklerdeki kusur miktarının rastgele bir dağılım gösterip (özellikle HCl asit çözeltisinin aşındırma sırasında örnek yüzeyinde oluşturduğu kusurlar), mesa alanıyla doğrudan bir bağlantısının olmadığını göstermektedir.



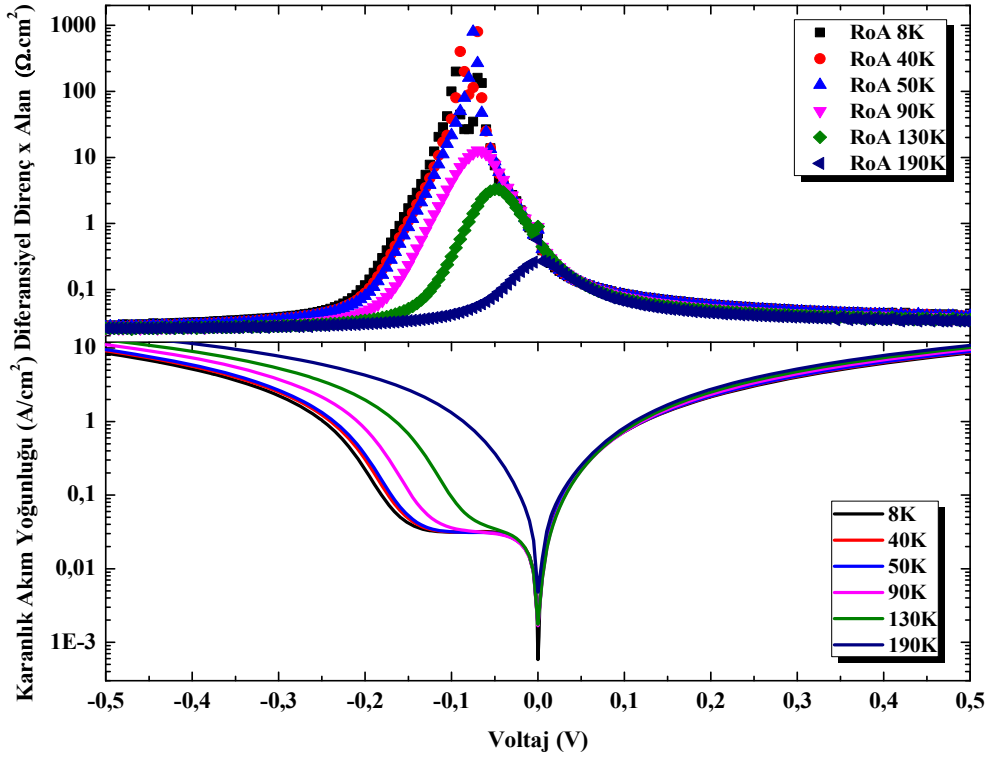
Şekil 5.18. N₁₁ örneğinin 77 K sıcaklıkta öngerilim voltajının bir fonksiyonu olarak karanlık akım yoğunluğu ve diferansiyel direnç

Şekil 5.18’de yer alan grafikte, InAsSb-tabanlı nBn dedektör yapısının 0 V’da 1000 ve 800 μm^2 ’lik mesa boyutlarındaki karanlık akım yoğunlukları sırasıyla $1,56 \times 10^{-8}$ ve $6,85 \times 10^{-5}$ A/cm² olarak bulunmuştur. Bu voltaja karşılık gelen R_{0A} değerleri ise sırasıyla 0,928 ve 0,168 $\Omega.\text{cm}^2$ ’dir. Diferansiyel direnç değerlerinin düşük çıkması karanlık akım yoğunluğunu büyük oranda etkilemiş ve karanlık akımı baskılayamamıştır. Ayrıca, örneğe yalıtım veya herhangi bir karşı yansıtıcı uygulanmadığı için kaçak akımlar baskılanamamış ve karanlık akım yoğunluk değerleri ve diferansiyel direnç değerlerinde istenilen seviyeye ulaşılammamıştır.

N₁₂ ve N₁₃ örneklerinin karanlık akımları, 10 ile 260 K sıcaklıkları arasında 10 K’lik adımlarla incelenmiş ve Arrhenius davranışları karanlık akıma etki eden mekanizmaların incelenmesi için grafik haline dönüştürülmüştür. Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de örneklerin farklı sıcaklık aralıkları için karanlık akım yoğunlukları ve R_{0A} diferansiyel dirençleri verilmiştir. Tüm ölçümler, 400 x 400 μm^2 ’lik mesalardan alınmış olup, -50mV voltaj adımlarıyla alınmıştır.

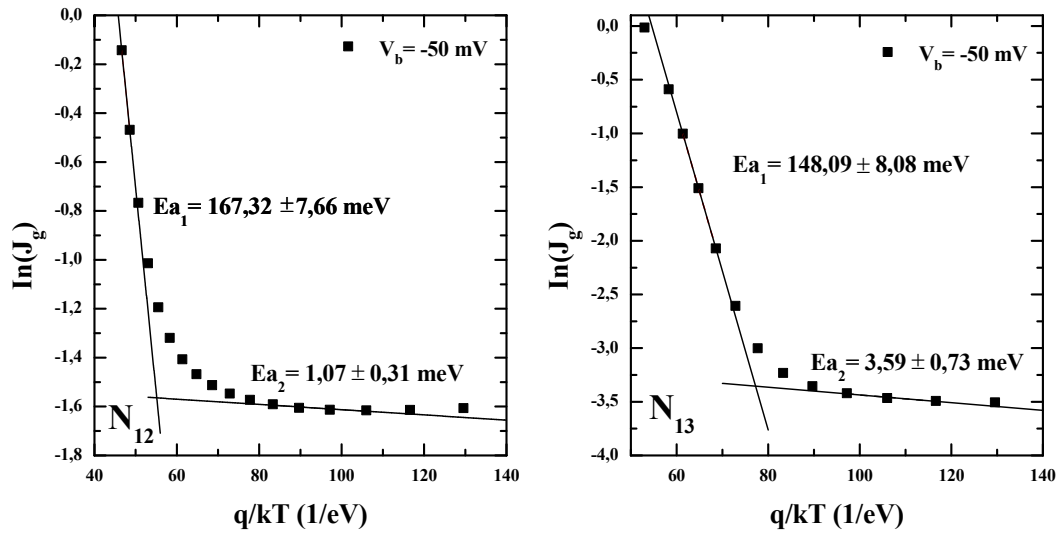


Şekil 5.19. N₁₂ örneğinin farklı sıcaklıklar için karanlık akım yoğunluğu ve diferansiyel direnç değerleri



Şekil 5.20. N₁₃ örneğinin farklı sıcaklıklar için karanlık akım yoğunluğu ve diferansiyel direnç değerleri

Şekil 5.19 ve Şekil 5.20’de görüldüğü gibi, en düşük sıcaklık olan 8 ve 10 K değerlerinde karanlık akımın yoğunluklarının en az olduğu, sıcaklık arttıkça bu değerlerin artmaya başladığı görülmüştür. N₁₂ örneği için 0 V’da ve 10 K sıcaklıktaki karanlık akım yoğunluğu $2,61 \times 10^{-4}$ A/cm² iken 190 K sıcaklıkta ise $7,33 \times 10^{-4}$ A/cm²’dir. N₁₃ örneğinde 0 V ve 8 K sıcaklığındaki karanlık akım yoğunluğu $5,82 \times 10^{-4}$ A/cm² iken 190 K’de bu değer $4,80 \times 10^{-4}$ A/cm²’dir. N₁₂ örneği için, -0,15 V ve 10 K sıcaklıkta RoA değeri yaklaşık olarak $80 \Omega \cdot \text{cm}^2$ iken, N₁₃ için 40 K’de -0,07 V’da ve 50 K’de -0,075 V’da $800 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ’dir. Yapı içerisinde, karanlık akıma etki eden mekanizmaların tanımlamasını yapmak için aktivasyon enerjisi hesaplanmış ve -50mV’a karşılık gelen Arrhenius davranışları karanlık akıma etki eden mekanizmaların incelenmesi için grafik haline dönüştürülmüştür (Şekil 5.21). Arrhenius grafiklerindeki eğrinin eğimi, verilen sıcaklık için dedektörün aktivasyon enerjisini verir ve bu değerler akımı sınırlayan faktörler hakkında bilgi edinmemizi sağlar [65-66].



Şekil 5.21. N₁₂ ve N₁₃ örneklerinin Arrhenius eğrileri ve aktivasyon enerjileri

Şekil 5.21’de gösterildiği gibi Arrhenius eğrileriyle elde edilen verilerin iki farklı bölgesinde doğrusal fit yapılmış ve her bir örnek için iki farklı aktivasyon enerjisi elde edilmiştir. Yüksek sıcaklıklar için azınlık taşıyıcı difüzyon akımı karanlık akıma katkıda bulunurken, düşük sıcaklık değerleri için ise G-R ve TAT

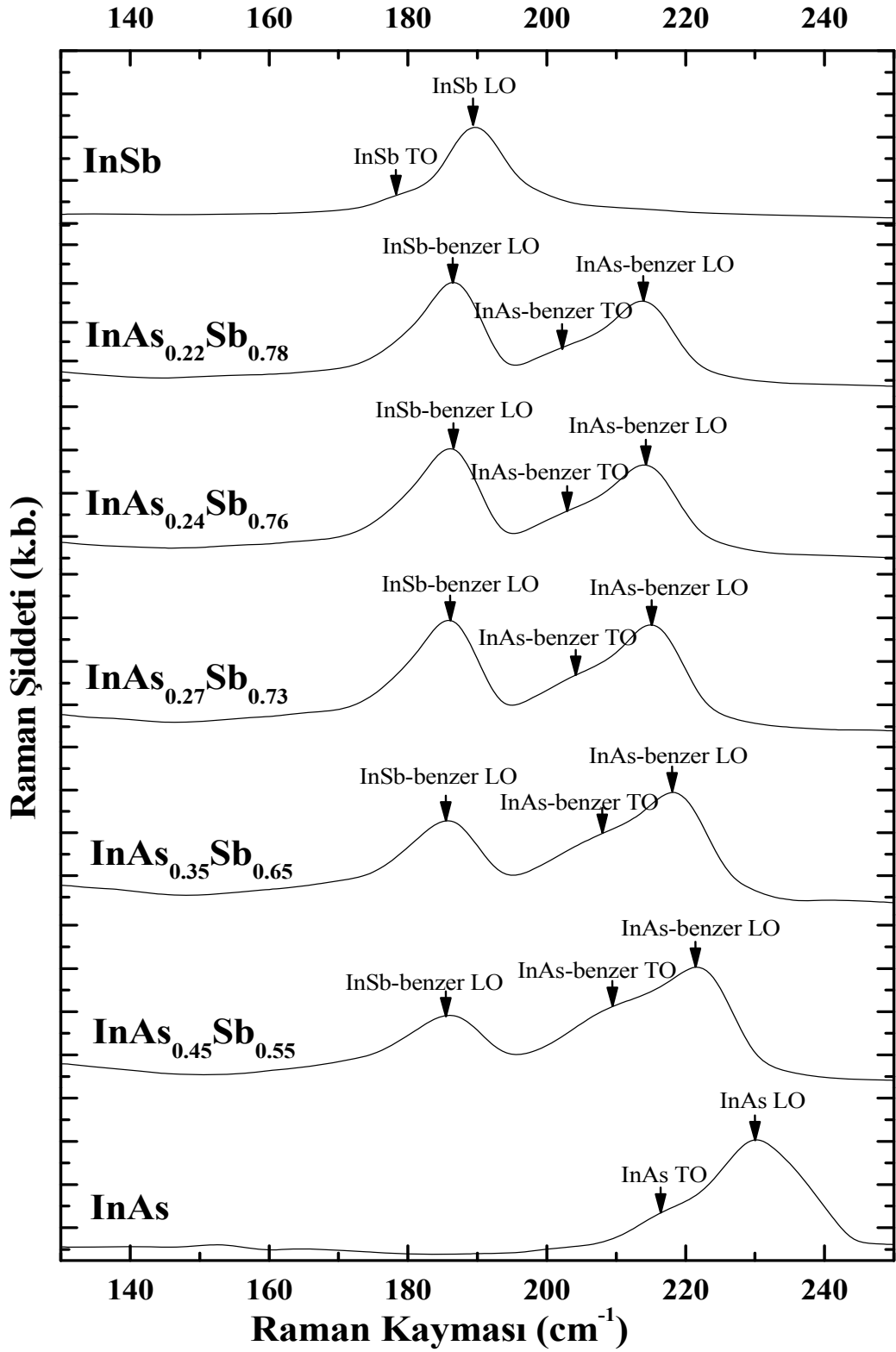
mekanizmaları karanlık akıma katkıda bulunur. Sıcaklık azaldıkça iki örnek içinde bulunan E_{a1} değerleri yaklaşık olarak bant aralıklarının yarısına denk gelmektedir. Bu seviyeler, G-R karanlık akım mekanizmalarının baskın olduğu bölgelerdir. Dar bant aralıklı soğurucu tabakaların olduğu yapılarda (özellikle p-i-n, p-n ve p- π -n eklemleri) sıklıkla rastlanan bir durum olup, kıtlık bölgesinde ortaya çıkar [65-66]. N_{12} ve N_{13} örnekleri için bu mekanizma yaklaşık olarak 145 K sıcaklığı ve üzeri değerlerinde ortaya çıkıp, her iki aygıt için de baskın karanlık akım mekanizması oluşturmaktadır. İki örnek için de bulunan E_{a2} aktivasyon enerjisi değerleri 1 ile 3 meV arasında değişim göstermektedir. Düşük sıcaklıktaki aktivasyon enerjilerinin, sığ enerji tuzaklarından veya yüzey kaçak akımlarından kaynaklandığı düşünülmektedir [65]. Ayrıca, düşük sıcaklıklara gidildiğinde (8-10 K) R_{0A} değerinin iyileşmemesi G-R ve TAT mekanizmalarının karanlık akımı yükselmesinden kaynaklanmaktadır.

5.7. $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ Epitatan Raman Spektroskopisi Ölçümleri

Raman spektroskopisi, çeşitli malzeme sistemlerinin örgü titreşimlerini anlamak için kullanılan güçlü bir tekniktir [67]. $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ bileşikleri için ilk Raman spektroskopisi çalışması, Cherng ve ark. tarafından InAs ve InSb altaşlar üzerine büyütülen $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ epikatmanlar için yapılmıştır [68]. Bu çalışmada, $x \leq 0,6$ için "tek kip", eğer $x > 0,6$ ise "iki kip"li olması gerektiğini bildirmiştir. Daha sonra, Li ve ark. GaAs altaş üzerine farklı konsantrasyonlarda $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ örnekleri büyütmüş ve Cherng'in çalışmasını doğrulamıştır [69].

$\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ epikatman örneklerin örgü dinamiklerini anlamak adına Raman spektroskopisi ölçümleri yapılmıştır. Epikatman örneklerin yanı sıra referans olarak kullanılmak üzere InAs ve InSb kullanılmıştır. Şekil 5.22'de InSb ve InAs için boyuna optik fonon (longitudinal-optical, LO) doruk sırasıyla 189 ve 230 cm^{-1} ve enine optik fonon (transverse-optical, TO) doruk yerleri 178 ve 216 cm^{-1} olarak açık bir şekilde gösterilmiştir [70,71]. Konsantrasyon bağlı olarak $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ epikatman örneklerin daha önce tek yada iki kipli olduğu çeşitli çalışmalar tarafından vurgulanmıştır [68, 69]. Şekil 5.22'de görüldüğü gibi tüm epikatman

örnekler iki kipli olduğu görülmektedir ve bu doruklar InAs- ve InSb-benzer LO kiplerinden oluşmaktadır. Aynı zamanda, InAs-benzer LO kipine bir de InAs-benzer TO kipi eşlik etmektedir. Cherng ve *ark.*, $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ alaşımları için $0,6 < x < 1$ kompozisyon aralığında iki güçlü LO doruk gözlemlendiğini, bunların da InAs-benzer LO ve InSb-benzer LO olarak iki-kipli tanımlanabileceğini söylemiştir [68]. Bu durumu, Li ve *ark.* da doğrulamıştır [69]. Fakat, bizim yapılarımız için bu iki güçlü doruk $x=0,55$ konsantrasyonda da gözlemlendi (Şekil 5.22).



Şekil 5.22. Normalize edilmiş farklı Sb konsantrasyonlarında InAs_{1-x}Sb_x epikatman örneklerin Raman spektrumları

Büyütülen örneklerin düşük dalga numaralı (90-140 cm^{-1}) Raman spektrumları Şekil 5.23'de gösterilmiştir. InAs referans örneği, 86, 106, 117 ve 153 cm^{-1} doruk yerlerinde sırasıyla 2TA(L), 2TA($\Delta \rightarrow K$), 2TA(W) ve 2IA(K) olarak gösterilmiştir [72]. Benzer şekilde, InSb için 83, 118 ve 135 cm^{-1} doruk yerlerinde 2TA(X), 2IA(K) [71] ve TO(Δ_3) - TA(Δ_3) [73] olarak gösterilmiştir. Sonuç olarak, InAs ve InSb olduğu gibi, InAs_{1-x}Sb_x alaşımları karmaşık-kipli InSb-benzer 2IA(K) davranışı sergiler. Çünkü, alaşımların Sb konsantrasyonları daha yüksektir ve InSb 2IA(K)'ya daha yakındır.

Şekil 5.22'de büyütülen alaşımların bütün doruk pozisyonları referans örneklerle beraber gösterilmiştir. InAs-benzer ve InSb-benzer LO dorukları sırasıyla LO₁ ve LO₂, InAs-benzer TO kipi ise TO₁ olarak tanımlanmıştır. Sb konsantrasyonu arttıkça LO₁ doruk şiddeti azalır ve fonon doruk frekansında bir maviye kayma gözlemlenir (blue shift). LO₁ fononlarının doruk yerleri en küçük kareler metoduyla yapıldığında;

$$\nu_{LO1}(\text{cm}^{-1}) = 231 - 21x \quad (5.1)$$

TO fononları, normal şartlarda (1 0 0) yüzeyi için yasaklıdır ve görülemez [68]. Fakat, bizim ölçümlerimizde, yanlış hizalanmaları ya da örnek kusurlarından dolayı TO fononları gözlemlenmiştir. TO₁ fononu için en küçük kareler yöntemi uygulandığında;

$$\nu_{TO1}(\text{cm}^{-1}) = 218 - 18x \quad (5.2)$$

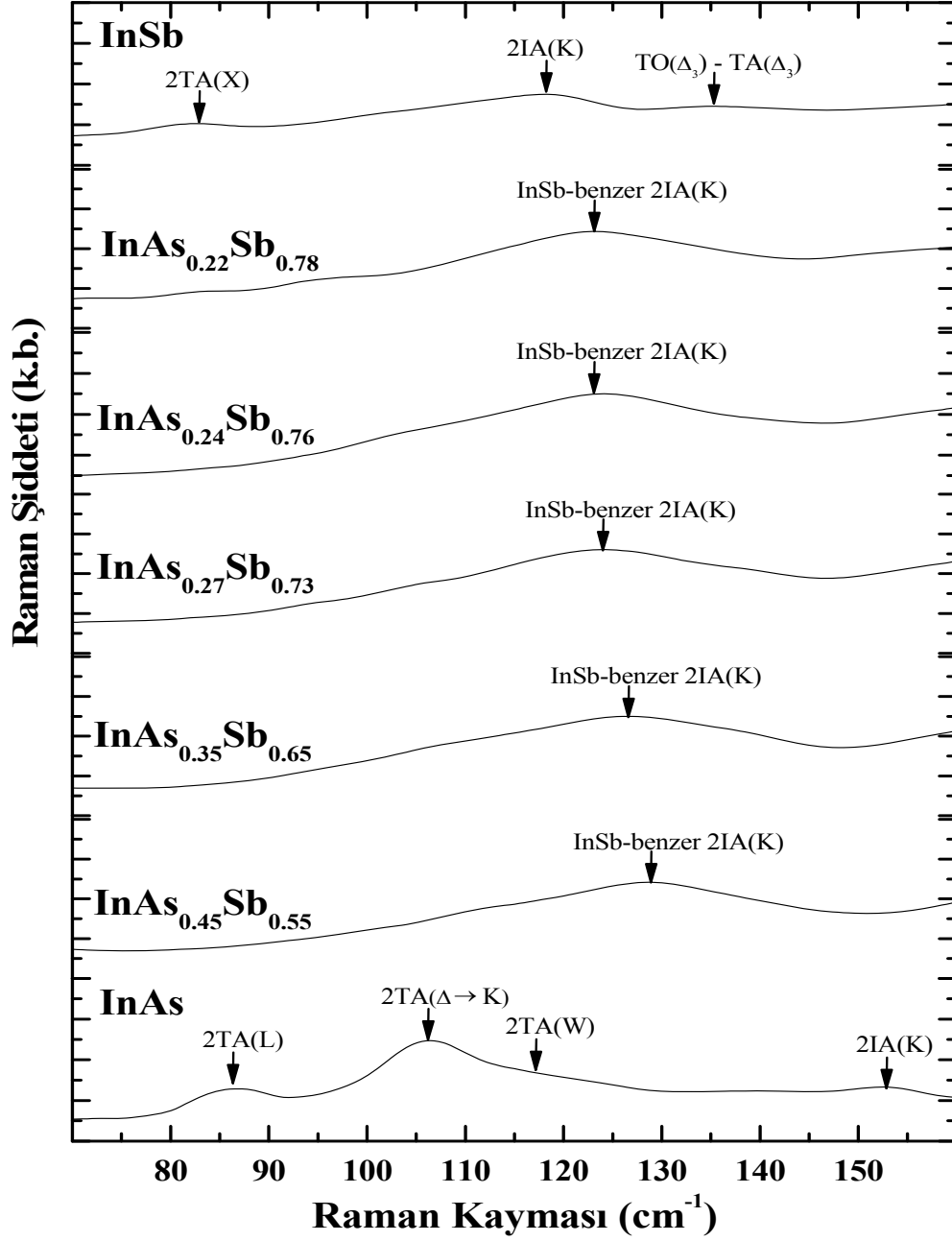
Şekil 5.22'de görüldüğü gibi, LO₁ fonon doruğu gibi, LO₂ fonon doruğu Sb konsantrasyonu arttıkça az da olsa bir artış göstermektedir. Bu fononun doruklarının konsantrasyon bağımlı olarak yerlerini veren denklem;

$$\nu_{LO2}(\text{cm}^{-1}) = 178 + 11x \quad (5.3)$$

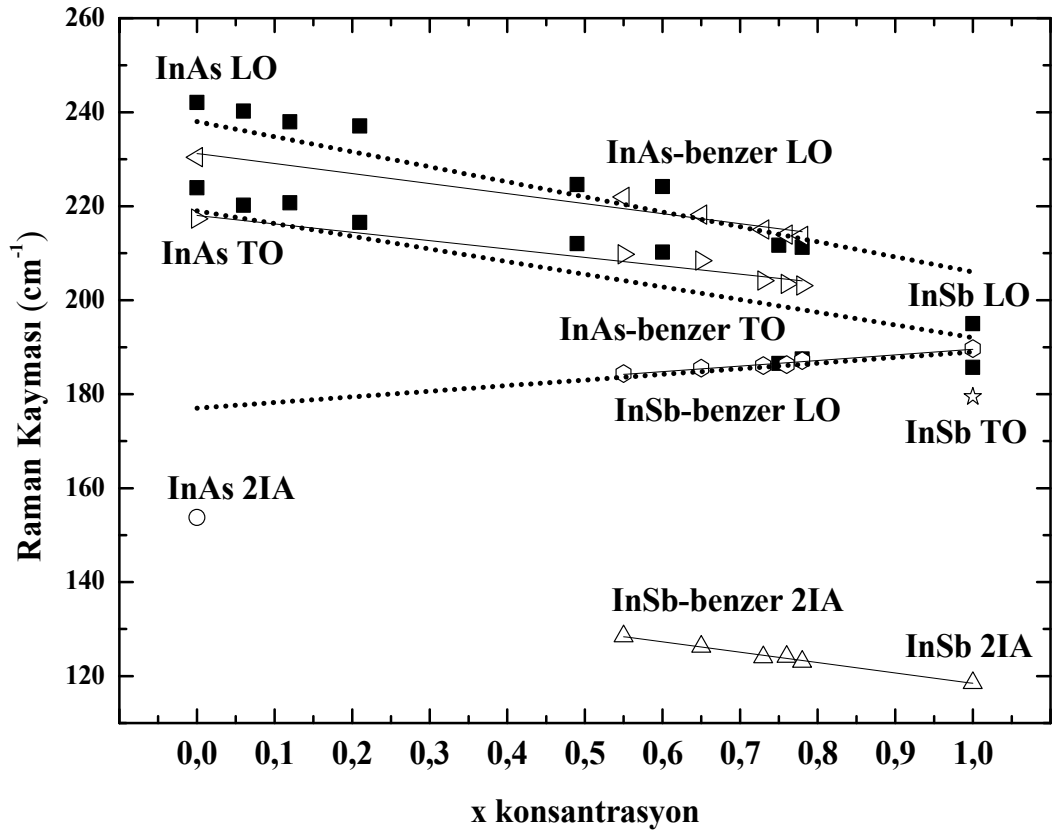
InAs_{1-x}Sb_x alaşımları, akustik bölgede zayıf doruklara sahiptir ve bu doruklar InAs ile InSb arasında 2IA(K) karmaşık fonon kipleridir (Şekil 5.23). Bizim örneklerimiz, yüksek Sb konsantrasyonlu olduğu için ($x \geq 0,55$) bu doruklar InSb 2IA(K) fonon kiplerine daha yakındır ve bu nedenle InSb-benzer 2IA(K) karmaşık-kipli fononlar olarak tanımlanmıştır. Bu karmaşık-kipli fononların doruk yerleri;

$$\omega_{21A} (\text{cm}^{-1}) = 140 - 22x \quad (5.4)$$

Sonuç olarak, bizim verilerimiz Cherng-Li ve ark.'larının verileri ile karşılaştırılmış, Sb konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak verilen doruk yerlerinin denklemleri, fonon frekansındaki değişiklikler ve deney verileri ile gayet uyumlu olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.24). Bu da $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ epikatman örneklerin başarılı bir şekilde büyütüldüğünün göstergesidir.



Şekil 5.23. Normalize edilmiş farklı Sb konsantrasyonlarında $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ epikatman örneklerin Raman spektrumları



Şekil 5.24. InAs_{1-x}Sb_x bileşiklerinin x konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak Raman frekanslarının bağımlılığı (■, Cheng ve ark.[68] verileri, nokta ile gösterilenler ise Li ve ark. [69]verileri)

6. $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ FOTO-ALGILAYICI YAPILARININ BÜYÜTÜLMESİ ve KARAKTERİZASYONU

Bu bölümde, $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ dörtlü bileşikleri farklı konsantrasyonlarda sistematik olarak GaAs alttaş üzerine MBE’de büyütülmüştür. Büyütülen örneklerin kristal kalitelerini değerlendirebilmek adına farklı karakterizasyon yöntemleri kullanılmış ve alınan sonuçlar neticesinde, yapısal, optik ve opto-elektronik karakterizasyonlar birbiriyle ilişkilendirilmiştir. MBE sisteminde, GaAs alttaş üzerine kaliteli $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ epikatman yapılarının düzgün bir şekilde büyütüldüğü gözlemlenmiş ve kristal kalitelerinin literatür ile uyumlu olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, yapıların PL tekniği ile bant aralığı enerjileri elde edilmiş ve bulunan enerjiler, tayfsal fototepki ölçümleri sonucunda bulunan λ_{50} ile doğrulanmıştır. $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ foto-algılayıcı yapılarının, sıcaklık bağımlı olarak karanlık akım ölçümleri alınmış ve karanlık akımlarına etki eden mekanizmaların tanımlanması için Arrhenius eğrileri çizilerek her bir örnek için iki farklı aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır.

6.1. $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ Yapılarının MBE Sisteminde Büyütülmesi

Büyütme çalışmalarına başlamadan önce konsantrasyon hedefini tutturmak amacıyla her büyütme öncesinde V ve III grubu malzemeler için akı ölçümleri yapıldı. Tablo 6.1’de Ga, In, As ve Sb malzemeleri için kullanılan sıcaklık, vana aralıkları, BFM, BP ve BEP değerleri verilmiştir.

Tablo 6.1. Ga, In, As ve Sb kaynaklarının akı değerleri

Malzemeler	Sıcaklık (°C) Uç/Taban (Kırıcı/Orta/Ana)	Vana Açıklığı (mil)	Akı Değeri (Torr)	
Ga	1150/900	-	BFM	$5,85 \times 10^{-8}$
			BP	$1,35 \times 10^{-9}$

			BEP	$5,71 \times 10^{-8}$
In	900/700	-	BFM	$1,94 \times 10^{-8}$
			BP	$1,38 \times 10^{-9}$
			BEP	$1,80 \times 10^{-8}$
As	900/335	70	BFM	$6,51 \times 10^{-8}$
			BP	$1,04 \times 10^{-9}$
			BEP	$6,40 \times 10^{-8}$
		80	BFM	$1,07 \times 10^{-7}$
			BP	$1,28 \times 10^{-9}$
			BEP	$1,05 \times 10^{-7}$
		90	BFM	$1,67 \times 10^{-7}$
			BP	$1,95 \times 10^{-9}$
			BEP	$1,65 \times 10^{-7}$
		100	BFM	$2,27 \times 10^{-7}$
			BP	$2,24 \times 10^{-9}$
			BEP	$2,24 \times 10^{-7}$
		140	BFM	$4,46 \times 10^{-7}$
			BP	$2,59 \times 10^{-9}$
			BEP	$4,43 \times 10^{-7}$
Sb	900/525/800	125	BFM	$5,66 \times 10^{-7}$
			BP	$2,51 \times 10^{-10}$
			BEP	$5,65 \times 10^{-7}$
		140	BFM	$6,81 \times 10^{-7}$
			BP	$3,05 \times 10^{-10}$
			BEP	$6,8 \times 10^{-7}$
		170	BFM	$9,95 \times 10^{-7}$
			BP	$2,73 \times 10^{-10}$
			BEP	$9,94 \times 10^{-7}$
		180	BFM	$1,02 \times 10^{-6}$
			BP	$3,01 \times 10^{-10}$
			BEP	$1,01 \times 10^{-6}$
		190	BFM	$1,11 \times 10^{-6}$
			BP	$4,45 \times 10^{-10}$
			BEP	$1,10 \times 10^{-6}$

		200	BFM	$1,19 \times 10^{-6}$
			BP	$3,35 \times 10^{-10}$
			BEP	$1,18 \times 10^{-6}$

Prineas ve ark., $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ örneğinin x konsantrasyonunu $x = R_{GaSb}/(R_{GaSb} + R_{InAs})$ denklemiyle ve y konsantrasyonu $y = BEP [As/(As+Sb)]$ denklemi ile hesaplamışlardır [74]. Burada, R_{GaSb} ve R_{InAs} sırasıyla GaSb ve InAs'in büyüme oranlarını, BEP [As/Sb], As/Sb malzemelerinin net demet basınçlarını ifade etmektedir. Büyütme oranlarını belirleyebilmek için GaSb alttaş üzerine farklı sıcaklarda GaSb ve InAs epikatman yapıları büyütülmüştür. Büyütülen yapıların kalınlıkları SEM yan-kesit tekniği ile tespit edilmiştir. Bu sayede, GaSb ile InAs'in büyüme oranları belirlenmiş ve $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ epikatman örneklerinin konsantrasyon hedefleri bu bilgilerden yola çıkılarak yapılmıştır.

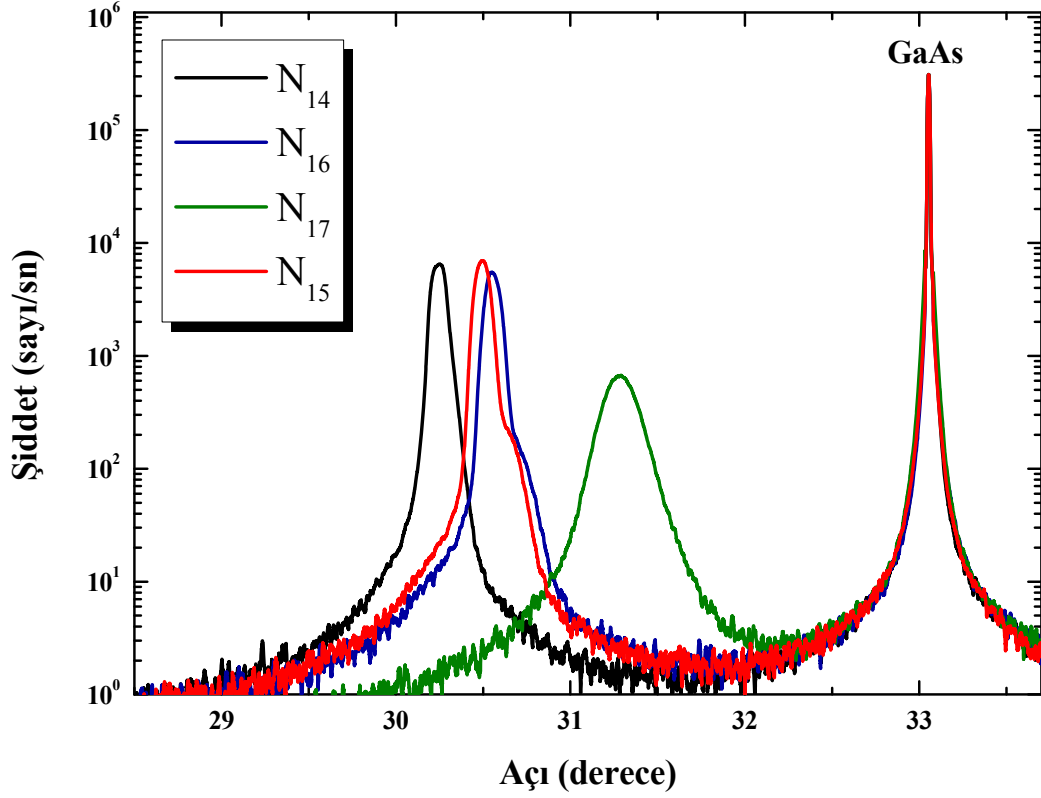
$Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ epikatman örnekleri, yarı yalıtkan GaAs (100) alttaş kullanılarak Veeco GEN20MC katı kaynaklı MBE sistemiyle büyütülmüştür. Ga ve In malzemeleri kaynakları için çift filamanlı SUMO® hücreleri, As ve Sb kaynakları için ise kırıcı bölgeci efüzyon hücreleri kullanılmıştır. As ve Sb kaynakları, hücrenin kırıcı bölgesinde As_2 ve Sb_2 demetlerine dönüştürülerek kullanılmıştır. Büyütmeye başlamadan önce, alttaşın oksit tabakası As_2 akısı altında ($BEP 1,48 \times 10^{-6}$ Torr) 10 dk süre ile yaklaşık 602-605 °C sıcaklık değerleri arasında oksit kaldırma işlemi yapılmıştır. Oksit kaldırma işlemi tamamlandıktan As_2 akısı altında sıcaklık 585 °C'ye düşürülmüş ve bu sıcaklıkta 60 dk GaAs düzeltme katmanı büyütülmüş, yaklaşık 2 dk kararlı hale gelmesi için beklenmiştir. Ardından, As vanası istenilen seviye düşürülmüş, bu sırada Sb vanası ayarlanmış fakat hücre önündeki kepenk açılmamıştır. 10 sn sonunda, Sb hücrenin kepenği açılmış ve 10 sn daha beklenmiştir. Daha sonra, 10 sn'nin sonunda Ga hücrenin kepenği açılmış ve 10 sn sonra In hücrenin kepenği açılmıştır. Bu şekilde, Ga ve In hücre sıcaklıkları sabit tutularak As ve Sb akıları farklı, dört adet $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ epikatman örnekleri büyütülmüştür (N_{14} , N_{15} , N_{16} , N_{17}).

GaSb geçiş katmanı, Si katkılı GaAs düzeltme tabakasından sonra büyütülmüştür. GaAs düzeltme katmanı büyüdüktan (~585 °C) sonra örnekler, As₂ akısı altında 495 °C'ye soğutulmuştur. Örneklerin kararlı hale gelmesi için 495 °C sıcaklıkta 2 dk beklenmiştir. Ardından, As hücresinin vanası-kepengi kapatılıp, yerine Sb hücresinin kepenk-vanası açılmış ve yüzeye 5 sn Sb₂ akısı verilmiştir. Daha sonra, Ga ve Si hücrelerinin kepenkleri açılarak yaklaşık 60 dk GaSb geçiş katmanı büyütülmüştür (~675 nm). Örneklerden fotoluminesans ölçümleri alınabilmesi için GaAs ve GaSb katmanları ~10¹⁷ taşıyıcı/cm⁻³ mertebelerinde Si ile katkılanmıştır. GaSb düzeltme katmanı büyüdüktan sonra Sb₂ akısı altında 460 °C sıcaklığa kadar soğutulmuştur. Sb hücresinin vanası istenilen seviyeye getirilerek 10 sn beklenmiş, As hücresinin kepenk-vanası açılmıştır. 10 sn beklendikten sonra Ga hücresinin kepengi, 10 sn sonra In hücresinin kepengi ve 10 sn sonra da Si hücre kepengi açılarak aynı Ga ve In sıcaklıklarında, farklı As ve Sb akılarında iki adet Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} epikatman yapısı GaAs alttaş üzerine büyütülmüştür (N₁₈, N₁₉).

Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} foto-algılayıcı yapıları (N₂₀, N₂₁), 4 inç GaAs alttaş üzerine GaAs düzeltme katmanlı (N₂₁) ve GaSb geçiş katmanlı (N₂₀) olarak büyütülmüştür. GaAs alttaşın oksidi, her bir örnek için yaklaşık 10 dk 601-607 °C sıcaklık aralığında beklenecek termal olarak kaldırılmıştır. Oksit kaldırma işlemi sonunda GaAs düzeltme katmanı ~10¹⁷ taşıyıcı/cm⁻³ mertebelerinde Be katkılı olarak yaklaşık 60 dk büyütülmüştür (~530 nm). GaAs düzeltme katmanlı örnekten sonra, N₂₀ örneğinde 95 dk ~10¹⁸ taşıyıcı/cm⁻³ mertebesinde olacak şekilde Be katkılı Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} alt kontak tabakası büyütülmüştür. N₂₁ örneğinde, GaAs düzeltme katmanından sonra yaklaşık ~90 dk GaSb geçiş katmanı büyütülmüş (~1 µm), daha sonra Be katkılı Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} alt kontak tabakasına geçilmiştir. Alt kontaklardan sonra, her iki yapı için de π-katkılı olan soğurucu tabakaya geçilmiştir. Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} yapısı, doğası gereği p-tipi bir malzemedir (~1,1x10¹⁶ taşıyıcı/cm⁻³) [76]. Malzemeyi esas (intrinsic) hale getirebilmek için, Si ile ~1,1x10¹⁶ taşıyıcı/cm⁻³ mertebesinde katkılanmıştır. Üst kontak yapıları, Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} katmanı Si ile ~10¹⁸ taşıyıcı/cm⁻³ mertebesinde katkılanarak elde edilmiştir.

6.2. $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ Yapılarının HRXRD Analizleri

$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ epikatman örneklerinin x ve y konsantrasyonlarının belirlenmesi için HRXRD sallantı eğrisi ölçümleri yapıldı. Örneklerin X-ışını spektrumları Şekil 6.1’de, temel büyütme değişkenleri ise Tablo 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.1. GaAs alttaş üzerine büyütülmüş $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ epikatman yapılarının X-ışını spektrumları

Tablo 6.2. $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ epikatman yapılarının temel büyütme değişkenleri

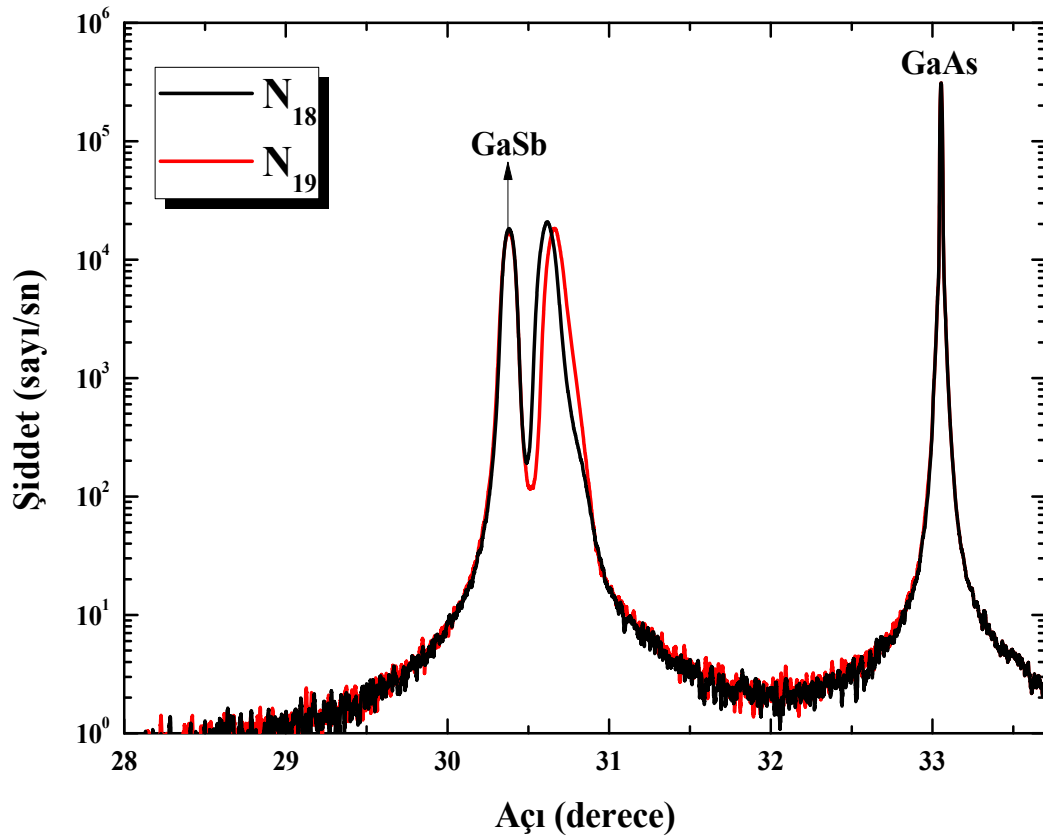
Örnek Numaraları	N ₁₄	N ₁₅	N ₁₆	N ₁₇
Büyüme Sıcaklığı (°C)	458-462	458-462	458-462	458-462
Doruk Yeri (Açıderece)	30,25	30,49	30,54	31,28
Ga Konsantrasyonu	~0,85	~0,85	~0,85	~0,85
As Konsantrasyonu	~0,07	~0,17	~0,20	~0,49
FWHM Değeri (Açısanıye)	345,2	349,1	349,0	656,7
Örnek Kalınlığı (nm)	664,9	670,3	657,8	620,8
Büyüme Zamanı (dk)	60	60	60	60

$GaSb$ doruk yeri 30,36 açıderece olarak bilinmektedir (Şekil 6.2). $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ epikatman örneklerinin, Ga ve Sb konsantrasyonları arttıkça doruk yerinin 30,36 açıdereceye yaklaşması beklenmektedir. Bu bağlamda, tüm örnekler için Ga konsantrasyonlarının birbirlerine çok yakın oldukları düşünülürse, Sb konsantrasyonu en fazla olan örneğin 30,36 açıdereceye en yakın olması ve konsantrasyona göre sıralanması beklenmektedir. Sb konsantrasyonu en fazla olan N₁₄ örneği 30,36 açıdereceye en yakın, en az olan N₁₇ ise en uzaktır. Bu da $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ örneklerinin düzgün bir biçimde büyüdüklerinin göstergesidir.

Tablo 6.2’de görüldüğü gibi, Ga konsantrasyonları aynı olan dörtdü bileşiklerin FWHM değerleri en iyi 345,2 açısanıye ile N₁₄ örneğindedir. N₁₅ ve N₁₆ örneklerinin Sb konsantrasyonun birbirlerine çok yakın olduğu için FWHM değerleri sırasıyla 349,1 ve 349,0 açısanıye olarak bulunmuştur. Ayrıca, örneklerin X-ışını doruklarının sağında omuzlar görülmektedir. Bunun nedeni olarak, büyütme sırasında hazırlık haznesinde yapılmış olan alttaş kusturma işlemi olduğu düşünülmektedir. Ana hazne ile hazırlık haznesi arasında bulunan vananın çok küçük de olsa vakum sızdırması, kusturma işleminde alttaş üzerindeki artık gazların çok küçük bir kısmının ana hazneye geçmesi nedeniyle konsantrasyonda değişiklik yapma eğilimde bulunmuştur. Büyütme sırasında, hazırlık haznesinde kusturma işlemi yapılmayan örneklerin X-ışını spektrumlarında bu omuzlar görülmemektedir. Bu da açık bir şekilde, büyütme sırasında hazırlık haznesinde

yapılan alttaş kusturma işleminden etkilendiğinin göstergesidir. Diğer üç örnek ile kıyaslandığında kristal kalitesi düşük olan N₁₇ örneğinin FWHM değeri 656,7 açısanıyedir. İlk bakışta, GaAs alttaş üzerine büyütülen bir Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} dörütlü bileşiklerin Ga ve As konsantrasyonun artması örgü uyumsuzluğunun azalması nedeniyle yapının kristal kalitesinin iyileşmeye doğru gitme eğiliminde olması gerektiği izlenimini verebilir. Fakat, N₁₇'nin büyüme sırasında elde edilen RHEED görüntülerden düzgün çizgiler yerine yüzeyin sürekli yeniden yapılanma görüntüsünde olması, örneğin karışabilir bant aralıklı olarak büyüdüğünü göstermektedir (x=0,85 ve y=0,49 konsantrasyonu için) [75]. Bu nedenle, kristal yapı olumsuz bir şekilde etkilenmiş ve en kötü FWHM değeri N₁₇ örneğinden elde edilmiştir.

GaSb geçiş katmanlı örneklerin (N₁₈ ve N₁₉) X-ışını spektrumları Şekil 6.2'de, temel büyütme değişkenleri ise Tablo 6.3'de verilmiştir.



Şekil 6.2. GaAs alttaş üzerine büyütülmüş GaSb geçiş katmanlı Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} örneklerinin X-ışını spektrumları

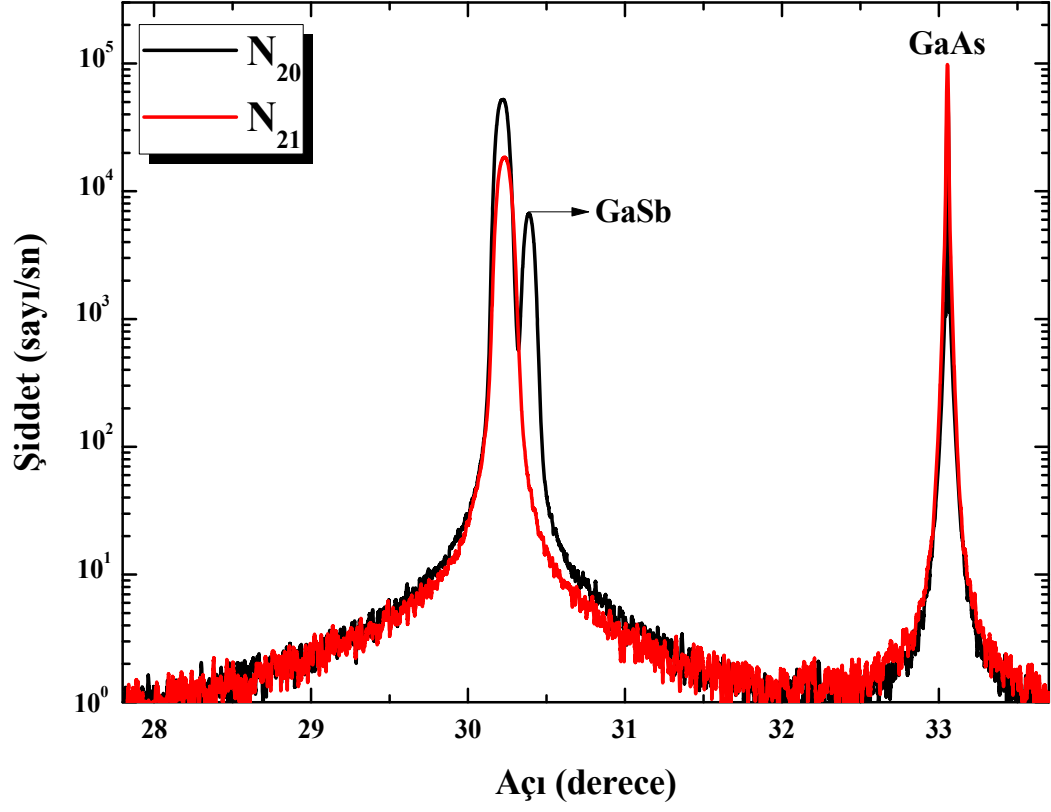
Tablo 6.3. GaSb geçiş katnamlı $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ epikatman örneklerin temel büyütme değişkenleri

rnek Numaraları	N ₁₈	N ₁₉
$Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ Büyüme Sıcaklığı (°C)	458-462	458-462
Ga Konsantrasyonu	~0,87	~0,87
As Konsantrasyonu	~0,18	~0,20
$Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ FWHM Değeri (Aı saniye)	345,4	335,2
$Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ Kalınlığı (nm)	840,6	838,1
$Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ Büyüme Zamanı (dk)	60	60
GaSb Büyüme Sıcaklığı (°C)	495	495
GaSb FWHM Değeri (Aı saniye)	265,8	284,6
GaSb Kalınlığı (nm)	731	731
GaSb Büyüme Zamanı (dk)	60	60

GaAs alttaş üzerine büyütülen GaSb geçiş katmanları V/III oranları yaklaşık olarak 9 oranında büyütülmüştür. N₁₈ ve N₁₉ rnekleri için GaSb FWHM değerleri sırasıyla 265,8 ve 284,6 aı saniye olarak bulunmuştur. Bu değerler, literatür için oldukça uyumlu değerlerdir [63]. Bunun neticesinde, $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ katmanlarının FWHM değerleri, GaAs düzeltme katmanlı örneklerle göre daha iyi değerlere ulaşmış ve daha iyi bir kristal yapı elde edilmiştir. N₁₈ ve N₁₉ $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ katmanlarının FWHM değerleri sırasıyla 345,4 ve 335,2 aı saniyedir.

$Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ foto-algılayıcı yapılarının X-ışını spektrumları Şekil 6.3’de ve temel büyütme değişkenleri ise Tablo 6.4’de sunulmuştur. rnek konsantrasyonları sallantı eğrisi ölümüyle belirlendi. Bu sonuçlara göre N₂₀ ve N₂₁ rneklerinin konsantrasyon değerleri sırasıyla $Ga_{0,87}In_{0,13}As_{0,04}Sb_{0,96}$ ve $Ga_{0,87}In_{0,13}As_{0,05}Sb_{0,95}$ olarak saptanmıştır. Ayrıca, foto-algılayıcı yapılarının doruk yerleri ~30,22 açıderece olarak bulundu. N₂₀ rneğinde yapıdaki zorlanmayı azaltması adına GaSb geçiş tabakası kullanılmış ve buna bağlı olarak daha iyi kristal kalitesi elde edilmiştir. Yaklaşık olarak 1m kalınlığa sahip GaSb tabakasının FWHM değeri 252,4 aı saniye olarak bulunmuş ve bulunan değerin literatür ile uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir [63]. Bu sonuçla ilişkili olarak,

N_{20} örneğinin FWHM değeri 306,7 açısaniye iken N_{21} örneğinde bu değer 338,6 açısaniye olarak bulunmuştur.



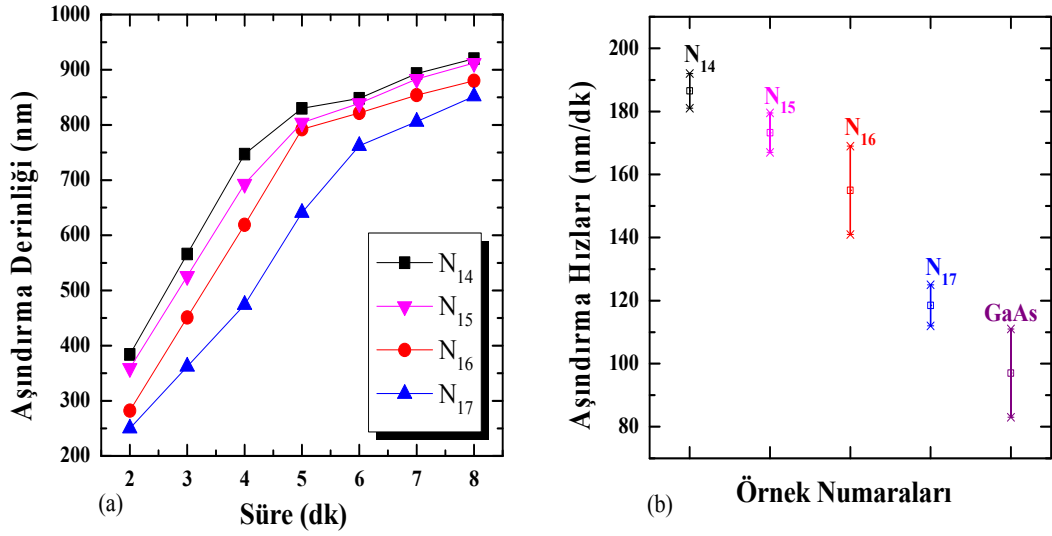
Şekil 6.3. GaAs alttaş üzerine büyütülmüş $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ foto-algılayıcı yapılarının X-ışını spektrumları

Tablo 6.4. N₂₀ ve N₂₁ foto-algılayıcı yapılarının temel büyütme değişkenleri

Örnek Numaraları	N ₂₀	N ₂₁
Ga _x In _{1-x} As _y Sb _{1-y} Büyüme Sıcaklığı (°C)	458-462	458-462
Ga Konsantrasyonu	~0,87	~0,87
As Konsantrasyonu	~0,04	~0,05
Ga _x In _{1-x} As _y Sb _{1-y} FWHM Değeri (Açı saniye)	306,7	338,6
Ga _x In _{1-x} As _y Sb _{1-y} Kalınlığı (nm)	4098	4059
Ga _x In _{1-x} As _y Sb _{1-y} Büyüme Zamanı (dk)	290	290
GaSb Büyüme Sıcaklığı (°C)	495	-
GaSb FWHM Değeri (Açı saniye)	252,4	-
GaSb Kalınlığı (nm)	1080	-
GaSb Büyüme Zamanı (dk)	90	-

6.3. Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} Foto-Algılayıcı Yapılarının Fabrikasyon Süreci

Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} dörtlü bileşiklerinin fabrikasyon sürecinde CA:H₃PO₄:H₂O₂:H₂O (55:3:5:220 ml) çözeltisi kullanılmıştır. İlk olarak, CA suda çözündürülüp ardından H₃PO₄ eklenmiştir. Son olarak, karışma H₂O₂ eklenerek yaklaşık 20 dk çözeltinin kararlı hale gelmesi için beklenmiştir (çözelti sıcaklığı 21 °C). Ayrıca, çözeltinin kararlılığını test etmek adına referans olarak GaAs alttaş kullanılmıştır. Her bir örnekten 10x10 mm²'lik parçalar alınarak çeşitli sürelerde çözeltide tutulmuş ve aşındırma derinlikleri ile aşındırma hızları hakkında bilgi edinilmiştir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4. $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ epikatman örneklerinin a-) aşındırma derinlikleri b-) aşındırma hızları

Çözelti en fazla N_{14} örneğini aşındırılmış olup, konsantrasyon bağımlı olarak aşındırma hızının değiştiği gözlemlendi. N_{14} , N_{15} , N_{16} örneklerinin kalınlıklarının yaklaşık olarak 660 ile 670 nm arasında olması nedeniyle 3. ile 4. dk'lar arasında $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ tabakasından GaAs tabakasına geçilmiştir. N_{17} örneği için bu geçiş 5. dk'nın sonuna doğru gerçekleşmiştir. Şekil 6.4b'de, CA:H₃PO₄:H₂O₂:H₂O çözeltisinde N_{14} yaklaşık olarak dakikada $186,5 \pm 11$ nm, N_{15} $173,3 \pm 12,5$ nm, N_{16} 155 ± 28 nm, N_{17} 118 ± 13 nm ve GaAs 97 ± 28 nm aşındırma hızlarına sahip oldukları görülmüştür. Ayrıca, çözelti örnek yüzeyinde aygıt performansına etki edebilecek herhangi bir kirlilik veya etmene yol açmadan düzgün bir aşındırma profili sergilemiştir.

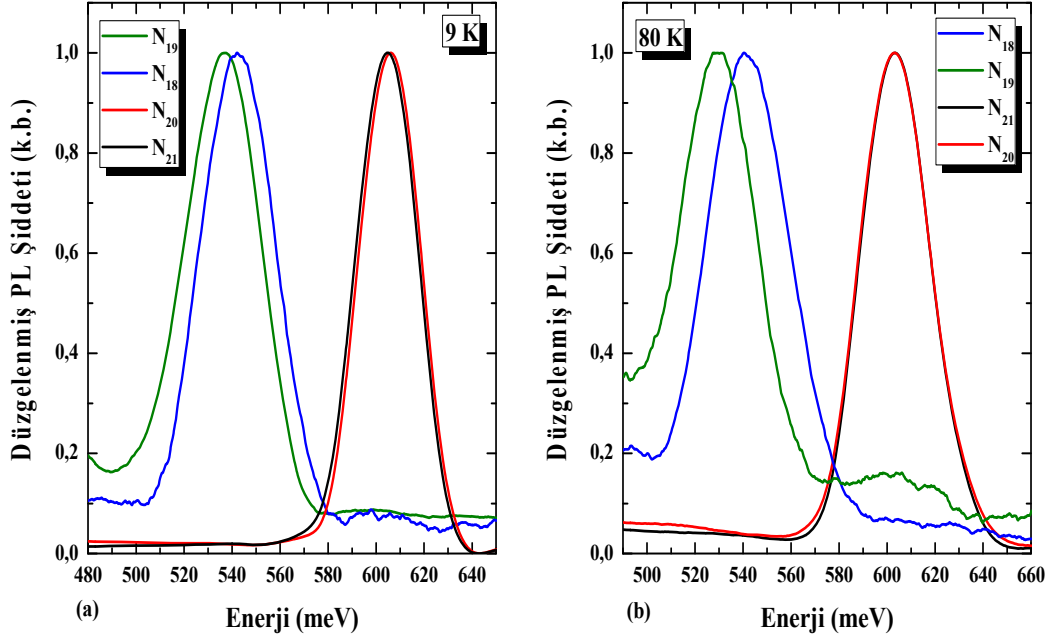
N_{20} ve N_{21} foto-algılayıcı yapılarından 10×10 mm²'lik parçalar kesilerek ilk olarak klasik örnek temizleme prosedürü uygulanmıştır. Sırasıyla, 6 dk aseton, metanol ve alkolden sonra saf su ile durularak yüksek saflıktaki gaz azot ile kurutulmuştur. Ardından, örneklere döner kaplayıcıda fotorezist kaplanıp hafif ısıtma işlemi uygulandıktan sonra maske hizalayıcıda morötesi ışığa maruz bırakılmıştır. Mesa deseninin ortaya çıkması için tab etme işlemi uygulanan örnekler, sert ısıtma işleminden sonra ıslak aşındırmaya hazır hale getirilmiştir. CA:H₃PO₄:H₂O₂:H₂O (55:3:5:220 ml) çözeltisinde örnekler yaklaşık olarak N_{20} örneği 3200 nm, N_{21} örneği ise 3150 nm aşındırılıp, metal kaplama işlemi için

maske hizalayıcıda alt ve üst kontak deseni aktarılması için tekrar fotorezist kaplanmıştır. Metal kaplama cihazında, Ti/Pt/Au 50/50/300 nm kalınlıklarında metal kaplama yapılan örnekler, yüzeydeki fotorezist ve artık metallere kurtulmak amacıyla asetona konularak halka deseninin çıkması sağlanmıştır. Daha sonra, tel bağlama işlemi yapılan örnekler opto-elektronik ölçümler için hazır hale getirilmiştir.

6.4. $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ Foto-Algılayıcı Yapılarının Optik ve Opto-Elektronik Karakterizasyonu

GaAs alttaş üzerine büyütülen $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ dörtlü kızılötesi foto- algılayıcılarının genel davranışlarının anlaşılabilmesi için PL, tayfsal fototepki ve karanlık akım ölçümleri yapılmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

PL deney düzeneğinde, demet bölücü olarak CaF_2 kullanılmış olup, dedektör olarak sıvı azot soğutmalı InSb dedektör kullanılmıştır. N_{18} , N_{19} , N_{20} ve N_{21} örneklerinin 9 ve 80 K'deki PL spektrumları Şekil 6.5'de verilmiştir. N_{20} ve N_{21} örnekleri, birbirlerine çok yakın konsantrasyonlara sahip oldukları için bant aralığı enerjilerinin hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. 80 K sıcaklığında örneklerin bant aralığı enerjileri sırasıyla yaklaşık olarak 603,01 ve 603,24 meV iken 9 K'deki enerjilerinin sırasıyla 606,11 ve 604,68 meV olduğu saptanmıştır. N_{18} ve N_{19} örneklerinin bant aralığı enerjileri 80 K'de sırasıyla 540,36 ve 527,35 meV, 9 K'de 542,03 ve 537,25 meV olarak bulunmuştur. Örneklerin PL ölçümlerinden elde edilen bant aralığı enerjileri Tablo 6.5'de sunulmuştur.

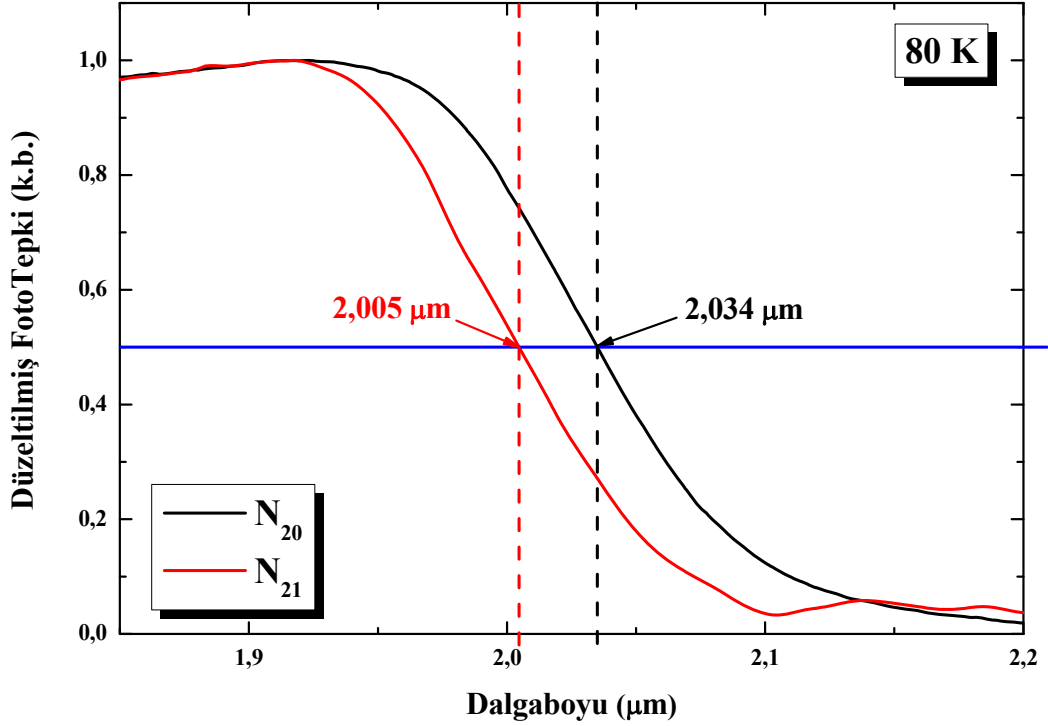


Şekil 6.5. Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} dördlü bileşiklerin a-) 9 K'deki b-) 80 K'deki PL spektrumları

Tablo 6.5. N₁₈, N₁₉, N₂₀ ve N₂₁ örneklerinin PL ölçümleriyle elde edilen bant aralığı enerjileri

Örnek	Bant Aralığı Enerjisi (meV)	
	9 K	80 K
N ₁₈	542,03	540,36
N ₁₉	537,25	527,45
N ₂₀	606,11	603,01
N ₂₁	604,68	603,24

Şekil 6.6'da aygıt haline dönüştürülmüş olan N₂₀ ve N₂₁ foto-algılayıcı yapılarının 80 K sıcaklıkta tayfsal fototepki ölçümleriyle kesim dalgaboyları belirlenmiştir. Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y} bileşikleri, kapalı devre helyum soğutmalı kreostata konulmuş ve ölçümler için ZnSe pencere kullanılmıştır. Alınan sinyallerin yüksek miktarda olması nedeniyle ön yükseltici kaynağına ihtiyaç duyulmamıştır. Örneklerden alınan ham sinyaller, tayfsal tepkisi dalga boyu bağımsız olarak kabul edilen DLaTGS algılayıcının spektrumu ile düzeltilip ardından düzleştirilmiştir (smooth). Ayrıca, her örnek için elde edilen spektrumun diğerleri ile kıyaslanabilmesi için normalizasyon yapılmıştır.



Şekil 6.6. N_{20} ve N_{21} örneklerinin 80 K sıcaklıktaki düzeltilmiş fototepkileri ve kesim dalgaboyu değişimleri (Kesikli çizgiler kesim dalgaboyunu göstermektedir)

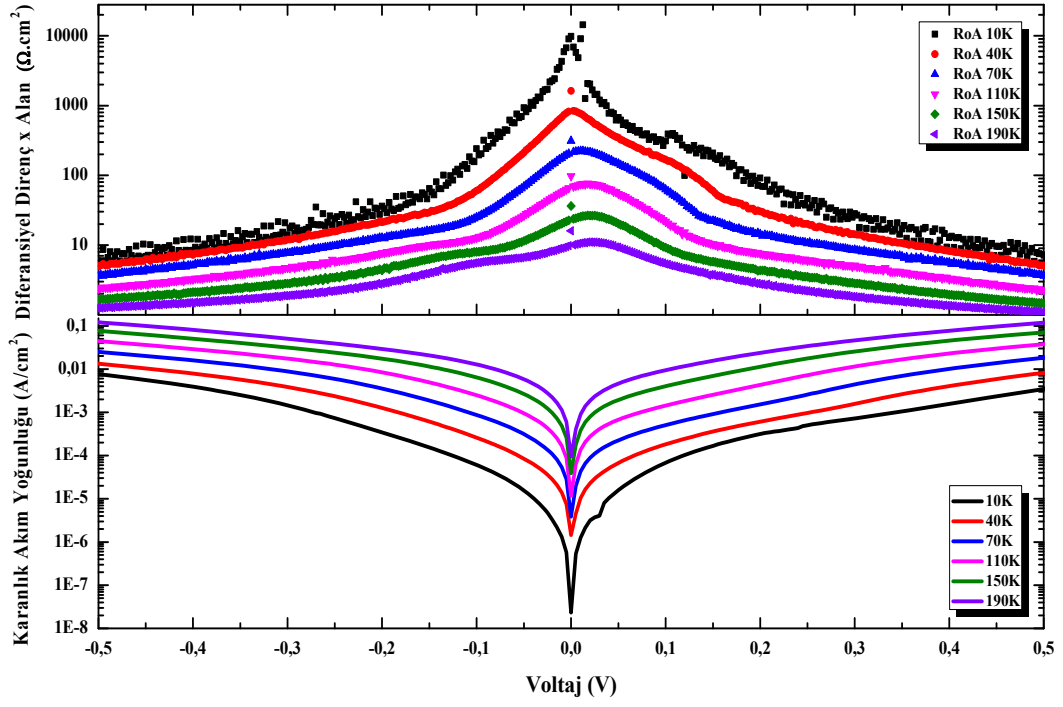
N_{20} örneğinin λ_{50} 2,034 μm iken, N_{21} örneğinin ise 2,005 μm olarak bulunmuştur. N_{20} ve N_{21} örnekleri için bu değerlere karşılık gelen bant aralığı enerjileri sırasıyla 609,6 ve 618,4 meV olarak bulunmuştur. Wang ve ark. [76] oda sıcaklığında $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ dörtlü bileşiklerinin bant aralığı enerjisini x ve y konsantrasyonlarına bağlı olarak;

$$E(x,y) = 0,726 - 0,961x - 0,501y + 0,08xy + 0,415x^2 + 1,2y^2 + 0,021x^2y - 0,62xy^2 \quad (6.1)$$

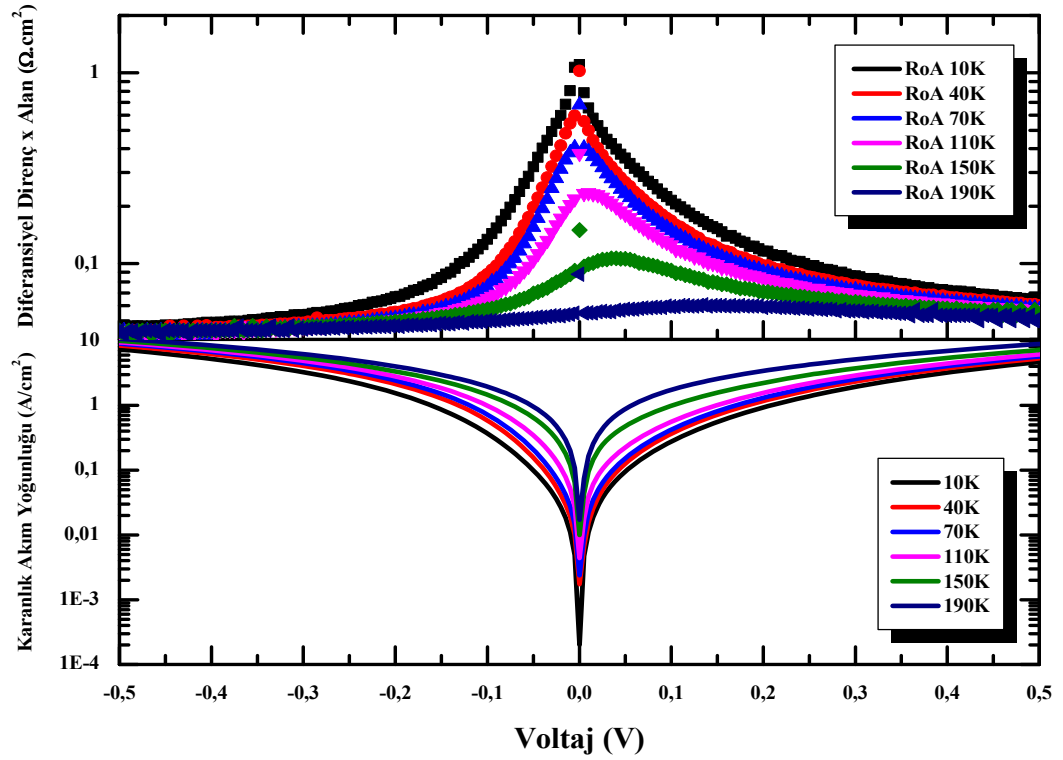
denklemleriyle hesaplamışlardır. Bu değerlere göre, N_{20} ve N_{21} örneklerinin oda sıcaklığındaki bant aralığı enerjileri sırasıyla 590,26 ve 586,37 meV olarak bulunmuştur.

N_{20} ve N_{21} örneklerinin karanlık akımları, sıcaklık bağımlı olarak incelenmiş ve Arrhenius davranışları karanlık akıma etki eden mekanizmaların incelenmesi için grafik haline dönüştürülmüştür. Şekil 6.7 ve 6.8'de örneklerin karanlık akım yoğunlukları ve R_0A diferansiyel dirençleri değerleri verilmiştir. Sıcaklık bağımlı karanlık akım ölçümleri N_{20} örneği için $1500 \times 1500 \mu\text{m}^2$, N_{21}

örneğinde ise $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ 'lik mesalardan alınmış olup, 50mV voltaj adımlarında alınmıştır. Karanlık akım yoğunluğunun sıcaklıkla doğru orantılı olarak artması ve buna bağlı olarak diferansiyel direnç değerlerinin de azalması beklenmektedir. Şekil 6.7'de görüldüğü gibi N₂₀ diyot yapısının, buna uygun bir şekilde davrandığı açık bir şekilde gözükmektedir. N₂₀ örneği için 0 V'da ve 10 K sıcaklıktaki karanlık akım yoğunluğu $2,33 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ iken 190 K sıcaklıkta ise $9,50 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 'dir. Bu yapı için bulunan en yüksek R_{0A} değeri, 10K sıcaklığında 0 V'da $9803 \Omega \cdot \text{cm}^2$ ve 0,025V'da $14404 \Omega \cdot \text{cm}^2$ olarak bulunmuştur. Diyot yapısında sıcaklığın azalmasıyla birlikte R_{0A} değerinin artması beklenmekte olup, Şekil 6.7'de görüldüğü gibi N₂₀ diyotunun davranışı buna uygundur. N₂₁ diyotunun 0 V'da ve 10 K sıcaklıktaki karanlık akım yoğunluğu $2,00 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ iken 190 K sıcaklıkta ise $1,71 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 'dir. Bulunan en yüksek R_{0A} değeri ise 0 V'da ve 10K sıcaklığında $1,10 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 'dir. N₂₀ örneği ile kıyaslandığında oldukça düşük R_{0A} değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bunun en önemli nedenlerinin başında, N₂₀ örneğinin GaSb geçiş katmanı kullanılarak alttaş ile yapı arasında örgü uyumsuzluğundan kaynaklı olarak oluşabilecek kusurların giderilmesi gelmektedir. GaSb geçiş katmanlı ile bu kusurların bir kısmı giderilmiş ve yüksek R_{0A} değeri elde edilmiştir.

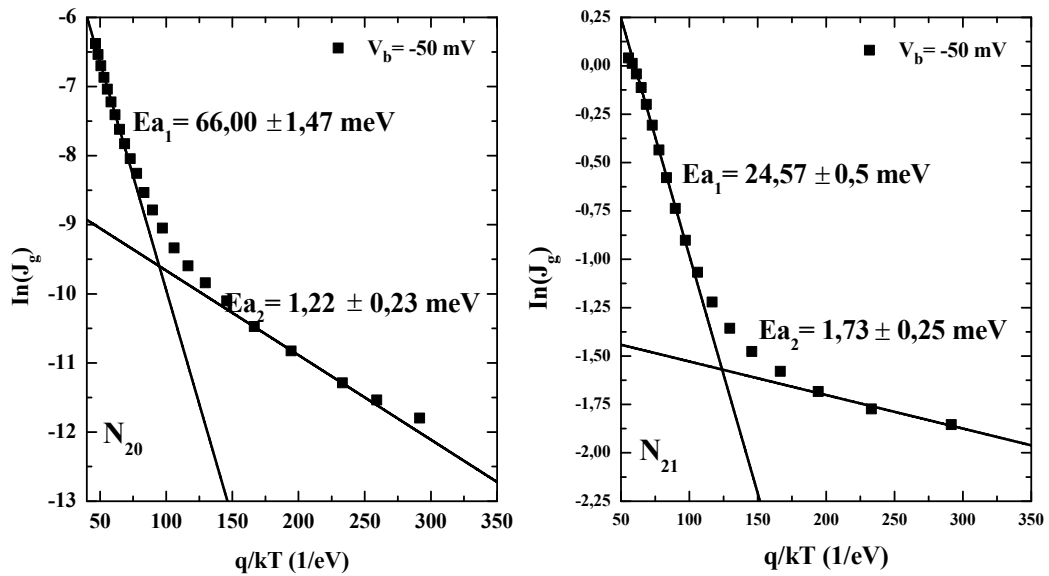


Şekil 6.7. N_{20} örneğinin farklı sıcaklıklar için karanlık akım yoğunluğu ve diferansiyel direnç değerleri



Şekil 6.8. N_{21} örneğinin farklı sıcaklıklar için karanlık akım yoğunluğu ve diferansiyel direnç değerleri

N_{20} ve N_{21} örneklerinde, yapı içindeki karanlık akıma etki eden mekanizmaların tanımlanmasını yapmak için aktivasyon enerjisi hesaplanmış ve -50mV'a karşılık gelen Arrhenius davranışları karanlık akıma etki eden mekanizmaların incelenmesi için grafik haline dönüştürülmüştür (Şekil 6.9). Arrhenius eğrisiyle elde edilen verilerin iki farklı bölgesinde doğrusal fit yapıp, iki farklı aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır. N_{20} için hesaplanan aktivasyon enerjileri sırasıyla 66 ve 1,22 meV N_{21} örneği için 24,57 ve 1,73 meV olarak bulunmuştur. Bu seviyeler, safsızlık aktivasyon enerjisi seviyeleridir. N_{20} ve N_{21} örneklerinin E_{a1} sırasıyla 66 ve 24,57 meV seviyeleri tek ya da çift homojen eklemlerde görülebilen derin alıcı (deep acceptors), E_{a2} sırasıyla 1,22 ve 1,73 meV seviyeleri ise sığ alıcılardan (shallow acceptors) kaynaklanmaktadır [77]. GaSb, $Ga_{0,89}In_{0,11}As_{0,7}Sb_{0,93}$, $Ga_{0,85}In_{0,15}As_{0,14}Sb_{0,86}$, $Ga_{0,78}In_{0,22}As_{0,13}Sb_{0,87}$, $Ga_{0,91}In_{0,08}As_{0,7}Sb_{0,93}$ örnekleri için Voronina ve ark. [77] benzer sonuçlar elde etmişlerdir.



Şekil 6.9. N_{20} ve N_{21} foto-algılayıcı yapılarının Arrhenius davranışları ve aktivasyon enerjileri

7. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ve $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ külçe yapı malzeme sistemleri GaAs düzeltme katmanlı, GaAs düzeltme ve GaSb geçiş katmanlı olarak MBE sisteminde büyütülmüş, yapısal, optik ve opto-elektronik karakterizasyonları yapılmıştır.

$\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ örneklerinin konsantrasyonlarını belirlemek için farklı As ve Sb akılarında örnekler büyütülmüştür. İlk olarak, GaAs alttaşın oksit katmanı kaldırıldıktan sonra direk olarak Sb konsantrasyonu fazla olan beş adet set $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ örnekleri büyütülmüştür. Her bir örnek için büyüme sıcaklıkları, büyüme süreleri, In akıları ve hücre sıcaklıkları gibi büyüme parametreleri sabit tutulup, sadece As ve Sb akıları değiştirilmiştir (farklı vana açıklıkları kullanılmıştır). Oksit tabakasının kaldırılmasının ardından GaAs düzeltme katmanlı set örnekler büyütülmüştür. Bu örneklerin As konsantrasyonu yüksek olup, N_4 ve N_5 örneklerinin In akısı artırılarak büyüme oranları değiştirilmiştir. Bir diğer örnek grubunda, GaAs düzeltme katmanından sonra GaSb geçiş katmanlı set örnekler büyütülmüştür. InAsSb-tabanlı nBn dedektör yapısı önce AlAsSb bariyer katmanlarının konsantrasyonunu belirleyebilmek için GaSb alttaş üzerine iki adet InAsSb/AlAsSb yapısı büyütülüp, konsantrasyon ve büyüme oranı hakkında bilgi edinildikten sonra nBn dedektör yapısı büyütülmüştür. Tüm örnekler için x konsantrasyon değerleri ve kristal kaliteleri ile ilgili bilgiler HRXRD tekniği sallantı eğrisi ölçümüyle belirlenmiş ve büyütülen epikatmanların konsantrasyon doğruluğunun daha iyi anlaşılması adına InAs ve InSb referans örnekleri kullanılmıştır.

HRXRD sallantı eğrisi ölçümleri sonucunda, konsantrasyon bağımlı örneklerin düzeltme katmanı olmamasına rağmen, GaAs alttaş üzerine, yüksek kalitede büyütüldüğü görülmüştür. FWHM değerleri literatürdekilerle karşılaştırılmış ve çıkan değerlerin literatür ile gayet uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, S_5 örneğinin 550 nm kalınlıkta olmasına rağmen şimdiki kadar raporlanan çalışmalar arasında en iyi FWHM değerine sahip olduğu saptanmıştır. Bu da örneklerin başarılı bir şekilde büyütüldüğü ve iyi bir kristal

yapıya sahip olduğunun açık bir göstergesidir. As konsantrasyonu yüksek GaAs geçiş katmanlı örneklerde, In akısı artırılarak büyüme oranı artırılmış ve literatür ile uyumlu FWHM değerleri elde edilmiştir. GaSb geçiş katmanlı örneklerde, N₈ örneğinde InAs_{1-x}Sb_x ile GaSb HRXRD dorukları birbirlerine çok yakın çıktığı için doruklar, ters evrişim yöntemiyle ayrıştırılarak InAsSb ve GaSb katmanlarının FWHM değerleri elde edilmiştir. N₆ ve N₇ örnekleri, Sb akısının zamanla azalmasından dolayı çift konsantrasyonda büyüme eğilimi olduğu saptanmış ve HRXRD doruklarında omuzlar çıktığı görülmüştür. Bu omuzlara rağmen, GaSb geçiş katmanlı örneklerin FWHM değerleri, literatürdeki bazı değerlerle karşılaştırıldığında oldukça makul değerler olduğu görülmüş ve çift konsantrasyonlu büyüme eğilimine rağmen iyi bir kristal yapıya sahip oldukları saptanmıştır. Ayrıca, N₁₁ nBn dedektör yapısı büyütülmeden önce, AlAsSb konsantrasyonunu belirlemek için N₉ ve N₁₀ örnekleri büyütülmüş, fakat Sb akısının zamanla değişmesi nedeniyle kristal kalitesi hakkında bilgi edinilememiştir. N₁₁ örneği, GaSb alttaş üzerine düzgün şekilde büyütülmüş ve 54 nm kalınlıktaki AlAsSb'nin FWHM değeri literatürdekilerle karşılaştırıldığında oldukça makul değerde olduğu saptanmıştır.

InAs_{1-x}Sb_x epikatman örnekleri, tavlama etkisini anlamak amacıyla 500 °C'da 5 ve 30 dk sürelerde tavlansak HRXRD tekniği ile incelenmiştir. N₅ örneği haricindeki tüm örneklerin HRXRD spektrumlarında, ana doruklardan farklı olarak omuzlar meydana gelmiştir. Fakat, bu omuzların konsantrasyon değiştirici kayma yada oksit tabakası olup olmadıkları doğrulanamamıştır. Bu omuzların doğrulanması PL tekniği ihtiyacını doğurmuştur. As konsantrasyonu yüksek olan (1-x_{As}= 0,87) N₅ örneğinin X-ışını spektrumlarında herhangi bir değişiklik olmayıp FWHM değerlerinde küçük de olsa iyileşmeler gözlemlenmiştir. Bu durum, tavlamanın As konsantrasyonu yüksek InAs_{1-x}Sb_x epikatman örnekleri için kristal kalitesini iyileştirme eğiliminde olduğunu göstermektedir.

InAs_{1-x}Sb_x epikatman örneklerinin CA çözeltisi için x konsantrasyonuna bağlı olarak aşındırma oranı belirlenmiştir. CA çözeltisi, InAs'ı en fazla InSb'yi ise neredeyse hiç aşındırmadığı saptanmıştır. Bu bağlamda, InAs_{1-x}Sb_x örneklerinin aşındırma hızının konsantrasyon bağlı olduğu gözlemlenmiştir. As konsantrasyonu arttıkça aşındırma hızının arttığı sonucuna varılmıştır. S set

örnekleri içinde As konsantrasyonu en fazla olan S₅ örneğinin aşındırma hızı ortalama olarak 43 nm/dk olarak bulunmuştur. Ayrıca, InAs_{1-x}Sb_x bileşiği için CA asit çözeltisinin , düzgün ve pürüzsüz yüzey elde etmek için iyi bir aşındırıcı olduğu sonucuna varılmıştır.

AlAsSb katmanını aşındırmak için HCl asit çözeltisi kullanılmıştır. HCl asit çözeltisinin AlAsSb'yi aşındırma hızı dakikada yaklaşık olarak 1371 nm olduğu için aşındırma hızı belirlenememiştir. Ayrıca, InAsSb/AlAsSb çoklu eklemlili örneklerde InAs_{1-x}Sb_x katmanları da aşındırılmıştır. Fakat, HCl asit çözeltisi örneklerin yüzeyinde kararmalar ve kusurlara neden olduğu için düzgün aşındırma oranı InAs_{1-x}Sb_x katmanları için de belirlenememiştir ve bu katman için uygun bir aşındırıcı olmadığı sonucuna varılmıştır.

InAsSb-tabanlı nBn dedektör yapısının fabrikasyon sürecinde yüzey yalıtımı kullanılmadığı için yüzey kaçak akımları oldukça fazladır ve bu nedenle R_{0A} değerleri oldukça düşük çıkmıştır. Ayrıca, karanlık akım yoğunluğunun diyot alanından bağımsız bir şekilde çıkmaması örnekteki kusur dağılımının rastgele dağılım gösterdiğini ortaya koymuştur. Karanlık akım ölçümlerinden elde edilen sonuçların analizlerinin daha doğru yapılabilmesi, yüzey kaçak akımlarının baskılanması için yüzey yalıtımına ihtiyaç olduğu ve örnekteki rastgele kusur dağılımının iyileştirilmesine ihtiyaç olduğu görülmüştür.

InAs_{1-x}Sb_x GaAs düzeltme katmanlı-GaSb geçiş katmanlı ve GaAs düzeltme katmanlı foto-algılayıcı yapıları GaAs alttaş üzerine başarılı bir şekilde büyütülmüş ve kesim dalga boyu ile bant aralığı enerjileri belirlenmiştir. Bulunan bant aralığı enerjileri ile teorik değerlerin birbirleriyle uyumlu oldukları gözlemlenmiştir. GaSb geçiş katmanlı diyot yapısının 250 K, geçiş katmansız örnekte ise 270 K sıcaklıklarına kadar foto-tepkilerinin olduğu saptanmıştır. Her iki algılayıcı yapısı için sıcaklık bağımlı karanlık akım ölçümleri yapılmış, Arrhenius grafikleri çizilmiştir. Arrhenius grafiklerinde, doğrusal fit yöntemiyle her bir örnek için iki farklı aktivasyon enerjisi hesaplanmış ve karanlık akıma etki eden mekanizmalar farklı sıcaklıklar için tanımlanmıştır. Algılayıcı yapılarında, G-R mekanizmasının baskın olduğu sonucuna varılmış ve bu mekanizmanın R_{0A} değerini olumsuz bir şekilde etkilediği görülmüştür. Ayrıca, örneklere herhangi bir

yüzey yansıtıcı veya yalıtımı işlemi yapılmaması nedeniyle yüzey kaçak akımları baskılanamamış, bu nedenle karanlık akım değeri beklenenden yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

$\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ konsantrasyonu, Raman spektroskopisi ölçümleri ile de doğrulanmıştır. Alaşımların fonon frekans değişimleri, konsantrasyona bağlı olarak InAs ve InSb LO doruklarına yaklaşmakta veya uzaklaşmaktadır. Sb konsantrasyonu yüksek olan örneklerin InSb-benzer LO dorukları InSb LO'ya yaklaşırken aynı zamanda Raman şiddeti de artmaktadır. InAs-benzer LO dorukları Sb konsantrasyonu arttıkça InAs LO doruklarından uzaklaştığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, InAs-benzer TO dorukları Sb konsantrasyonu arttıkça InAs TO doruklarından uzaklaşmaktadır. Bu dorukların Raman kaymaları, konsantrasyona bağlı olarak doğrusal şekilde kaydığı gözlemlenmiş ve bu dorukların her birinin yeri en küçük kareler yöntemiyle hesaplanarak konsantrasyonun bir fonksiyonu olarak sunulmuştur. Akustik fonon bölgesinde $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ örnekleri için zayıf dorukların olduğu saptanmış ve bu dorukların InSb 2IA(K) karmaşık-kipli bölgeye yakın bir yerde konsantrasyona bağlı olarak kaydığı görülmüştür. Bu nedenle, bu doruklar InSb-benzer 2IA(K) karmaşık-kipli fononlar olarak adlandırılmış ve yerleri konsantrasyonun bir fonksiyonu olarak bir denklem halinde sunulmuştur.

$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ dörtlü bileşik yapılarının konsantrasyonlarını belirleyebilmek için ilk olarak GaSb alttaş üzerine GaSb ve InAs katmanları farklı sıcaklarda büyütülmüştür. Katman kalınlıkları, SEM yan-kesit yöntemiyle belirlenmiş ve farklı Ga ve In sıcaklıkları için GaSb/InAs büyüme oranı kalibrasyonu yapılmıştır. Ardından, Ga ve In hücre sıcakları sabit tutulup sadece As ve Sb akıları değiştirilerek GaAs düzeltme katmanlı dört adet $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ epikatman örnekleri başarılı bir şekilde GaAs alttaş üzerine büyütülmüştür. Büyütülen örnekler arasında N_{14} 'ün 345,2 açısaniyelik değer ile en iyi FWHM'a sahip olan örnek olduğu gözlemlenmiştir. N_{17} örneğinin, karışabilir bant aralıklı büyüdüğü RHEED üzerinden saptanmış ve buna bağlı olarak kristal kalitesi en düşük olan örnek olarak belirlenmiştir (FWHM değeri 656,7 açısaniye).

$Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ epikatman yapılarının $CA:H_3PO_4:H_2O_2:H_2O$ çözeltisi için x ve y konsantrasyonuna bağlı olarak aşındırma derinlikleri ve hızları elde edilmiştir. Bu çözeltinin $Ga_{0,85}In_{0,15}As_ySb_{1-y}$ bileşiğinde Sb konsantrasyonu en fazla olan N_{14} örneğini en fazla aşındırdığı, en az olan N_{17} örneğinin ise en az aşındırdığı sonucuna ulaşmıştır. Aşındırma sırasında çözeltinin kararlılığını test etmek adına kullanılan $GaAs$ referans örneğinin ise bu örnek grubundan daha az oranda aşındığı tespit edilmiştir. Ayrıca çözeltinin, aşındırma hızı en fazla olan N_{14} örneğini dakikada 186 ± 11 nm, en az olan N_{17} örneğini ise dakikada 118 ± 13 nm aşındırdığı saptandı.

$GaAs$ alttaş üzerine $GaSb$ geçiş katmanlı olarak büyütülen $Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ dördümlü alaşım yapıları, $GaAs$ düzeltme katmanlı örneklerle göre daha iyi kristal kalitesigöstermiştir. N_{19} örneğinin, büyütülen epikatmanlar arasında en iyi FWHM değerine sahip olduğu saptanmıştır (FWHM değeri 335,2 açısanıye). N_{18} ve N_{19} örneklerinin bant aralığı enerjileri, 9 ve 80 K sıcaklık değerleri için PL ölçümleriyle belirlenmiştir. Bu yapıların 80 K'deki bant aralığı enerjileri sırasıyla 540,36 ve 531,04 meV olarak bulunmuştur. Bulunan bant aralığı enerjileri, literatür ile karşılaştırıldığında oldukça uyumlu olduğu ve örnekler için belirlenen konsantrasyon değerlerinin doğru olduğunu göstermiştir [76].

$Ga_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ foto-algılayıcı yapıları, $GaAs$ alttaş üzerine $GaSb$ geçiş katmanlı ve $GaAs$ düzeltme katmanlı olarak başarılı bir şekilde büyütülmüştür. Büyütülen yapıların, PL spektrumları ile kesim dalgaboyu ile elde edilen bant aralığı enerjileri birbirleriyle karşılaştırılarak uyum içinde oldukları gözlemlenmiştir. Ayrıca bulunan enerji değerleri, konsantrasyona bağlı teorik değer ile de uyum göstermektedir [76]. N_{20} ve N_{21} foto-algılayıcı yapılar için sıcak bağımlı olarak karanlık akım ölçümleri yapılmış ve $-50mV$ 'a karşılık gelen Arrhenius davranışları grafik haline dönüştürülüp karanlık akıma etki eden mekanizmalar incelenmiştir. Diyotlarda en iyi R_0A değeri N_{20} örneği için $0,025 V$ 'da ve 10K sıcaklığında $14404 \Omega.cm^2$ olarak bulunmuştur. Ayrıca, 10 K sıcaklıktaki karanlık akım yoğunluğu $2,33 \times 10^{-8} A/cm^2$ iken 190 K sıcaklıkta ise $9,50 \times 10^{-5} A/cm^2$ olduğu saptanmıştır. N_{21} diyodunun 0 V'da ve 10 K sıcaklıktaki

karanlık akım yoğunluğu $2,00 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ iken 190 K sıcaklıkta ise $1,71 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ 'dir. Bulunan en yüksek R_0A değeri 0 V'da ve 10K sıcaklığında $1,10 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ 'dir. GaSb geçiş katmanlı N_{20} örneğinin R_0A değeri, GaAs düzeltme katmanlı N_{21} 'e göre çok daha yüksek olduğu görülmüştür. GaAs ile yapı arasındaki örgü uyumsuzluğu nedeniyle oluşan kusurların bir kısmı GaSb geçiş katmanıyla giderilmiş, N_{20} foto-algılayıcı yapısının opto-elektronik özelliklerine olumlu şekilde yansımıştır. N_{20} ve N_{21} örneklerinin karanlık akım mekanizmalarını tanımlamak için Arrhenius eğrisiyle, her biri için iki farklı aktivasyon enerjisi hesaplanmış ve bu değerlerin safsızlık aktivasyon enerjileri olduğu öngörülmüştür. Örneklerin karanlık akımları, yapıdaki derin ve sığ alıcı seviyelerden önemli derecede etkilendikleri sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] A. Rogalski, “Infrared detectors: status and trends”, *Progress in Quantum Electronics*, **27**, 59-210, 2003.
- [2] A. Rogalski, “Competitive technologies of third generation infrared photon detectors”, *Opto-Electronics Review*, **14**, 1, 84-98, 2006.
- [3] Esaki, L., Tsu, R., “Superlattice and negative conductivity in semiconductors”, *IBM Journal of Research and Development*, **14**, 61–65, 1970.
- [4] Levine, B., F., Choi, K., K., Bethea, C., G., Walker, J., Malik, R., J., “New 10 μm infrared detector using intersubband absorption in resonant tunneling GaAlAs superlattices”, *Appl. Phys. Lett.* **50**, 1092, 1987.
- [5] Matthew Erdtmann, “*GaInAs/InP Quantum Well Infrared Photodetectors on Si Substrate for Low-cost Focal Plane Arrays*”, edited by Manijeh Razeghi, 2001.
- [6] Bethea, C., G., Levine, B., F., Shen, V., O., Abbott, R., R., Hsieh, S., J., “10- μm GaAs/AlGaAs multiquantum well scanned array infrared imaging camera”, *IEEE Trans. Electron Devices*, **38**, 5, 1991.
- [7] 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. Techn.* **47**, 53-58, 2005.
- [8] 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.
- [9] Rogalski, A., “Progress in focal plane array technologies”, *Progress in Quantum Electronics*, **36**, 342-473, 2012.
- [10] 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.

- [11] Dennis Thomas Norton, Jr., “Type-II InAs/GaSb superlattice LEDs: applications for infrared scene project or systems”, Doktora Tezi, Iowa Üniversitesi, 2013.
- [12] Rogalski, A., Adamiec, K., Rutkowski, J., “Narrow-Gap Semiconductor Photodiodes”, SPIE, Bellingham, 2000.
- [13] Rogalski, A., “InAs_{1-x}Sb_x infrared detectors”, *Progress in Quantum Electronics*, **13**, 191–231, 1989.
- [14] Rogalski, A., “New Ternary Alloy Systems for Infrared Detectors”, *Optical Engineering*, Bellingham, 1994.
- [15] Rogalski, A., “Infrared Photon Detectors”, *SPIE Optical Engineering*, Bellingham, 1995.
- [16] Bubulac, L., O., Andrews, A., M., Gertner, E., R., Cheung, D., T., “Backside-illuminated InAsSb/GaSb broad band detectors”, *App. Phy. Lett.*, **36**, 734–736, 1980.
- [17] Kalyan Chakravarthy Nunna, Siew Li Tan, Charles Reyner, J., Andrew Robert Julian Marshall, Baolai Liang, Anitha Jallipalli, John P., R., David, and Diana, L., Huffaker, “Short-Wave Infrared GaInAsSb Photodiodes Grown on GaAs Substrate by Interfacial Misfit Array Technique”, *IEEE Photonics Technology Letters*, **24**, 3, 2012.
- [18] Vurgaftman, I., Meyer, J.R., Ram-Mohan, L., “Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys”, *J. Appl. Phys.*, **89**, 5815-5875, 2001.
- [19] Herschel, W., *Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the Sun*, Philos. Trans. Roy. Soc. London, **90**, 284, 1800.
- [20] *Elektromanyetik Spektrum*, Bölüm 3,
http://astronomy.ege.edu.tr/~sevren/Dersler/PratikAstronomi/Isik_ve_Tayf.pdf
- [21] Barr, E., S., “Historical survey of the early development of the infrared spectral region”, *Am. J. Phys.*, **28**, 42–54, 1960.
- [22] Rogalski, A., *Infrared Detectors*, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 2000.

- [23] Rogalski, A., “Recent progress in infrared detector technologies”, *Inf. Phy. & Tech.*, **54**, 136-154, 2011.
- [24] Rogalski, A., Chrzanowski, K., “Infrared devices and techniques”, *Opto-Elect. Rev.*, **10**, 111-136, 2002.
- [25] Richards, P., L., “Bolometers for infrared and milimeter waves”, *J. Appl. Phy.*, **76**, 1, 1994.
- [26] Dereniak, E., L., Boreman, G., D., *Infrared Detectors and Systems*, New York, 1996.
- [27] Jutao Jiang, *Infrared Focal Plane Array based on GaInAs/InP Quantum Well Infraed Photodetectors*, edited by Manijeh Razeghi, 2004.
- [28] Rogalski, A., *Infrared Detectors*, 2nd Edition, CRC Press, Boca Raton/New York, 2011.
- [29] Chakrabarti, S., Stiff-Roberts, A.D., Su, X.H., Bhattacharya, P., Ariyawansa, G., Perera, A.G.U., “High-performance mid-infrared quantum dot infrared photodetectors” *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38**, 2135–2141, 2005.
- [30] Mikhailova, M.P., Handbook Series on Semiconductor Parameters, **vol.2**, Edited by Levinshtein, M., Rumyantsev S., Shur, M. , World Scientific, London, 180-205, 1999.
- [31] Grundmann, M., *The Physics of Semiconductors: An Introduction Including Devices and Nanophysics*, Springer-Verlag ,Berlin-Heidelberg, 2006.
- [32] Woolley J.J., Warner, J.C., “Optical energy-gap variation in InAs-InSb alloy” *Can. J. Phys.*, **2**, 1879-1885, 1964.
- [33] Yen, M., Y., Levine, B., F., Bethea, C., G., Choi, K., K., Cho, A., Y., “Molecular beam epitaxial growth and optical properties of InAs_{1-x}Sb_x in 8-12 μm wavelength range”, *Appl. Phys. Lett.*, **50**, 927-9, 1987.
- [34] Fang, Z., M., Ma, K., Y., Jaw, D., H., Cohen, R., M., Stringfellow, G., B., “Photoluminescence of InSb, InAs, and InAsSb grown by organometallic vapor phase epitaxy”, *J. Appl. Phys.*, **67**, 7034-7039, 1990.
- [35] Wieder, H.H., Clawson, A.R., “Photo-electronic properties of InAs_{0.07}Sb_{0.93} films”, *Thin Solid. Films*, **15**, 217-21, 1973.

- [36] Steenbergen, E., H., “*Strain-balanced InAs-InAsSb Type-II Superlattices on GaSb Substrates for Infrared Photodetector Applications*”, Doktora Tezi, Arizona State University, Arizona, USA, 2012.
- [37] Yen, M.Y., People, R., Wecht, K.W., Cho, A.Y., “Long-wavelength photoluminescence of $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 < x < 1$) grown by molecular beam epitaxy on (100) InAs”, *Appl. Phys. Lett.*, **52**, 489-491, 1988.
- [38] Chuang, S.L., *Physics of Photonic Devices*, Hoboken, New Jersey: Wiley, 2009.
- [39] Smith, S.N., Phillips, C.C., Thomas, R.H., Stradling, R.A., Ferguson, I.T., Norman, A.G., Murdin, B.N., Pidgeon, C.R., “Interband magneto-optics of $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ” *Semicond. Sci. and Technol.*, **7**, 900-906, 1992.
- [40] Osbourn, G.C., “InAsSb strained-layer superlattices for long wavelength detector applications”, *J. Vac. Sci. Technol. B.*, **2**, 176-178, 1984.
- [41] Belenky, G., Kipshidze, G., Donetsky, D., Svensson, S.P., Sarney, W. L., Hier, H., Shterengas, L., Wang, D., Lin., Y., “Effects of carrier concentration and phonon energy on carrier lifetime in type-2 SLS and properties of $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ alloys”, *Proc. SPIE 8012 (1)*, **80120W.**, 2011.
- [42] Li, Y.B., Bain, D.J., Hart, L., Livingstone, M., Ciesla, C.M., Pullin, M.J., Tang, P.J.P., Yuen, W.T., Galbraith, I., Phillips, C.C., Pidgeon, C.R., Stadling, R.A., “Band alignments and offsets in $\text{In}(\text{As,Sb})/\text{InAs}$ superlattices”, *Phys. Rev. B (Condensed Matter)*, **55**, 4589-4595, 1997.
- [43] Astles, M., Hill, H., Williams, A.J., Wright, P.J., Young, M.L., “Studies of the $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_{1-y}\text{Sb}_y$ Quaternary Alloy System Liquid-Phase Epitaxial Growth and Assessment”, *J. Elec. Mater.*, **15**, 41-49, 1986.
- [44] Adachi, S., “Band gaps and refractive indices of AlGaAsSb , GaInAsSb , and InPAsSb : Key properties for a variety of the 2-4 μm optoelectronic devices applications”, *J. Appl. Phys.*, **61**, 10, 1987.
- [45] Cherng, M.J., Stringfellow, G.B., “ GaInAsSb metastable alloys grown by organometallic vapor phase epitaxy”, *Appl. Phys. Lett.*, **48**, 6, 1986.
- [46] Gong, X., Kan, H., Yamaguchi, T., Suzuki, I., Aoyama, M., Kumagaha, M., Rowell, N.L., Wang, A., Rinfret, R., “Optical Properties of High-

- Quality GaInAsSb/InAs Grown by Liquid-Phase Epitaxy”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 1740-1746, 1994.
- [47] Voronina, T.I., Lagunova, T.S., Mikhailova, M.P., Sipovskaya, M.A., Sherstnev, V.V., Yakovlev, Yu.P., *Sov. Phys. Semicond.*, **25**, 167, 1991.
- [48] Bouarissa, N., “Substrate effect on the electronic structure in $Ga_{1-y}In_yAs_{1-x}Sb_x/GaSb$ and $Ga_{1-y}In_yAs_{1-x}Sb_x/InAs$ ”, *Inf. Phy. Tech.*, **40**, 423-429, 1999.
- [49] Krishna, S., *Handbook of Thin-Film Deposition processes and techniques Molecular Beam Epitaxy: Equipment and Practice*, William Andrew Publishing Norwich, New York, 2002.
- [50] Sun, X., *High Performance 1300 nm Photodetectors Grown by Molecular Beam Epitaxy*, Doktora Tezi, Texas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Austin, 2002.
- [51] Veeco GEN 20MC Manual®, 2008.
- [52] Şahin, S., *GaSb Alttaş Üzerine Kaliteli GaSb Epi-Katmanların Büyütülmesi ve Karakterizasyonu*, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2014.
- [53] Korkmaz, M., *Orta-Kızılötesi Dalgaboyunda Çalışan InAs/GaSb Süperörgü Fotodiyotların Opto-Elektronik Karakterizasyonu*, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2014.
- [54] Bauer, G., Richter, W. G., *Optical Characterization of Epitaxial Semiconductor Layers*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 129-149, 1996.
- [55] Güç, E., *III-V Grubu Yarıiletken Bileşiklerin Raman Özellikleri*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- [56] Maimon, S., Wicks., G.W., “nBn detector, an infrared detector with reduced dark current and high operation temperature”, *App. Phys. Lett.*, **89**, 151109, 2006.
- [57] Bubulac, L.O., Andrews, A.M., Gertner, E.R., Cheung, D.T., “Backside-illuminated InAsSb/GaSb broadband detectors”, *App. Phys. Lett.*, **36**, 734, 1980.

- [58] Gao, H., Wang, W., Jiang, Z., Liu, L., Zhou, J., Chen, H., “The growth parameter influence on the crystal quality of InAsSb grown on GaAs by molecular beam epitaxy”, *J. Cryst. Growth*, **308**, 406–411, 2007.
- [59] Wang, Q.W., Sun, C.H., Hu, S.H., He, J.Y., Wu, J., Chen, X., Deng, H.Y., Dai, N., “LPE growth and characterization of mid-infrared InAs_{0.85}Sb_{0.15} film on InAs substrate”, *J. Cryst. Growth*, **327**, 63-67, 2011.
- [60] Nakamura, S., Jayavel, P., Koyama, T., Hayakawa, Y., “Investigations on the effect of InSb and InAsSb step-graded buffer layers in InAs_{0.5}Sb_{0.5} epilayers grown on GaAs (0 0 1)”, *J. Cryst. Growth*, **300**, 497-502, 2007.
- [61] Xiaoming Liu, Hongtao Li, Fengyun Guo, Meicheng Li, Liancheng Zhao, “Effect of annealing on electrical properties of InAsSb films grown on GaAs substrates by molecular beam epitaxy”, *Phys. E*, **41**, 1635-1639, 2009.
- [62] Suyolcu, Y.E., “Characterization of epitaxially grown III-V Nanostructures by electron microscopy”, Yüksek lisans tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2014.
- [63] Noh, Y.K., Hwang, Y.J., Kim, M.D., “Structural Properties of GaSb Layers Grown on InAs, AlSb, and GaSb Buffer Layers on GaAs (001) Substrates”, *Journal of The Korean Physical Society*, **50**, 6, 2007.
- [64] Dier, O., Lin, C., Grau, M., Markus-Christian, A., “Selective and non-selective wet-chemical etchants for GaSb-based materials”, *Semicond. Sci. Technol.*, **19**, 1250-1253, 2004.
- [65] 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.
- [66] Maimon, S., Wicks, G.W., “nBn detector, an infrared detector with reduced dark current and high operation temperature”, *App. Phys. Lett.*, **89**, 151109, 2006.
- [67] Loudon, R., “The Raman effect in crystals” *Adv. Phys.*, **50**, 813–864, 2001.

- [68] Cherng, Y.T., Ma, K.Y., Stringfellow, G.B., “Raman scattering in $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ grown by organometallic vapor phase epitaxy”, *App. Phys. Lett.*, **53**, 886, 1988.
- [69] Li, Y.B., Dosanjht, S.S., Ferguson, I.T., Norman, A.G., de Oliveira, A.G., Stradling, R.A., Zallen, R., “Raman scattering in $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ alloys grown on GaAs by molecular beam epitaxy”, *Semiconductor Science and Technology*, **7**, 567-570, 1992.
- [70] Lockwood, D.J., Yu, G., Rowell, N.L., “Optical phonon frequencies and damping in AlAs, GaP, GaAs, InP, InAs and InSb studied by oblique incidence infrared spectroscopy”, *Solid State Commun.*, **136**, 7, 2005.
- [71] Sławomir Prucnal, Marcin Turek, Andrzej Drozdziel, Krzysztof Pyszniak, Artur Wójtowicz, Sheng-Qiang Zhou, Alohe Kanjilal, Artem Shalimov, Wolfgang Skorupa, Jerzy Zuk, “Optical and microstructural properties of self-assembled InAs quantum structures in silicon”, *Cent. Eur.J. Phys.*, **9**, 338-343, 2011.
- [72] Carles, R., Saint-Cricq, N., Renucci, J.B., Renucci, M.A., Zwick, A., “Second-order Raman scattering in InAs”, *Physical Review B*, **22**, 10, 1980.
- [73] Kiefer, W., Richter, W., Cardona, M., “Second-order Raman scattering in InSb”, *Physical Review B*, **12**, 6, 1975.
- [74] Prineas, J.P., Yager, J.R., Olesberg, J.T., Seydmohamadi, S., Cao, C., Reddy, M., Coretsopoulos, C., Hicks, J.L., Boggess, T.F., Santilli, M., Olafsen, L.J., “PIN versus PN Homojunctions in GaInAsSb 2.0-2.5 MicronMesa Photodiodes”, *Proc. of SPIE*, 6119, 2006.
- [75] Rakovicsa, V., Toth, A.L., Podor, B., Frigeri, C., Balazs, J., Horvath, Z.E., “Liquid phase epitaxy growth and characterization of $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ quaternary alloys”, *Mat. Sci. Eng. B*, **91-92**, 83-86, 2002.
- [76] Wang, C.A., Choi, H.K., Oakley, D.C., Charache, G.W., “Recent progress in GaInAsSb thermophotovoltaics grown by organometallic vapor-phase epitaxy”, *J. Cryst. Growth*, **195**, 346-355, 1998.
- [77] Voronina, T.I., Dzhurtanov, B.E., Lagunova, T.S., Sipovskaya, M.A., Sherstnev, V.V., “Electrical properties of GaSb-based solid

solutions GaInAsSb, GaAlSb, GaAlAsSb and their compositional dependence", *Semiconductors*, **32**, 3, 1998.