

**InAs/GaSb TİP-II SÜPERÖRGÜ  
KIZILÖTESİ FOTODEDEKTÖR YAPILARIN  
MBE TEKNİĞİ İLE  
GaSb ve GaAs ALTTAŞLAR ÜZERİNE  
BÜYÜTÜLMESİ**

Bülent ARIKAN  
Doktora Tezi

Fizik Anabilim Dalı  
Ocak-2015

**Bu tez çalışması 1110F169 numaralı proje kapsamında Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı, 111T335 numaralı proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

**Bülent Arıkan**'ın "**InAs/GaSb Tip-II Süperörgü Kızılötesi Fotodedektör Yapıların MBE Tekniği ile GaSb ve GaAs Alttaşlar Üzerine Büyütülmesi**" başlıklı **Fizik** Anabilim Dalındaki, Doktora Tezi 19.01.2015 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	<b>Adı-Soyadı</b>	<b>İmza</b>
Üye (Tez Danışmanı) :	<b>Doç. Dr. UĞUR SERİNCAN</b>	.....
Üye :	<b>Prof. Dr. SERVET TURAN</b>	.....
Üye :	<b>Prof. Dr. MEHMET PARLAK</b>	.....
Üye :	<b>Doç. Dr. YUSUF SELAMET</b>	.....
Üye :	<b>Yard. Doç. Dr. MUSTAFA KULAKCI</b>	.....

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

**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

**Doktora Tezi**

### **InAs/GaSb TİP-II SÜPERÖRGÜ KIZILÖTESİ FOTODEDEKTÖR YAPILARIN MBE TEKNİĞİ İLE GaSb ve GaAs ALTTAŞLAR ÜZERİNE BÜYÜTÜLMESİ**

**Bülent ARIKAN**

**Anadolu Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Uğur SERİNCAN**

**2015, 160 sayfa**

Bu tez çalışmasında, orta ve uzun dalgaboyu kızılötesi bölgelerinde gösterdikleri yüksek performans ve yüksek sıcaklık uygulamaları ile yeni nesil kızılötesi dedektör teknolojisinde öne çıkan InAs/GaSb Tip-II süperörgü fotodedektör yapılarının moleküler demet epitaksi tekniği ile 2 inç GaSb ve 4 inç GaAs alttaşlar üzerine epitaksiyel büyüme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Büyütülen süperörgü örneklerin yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınım ve geçirimli elektron mikroskobu analizleri ile yapısal özellikleri, üretilen tek-piksel fotodedektörler üzerinde yapılan ölçümlerle de elektriksel özellikleri ve optik performansları incelenmiştir. Süperörgüyü oluşturan InAs ve GaSb katmanların bireysel kalınlıkları ile bu katmanlar arasındaki geçiş ara yüzlerinin sistematik olarak değiştirildiği örnek grupları büyütülmüş ve opto-elektronik karakterizasyonları yapılmıştır. Kristal örgü uyumu açısından avantajlı olan GaSb alttaşlar ve örgü uyumsuzluğuna rağmen daha büyük boyutlarda, yüksek kristal kalitesinde, düşük maliyette ve katkısız üretilibilmeleri gibi avantajlara sahip olan GaAs alttaşlar üzerine büyütülen özdeş yapılar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. GaAs alttaşlardan GaSb epikatmana geçiş ara yüzünde özellikle AlSb kuantum nokta yapılarının kullanıldığı yapılarda, GaSb alttaş üzerine büyütülen yapılarla benzer dedektör özellikleri elde edilmiş böylece InAs/GaSb süperörgü malzeme sistemi için GaAs alttaşların alternatif olabileceği gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** MBE, InAs/GaSb, Süperörgü, GaAs

## **ABSTRACT**

**PhD Dissertation**

### **GROWTH of InAs/GaSb TYPE-II SUPERLATTICE INFRARED PHOTODETECTOR STRUCTURES on GaSb and GaAs SUBSTRATES by MBE TECHNIQUE**

**Bülent ARIKAN**

**Anadolu University  
Graduate School of Sciences  
Physics Program**

**Supervisor: Doç. Dr. Uğur SERİNCAN**

**2015, 160 pages**

In this thesis, epitaxial growth of InAs/GaSb Type-II superlattice photodetector structures that are prominent in the new generation infrared detector technology for their high performance and high temperature applications in mid and long wavelength infrared regions was carried out by using molecular beam epitaxy on 2 inch GaSb and 4 inch GaAs substrates. Structural properties of the grown superlattice samples have been investigated by high resolution X-ray diffraction and transmission electron microscopy analysis. Electrical properties and optical performances have also been investigated through measurements on the fabricated single pixel photodetectors. Groups of samples where the thickness of the individual InAs and GaSb layers that forms the superlattice and the transition interfaces between these layers are systematically changed were grown and their opto-electronic characterizations have been completed. Identical structures grown on both GaSb substrates that are advantageous for their crystal lattice matching and GaAs substrate that are advantageous for their bigger size, high crystal quality, low cost and dopant free producibility despite their lattice mismatch were comparatively evaluated. Similar detector performances were obtained from the samples grown on GaAs substrate with especially AlSb quantum dots as interface layer between the GaAs substrate and GaSb epilayer. Thus, it was shown that the GaAs substrates are alternative to GaSb for InAs/GaSb superlattice material system.

**Key Words:** MBE, InAs/GaSb, Superlattice, GaAs

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında bilgi ve birikimleri ile bana her zaman destek olan, deneysel çalışmalar için imkân ve olanak sağlayan danışmanlarım Doç. Dr. Uğur SERİNCAN'a ve Doç. Dr. Bülent ASLAN'a,

Yüksek Lisans ve Doktora çalışmalarım boyunca desteğini hiç esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Servet TURAN'a, TEM çalışmaları için Y. Eren SUYOLCU'ya,

Değerli fikir ve görüşleri ile çalışmayı yönlendiren Prof. Dr. Mehmet PARLAK'a,

Deneysel çalışmalarımındaki yardımları ve destekleri için arkadaşım Güven KORKMAZ'a,

Cihaz üretim süreçleri ve optik ölçümlerdeki yardımları için Melih KORKMAZ'a ve Nanoboyut Laboratuvarı çalışma arkadaşlarıma,

Çok kıymetli hocam Doç. Dr. Feriştah SOYKAL ALANYALI'ya,

Bütün bu süreçlerde, hep yanımda olan ve bana desteklerini hiç bir zaman esirgemeyen aileme ve eşime, teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>xv</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xvii</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1. Kızılötesi Radyasyon ve Uygulama Alanları.....	5
1.1.1. Termal ışıma yasaları.....	7
1.1.2. Atmosferik soğurma.....	9
1.1.3. Kızılötesi görüntüleme ve kullanım alanları.....	10
1.2. Kızılötesi Dedektörler ve Tarihsel Gelişimi.....	12
1.2.1. Kızılötesi termal dedektörler.....	13
1.2.2. Kızılötesi foton dedektörleri.....	14
1.3. 6,1 Angstrom Ailesi.....	19
1.4. InAs/GaSb Tip-II Süperörgü Fotodedektör Yapıları.....	22
<b>2. DENEYSEL YÖNTEMLER</b>	<b>32</b>
2.1. MBE Sistemi ve Epitaksiyel Büyütme .....	32
2.2. Kristalografik Karakterizasyon Çalışmaları .....	39
2.3. Mikroskobik Karakterizasyon Çalışmaları .....	40
2.4. InAs/GaSb Süperörgü Fotodedektör Yapıların Fabrikasyon Süreçleri .....	42
2.5. Elektriksel ve Optik Karakterizasyon .....	50
2.5.1. Karanlık akım ölçümleri .....	50
2.5.2. Spektral tepki ölçümleri .....	52

	<b><u>Sayfa</u></b>
2.5.3. Tepkisellik ölçümleri .....	55
2.5.4. Kuantum verimi ölçümleri .....	56
<b>3. EPİKATMAN BÜYÜTME ÇALIŞMALARI</b>	<b>57</b>
3.1. GaSb Alttaş Üzerine GaSb Epikatman Büyütme Çalışmaları .....	57
3.1.1. GaSb alttaşların büyütme için hazırlık süreçleri .....	59
3.2. GaAs Alttaş Üzerine Yüksek Kalitede GaSb Epikatman Büyütme Çalışmaları.....	64
3.2.1. GaAs alttaşların büyütme için hazırlık aşamaları .....	67
3.2.2. GaAs <sub>x</sub> Sb <sub>(1-x)</sub> üçlü ara yüz bileşiği kullanılarak büyütülen epikatman örnekler .....	68
3.2.3. AlSb kuantum nokta ara yüz kullanılarak büyütülen epikatman örnekler .....	85
<b>4. InAs/GaSb TİP-II SL FOTODEDEKTÖR YAPILARIN     EPİTAKSİYEL BÜYÜTME VE KARAKTERİZASYON     ÇALIŞMALARI</b>	<b>95</b>
4.1. InAs/GaSb Tip-II SL Fotodedektör Yapıları GaSb Alttaşlar Üzerine Büyütme Çalışmaları .....	95
4.1.1. GaSb alttaşlar üzerine büyütülen InAs/GaSb SL yapılarda kullanılan epitaksiyel büyütme basamakları ve parametreleri .....	96
4.1.2. MWIR bölgede çalışan InAs/GaSb Tip-II SL fotodedektör yapılarını GaSb alttaşlar üzerine büyütme çalışmaları.....	100
4.1.2.1 InAs/GaSb Tip-II SL yapılarda InAs ve GaSb katman kalınlıklarının sabit olduğu durumda InSb-benzeri ara yüz kalınlığındaki değişimin yapısal özellikler ve optik performans üzerindeki etkileri.....	101

4.1.2.2 InAs/GaSb Tip-II SL yapılarında InSb-benzeri ara yüz reçetesinin sabit olduğu durumda InAs ve GaSb katman kalınlıklarındaki değişimin yapısal özellikler ve optik performans üzerindeki etkileri.....	114
4.1.3. LWIR bölgede çalışmak üzere tasarlanmış InAs/GaSb Tip-II SL fotodedektör yapılarının GaSb alttaşlar üzerine büyütme çalışmaları .....	126
4.2. InAs/GaSb Tip-II SL Fotodedektör Yapıları GaAs Alttaş Üzerine Büyütme Çalışmaları .....	130
4.2.1. Alttaş üzerindeki tekdüzeliğin kontrolü .....	135
4.2.2. MWIR bölgede çalışan InAs/GaSb SL fotodedektörleri GaAs alttaşlar üzerine büyütme çalışmaları .....	137
4.2.2.1 GaAs alttaşlar üzerine büyütülen SL yapılarının yapısal karakterizasyonu.....	137
4.2.2.2 GaAs alttaşlar üzerine büyütülen SL yapıların elektriksel ve optik karakterizasyonu .....	142
4.2.4. GaSb ve GaAs alttaşlar üzerine büyütülen InAs/GaSb Tip-II SL fotodedektörlerin kıyaslamalı değerlendirilmesi.	148
<b>5. SONUÇ</b>	<b>153</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>156</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

1.1. İletken, yarıiletken ve yalıtkan bazı malzemelerin iletkenlikleri ve öz dirençleri.....	3
1.2. Yalıtkan, yarıiletken ve metallerin bant yapılarının şematik gösterimi ..	4
1.3. Periyodik çizelgeden bir bölüm .....	5
1.4. Elektromanyetik spektrum .....	6
1.5. Farklı sıcaklıklarda siyah cisim spektrumu .....	8
1.6. 0-15 µm dalgaboyu aralığında atmosferik geçirgenliğin değişimi.....	9
1.7. Kızılötesi görüntülerin sağlık alanındaki uygulamalarına örnekler .....	10
1.8. Kızılötesi görüntülemenin arıza tespiti alanındaki uygulamalarına örnekler .....	11
1.9. Kızılötesi görüntülemenin uzay çalışmalarındaki uygulamalarına örnekler .....	11
1.10. Kızılötesi görüntülemenin askeri ve güvenlik alanındaki kullanımına ilişkin örnekler .....	12
1.11. PC dedektör yapısının ve optik uyarılma sürecinin şematik gösterimi...	15
1.12. P-i-n yapıdaki InAs/GaSb Tip-II SL PV dedektör yapısı ve PV dedektörlerin çalışma mekanizmasının şematik çizimi.....	16
1.13. Yarı-iletken malzemelere ait örgü sabiti-bant aralığı grafiği (III-V bileşikleri mavi yıldızla işaretlenmiştir.).....	19
1.14. InAs, GaSb, AlSb (6,1Å ailesi) bant aralığı enerjileri ve birbirlerine göre pozisyonları.....	20
1.15. Çinko-sülfür (Zinc-blende) kristal yapısı .....	22
1.16. InAs/GaSb Tip-II SL yapının şematik görünümü .....	23
1.17. InAs/GaSb SL yapılarda kullanılan ara yüz formları .....	25
1.18. Süperörgü ile GaSb tampon katman arasındaki ortalama örgü uyumsuzluğunun değişen GaSb katman ve InSb ara yüz kalınlığına bağlı değişimi (InAs katman kalınlığı sabit tutulmuştur (10 ML).).....	26
1.19. Süperörgü katmanlar büyütülürken kullanılan kepenk organizasyonu...	27
1.20. Üç muhtemel bant hizalamasının şematik gösterimleri .....	28

1.21. InAs ve GaSb'den oluşan hetero-eklemin bant diyagramı .....	29
1.22. InAs/GaSb Tip-II SL fotodedektör yapının bant diyagramı .....	29
2.1. (a) MBE sistemi ( Anadolu Üniversitesi, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı), (b) MBE cihazının şematik gösterimi .....	32
2.2. (a) Epi-ready alttaşlar, (b) Örnek tutucular, (c) Örnek arabası, (d) yükleme haznesinin iç görünümü ve (e) Yükleme haznesinin yükleme sonrası görünümü.....	33
2.3. (a) PBN potalar (crucibles), (b) Efüzyon hücreleri, (c) Sistem üzerine monte edildikten sonra efüzyon hücresinin dışarıdan görünümü .....	34
2.4. (a) Yükleme kolları, (b) Robotik kol ve (c) Robotik kol üzerindeki ısıtıcı .....	35
2.5. Epitaksiyel büyütme işleminin şematik olarak gösterimi .....	36
2.6. MBE'de epitaksiyel büyüme esnasında yüzeyde gerçekleşen süreçlerin şematik çizimi.....	36
2.7. RHEED deseni örneği .....	38
2.8. RHEED elastik saçılım modeli ve 2-boyutlu epitaksiyel büyütmede oluşan şiddet osilasyonları .....	38
2.9. Panalytical XPert Pro MRD X-ışınları difraktometresi .....	39
2.10. Örnekler üzerinde yapılmış SEM çalışmalarına ilişkin örnekler .....	41
2.11. Örnekler üzerinde yapılmış TEM çalışmalarına ilişkin örnekler .....	42
2.12. (a) Döner kaplayıcı ve ısıtıcı, (b) Fotorezist kaplanan SL yapının şematik görünümü .....	43
2.13. (a) Maske hizalayıcı, (b) Maskeleme işleminin şematik gösterimi .....	44
2.14. Yüzey profilometre cihazının görüntüsü .....	45
2.15. (a) Tab edilen örneğin şematik görünümü, (b) Aşındırılma sonrası mesanın görünümü .....	45
2.16. (a) Aşındırılma sonrası mesanın şematik görünümü, (b ve c) Aşındırma sonrası mesaların SEM görüntüleri.....	46
2.17. Metal kaplama öncesindeki maskeleme işleminin şematik görünümü...	47
2.18. (a) Metal kaplama işlemi öncesi, (b) Kaplama işlemi sonrası, (c) Aseton içerisinde bekletilen örneklerin görünümü .....	47

2.19. Alt ve üst kontak bölgeleri metal kaplanmış örneğin SEM görüntüsü ...	48
2.20. (a) Paketlenmiş örneğin görünümü, (b) Tel Bağlama cihazı, (c) Alt ve üst kontak bağlantı noktalarının görünümü .....	49
2.21. InAs/GaSb SL p-i-n dedektör yapısının şematik görünümü .....	49
2.22. Karanlık akım ölçümlerinde kullanılan düzenek .....	50
2.23. (a) Paketlenmiş SL örneğin görüntüsü, (b) Dedektörlerin içine yerleştirildiği dewar kabı, (c) Dewar kabının turbo pompa ile vakumlanması .....	53
2.24. Spektral tepki ölçümleri yapılırken kullanılan optik konfigürasyon .....	54
2.25. Referans DlaTGS dedektörün spektral tepkisi .....	54
2.26. Tepkisellik ölçümlerinde kullanılan ekipman .....	56
3.1. Czochralski (CZ) tekniği ile büyütülmüş GaSb ingotun görünümü .....	58
3.2. Büyütme öncesinde GaSb alttaşlara uygulanan ısıl reçete .....	59
3.3. GaSb alttaş yüzeyinde oluşan oksit kristallerinin SEM görüntüleri .....	60
3.4. Yüzeyinde antimon yoğunlaşmış örneklerden alınmış SEM görüntüleri ...	61
3.5. G-1, G-2 numaralı örneklerden ve GaSb alttaştan alınmış HRXRD-gonio ölçümleri .....	62
3.6. GaSb alttaş üzerine büyütülmüş 1500 nm kalınlığındaki GaSb epikatman yapının çift-kristal X-ışını sallantı eğrisi .....	63
3.7. GaAs→GaSb geçişinin şematik gösterimi .....	65
3.8. GaAs→GaSb geçişinde kullanılan ara yüzlerin şematik gösterimi .....	66
3.9. GaAs alttaş üzerine büyütülen GaSb epikatman örnekten alınan STEM- HAADF görüntüsü .....	66
3.10. Büyütme öncesinde GaAs alttaşlara uygulanan ısıl reçete .....	67
3.11. Büyütme sonrası GaSb epikatman örnekler üzerinde uygulanan soğutma reçetesi .....	68
3.12. Çeşitli III-V grubu yarıiletken kristallerin örgü sabitlerinin bant aralıkları ve dalga boylarına karşı çizilmiş grafikleri (oda sıcaklığında).	69
3.13. GaAs <sub>(1-x)</sub> Sb <sub>x</sub> kristalinde örgü sabitinin x'e bağlı değişimi .....	69

3.14. GaAs alttaş üzerine büyütülmüş GaSb epikatman örnek üzerinde GaAs→GaSb geçiş bölgesinden alınmış STEM-EDX çizgi analizi .....	70
3.15. GaAs ve GaSb yüzeylerden büyüme anında alınmış RHEED görüntüleri, (a, b) GaAs yüzeyin (2x4) RHEED deseni, (c, d) GaAs → GaSb geçişinde gözlenen spot görünümlü RHEED desenleri, (e, f) GaAs → GaSb geçişinde spot görünümünden çizgi görünüme geçiş anını gösteren RHEED desenleri, (g, h) GaSb yüzeyin büyüme anında gözlenen (1x3) RHEED deseni, (i, j) GaSb yüzey soğutulurken yeniden-yapılanma sonrası gözlenen (2x5) RHEED deseni.....	73
3.16. E-1, E-2, E-3 ve E-4 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri .....	75
3.17. E-1, E-2, E-3 ve E-4 numaralı örneklerin DCXRC analizleri .....	75
3.18. E-5, E-6 ve E-7 numaralı örneklere ait çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri .....	77
3.19. E-5, E-6 ve E-7 numaralı örneklerin DCXRC analizleri .....	77
3.20. E-4, E-6 ve E-8 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri .....	79
3.21. E-4, E-6 ve E-8 numaralı örneklerin DCXRC analizleri .....	79
3.22. E-1 ve E-9 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri .....	81
3.23. E-1 ve E-10 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri .....	82
3.24. E-5, E-12 ve E-13 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri .....	84
3.25. E-5, E-12 ve E-13 numaralı örneklerin DCXRC analizleri .....	84
3.26. AlSb QD ara yüzün TEM-BF görüntüleri .....	86
3.27. AlSb QD öncesi, oluşturulurken ve sonrası örnek yüzeyinde oluşan RHEED desenleri.....	87
3.28. AlSb QD ara yüz oluşumlarının görüldüğü TEM görüntüleri .....	88
3.29. E-14, E-15, ve E-16 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri .....	90

3.30. E-14 ve E-17 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri ...	90
3.31. AlSb QD ara yüz üzerine büyütülen GaSb epikatmanların AFM analizleri .....	91
3.32. E-18, E-19 ve E-20 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri .....	93
3.33. E-21 ve E-22 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri ...	93
4.1. Çift periyoda sahip SL örneğin çift-kristal X-ışını sallantı eğrisi analizi ve bu analizin simülasyonu (Simülasyon eğrisi dikey ekseninde yukarıya kaydırılmıştır.) .....	97
4.2. B-3 numaralı örnekten alınmış HRTEM görüntüsü .....	98
4.3. (a, b) GaSb yüzeyin büyüme anındaki ve (c, b) yeniden yapılanma sonrasındaki RHEED görüntüleri.....	99
4.4. GaSb ve InAs için alttaş sıcaklığı ve V-grubu akısına bağlı yeniden yapılanma diyagramları.....	99
4.5. InAs katmanın büyüme anındaki RHEED görüntüleri .....	100
4.6. GaSb alttaşlar üzerine büyütülen InAs/GaSb SL yapı ve B-3 numaralı örnekten alınmış TEM görüntüsü .....	101
4.7. (a) InAs/GaSb SL örneğin ayna görünümlü yüzeyi, (b) örnek yüzeyinin SEM (Inlens) görüntüsü (B-5) .....	103
4.8. B-3 numaralı örneğin kesitinden alınan (a) TEM-BF ve (b) HRTEM görüntüleri .....	104
4.9. B-1 numaralı örneğin DCXRC analizi ve bu analizin simülasyonu .....	105
4.10. B-2, B-3, B-4 ve B-5 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri .....	105
4.11. Büyütülen süperörgülerin sıfırıncı piklerinin GaSb (004) pikine göre pozisyonlarını gösteren grafik .....	108
4.12. Büyütülen örneklerde SL periyodu, ara yüz kalınlığı ve örgü uyumsuzluğu arasındaki ilişkiyi gösteren grafik .....	109
4.13. B-2, B-4 ve B-5 numaralı örneklerin karanlık akım yoğunluğu-voltaj grafikleri.....	110
4.14. B-2, B-4 ve B-5 numaralı örneklerin $R_0$ -A-voltaj grafikleri.....	110

4.15. B-1, B-2, B-3, B-4 ve B-5 numaralı örneklerin 300 K'deki geçirgenlik ölçüm sonuçları .....	112
4.16. B-1, B-2, B-3, B-4 ve B-5 numaralı örneklerin 77 K'deki tepkisellik ölçüm sonuçları .....	113
4.17. B-1, B-2, B-3, B-4 ve B-5 numaralı örneklerin 77 K'deki kuantum verimi (QE) grafikleri .....	113
4.18. (a) Eşit InAs ve GaSb katman kalınlığına sahip SL yapılarda katman Kalınlığındaki değişimim bant aralığı ve kesim dalgaboyu üzerindeki etkisi, (b) Farklı InAs ve GaSb katman kalınlığına sahip SL yapılarda katman kalınlığındaki değişimim bant aralığı üzerindeki etkisi.....	115
4.19. M-1, M-2 ve M-3 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri .....	117
4.20. M-3, M-4 ve M-5 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri .....	118
4.21. M-1, M-2 ve M-3 numaralı örneklerde SL sıfıncı piklerin GaSb (004) pikine göre konumlarını gösteren DCXRC grafiği.....	119
4.22. M-3, M-4 ve M-5 numaralı örneklerde SL sıfıncı piklerin GaSb (004) pikine göre konumlarını gösteren DCXRC grafiği.....	120
4.23. SET-2'de yer alan örneklerin karanlık akım yoğunluğu-voltaj grafikleri	121
4.24. SET-2'de yer alan örneklerin $R_0.A$ -voltaj grafikleri .....	121
4.25. M-1, M-2, M-3 numaralı SL fotodiyotların 77 K sıcaklığındaki tepkisellik ve kuantum verimi (QE) ölçüm sonuçları (iç grafik).....	123
4.26. M-3, M-4, M-5 numaralı SL fotodiyotların 77 K sıcaklığındaki tepkisellik ve kuantum verimi (QE) ölçüm sonuçları (iç grafik).....	124
4.27. SET-2'de yer alan örneklerde InAs ve GaSb kalınlığına bağlı olarak bant kenarı eğimin değişimi.....	125
4.28. Katman kalınlığındaki değişimin 77 K sıcaklığında fotodedektör parametreleri üzerindeki etkileri; QE, $\%50-\lambda_c$ , bant kenarı (band edge) yakınında fototepkinin eğimi.....	125

4.29. L-1 ve L-2 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri .....	127
4.30. L-1 ve L-2 numaralı örneklerde sıfıncı piklerin GaSb (004) pikine göre konumunu gösteren DCXRC grafiği .....	128
4.31. L-1 ve L-2 numaralı örneklerin tepkisellik ve kuantum verimi (QE) ölçüm sonuçları .....	129
4.32. GaSb, GaAs ve Si alttaşların kızılötesi geçirgenlik spektrumları .....	131
4.33. InAs/GaSb süperörgü yapının katmanların şematik gösterimi .....	131
4.34. GaAs alttaşlar üzerine büyütülen SL fotodedektör yapıların şematik gösterimi .....	134
4.35. S-7 numaralı örnekten DCXRC ölçümü alınan noktalar .....	136
4.36. S-7 numaralı örneğin DCXRC haritalaması .....	136
4.37. SL periyot değerlerinin SL (-1)'inci uydu pikine ait FWHM değerine karşı grafiği .....	139
4.38. S-1 numaralı örneğin çift-kristal X-ışını sallantı eğrisi .....	139
4.39. S-2 numaralı örneğin çift-kristal X-ışını sallantı eğrisi .....	140
4.40. S-3 numaralı örneğin çift-kristal X-ışını sallantı eğrisi .....	140
4.41. S-4 numaralı örneğin çift-kristal X-ışını sallantı eğrisi .....	141
4.42. S-6 numaralı örneğin çift-kristal X-ışını sallantı eğrisi .....	141
4.43. Paketlenmiş SL fotodedektör örneğin görüntüsü ve şematik yapısı .....	142
4.44. S-2, S-3 ve S-4 numaralı örneklerin (a) Karanlık akım yoğunluğu – voltaj grafikleri.....	144
4.45. S-2, S-3 ve S-4 numaralı örneklerin $R_0$ -A-voltaj grafikleri .....	145
4.46. S-2 numaralı örneğin 77 K'deki tepkisellik ve QE spektrumları .....	146
4.47. S-3 numaralı örneğin 77 K'deki tepkisellik ve QE spektrumları .....	147
4.48. S-4 numaralı örneğin 77 K'deki tepkisellik ve QE spektrumları .....	147
4.49. C-1 ve S-1 numaralı örneklerin (a) Karanlık akım yoğunluğu –voltaj ve (b) $R_0$ -A-voltaj grafikleri.....	150
4.50. C-1 ve S-1 numaralı örneklerin 77 K'deki tepkisellik ve QE spektrumları (C-1-%50 $\lambda_c=5,44 \mu\text{m}$ ), (S-1-%50 $\lambda_c=5,63 \mu\text{m}$ ).....	150

**Sayfa**

4.51. C-2 ve S-5 numaralı örneklerin (a) Karanlık akım yoğunluğu –voltaj ve (b) $R_0$ .A-voltaj grafikleri.....	151
4.52. C-2 ve S-5 numaralı örneklerin 77 K'deki tepkisellik ve QE spektrumları (C-2-%50 $\lambda_c=4,07 \mu\text{m}$ ), (S-5-%50 $\lambda_c=3,96 \mu\text{m}$ ).....	151
4.53. C-3 ve S-6 numaralı örneklerin (a) Karanlık akım yoğunluğu –voltaj ve (b) $R_0$ .A-voltaj grafikleri.....	152
4.54. C-3 ve S-6 numaralı örneklerin 77 K'deki tepkisellik ve QE spektrumları (C-3-%50 $\lambda_c=3,79 \mu\text{m}$ ), (S-6-%50 $\lambda_c=3,78 \mu\text{m}$ ).....	152

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
1.1. Termal dedektör çeşitleri ve operasyon yöntemleri .....	13
1.2. Kızılötesi algılamada kullanılan foton dedektörlerin özelliklerinin kıyaslandığı çizelge .....	18
1.3. Kızılötesi algılamada kullanılan foton dedektörlerinin 77 K sıcaklığında MWIR ve LWIR bölgedeki performanlarına ilişkin bilgiler .....	18
1.4. Bazı yarıiletken malzemeler için örgü uyumsuzluğu ve kritik kalınlık değerleri.....	21
1.5. Çalışmada kullanılan III-V bileşikleri için bazı önemli fiziksel parametreler (300 K) .....	31
2.1. Fabrikasyon öncesi örnek temizleme reçetesi .....	43
2.2. GaSb alttaş üzerine büyütülmüş InAs/GaSb SL yapılarda zamana bağlı aşınma miktarları .....	45
3.1. Aynı $GaAs_xSb_{(1-x)}$ ara yüz reçetesinin kullanıldığı farklı kalınlıklardaki GaSb epikatmanlara ilişkin bilgiler .....	74
3.2. Aynı $GaAs_xSb_{(1-x)}$ ara yüz reçetesi kullanılarak farklı kalınlıklarda büyütülen ikinci grup GaSb epikatman yapılara ilişkin bilgiler .....	76
3.3. Farklı biçimlerde oluşturulan $GaAs_xSb_{(1-x)}$ ara yüzler üzerine büyütülen 1000 nm kalınlığındaki GaSb epikatman yapılara ilişkin bilgiler .....	78
3.4. Farklı $GaAs_xSb_{(1-x)}$ ara yüz oluşum reçeteleri ve farklı sıcaklıklar kullanılarak büyütülmüş 100 nm kalınlığındaki GaSb epikatmanlara ilişkin bilgiler .....	80
3.5. Farklı biçimlerde oluşturulan $GaAs_xSb_{(1-x)}$ ara yüz üzerine büyütülen 260 nm kalınlığındaki GaSb tek katman yapılara ilişkin bilgiler .....	83
3.6. E-14, E-15, E-16 ve E-17 numaralı örneklerin büyütme değişkenleri ...	88

3.7. E-14, E-15, E-16 ve E-17 numaralı örneklerin DCXRC analiz sonuçları.....	89
3.8. E-18-22 numaralı örneklerin büyütme değişkenleri .....	92
4.1. Süperörgülerde 1 periyot büyütülürken kullanılan kepenk organizasyonları (SET-1) .....	102
4.2. SET-1’de yer alan örneklerin DCXEC analiz sonuçları (Eksi işaret süperörgü üzerindeki stresin örgüyü genişletecek yönde olduğunu göstermektedir.) .....	106
4.3. İlgili malzemeler için kritik kalınlık değerleri ve uyumsuzluk oranları ...	107
4.4. B-1, B-2, B-3, B-4 ve B-5 numaralı örneklerin optik karakterizasyon bilgileri .....	112
4.5. SET-2’de yer alan örneklerin büyütülmesinde kullanılan epitaksiyel parametreler .....	116
4.6. Büyütülen süperörgülerde kullanılan kepenk organizasyonları (SET-2) .....	116
4.7. Örneklerin hedeflenen katman kalınlıkları ve DCXRC analiz sonuçları .....	117
4.8. Örneklerin hedeflenen katman kalınlıkları ve optik ölçüm sonuçları ....	122
4.9. Büyütülen süperörgülerde kullanılan kepenk organizasyonları (SET-3)	126
4.10. L-1 ve L-2 numaralı örneklerin DCXRC analiz sonuçları .....	127
4.11. GaAs alttaşlar üzerine büyütülen örneklere ilişkin epitaksiyel büyütme parametreleri .....	132
4.12. GaAs alttaşlar üzerine büyütülen InAs/GaSb süperörgülerin yapısal özelliklerine ilişkin bilgiler .....	135
4.13. GaAs alttaşlar üzerine büyütülen InAs/GaSb süperörgüler için DCXRC analiz sonuçları .....	138

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b>AlSb</b>	:	Alüminyum Antimon
<b>Å</b>	:	Angstrom
<b>Be</b>	:	Berilyum
<b>C<sub>1</sub></b>	:	İletim Bandı Minimumu
<b>DCXRC</b>	:	Çift kristal X-ışını Sallantı Eğrisi
<b>E<sub>g</sub></b>	:	Bant Aralığı
<b>E<sub>F</sub></b>	:	Fermi Enerjisi
<b>FTIR</b>	:	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopisi
<b>FPA</b>	:	Odak Düzlemlili Tarla
<b>FOV</b>	:	Görüş Alanı
<b>G-R</b>	:	Yaratma-Yeniden Birleşme
<b>GaAs</b>	:	Galyum Arsenik
<b>GaSb</b>	:	Galyum Antimon
<b>HRXRD</b>	:	Yüksek Çözünürlüklü X-ışını Kırınımı
<b>HRTEM</b>	:	Yüksek Çözünürlüklü Geçirimli Elektron Mikroskobu
<b>HH<sub>1</sub></b>	:	Ağır Boşluk Bandı Maksimumu
<b>IR</b>	:	Kızılötesi
<b>InAs</b>	:	İndiyum Arsenik
<b>InSb</b>	:	İndiyum Antimon
<b>LWIR</b>	:	Uzun Dalgaboylu Kızılötesi Radyasyon
<b>ML</b>	:	Tek-atom Katman
<b>MBE</b>	:	Moleküler Demet Epitaksi
<b>MOVPE</b>	:	Metal-organik Buhar Faz Epitaksi
<b>MCT/HgCdTe</b>	:	Cıva Kadmiyum Tellür
<b>MWIR</b>	:	Orta Dalgaboylu Kızılötesi Radyasyon
<b>QD</b>	:	Kuantum Nokta
<b>QDIP</b>	:	Kuantum Nokta Kızılötesi Fotodedektör
<b>QWIP</b>	:	Kuantum Kuyu Kızılötesi Fotodedektör
<b>QE</b>	:	Kuantum Verimi

<b>PC</b>	:	Fotoliletken
<b>PV</b>	:	Fotovoltaik
<b>Si</b>	:	Silikon
<b>SL</b>	:	Süperörgü

## 1. GİRİŞ

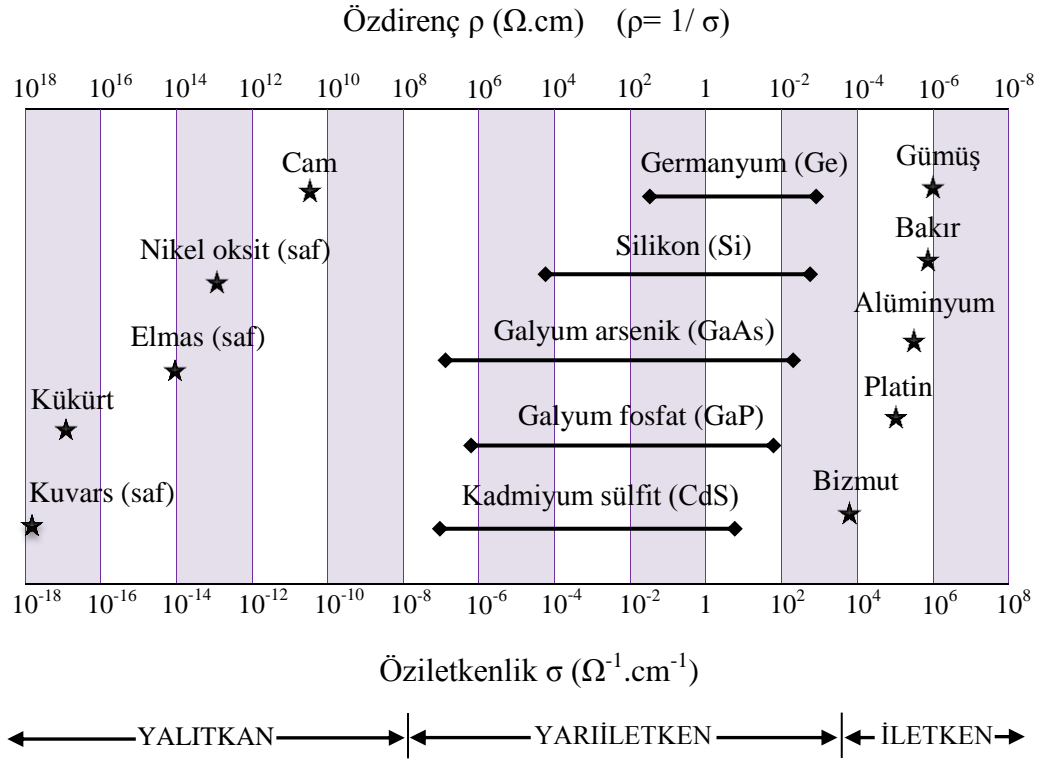
İnsan duyularının algısal sınırlarının olması, çevresel koşulların zorlu olduğu ortamlarda her zaman bir zafiyet oluşturmuştur. Geçmişten günümüze bu sınırlar diğer bazı canlıların doğal yeteneklerinden faydalanılarak aşılmaya çalışılmıştır. Örneğin, köpeklerin insanlara kıyasla çok daha yüksek bir hassasiyette ve geniş bir spektrumda koku alma ve görme yeteneklerinin çok eski zamanlardan bu yana bilinmesi sebebiyle bu hayvanlar, iz sürme, geceleri yol bulma ve geceleri güvenlik uyarıcısı olarak kullanılmışlardır. Günümüzde ise bu algı sınırları, geliştirilen çeşitli teknolojik ürünlerle aşılmaya çalışılmaktadır. Söz konusu teknolojik ürünlerden en etkinini, görme duyusunu insan algısının katbekat üzerine çıkaran kızılötesi (IR) algılama ürünleri, dedektörlerdir. Doğada insan gözünün algıladığı radyasyon bölgesinin dışında da radyasyon emisyonlarının varlığının anlaşılması teknolojide yeni çalışma ve uygulama alanları yaratmıştır. Kızılötesi radyasyonun keşfi (1800'ler) ve bu radyasyonu algılayabilen dedektör yapılarının geliştirilmesinin (1900'lü yılların ikinci yarısı) ardından gece görmek ve görüntülemek mümkün hale gelmiş, bunun sonucunda da birçok kullanım alanı yaratılmıştır. Gece görüşünün yanı sıra hedef takibi, mekan güvenliği ve savunması, endüstride hata tespiti, medikal teşhis, uzay çalışmalarında görüntüleme ve iletişim kızılötesi algılama teknolojisinin kullanıldığı başlıca uygulama alanlarıdır.

Bir kızılötesi algılama sisteminin en önemli ve temel elemanı dedektör kısmıdır. Dedektör, üzerine düşen optik sinyali, elektrik sinyaline dönüştüren özel bir mekanizmadır. Kızılötesi dedektörler, özel malzeme türlerinin uygun şekilde doğrudan veya eklenerek kullanılması ile oluşturulmaktadır. Malzeme özellikleri ve çalışma mekanizmaları açısından bu yapılar, *termal dedektörler* ve *foton dedektörleri* olmak üzere iki grupta ele alınmaktadır. Her iki grupta yer alan dedektörler de teknolojinin ve günlük hayatın birçok alanında sahip oldukları yetenekler doğrultusunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada foton dedektörleri üzerine yoğunlaşılacaktır. Termal dedektörler (bolometreler, ısıçiftler, gibi), yüksek sıcaklıklarda (oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda) çalışma yeteneğine sahiplerken, yavaşlardır. Foton dedektörleri ise çalışabilmeleri ve/veya

yüksek performans gösterebilmeleri için kroyojenik sıcaklıklara ihtiyaç duymalarına karşın hızlı ancak görece olarak yüksek maliyete sahiptirler. Cıva-kadmiyum-tellür (HgCdTe / MCT) tabanlı IR fotodedektörler ve kuantum kuyu IR fotodedektörler (QWIP'ler) kızılötesi foton dedektörü teknolojisinde öne çıkan başlıca yapılarıdır. Ancak günümüz kızılötesi algılama teknolojisinde bu yapıların performans ve malzeme verimliliği (geniş alanda tekdüzelik, üretimde tekrarlanabilirlik, gibi) açısından alternatif oluşturacak farklı yapı ve malzeme arayışları sürmektedir. InAs/GaSb Tip-II süperörgü (SL) fotodedektör yapıları, son yıllarda bu alanda dikkatleri üzerine çeken ve üzerinde yoğun çalışılan malzeme sistemleri (ve fotodedektör yapıları) arasında yer almaktadır. Bu tez çalışması da yeni nesil foton dedektörleri arasında öne çıkan InAs/GaSb Tip-II SL fotodedektör yapılarının üretilmesi ve karakterize edilmesi üzerine kurgulanmıştır.

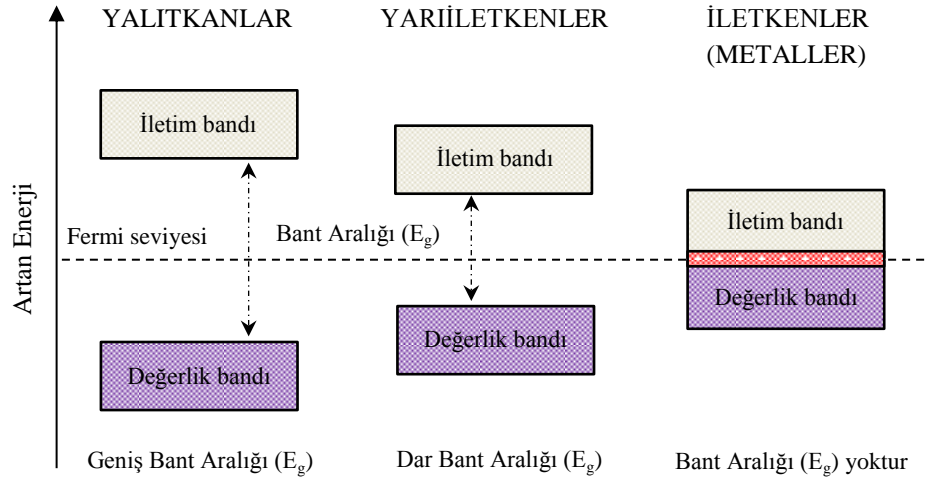
Bir kızılötesi foton dedektörünün yapısını genellikle *yarıiletken* kristal formunda ışığa duyarlı malzemeler oluşturmaktadır. Bu tür malzemeler doğrudan doğruya temin edilememekte, ileri teknoloji ürünü cihazlarla üretilmekte veya yaygın kullanımıyla büyütülmektedir. Günümüzde bu malzemelerin yüksek saflıkta ve kalitede üretimi, çeşitli epitaksiyel büyütme sistemleri ile mümkün olabilmektedir.

Malzemeler, elektriği iletme yetenekleri açısından *iletken*, *yalıtkan* ve iletkenliği bu iki malzeme grubu arasında yer alan *yarıiletkenler* olmak üzere üç ana grupta ele alınmaktadır. İletkenler ya da yaygın kullanımı ile metallerin özdirençleri yani bir malzemenin birim uzunluk ve kesitte elektrik akımına ne ölçüde karşı koyduğunun ölçüsü, oldukça küçüktür. Yalıtkanlarda tam aksine malzemelerin özdirençleri, büyük değerlerdedir yani elektrik akımına karşı önemli ölçüde direnç gösterirler. Yarıiletken malzemelerin özdirençleri ise malzeme içerisinde bulunan katkı atomlarının miktarı uyarınca belirli bir aralıkta değerler alabilmektedir. Bu özelliği, bu malzeme grubunu özellikle optoelektronik çalışmalarda özel kılmakta, bu alanda esnek ve geniş bir kullanım alanı sunmaktadır. Şekil 1.1'de söz konusu gruplarda yer alan bazı malzemelere ilişkin iletkenlik davranışları görülmektedir. Bir malzemenin öziletkenliği ( $\sigma$ ) ile özdirenci ( $\rho$ ) arasında ters orantı söz konusudur.



Şekil 1.1. İletken, yarıiletken ve yalıtkan bazı malzemelerin iletkenlikleri ve özdirençleri [1]

Bu malzeme grupları bant özellikleri açısından ele alınırsa, yalıtkanlarda malzemelerin iletim ve değerlik bantları arasındaki mesafe (bant aralığı,  $E_g$ ) oldukça geniştir (300 K'de  $E_g(\text{SiO}_2) = 9 \text{ eV}$ ,  $E_g(\text{Elmas}) = 5,46\text{-}5,6 \text{ eV}$ ). Metallerde söz konusu iki bant birbiri ile çakışık haldedir, tanımlı bir bant aralığı yoktur. Yarıiletkenlerde ise bant aralığı yalıtkanlara kıyasla daha dardır (300 K'de  $E_g(\text{Si}) = 1,12 \text{ eV}$ ,  $E_g(\text{GaAs}) = 1,42 \text{ eV}$ ) (Şekil 1.2). Ancak yarıiletken malzemelerin bant aralıkları, malzeme içerisine katkı atomları eklenerek belirli bir aralıkta değiştirilebilmektedir. Yarıiletken malzemelerin sağladığı bu esneklik, bu malzeme grubunu optoelektronik uygulamalar açısından öne çıkarmaktadır. Bir malzemenin bant aralığının genişliği, o malzemenin ışıkla olan etkileşim mekanizmasında doğrudan etkilidir. Malzemeler, bant aralığı enerjilerine eşit veya daha yüksek enerjiye sahip ışığı soğurabilirler. Bu durumda, ilgili malzemelerin bant aralıkları kontrol edilerek belirli dalgaboyu bölgesine hassasiyet gösteren yapılar tasarlamak ve istenilen bölgede soğurma (ya da ışımaya) yapabilen optoelektronik aygıtlar üretmek mümkün hâle gelmektedir.



**Şekil 1.2.** Yalıtkan, yarıiletken ve metallerin bant yapılarının şematik gösterimi

Optoelektronik uygulamalarda kullanılan yarıiletken özellikteki malzemeler genellikle kristal formundadır. Bu malzemelerin mümkün olduğunca kusursuz ve yüksek kalitede üretimi, günümüz yarıiletken teknolojisi açısından oldukça önem arz etmektedir. Bu tip kristal malzemeler, ileri görüntüleme teknolojisinin yanı sıra kamera, cep telefonu, bilgisayar gibi günlük hayatımızda da kullandığımız birçok elektronik aygıtın önemli yapı taşları olan diyot, led, transistör gibi bazı temel kısımlarını oluştururlar. Kristal kalitesi, o malzemeden üretilecek olan cihazın verimliliğini ve hassasiyetini doğrudan etkileyen bir parametredir. Bu nedenle, yarıiletken kristallerin üretim süreçleri oldukça titizlik gerektirmektedir.

Günümüzde, yarıiletken kristallerin yüksek kalitede üretimi, moleküler demet epitaksi (Molecular Beam Epitaxy, MBE) gibi tekniklerle ultra yüksek vakum (UHV) şartları altında ( $<10^{-9}$  Torr), metal organik kimyasal buhar biriktirme (Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) gibi tekniklerle düşük basınç şartları altında (0,5-760 Torr) gerçekleştirilebilmektedir. Bu tür cihazlarda, çok yüksek saflıkta kaynak malzemeler, yapılması hedeflenen işe uygun olan konfigürasyonlarda katı veya gaz kaynak olarak kullanılmaktadır. Epitaksiyel sistemler, sisteme yüklenen kaynak malzemelerin periyodik cetveldeki grupları baz alınarak III-V (GaN, GaAs, InGaAs, gibi), IV (Si, Ge, gibi), II-VI

(ZnO, ZnS, HgCdTe, gibi) sistemi gibi isimlerle adlandırılmaktadır. Bu çalışmadaki kristal üretim süreçlerinde, üretilmesi hedeflenen dedektör yapılarının malzeme sistemine uygun olan III-V MBE tekniği kullanılmıştır. MBE tekniği, tek atom-katman (monolayer, ML, 3-4 Å) hassasiyetinde büyüme kontrolüne sahip olup bu teknikle oldukça ince katmanlar birbiri üzerine düşük kusur oranlarında ve yüksek saflıkta büyütülebilmektedir. MBE tekniğinin bu özelliği, InAs/GaSb süperörgüler gibi ince katmanlı (5-15 ML) ve çok tekrarlı (100-600) yarıiletken tek-kristal hetero yapıların büyütülmesini mümkün kılmaktadır. Bu çalışmada kristal üretiminde kullanılan malzemelerin işaretlendiği periyodik cetvelden bir bölüm Şekil 1.3'te görülmektedir. Berilyum (Be) ve silisyum (Si) katkı malzemesi olarak kullanıldığından farklı renkle işaretlenmiştir.

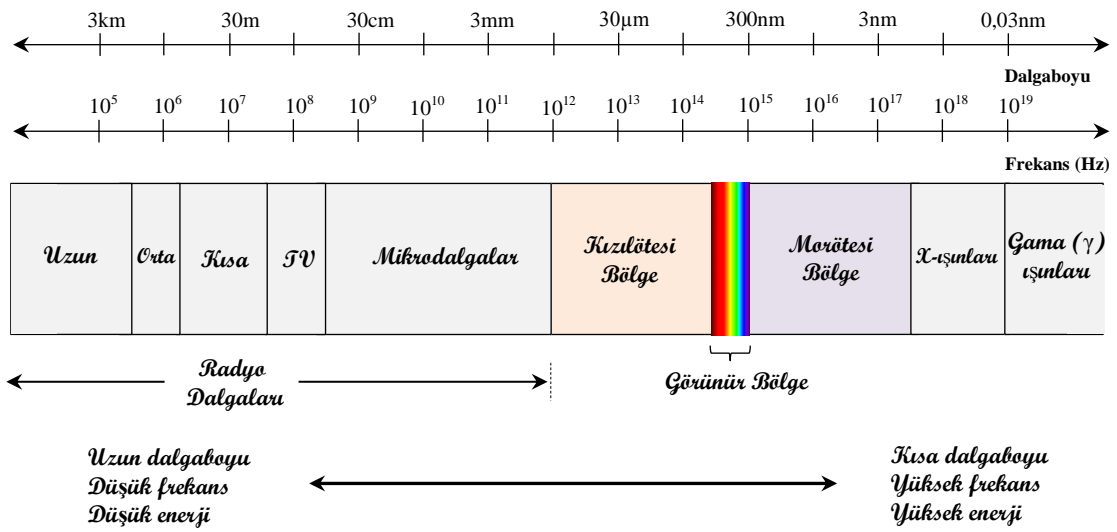
II		III		IV		V		VI	
4	9,012 <b>Be</b> Berilyum	5	10,811 <b>B</b> Bor	6	12,0107 <b>C</b> Karbon	7	14,0067 <b>N</b> Azot	8	15,9994 <b>O</b> Oksijen
12	24,31 <b>Mg</b> Magnezyum	13	26,9815 <b>Al</b> Alüminyum	14	28,0855 <b>Si</b> Silikon	15	30,9737 <b>P</b> Fosfor	16	32,065 <b>S</b> Kükürt
30	65,39 <b>Zn</b> Çinko	31	69,723 <b>Ga</b> Galyum	32	72,64 <b>Ge</b> Germanyum	33	74,9216 <b>As</b> Arsenik	34	78,96 <b>Se</b> Selenyum
48	112,41 <b>Cd</b> Kadmilyum	49	114,818 <b>In</b> İndiyum	50	118,710 <b>Sn</b> Kalay	51	121,760 <b>Sb</b> Antimon	52	127,60 <b>Te</b> Tellür
80	200,59 <b>Hg</b> Cıva	81	204,3833 <b>Tl</b> Talyum	82	207,20 <b>Pb</b> Kurşun	83	208,980 <b>Bi</b> Bizmut	84	208,98 <b>Po</b> Polonyum

Şekil 1.3. Periyodik çizelgeden bir bölüm [2]

### 1.1. Kızılötesi Radyasyon ve Uygulama Alanları

Mutlak sıfır (0 K) sıcaklığının üzerinde bütün cisimler foton yayımlarlar ve bu olgu termal radyasyon (karacisim ışması) olarak bilinir. Oda sıcaklığına (~300 K) yakın sıcaklıklarda, cisimler tarafından yayımlanan radyasyon

gözümüzle algılayamayacağımız bir forma sahiptir. Belirli bir sıcaklığa ulaşmış bir cismin yayımladığı radyasyonu gözümüzle göremesek bile dokunma duyumuzla ısı olarak algılayabilmemiz olanaklıdır. Isınan cisim üzerinden yayımlanan radyasyonunun dalgaboyu görünür bölge içerisine karşılık geldiğinde ise yayımlanan radyasyonu gözle de algılayabilmek mümkün hâle gelir. Burada, görünür bölge ile insan gözünün algılayabildiği dalgaboyu aralığı (0,4-0,77  $\mu\text{m}$ ) kastedilmektedir.



Şekil 1.4. Elektromanyetik spektrum [3]

Kızılötesi (IR) bölge, elektromanyetik spektrumda (Şekil 1.4) görünür bölge ile mikrodalga bölgesi arasında yer alır. Dalgaboyu olarak bu bölge, 0,77  $\mu\text{m}$ 'den 100  $\mu\text{m}$ 'ye kadar uzanmaktadır. Belirli bir sıcaklığa sahip cisimler kızılötesi bölgeye karşılık gelen radyasyon yayımladığından, bu bölge elektromanyetik spektrumun ısı bölgesi olarak da tanımlanır. Kızılötesi radyasyonun varlığı ilk olarak 1800'lü yıllarda Sir. William Herschel tarafından fark edilmiş olup teorik altyapısı daha sonraki dönemlerde Kirchhoff (1859), Stefan (1879), Boltzmann (1884), Wien (1893), Rayleigh (1900), Max Planck (1900)'ın katkılarıyla oluşturulmuştur [4].

Kızılötesi radyasyon bölgesi, genel olarak aşağıda belirtilen dalgaboyu aralıklarında alt gruplara ayrılarak ele alınmaktadır [3].

Bölge Adı	Dalgaboyu Aralığı (μm)
(i) Yakın Kızılötesi (NIR)	» 0,78 - 1
(ii) Kısa Dalgaboylu Kızılötesi (SWIR)	» 1 - 3
(iii) Orta Dalgaboylu Kızılötesi (MWIR)	» 3 - 6
(iv) Uzun Dalgaboylu Kızılötesi (LWIR)	» 6 - 15
(v) Çok Uzun Dalgaboylu Kızılötesi (VLWIR)	» 15 - 30
(vi) Uzak Kızılötesi (FIR)	» 30 - 100

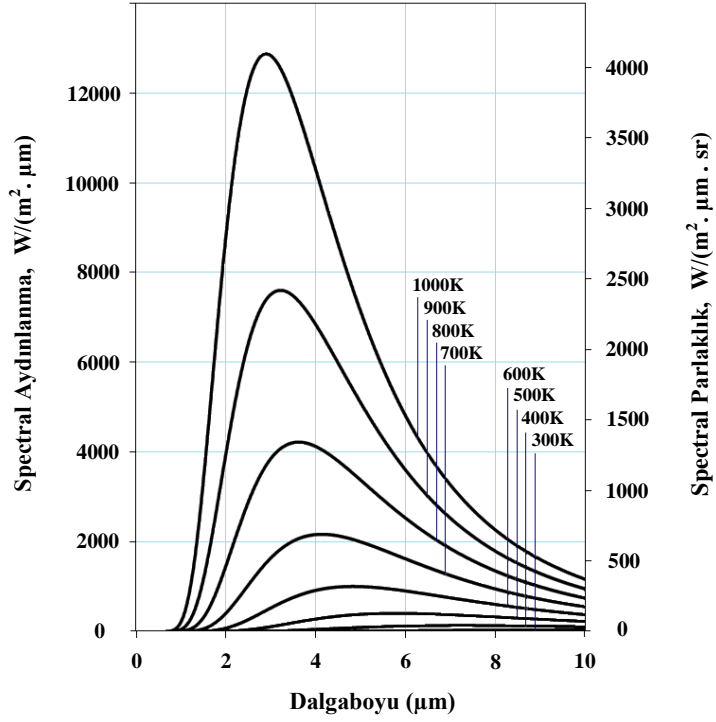
### 1.1.1. Termal ışıma yasaları

Siyahcisim kavramı, varsayımsal olarak üzerine düşen bütün ışınımı hiçbir biçimde yansıtmadan bütünüyle soğuran cisim ifade etmektedir. Siyahcisim radyasyonunun doğasını ve sistematliğini tanımlayan üç temel yasa söz konusudur. Bunlar;

*Planck Yasası:* Planck, ışığın fotonlar şeklinde kuantize olduğunu varsayarak siyahcisim radyasyonunun doğasını açıklayan genel ifadeyi türetmiştir. Planck yasası uyarınca, mutlak sıfır (0 K) sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa sahip bütün cisimler, W gücü ile elektromanyetik dalgalar yayımlarlar. Söz konusu W gücü, λ dalgaboyuna ve T sıcaklığına bağlı bir ifadedir.

$$W(\lambda, T) = \epsilon \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad [\text{Watt} / \text{cm}^2 / \mu\text{m}] \quad (1.1)$$

Burada, h, Planck sabiti ( $6,62618 \times 10^{-34}$  J.s), k, Boltzmann sabiti ( $1,38066 \times 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>), c ise ışığın boşluktaki hızıdır ( $2,9979 \times 10^8$  m.s<sup>-1</sup>). Salım gücü (emissivity) (ε) ise cismin yaydığı radyasyon gücünün aynı sıcaklıktaki bir siyahcismin toplam radyasyon gücüne oranıdır [5]. Farklı sıcaklıklardaki siyahcisim spektrumu Şekil 1.5’de verilmiştir.



Şekil 1.5. Farklı sıcaklıklarda siyahcisim spektrumu [6]

*Wien Yasası:* Verilen bir T sıcaklığında, siyahcisim tarafından yayımlanan elektromanyetik dalga enerjisinin dağılımının tepe noktasını verir. Sıcaklık arttıkça yayımlanan enerjinin maksimumu, kısa dalgaboylarına (yüksek frekans ve enerjilere) doğru kaymaktadır.

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,756}{T[K]} \quad [\mu\text{m}] \quad (1.2)$$

Burada,  $\lambda$ 'nın birimi  $\mu\text{m}$ , T'nin birimi ise Kelvin'dir.

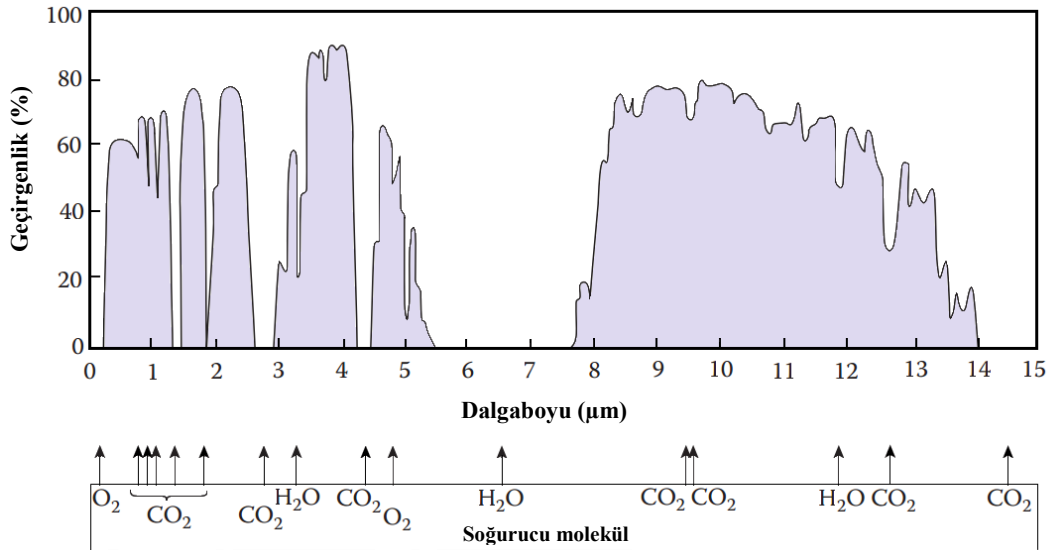
*Stefan-Boltzmann Yasası:* Verilen bir sıcaklık için siyahcisimden yayılan toplam gücün yaklaşık olarak belirlenmesini olanaklı kılmaktadır.

$$M = \sigma \cdot T^4 \quad [\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}] \quad (1.3)$$

Burada,  $\sigma$ , Stefan-Boltzmann sabitidir ( $\sigma = 5,67051 \times 10^{-12} \text{ [W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$ ).

### 1.1.2. Atmosferik soğurma

Düşük foton enerjileri nedeniyle (birkaç yüz meV) kızılötesi radyasyon, bant aralığı enerjisi radyasyonun enerjisinden büyük olan birçok ortamda şiddetinde kayba uğramadan yoluna devam edebilmektedir. Bu, görünür bölgede opak görünümdeki birçok malzeme veya ortamın kızılötesi radyasyon için transparan (geçirgen) olabileceği anlamına gelmektedir. Dünyanın atmosferini oluşturan moleküller, kızılötesi radyasyonu önemli oranlarda soğururlar. Özellikle atmosferde yer alan karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ), su buharı ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ve ozon ( $\text{O}_3$ ) molekülleri yoğun olarak IR tayf bölgesini soğururlar. Karbonmonoksit, azot oksit, metan, nitrik oksit gibi moleküller ise soğurmada daha az etkilidirler [7].



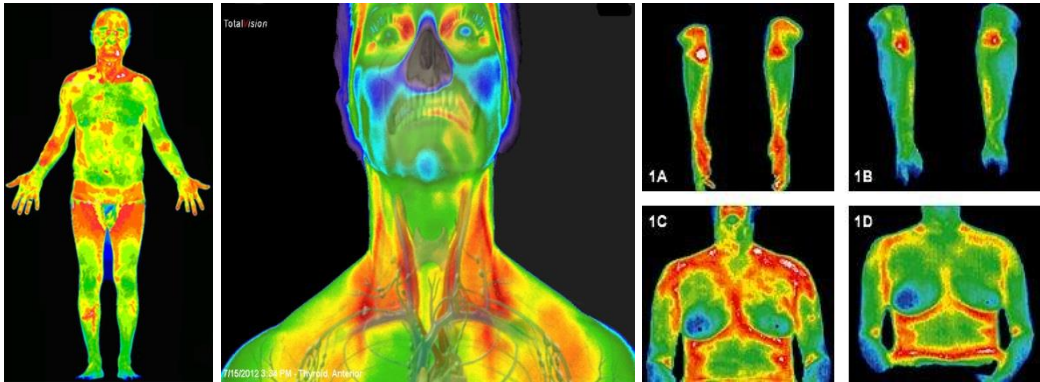
Şekil 1.6. 0-15 µm dalgaboyu aralığında atmosferik geçirgenliğin değişimi [3]

Elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesi, atmosfer tarafından soğurulma miktarlarına bağlı olarak kendi içinde alt gruplarda değerlendirilir. Atmosferin 0-15 µm dalgaboyu aralığındaki bölgedeki geçirgenliği Şekil 1.6'da görülmektedir. Görüldüğü üzere, atmosfer 3-5 µm ve 8-12 µm dalgaboyları arasında görece olarak daha fazla geçirgenliğe sahiptir. Bu bölgelerdeki radyasyon, atmosfer boyunca çok az miktarda kayba uğrayarak yoluna devam etmektedir. Bu bölgeler, atmosferik pencere olarak adlandırılmaktadır.

Şekil 1.6'da görüldüğü üzere, kızılötesi radyasyon 5,5-7  $\mu\text{m}$  bandında yoğun olarak atmosferdeki su buharı tarafından soğurulmakta, 3 ve 12  $\mu\text{m}$  yakınlıklarında yine su buharı kaynaklı soğurulma etkileri az olsa da gözlenmektedir. 2,7  $\mu\text{m}$ , 4,3  $\mu\text{m}$  ve 13  $\mu\text{m}$  bölgelerinde ise karbondioksit etkileri söz konusudur. Ozon ise 9,3  $\mu\text{m}$  bölgesinde soğurma bandına sahiptir [8].

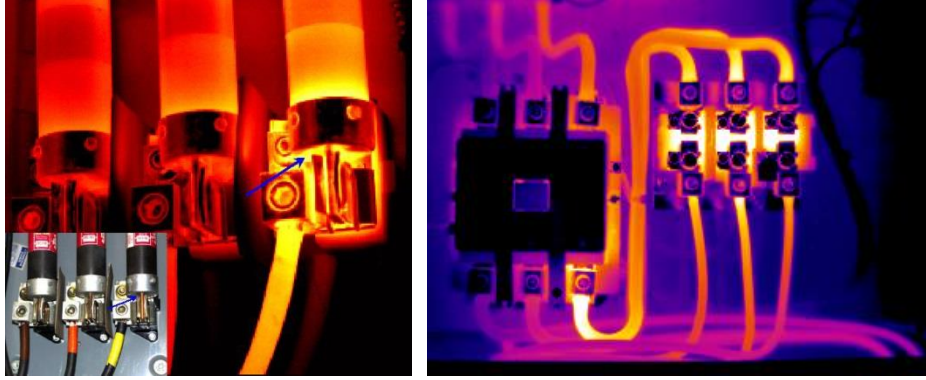
### 1.1.3. Kızılötesi görüntüleme ve kullanım alanları

Kızılötesi görüntüleme teknikleri, günümüzde sağlık, kalite kontrol işlemleri, uzay çalışmaları, güvenlik ve askeri amaçlarla yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Söz konusu kullanım alanlarına ilişkin örnekler Şekil 1.7-1.10'da verilmiştir. Şekil 1.7'de kızılötesi kameralar ile alınan görüntülerde insan vücudunun ısıl dağılımı görülmektedir. Görüntüler, vücuttaki sorunlu bölgelerin tespitini ve dağılımının belirlenmesini mümkün kılmaktadır. Tıbbi olarak vücudumuzun belirli bir bölgesinde bir sorunun varlığında o bölgedeki kan dolaşımı genellikle bozulmakta ve ısıl yönden vücudumuzun diğer kısımlarına göre farklılık göstermektedir. Bu farklılaşma da kızılötesi kameralarla kolayca algılanabilmektedir.



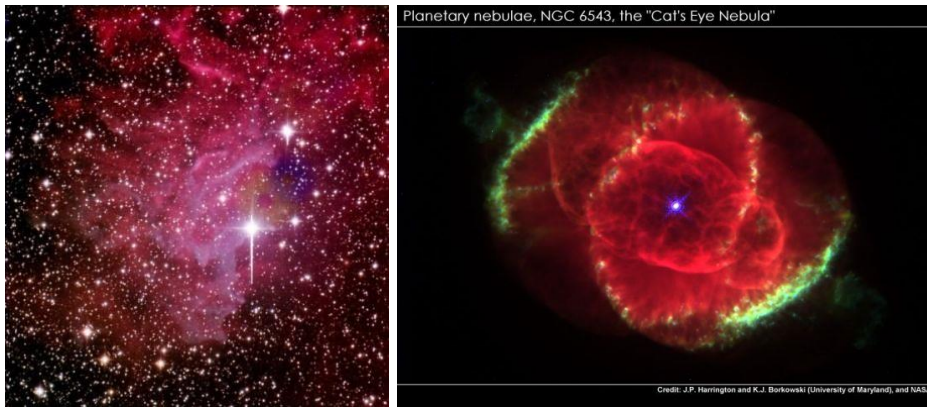
Şekil 1.7. Kızılötesi görüntülemenin sağlık alanındaki uygulamalarına örnekler [9, 10, 11]

Aynı özellikteki kablolar ve bağlantı noktaları üzerlerinden akım geçmekteyken bazı bölgelerin görece olarak daha fazla ısınması bir sorunun varlığını işaret ediyordur olabilir (Şekil 1.8). Bu tip sorunların daha ciddi sonuçlara neden olmadan erken tespiti açısından kızılötesi görüntüleme kullanışlı ve pratik bir yöntemdir.



Şekil 1.8. Kızılötesi görüntülemenin arıza tespiti alanındaki uygulamalarına örnekler [12, 13]

Dünyadan milyonlarca ışık yılı uzaklıktaki galaksi ve yıldız sistemlerine ait kızılötesi ışınım, gelişmiş kızılötesi dedektörler ile algılanabilmekte ve gelişmiş teleskop sistemleri yardımıyla evrenin derinliklerinden oldukça detaylı görüntüler yakalanabilmektedir (Şekil 1.9). Şekil 1.10'da ise kızılötesi dedektörlerin karanlıkta görüş avantajları nedeniyle, askeri ve güvenlik alanında kullanımına ilişkin örnekler görülmektedir.



Şekil 1.9. Kızılötesi görüntülemenin uzay çalışmalarındaki uygulamalarına örnekler [14, 15]



**Şekil 1.10.** Kızılötesi görüntülemenin askeri ve güvenlik alanındaki kullanımına ilişkin örnekler  
[16, 17, 18]

## 1.2. Kızılötesi Dedektörler ve Tarihsel Gelişimi

Bir kızılötesi algılama sisteminin hassasiyeti ve kabiliyeti, başta dedektör kısmı olmak üzere o sistemi oluşturan optik ve elektronik konfigürasyonun özellikleri ve gelişmişliği ile doğrudan ilişkilidir. Bu sistemlerde kullanılan ekipmanların çoğunluğu, sistemin algılama birimi olan dedektörün sağlıklı bir biçimde işlevini yerine getirebilmesini sağlamak amacıyla özel olarak tasarlanmakta ve kullanılmaktadır. Bu sebeple, bu tip sistemlerin geliştirilmesi ve performanslarının artırılması için odaklanılması gereken öncelikli birim dedektör bölümüdür. Bir kızılötesi algılama sisteminde dedektör, üzerine düşen (ya da çeşitli optik gereçlerle düşürülen) IR radyasyonu, ölçülebilir bir elektriksel sinyale çeviren bölümdür. Çalışma mekanizmalarına göre kızılötesi dedektörler, termal dedektörler ve foton dedektörleri olmak üzere iki grupta değerlendirilmektedir. Termal dedektörler, genel olarak optik radyasyon enerjisinin soğurulmasına bağlı olarak oluşan ısının malzeme üzerindeki fiziksel veya kimyasal etkilerini baz alarak çalışırken foton dedektörleri ise gelen optik radyasyonun dedektörü

oluşturan malzemenin atomik örgüsüyle doğrudan etkileşmesiyle oluşan sinyali baz alarak çalışmaktadırlar.

### 1.2.1. Kızılötesi termal dedektörler

Termal dedektörler çalışırken, soğurulan IR radyasyon dedektörün sıcaklığında değişim meydana getirmektedir. Söz konusu değişim, dedektör mekanizmasında fiziksel veya elektriksel parametrelerde (voltaj, direnç gibi) ölçülebilir bir etki yaratmaktadır. Bu etkinin ilgili cihaz ve ekipmanlarca ölçülmesi ile algılama yapılabilir.

Termal dedektörlerin en önemli avantajı, diğer birçok dedektör türünün aksine oda sıcaklığında herhangi bir soğutma mekanizmasına ihtiyaç duymadan çalışabilmeleridir. Bu özellikleri nedeniyle uzay çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu tip algılayıcıların olumsuz tarafı ise birkaç milisaniye veya daha uzun tepki zamanına sahip olmalarıdır. Bu nedenle yüksek veri hızı gerektiren uygulamalarda dezavantajlara sahiptirler ve nadiren kullanılmaktadırlar [7]. Yaygın olarak kullanılan termal dedektör türleri ve çalışma mekanizmaları aşağıdaki çizelgede özetlenmiştir (Çizelge 1.1).

**Çizelge 1.1.** Termal dedektör çeşitleri ve operasyon yöntemleri [3]

Dedektör	Operasyon yöntemi
Bolometre Metal Yarıiletken Süperiletken Ferroelektrik Sıcak elektron	Elektriksel iletkenlikteki değişim
Termoçift (Isıl çift) / termofil	Farkı iki malzemenin eklemesinde sıcaklık değişimine bağlı voltaj oluşumu
Piroelektrik (pyroelectric)	Elektriksel polarizasyondaki spontan değişim
Golay hücresi / Gaz mikrofon	Gazın genişmesi
Soğurma kenarı (absorption edge)	Yarıiletkenin optik geçirgenliği
Piromanyetik (pyromagnetic)	Manyetik özelliklerdeki değişim
Sıvı kristal	Optik özelliklerdeki değişim

*Bolometre (bolometer):* Gelen radyasyon nedeniyle ısınan dedektör malzemesinin elektrik direncindeki değişimi temel alan ve kullanan termal dedektör çeşitidir.

*Isılçift (thermocouple):* Birbirinden farklı iki metalin uç uca eklenmesi ile oluşturulmaktadır. IR radyasyon iki metalin eklem noktası tarafından soğurulduğunda sıcaklık değişimi ile ilişkilendirilebilecek olan bir voltaj üretilmektedir. Birden fazla ısılçiftin seri bağlanması ile de termofil (thermopile) adı verilen mekanizma oluşturulmaktadır.

*Piroelektrik dedektörler (pyroelectric detectors):* Gelen radyasyondaki değişime bağlı sıcaklık değişimi, dedektör malzemesinin elektriksel polarizasyonunda spontan değişime neden olmaktadır. Malzemenin yüzeyindeki polarizasyon değişimi de ölçülebilecek bir akım yaratmaktadır. Oluşan akım miktarı sıcaklık değişiminin ölçütü olarak kullanılmaktadır [7].

### **1.2.2. Kızılötesi foton dedektörleri**

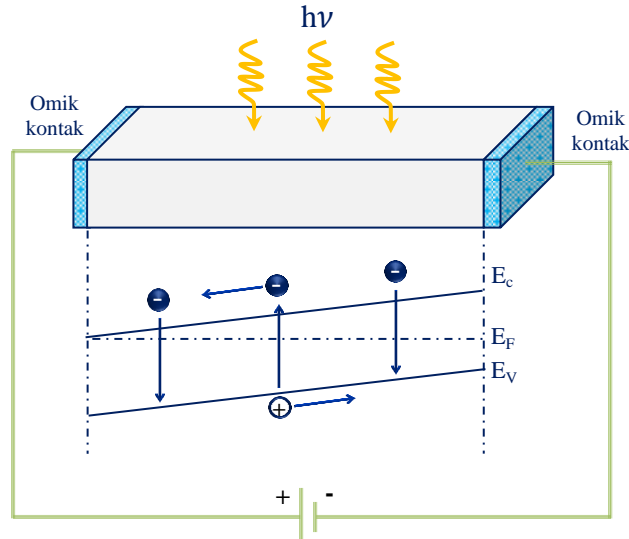
Foton dedektörlerinde gelen radyasyon, dedektör malzemesinin atomik örgüsü ile doğrudan etkileşmektedir. Fotonlar ile algılayıcı yapı içindeki bağlı elektronların etkileşmesi serbest elektriksel taşıyıcılar yaratmaktadır. Söz konusu ışık-madde etkileşimi, cihazın bağlı olduğu elektrik devre ünitesinde, özelleşmiş cihazlarla ölçülebilen direnç, iletkenlik, voltaj ya da akım gibi parametre değişimi meydana getirmektedir. Foton dedektörlerinde kullanılan başlıca değişkenler, direnç, indüktans, voltaj ve akımdır. Foton algılama süreci, soğurulan radyasyonun dedektör elemanının sıcaklığındaki değişimi beklemek yerine anlık etkiyi baz aldığından foton dedektörleri termal detektörlerden daha hızlı tepki zamanına sahiptirler [7, 8].

Fotoiletken (photoconductive, PC) ve fotovoltaiik (photovoltaic, PV) olmak üzere iki farklı türde foton dedektörü bulunmaktadır.

*Fotoiletkenlik etkisi:* Bir yarıiletkende gelen foton sayısındaki değişim, malzemedeki serbest yüklü taşıyıcıların ortalama sayısında değişime neden olmaktadır. Yarıiletkenin elektriksel iletkenliği, bu taşıyıcıların ortalama sayısı ile doğru orantılıdır. Bu yüzden elektriksel iletkenlikteki değişim, yarıiletken üzerine düşen foton sayısı ile doğru orantılıdır.

*Fotovoltaik etki:* Yarıiletken p-n eklemi üzerine gelen foton sayısındaki değişim eklem tarafından üretilen voltajda değişikliğe sebep olmaktadır [8].

PC dedektörler, foton kaynaklı taşıyıcıların varlığında iletkenlikleri artan zayıf iletkenlerdir. Yeterince enerjiye sahip ışık dedektöre girdiğinde fotonlar bağlı elektronlara yeterli enerjiyi aktararak onları iletim bandına çıkarırlar. Fotonlar tarafından yaratılmış taşıyıcılar, uygulanan dış yönlendirme voltajının yarattığı elektrik alan ile süpürülerek kontak bölgesine toplanıp algılama için gerekli elektriksel sinyali oluştururlar. Elde edilen bu elektriksel sinyal kullanılarak algılama gerçekleşir. PC dedektör yapısı şematik olarak Şekil 1.11’de görülmektedir.

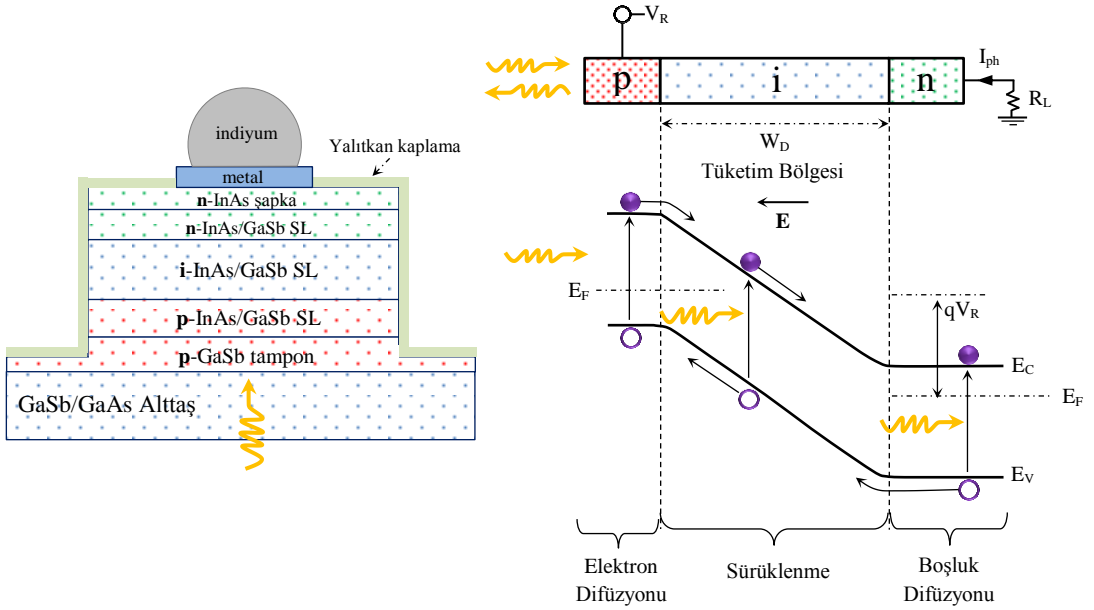


**Şekil 1.11.** PC dedektör yapısının ve optik uyarılma sürecinin şematik gösterimi [19]

PV dedektörler gelen optik radyasyondan bir gerilim veya akım üretirler. Bu yapılar, ışığa duyarlı yarıiletken diyotlar (p-n eklemi ya da p-i-n) olduklarından fotodiyotlar olarak isimlendirilirler. Bir fotodiyot içerisinde optik radyasyon iki malzemenin eklem noktasında soğurulur. Bu şekilde soğurulan fotonlar elektron-boşluk çiftleri oluştururlar. Oluşan elektron-boşluk çiftleri, ölçülebilen dış bir akım veya voltaj oluşturan bir iç elektrik alan oluşumu sağlar. Fotonlar tarafından yaratılan taşıyıcılar çok küçük yönlendirme voltajı

uygulanarak (ya da voltaj uygulanmadan) elektrotlarda oldukça verimli bir biçimde toplanır ve algılama için gerekli sinyali oluştururlar.

P-i-n diyot yapısı, p ve n katmanlar arasında katkılanmamış (intrinsic) bir i bölgesinin yer aldığı p-n eklemidir. P-i-n yapısındaki PV dedektörlerde, üç ana bölge bulunur. P ve n bölgeleri, fotoakım oluşturmak için gerekli elektrik alanı oluşturan p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerden oluşur. n tipi yarıiletken, elektron verici safsızlık atomları, p tipi yarıiletken ise boşluk verici safsızlık atomları ile katkılanır. Safsızlık atomlarıyla katkılanmayan bölge ise yapının i (intrinsic) bölgesini oluşturur. Bu bölge p ve n bölgesi arasında yer alır ve yapının tüketim bölgesi olarak işlev görür. Safsızlık atomlarıyla katkılanmayan i bölgesinin varlığı, tüketim bölgesinin genişliğinin artmasını sağlar ve aygıtın foton soğurma için kullanılabilir alanını artırır. P-i-n yapıdaki InAs/GaSb Tip-II SL PV dedektör yapısı ve PV dedektörlerin çalışma mekanizmasının şematik çizimi Şekil 1.12’de görülmektedir.



**Şekil 1.12.** P-i-n yapıdaki InAs/GaSb Tip-II SL PV dedektör yapısı ve PV dedektörlerin çalışma mekanizmasının şematik çizimi [20]

Günümüzde kızılötesi algılama teknolojisinde kullanılan foton dedektörleri, bantlar arası geçiş prensibine dayanan, küçük bant aralığına sahip cıva kadmiyum tellür (HgCdTe) tabanlı ve külçe (bulk) InSb foton dedektörleri, alt bantlar arası geçiş prensibine dayanan hetero yapıdaki kuantum kuyu kızılötesi foton dedektörleri (QWIP'ler) ve kuantum nokta kızılötesi foton dedektörleri (QDIP'ler)'dir. Bu tip dedektörler başta askeri teknoloji olmak üzere biyomedikal ve astronomi çalışmalarında da sağladıkları avantajlar doğrultusunda kullanılmaktadır. IR dedektörlerin yüksek sıcaklık operasyonlarında, hızlı Auger yeniden-birleşme oranı, yüksek ısı oluşturma oranı (thermal generation rate) gibi performanslarını düşüren bazı temel sorunları bulunmaktadır. Bahsi geçen dedektör yapılarından QWIP'ler, QDIP'ler ve InSb külçe dedektörler, yüksek sinyal gürültü oranı elde etmek amacıyla düşük sıcaklıklarda (77 K-200 K) çalıştırılmaktadır. Dedektör sistemlerini düşük sıcaklıklara soğutma gerekliliği, dedektör sisteminin ağırlığını ve maliyetini arttırmakta, yüksek güç tüketimi gerektirmektedir. Bu durum, insan ya da uçan bir araç için taşınabilirlik açısından dezavantaj oluşturmaktadır. HgCdTe tabanlı dedektörler, yüksek sıcaklık operasyonları ve odak düzlem dizin (Focal plane array, FPA) teknolojisinde performans açısından yeterli olsalarda malzeme büyütme süreçlerinde yaşanan zorlukların yanı sıra geniş alanda tekdüzelik (uniformity) ve maliyet açısından önemli dezavantajlara sahiptirler. Söz konusu olumsuzluklar nedeniyle kızılötesi dedektör teknolojisinde, yüksek sıcaklıklarda, mümkünse oda sıcaklığında, performans gösterebilecek, geniş alanda tekdüzelige sahip, büyüme kararlılığı açısından sorunsuz yeni dedektör yapılarının tasarlanması ve üretilmesi yönünde çalışmalara ağırlık verilmiş ve yeni dedektör yapıları geliştirilmiş, geliştirilmektedir [8, 21]. Tip-II kırık bant hizalamasına sahip InAs/GaSb süperörgü tabanlı dedektör yapıları, son yıllarda en çok ilgi gören ve yoğun olarak çalışılan dedektör tasarımlarından biridir. Bu malzeme sistemi ile tekdüzelik ve performansa dayalı sorunlar büyük ölçüde ortadan kalkmıştır. Ayrıca bu yapılarda bant aralığının geniş bir dalga boyu aralığında ( $3 \mu\text{m} < \lambda_c < 30 \mu\text{m}$ ) algılama yapabilecek şekilde ayarlanabilmesi kızılötesi algılama teknolojinde esneklik ve avantaj sağlamaktadır. Kızılötesi algılama teknolojisinde kullanılan dedektör yapılarının malzeme özellikleri ve performansları açısından birbirlerine göre

durumları Çizelge 1.2’de, 77 K sıcaklığında MWIR ve LWIR bölgedeki performanlarına ilişkin bilgiler ise Çizelge 1.3’de verilmiştir.

**Çizelge 1.2.** Kızılötesi algılamada kullanılan foton dedektörlerinin özelliklerinin kıyaslandığı çizelge [22]

Karakteristik	Tip-II Superörgüler	HgCdTe fotodiyotlar	Kuantum kuyu kızılötesi foto-dedektörler	Kuantum nokta kızılötesi foto-dedektörler	InSb fotodiyotlar
Normal doğrultuda soğurma	Evet	Evet	Hayır	Evet	Evet
Çalışma sıcaklığı	Yüksek	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük
Spektral ayarlanabilirlik	Evet	Evet	Evet	Evet	Hayır
Yüksek kuantum verimi	Evet	Evet	Hayır	Hayır	Evet
Yüksek tepkisellik ve duyarlılık	Evet	Evet	Hayır	Hayır	Evet
Çoklu-renk uygulaması	Evet	Evet	Evet	Evet	Hayır
Homojenlik	Evet	Hayır	Evet	Hayır	Evet
Malzeme verimliliği	Yüksek	Düşük	Yüksek	Yüksek	Düşük

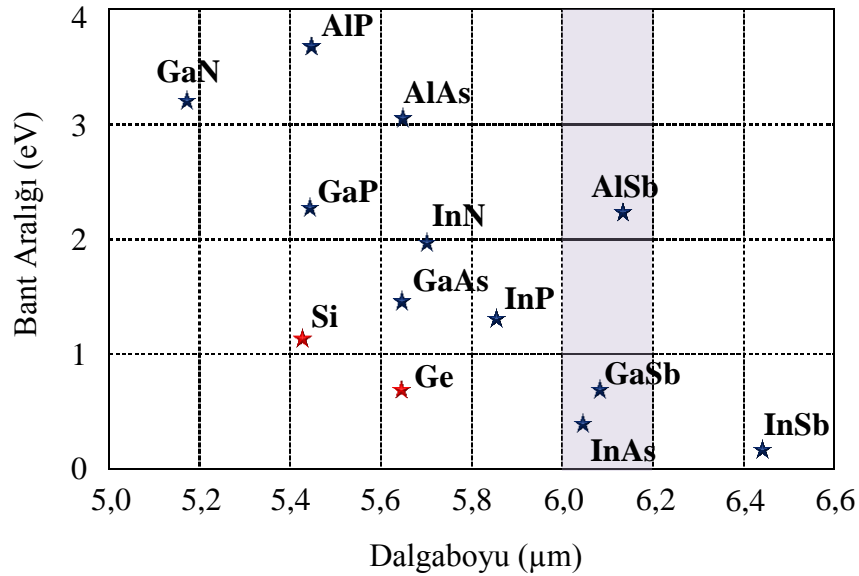
**Çizelge 1.3.** Kızılötesi algılamada kullanılan foton dedektörlerinin 77 K sıcaklığında MWIR ve LWIR bölgedeki performanlarına ilişkin bilgiler [22]

Parametre		Tip-II SL	HgCdTe	QWIP	QDIP
Kuantum Verimi	MWIR	~ % 70	≥ % 70	≤ % 10	% 48
	LWIR	~ % 70	≥ % 70	≤ % 10	% 2,7
R <sub>0</sub> A Çarpımı	MWIR (λ <sub>c</sub> =5 μm)	10 <sup>6</sup> Ω.cm <sup>2</sup>	10 <sup>8</sup> Ω.cm <sup>2</sup>	M.d.	M.d.
	LWIR (λ <sub>c</sub> =10 μm)	100 Ω.cm <sup>2</sup>	300 Ω.cm <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup> Ω.cm <sup>2</sup>	M.d.
Dedektivite (FOV=0)	MWIR (λ <sub>c</sub> =5 μm)	5x10 <sup>12</sup> Jones	4x10 <sup>15</sup> Jones	5x10 <sup>11</sup> Jones	2x10 <sup>11</sup> Jones
	LWIR (λ <sub>c</sub> =10 μm)	5x10 <sup>11</sup> Jones	2x10 <sup>12</sup> Jones	2x10 <sup>10</sup> Jones	2x10 <sup>10</sup> Jones

(M.d.: Mevcut değil)

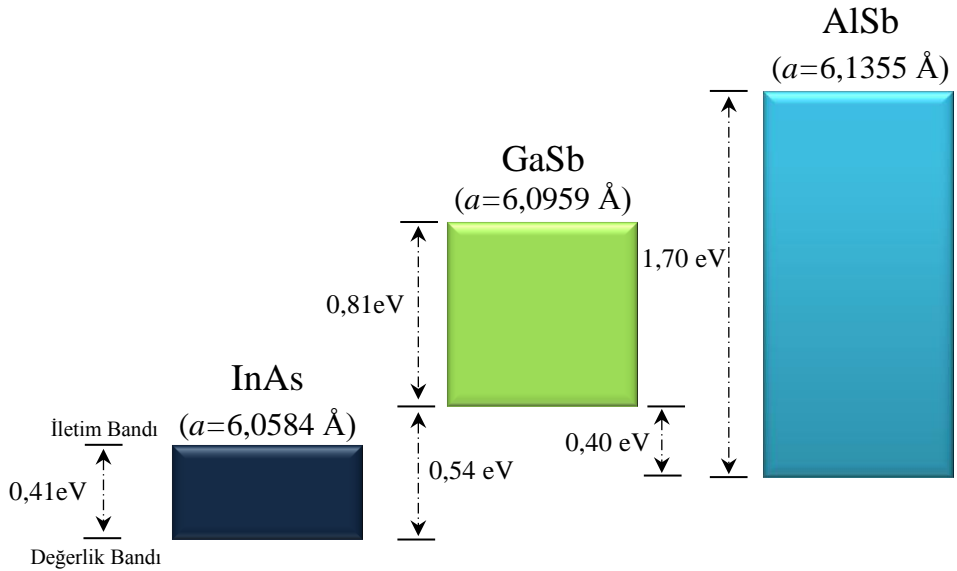
### 1.3. 6,1 Angstrom Ailesi

Periyodik tablonun III ve V gruplarında yer alan elementler kullanılarak üretilen yarıiletken kristaller, kızılötesi bölgede çalışan dedektör yapılarının üretiminde yoğun olarak kullanılmaktadır. AlSb, AlAs, AlP, AlGaAs gibi alüminyum bileşikleri, GaSb, GaAs, GaN, GaP gibi galyum bileşikleri, InSb, InAs, InN, InP gibi indiyum bileşikleri yarıiletken teknolojisinde sıklıkla kullanılan kristal bileşiklerdir. Şekil 1.13’de verilen grafikte bu bileşiklerin örgü sabitleri ve bant aralıklarının birbirlerine göre pozisyonları görülmektedir. Sözü edilen kristal bileşikler, uygun bir alttaş üzerine külçe halinde veya yüksek kabiliyetli ve gelişmiş epitaksiyel sistemler yardımıyla 1-5 nm gibi oldukça ince katmanlar halinde birbirleri üzerlerine tekrarlı biçimde büyütülebilmektedir. Bu sayede dedektör, lazer, güneş pili gibi çeşitli optoelektronik aygıtların üretimi mümkün olmaktadır. Son yıllarda ultra yüksek vakum şartlarında büyütme yapmaya olanak sağlayan epitaksiyel teknikler kullanılarak, bu tür malzemelerin kusursuz ve yüksek kalitede üretilmesi, söz konusu malzemeler üzerinde var olan ilgiyi arttırmış ve başta dedektör teknolojisi olmak üzere optoelektronik sektöründe önemli gelişmeler sağlanmıştır.



Şekil 1.13. Yarıiletken malzemelere ait örgü sabiti-bant aralığı grafiği (III-V bileşikleri mavi yıldızla işaretlenmiştir) [23]

6,1 angstrom ailesi, III-V kızılötesi teknolojisinde önemli bir yere sahiptir. Bu ailenin üç üyesi InAs, GaSb ve AlSb örgü parametreleri açısından birbirleri ile oldukça uyumludur. Bu durum, bu kristal malzemelerin birbirleri üzerine yüksek kalitede ve düşük kusur yoğunluklarında büyütülmesine imkân vermekte, söz konusu malzemelerin ikisinin veya üçünün de birlikte kullanıldığı optoelektronik aygıt tasarımlarına olanak sağlamaktadır. InAs/GaSb süperörgüler bu tasarımlardan öne çıkan yapılardır. InAs ile GaSb kristallerinin birbiri üzerine büyütülmesi ile InAs'ın iletim bandının GaSb'nin değerlik bandından daha aşağıda konumlandığı Tip-II kırık bant hizalamasına uyan bir heteroeklem elde edilmektedir. AlSb ise bazı süperörgü tasarımlarında bariyer olarak kullanılmaktadır. Şekil 1.14'de 6,1 Å ailesinde yer alan malzemelerin birbirlerine göre bant aralığı enerjileri şematik olarak çizilmiştir.



Şekil 1.14. InAs, GaSb, ve AlSb (6,1 Å ailesi)'nin bant aralığı enerjileri ve birbirlerine göre pozisyonları [4]

Birbiri üzerine büyütülecek malzemeler arasında kristal örgü uyumu bulunması büyük önem teşkil etmektedir. Aksi halde, kristalin büyüme kararlılığı kaybolmakta, oluşan zora bağlı kusurlar ve yönelmeler oluşmaktadır. Kristal malzemelerin farklı örgü sabitine sahip diğer bir kristal malzeme üzerine büyütülmesi işlemlerinde bir kritik kalınlık (Critical Layer Thickness, CLT) değeri tanımlanmaktadır. Tanımlanan kritik kalınlığa kadar kristal yapı, örgü

uyumsuzluğuna bağlı oluşan ve kalınlıkla birlikte artan zor altında bŸyŸmeyi sŸrdŸrmekte ancak belirli bir kalınlıktan sonra ŸrgŸ Ÿzerinde biriken zoru yŸnetemeyerek kendisini rahatlatacak yŸnde davranmaktadır. Bu durum ŸrgŸde kopmalara, yanlış veya eksik yerleşmelere neden olmaktadır. Bazı malzemeler için ŸrgŸ uyumsuzluk oranları ve kritik kalınlık değerleri izelge 1.4’de verilmiştir. SŸperŸrgŸlerde ŸrgŸ uyumsuzluğunu hesaplamakta kullanılan denklemler ise aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{a_{SR} - a_{GaSb}}{a_{GaSb}} \quad (1.4)$$

$$a_{SR} = \frac{a_{InAs} n_{InAs} + a_{GaSb} n_{GaSb}}{n_{InAs} + n_{GaSb}} \quad (1.5)$$

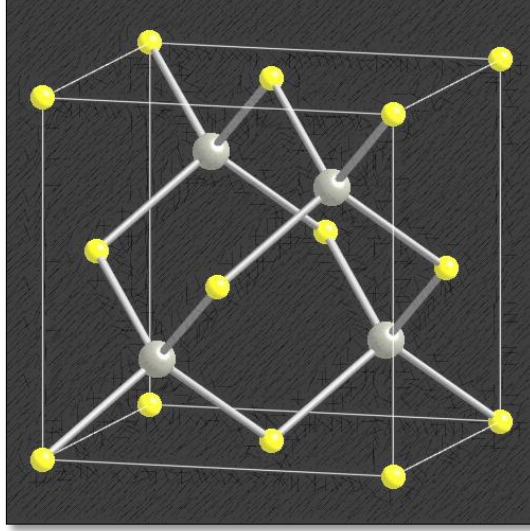
Burada,  $n_{InAs}$  ve  $n_{GaSb}$  InAs ve GaSb için ML sayısına,  $a_{InAs}$  ve  $a_{GaSb}$  InAs ve GaSb malzemelerinin dikey ŸrgŸ sabitleri,  $a_{SR}$  ise sŸperŸrgŸnŸn ortalama ŸrgŸ sabitine karşılık gelmektedir [22].

**Çizelge 1.4.** Bazı yarıiletken malzemeler için ŸrgŸ uyumsuzluğu ve kritik kalınlık değerleri [23]

Alt katman	Ÿst katman	ŸrgŸ Uyumsuzluğu ( $f_m$ )	Kritik kalınlık (Å)	Kritik kalınlık (ML)
GaSb	InAs	$-6,2 \times 10^{-3}$	194	64,1
GaSb	InSb	$5,9 \times 10^{-2}$	7,2	2,2
GaAs	GaSb	$7,3 \times 10^{-2}$	4,2	1,4
GaAs	InAs	$6,7 \times 10^{-2}$	4,9	1,6

Bu Ÿ malzemede çinko-sŸlfŸr (zinc-blende) kristal yapısına sahiptir. Bu yapı elmas yapının aksine iki cins atomdan oluşmaktadır. Şekil 1.15’deki animasyonda sarı renkte gŸrŸnen atomlar V-grubu elementlerini (Sb ve As), yapının iç kısmında konumlanan gri renkli atomlar ise III-grubu elementlerini (Ga, In, Al) temsil etmektedir. Stokiyometrik kristal bŸyŸtebilmek için, bŸyŸme esnasında ortamda V-grubu akısı III-grubu akısından katbekat daha fazla

sağlanmalıdır. Alttaş sıcaklığı arttıkça söz konusu oranında arttırılması büyüme kararlılığı açısından gerekli bir durumdur.



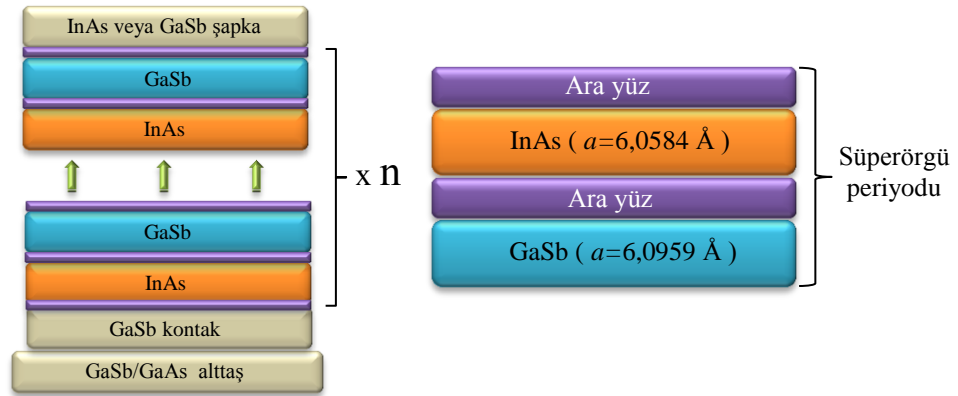
Şekil 1.15. Çinko-sülfür (Zinc-blende) kristal yapısı [24]

#### 1.4. InAs/GaSb Tip-II Süperörgü Fotodedektör Yapıları

InAs ve GaSb kristallerinin kullanıldığı Tip-II süperörgü malzeme sistemi ilk olarak Leo Esaki ve ark. tarafından 1970'lerde ortaya konulmuştur [25]. Bu yapının kızılötesi algılayıcı olarak kullanımına ilişkin ilk uygulamalar ise Smith ve Mailhot tarafından 1987 yılında gerçekleştirilmiştir [26]. 90'lı yılların ortalarından bu yana kendisine daha geniş bir uygulama alanı bulmuş ve gelişimi günümüzde de halen devam etmektedir.

InAs/GaSb Tip-II süperörgüler, III-V grubu malzeme sistemi ile yapılan kızılötesi dedektör alanındaki çalışmalarda oldukça yoğun çalışılan, MWIR ve LWIR bölgede özellikle yüksek sıcaklıklardaki performansları ile dikkat çeken hetero kristal yapılardır. Genel olarak 2-7 nm kalınlığındaki InAs ve GaSb katmanların birbiri üzerine tekrarlı olarak büyütülmesi ile oluşturulmaktadır (Şekil 1.16). Bu tür yapılarda yapıyı oluşturan katmanların kalınlıkları, kritik kalınlığın altında olması yapıdaki stresin yönetilmesi açısından önemlidir. Bunun dışında

InAs→GaSb ve GaSb→InAs geçişlerinde InSb-benzeri veya GaAs benzeri ara yüz oluşumlarının yapıdaki stresin yönetilmesinde etkisi büyüktür. Bu yapılar p-i-n, nBn, pBp gibi farklı tasarımlarda büyütülebilmektedir. Bu tez kapsamında çalışılan fotodiyotlar, büyüme doğrultusunda, p-i-n yapısında tasarlanmıştır. P-i-n yapılarda, yapının alt kontak katmanı yaygın olarak p-GaSb, üst kontak (şapka) katmanı ise n-InAs veya n-GaSb olarak büyütülmektedir.



Şekil 1.16. InAs/GaSb Tip-II SL yapının şematik görünümü

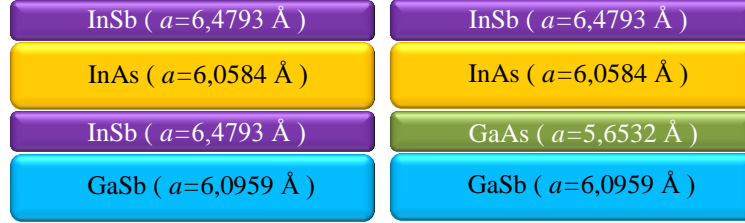
InAs/GaSb SL yapılar günümüzde yaygın olarak GaSb alttaşlar üzerine büyütülmektedir. Çünkü bu tip yapıların tekrarlı biçimde kusursuz büyüebilmeleri için örgü parametreleri arasında uyumluluk temel bir gerekliliktir. InAs ve GaSb kristalleri için örgü sabitleri sırasıyla 6,0584 Å ve 6,0959 Å'dur ve yakın bir uyumluluk söz konusudur. InAs alttaşlar her ne kadar örgü uyumu açısından avantajlı görünseler de yüksek kalitede alttaş üretimi ve temini açısından GaSb'ye kıyasla dezavantajlara sahiptir. GaSb alttaş üretimi 1990'ların sonlarından günümüze önemli gelişmeler katetmiş ve bugün 4 inç boyutuna kadar kaliteli üretimi ve ticari temini mümkün olabilmektedir. GaSb alttaş üretimindeki gelişmelere paralel olarak InAs/GaSb SL yapılar için alternatif alttaşların kullanılmasına yönelik çalışmalarda hızla sürdürülmektedir. GaAs alttaşlar ile süperörgü arasındaki dikkate değer örgü uyumsuzluğuna (~%7,3) rağmen GaAs alttaşlar bu kapsamda üretilen alternatiflerin başını çekmektedir. GaSb alttaş fiyatının GaAs alttaş fiyatına göre yüksek olması ve GaSb alttaş boyutundaki sınırlamalar bu tür çalışmalarda GaAs alttaşların kullanılmasına

yönelik çalışmaları önemli kılmaktadır. Günümüzde, GaSb alttaşların 4 inç boyutuna kadar GaAs alttaşların ise 6 inç boyutuna kadar üretimi mümkün olabilmektedir. Ayrıca GaAs alttaşların kızılötesi radyasyon için yüksek oranda geçirgen olması arkadan aydınlatma yapılan cihazlarda avantaj sağlamaktadır. GaAs alttaşların GaSb alttaşların aksine katkısız olarak üretilebilmeleri de diğer bir önemli husustur.

InAs/GaSb SL fotodedektörlerde yüksek sinyal gürültü oranlarına ulaşmak için süperörgü ara yüz oluşumunun kalitesi ve kontrolü önem taşımaktadır. InAs/GaSb SL fotodedektör yapılarının tasarımında katman kalınlıkları ve bu kalınlıklara uygun ara yüz optimizasyonu, bu tür yapıların kalitesi, elektriksel ve optik performansı açısından oldukça önemli iki parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Katman kalınlıkları genel olarak dedektörün hangi dalgaboyları arasında çalışacağını belirlerken, yapıdaki stres mekanizmasında da etkilidir [22, 27]. InAs-GaSb katmanlar arasına doğrudan ya da dolaylı olarak oluşturulan ara yüzler süperörgünün yapısal kalitesinde ve optik özelliklerinde büyük rol oynamaktadır [28]. InAs ve GaSb katman kalınlıkları ise tasarlanan yapıya göre değişkenlik göstermekte, kalınlıklar 5-20 ML arasında değişmektedir.

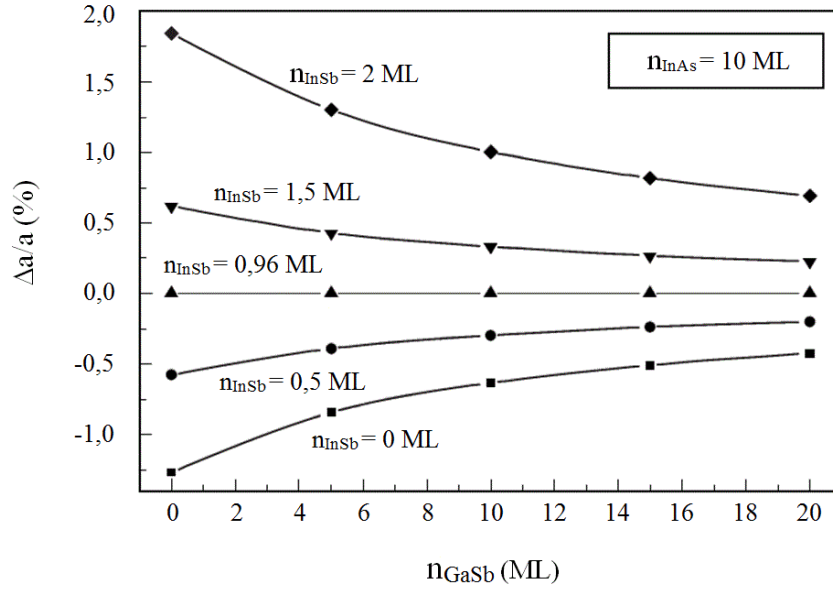
InAs/GaSb SL yapıların GaSb zemin üzerine büyütülmesi durumunda, InAs'ın örgü sabitinin daha küçük olması sebebiyle yapı örgüyü genişletici yönde zor (tensile strain) ( $\Delta a/a = -0,62$ ) altındadır [29]. Hetero yapılarda, her ne kadar örgü parametreleri birbirine yakın malzemeler seçilse de, farklı malzemelerin birbiri üzerine çok tekrarlı olarak büyütülmesi durumunda, yapı kalınlaştıkça yapıda belirli oranda stres oluşması kaçınılmaz olmaktadır. Kristal örgü, bu stresi belirli bir kalınlığa kadar tolere edebilmekte, belirli bir kalınlıktan sonra örgü düzgünlüğünü koruyamamaktadır. Bu sebeple InAs→GaSb, GaSb→InAs katman geçişlerinde stres rahatlatma tabakaları oluşturulmaktadır. InSb-InSb benzeri [27, 30, 31, 32] ve GaAs-InSb benzeri (mixed) [33, 34] ara yüzler en yaygın kullanılan ara yüz formlardır (Şekil 1.17). InAs ve GaSb yarıileken kristal bileşikleri ortak atoma sahip olmadıklarından birbirleri üzerlerine büyütülmeleri halinde kontrolsüz ara yüzlerin oluşumu aşikârdır. Burada yapılan örgüdeki stresi yönetmek amacıyla kontrollü ara yüz oluşumu sağlamaktır. Bu çalışmada büyütülen InAs/GaSb süperörgülerde, InSb-InSb-benzeri ara yüz oluşumu

kullanılmıştır. Yapıdaki InAs katmanlardan kaynaklanan genişletici zor (tensile strain), daha büyük örgü sabitine sahip bir malzeme olan InSb kullanılarak sıkıştırıcı zor (compressive strain) yaratarak kompanse edilmektedir [35].



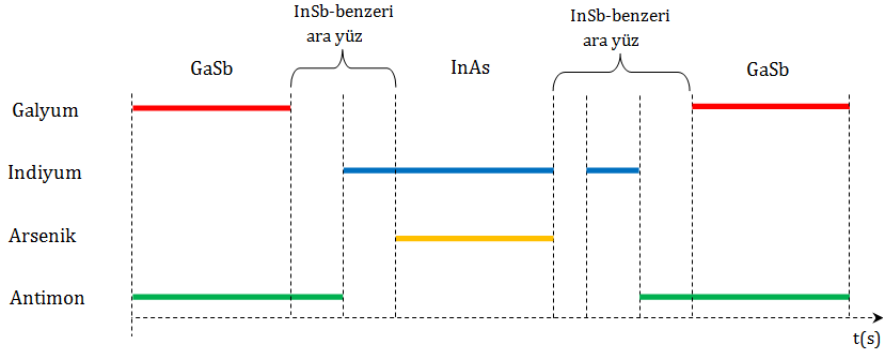
**Şekil 1.17.** InAs/GaSb SL yapılarında kullanılan ara yüz formları

GaSb→InAs geçişlerinde, InSb-benzeri ara yüz formunun anahtar rolü oynadığı ve GaSb üzerine yüksek kalitede InAs katman büyütülmesinde oldukça etkin olduğu A. Tahraoui ve ark. tarafından özellikle vurgulanmaktadır [36]. Yine aynı çalışmada, InAs üzerine GaSb büyütülürken büyüme sıcaklığının ara yüze kıyasla daha etkin bir parametre olduğu belirtilmektedir. InSb-InSb benzeri ara yüz yapısının kristal kalitesi üzerindeki, InSb-GaAs benzeri ara yüz yapısının ise sinyal kalitesi üzerindeki olumlu etkileri literatürde vurgulanmaktadır. Şekil 1.18'deki grafikte ise InSb-benzeri ara yüz kalınlığının örgü uyumsuzluğu üzerindeki etkisi görülmektedir [22]. Çalışmada, sabit InAs kalınlığı (10 ML) için GaSb ve InSb ara yüz kalınlıklarındaki değişimin örgü uyumsuzluğu üzerindeki etkisi yapılan hesaplamalar ile ortaya konulmaktadır.



**Şekil 1.18.** Süperörgü ile GaSb tampon katman arasındaki ortalama örgü uyumsuzluğunun değişen GaSb katman ve InSb ara yüz kalınlığına bağlı değişimi (InAs katman kalınlığı sabit tutulmuştur (10 ML).) [22]

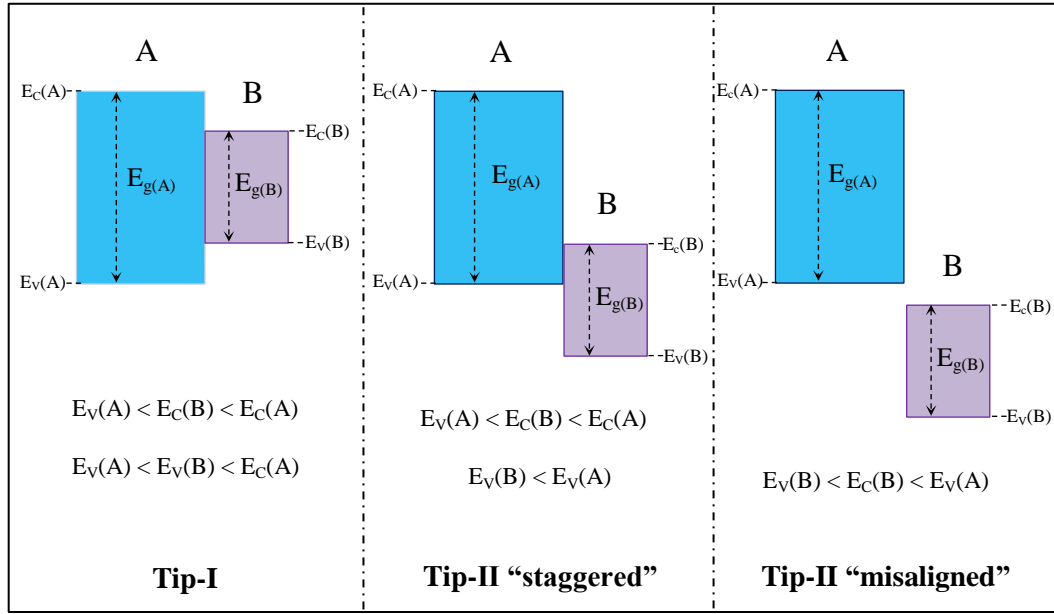
Söz konusu ara yüz oluşumları, oluşturulmak istenilen ara yüze uygun malzemelerin aynı anda doğrudan yüzeye verilmesiyle ya da yüzeydeki malzemenin özelliklerinin dikkate alındığı dolaylı ara yüz oluşum reçeteleri kullanarak oluşturulabilmektedir. Örneğin, GaSb yüzey büyütme sıcaklıklarında belirli bir süre ortama akı verilmeden bekletilerek yüzeydeki Sb atomlarının termal olarak kopması ve yüzeyin galyumca zengin hâle gelmesi sağlanmaktadır. Bu durumda yüzeye belirli süre arsenik verilmesi suretiyle yüzeyde GaAs benzeri oluşum sağlanmış olmaktadır. Yine benzer şekilde InAs büyütüldükten sonra arsenik kapatılıp yüzeye belirli süre indiyum verilirse indiyum atomları InAs yüzeye tutunmakta ve yüzey indiyumca zengin hâle gelmektedir. İndiyumca zengin yüzeye belirli süre antimon verilmesi halinde yüzeyde dolaylı InSb-benzeri bir yapı oluşumu sağlanabilmektedir. GaSb yüzey üzerinde InSb oluşumu ise tam tersi bir reçeteyle, önce yüzeye belirli miktarda antimon verilip sonra üzerine indiyum verilerek sağlanmaktadır. Bu çalışmada, InSb-InSb-benzeri ara yüz oluşturulurken kullanılan kepenk organizasyonu Şekil 1.19’da verilmiştir.



**Şekil 1.19.** Süperörgü katmanlar büyütülürken kullanılan kepenk organizasyonu

InAs ve GaSb kristalleri her ne kadar örgü sabitleri bakımından uyumlu olsalar da ideal büyüme koşulları farklılık göstermektedir. Bu sebeple, her iki kristal formunun da kararlı ve kusursuz büyülebileceği optimum koşulları yaratmak oldukça önemlidir. Epitaksiyel büyütme sırasında alttaş sıcaklığı, V/III akı oranları ve büyüme hızı kontrol edilen temel parametrelerdir. Malzemelerin kusursuz ve kararlı bir biçimde büyüebilmeleri için büyütülecek olan her bir malzeme için bu değişkenlerin değerleri kritiktir. Bu çalışmada kullanılan büyütme parametrelerine ilişkin bilgiler ileriki bölümlerde verilmiştir.

Yarıiletken heteroeklemler sahip oldukları bant yapıları uyarınca tip-I, tip-II “staggered” ve tip-II “misaligned” olmak üzere üç grupta sınıflandırılmaktadır. (Şekil 1.20). Tip-I bant hizalamasına sahip yapılarda, bir malzemenin iletim ve değerlik bantları, diğer malzemenin iletim ve değerlik bantlarının arasında yer almaktadır. Bu durumda, elektron ve boşluklar aynı tabaka içerisinde lokalize olmaktadır. Tip-II “staggered” ve tip-II “misaligned” hizalamalarında ise tip-I yapısının tersine, bir malzemenin iletim ve değerlik bandı sırasıyla diğer malzemenin iletim ve değerlik bandının aşağısında yer almaktadır. Bu durumda, elektron ve boşluklar farklı tabakalar içerisinde sınırlanmaktadır. Eğer bir malzemenin hem iletim hemde değerlik bandı, diğer malzemenin değerlik bandının aşağısında ise bu hizalama biçimi tip-II “misaligned” adını almaktadır.



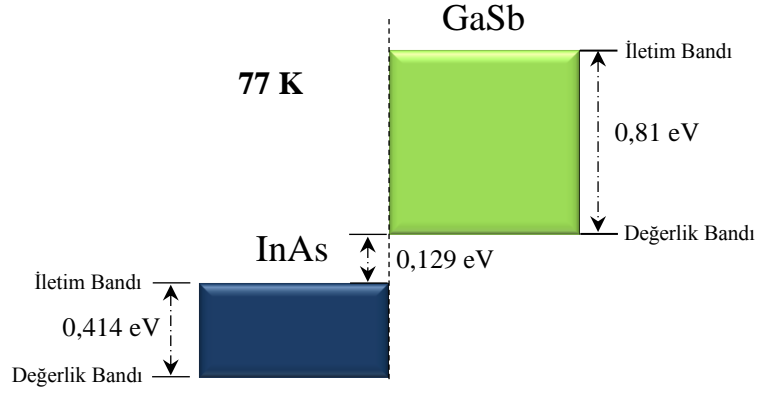
Şekil 1.20. Üç muhtemel bant hizlamasının şematik gösterimleri [21, 38]

InAs/GaSb SL yapılar, kırık-bant (broken-gap) Tip-II (Tip-II "misaligned" ya da Tip-III ifadeleri de kullanılmaktadır) bant hizlamasına uyarlar. Bu bant profilinin sağladığı başlıca avantaj, değerlik bantları arasındaki bazı ışımaz (non-radiative) yolları ortadan kaldırarak Auger rekombinasyon oranını azaltma imkanını sağlamasıdır. Auger mekanizmasındaki azalma, taşıyıcı ömrünü arttırarak ve karanlık akımı azaltarak yüksek sıcaklıklarda cihaz performansında artış sağlamaktadır [37].

InAs ve GaSb hetero-eklemleri, InAs'ın iletim bandının GaSb'nin değerlik bandından 0,129 eV daha aşağıda olduğu Tip-II bant hizlamasına sahiptir (Şekil 1.21). Xiao-Li Lang ve ark.'ın yaptığı çalışmada ETBM (Empirical tightbinding method) ile yapılan hesaplamalar üzerinden InAs/GaSb SL yapıların bant aralığı 0 ile 0,6 eV arasında ayarlanabildiği belirtilmektedir [35]. Bu durum, dedektörün kesim dalgaboyununun 3-30  $\mu\text{m}$  gibi geniş bir aralıkta kontrol edilmesini olanaklı kılmaktadır. Bu yapıların söz konusu esnekliği çok renkli kızılötesi dedektör uygulamalarına da olanak sağlamaktadır.

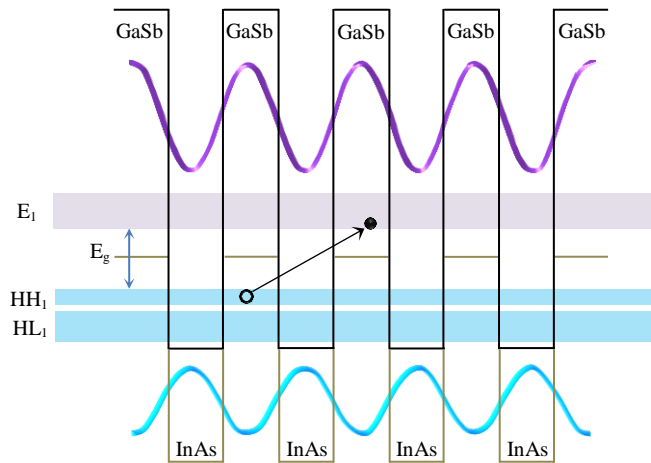
Tip-II bant hizlaması gereği, elektron ve boşluk dalga fonksiyonları, sırasıyla InAs ve GaSb içinde lokalize olmaktadır. Süperörgü yapıların bant aralığı, Brillouin bölgesindeki elektron minibandı ve birinci ağır-boşluk

seviyesi arasındaki enerji farkından hesaplanmaktadır. InAs/GaSb Tip-II SL yapının bant kenarı diyagramının şematik çizimi Şekil 1.22’de görülmektedir.



Şekil 1.21. InAs ve GaSb’den oluşan hetero-eklemin bant diyagramı [7]

InAs/GaSb Tip-II süperörgü heteroyapıda geçişler en yüksek değerlik minibandı ile en düşük iletim minibandı arasında gerçekleşir. Yapının gerçek bir bant aralığı yoktur. En yüksek değerlik minibandı ile en düşük iletim minibandı arasındaki mesafe yapının bant aralığı olarak tanımlanmaktadır. Tanımlanan bant aralığı, yapıyı oluşturan malzemelerin bant aralıklarından daha küçük olabilmektedir. Bant aralığı ve bant süreksizliği (band discontinuities) süperörgüyü oluşturan malzemelerin kalınlıkları tarafından belirlenmektedir [21].



Şekil 1.22. InAs/GaSb Tip-II SL fotodetektör yapısına ait bant yapısının şematik çizimi [39]

InAs/GaSb süperörgülerde optik soğurma, elektron ve boşluk dalga fonksiyonlarının üst üste gelmesi (binmesi) ile ilişkili bir durumdur. İnce katman kalınlığı, dalga fonksiyonlarının daha geniş bir biçimde çakışması ve dolayısı ile daha büyük soğurma katsayısı demektir. Dalga fonksiyonları arasındaki çakışma (üst üste binme) hetero-ara yüzlere yakın bölgelerde gözlenir ve bu yüzden optik soğurma ara yüz civarına kısıtlanmıştır. InAs/GaSb SL yapıların sözü edilen karakteristik özelliklerinden hareketle InAs ve GaSb kalınlıkları değiştirilerek ve katmanlar arasındaki ara yüzün atomik düzeyde kontrolü ile dedektörün kesim dalgaboyu geniş bir aralıkta (3-30  $\mu\text{m}$ ) kontrol edilebilmektedir [7].

InAs/GaSb SL dedektörlerin bazı avantajlı yanları aşağıda maddeler halinde verilmiştir;

- ◆ Süperörgülerde elektron etkin kütlelerinin büyük olması sebebiyle tünelleme akımları azalmaktadır. Süperörgü yapıdaki zor (strain) sebebiyle ağır-boşluk ve hafif-boşluk değerlik alt-bantları arasındaki geniş yarıma, Auger yeniden birleşmesinin baskılanmasına katkıda bulunmaktadır [7].
- ◆ Minibantlar arası geçişler (interminiband transitions) nedeniyle yüzeye dik gelen ışığı soğurma yeteneğine sahiptirler.
- ◆ Ayarlanabilir bant aralığı nedeniyle kesim dalgaboyunda ayarlanabilirlik söz konusudur.
- ◆ III-V malzeme sistemlerinin büyütme teknolojisindeki gelişmişliğe bağlı olarak yüksek oranda tekdüze (uniformity) bir yapıya sahiptirler. Bu özellikleri, bu malzeme grubunu geniş alan FPA yapımında çekici kılmaktadır.
- ◆ Soğutma sistemlerine ihtiyaç duymadan çalışma yetenekleri de InAs/GaSb süperörgü malzeme sistemini ön plana çıkarmakta, diğer birçok malzeme sistemlerine göre avantajlı kılmaktadır.

Çalışmada kullanılan III-V bileşikleri için bazı önemli fiziksel parametreler 300 K sıcaklığı için Çizelge 1.5'te listelenmiştir.

**Çizelge 1.5.** Çalışmada kullanılan III-V bileşikleri için bazı önemli fiziksel parametreler (300 K)  
[40]

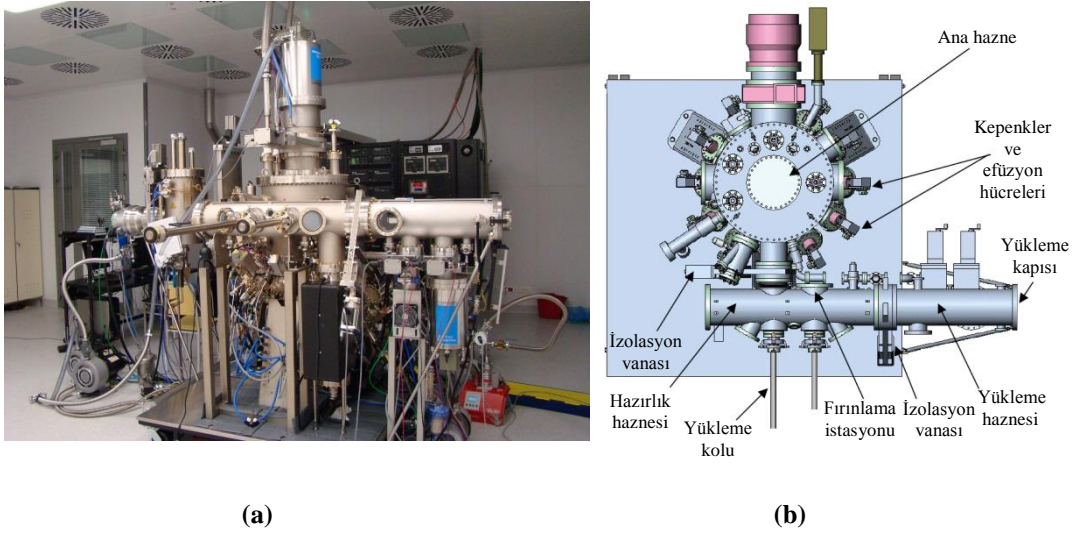
<b>Parametre</b>	<b>GaAs</b>	<b>GaSb</b>	<b>InAs</b>	<b>InSb</b>	<b>AlSb</b>
Örgü Parametresi (Å)	5,65321	6,09593	6,05840	6,47937	6,13350
Bant Aralığı Enerjisi (300K) (eV)	1,424	0,730	0,360	0,170	1,580
Kırılma indisi	3,655	3,820	3,520	4,000	3,400
Etkin Kütle: ( $m_e/m_0$ )	0,0650	0,0440	0,0220	0,0145	0,3900
Etkin Kütle: ( $m_{hh}/m_0$ )	0,45	0,33	0,41	0,44	0,50
Etkin Kütle: ( $m_{lh}/m_0$ )	0,082	0,056	0,025	0,016	0,110
Dielektrik Sabiti ( $\epsilon / \epsilon_0$ )	13,1	15,7	14,6	17,7	14,4
Elektron afinitesi $\chi$ (eV)	4,50	4,03	4,45	4,69	3,64

## 2. DENEYSEL YÖNTEMLER

Bu bölümde, çalışmanın üretim ve karakterizasyon süreçlerinde kullanılan cihazlar ve yararlanılan deneysel yöntemler anlatılmıştır.

### 2.1. MBE Sistemi ve Epitaksiyel Büyütme

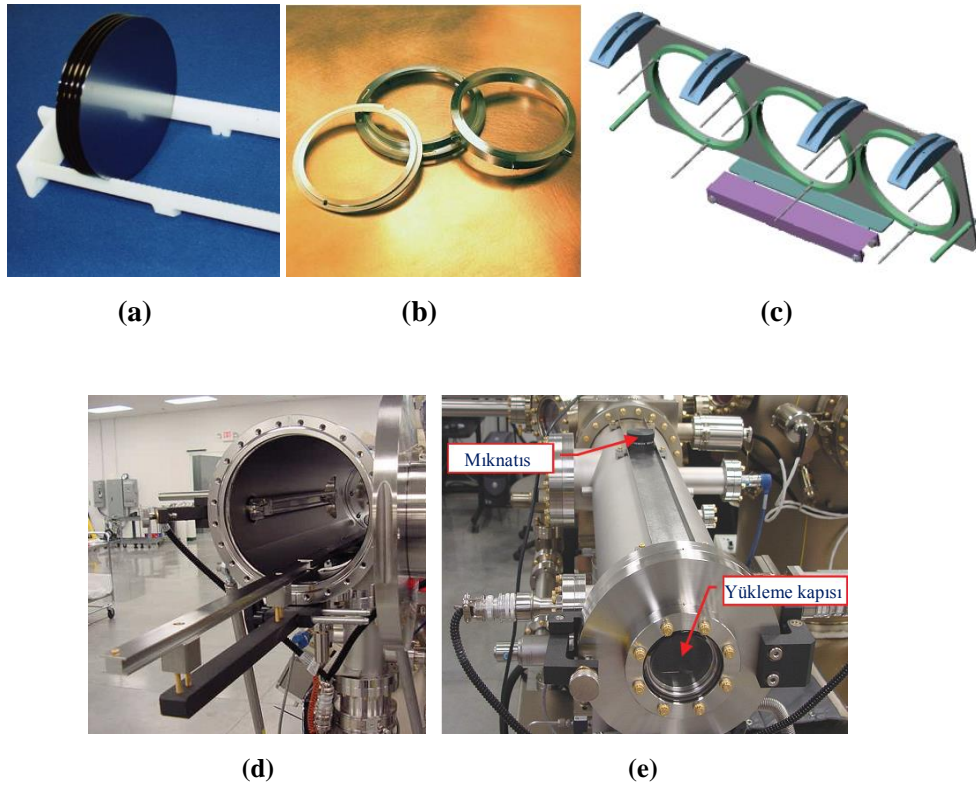
Bu çalışmada tasarlanan epikatman ve süperörgü örneklerin epitaksiyel büyütme işlemleri, Veeco Gen20MC marka ve modeldeki MBE sistemi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.1). Sistem, yükleme haznesi, hazırlık (buffer) haznesi ve ana hazne (büyütme haznesi) olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır. Her bir hazne birbirinden vakum sızdırmaz vanalarla ayrılmış olup birbirinden bağımsız olarak vakumlanmaktadır. Sistemde, büyüme işleminin gerçekleştiği ana haznenin vakum seviyesi,  $\sim 3 \times 10^{-10}$  Torr, büyütülen örneklerin tutulduğu ve üzerine büyütme yapılacak alttaşların büyütme haznesine hazırlanacağı hazırlık haznesinin vakum seviyesi,  $\sim 4 \times 10^{-10}$  Torr, örneklerin yüklendiği ve çıkarıldığı yükleme haznesinin vakum seviyesi ise  $\sim 3 \times 10^{-8}$  Torr mertebesindedir.



Şekil 2.1. (a) MBE sistemi (Anadolu Üniversitesi, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı), (b) MBE cihazının şematik görünümü

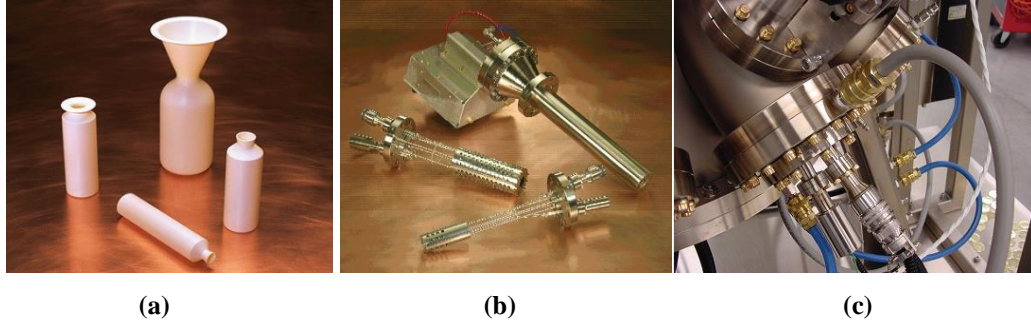
### MBE Sisteminde Epitaksiyel Büyütme Basamakları:

❖ *Altaşların yükleme haznesine yüklenmesi ve kusturma (bake) işlemi:* Büyütme işlemleri için hazır halde bulunan (epi-ready) altaşlar (Şekil 2.2a), molibdenden imal edilmiş örnek tutuculara (Şekil 2.2b) yerleştirilmektedir. Üzerinde örnek bulunan tutucular ise çelik bir ray üzerinde hareket etme kabiliyetine sahip, dışarıdan mıknatıs yardımıyla kontrol edilebilen bir araba (Şekil 2.2c) üzerine yerleştirilmektedir. Bütün bu işlemler sonunda örnekler araba ile yükleme haznesi içerisine alınmakta, atmosfere açılan kapak kapatılarak hazne vakumlanmaktadır. Daha sonra, vakumlanan yükleme haznesi 150 °C'ye kadar ısıtılıp 1 saat kadar bu sıcaklıkta beklenmektedir. Bu işlemin amacı, yüklenen altaşlar üzerindeki ve atmosfere açılan hazne içerisindeki su buharından ve diğer olası kirlilikten kurtulmaktır. Giriş haznesindeki bu işlem, uygun vakum değerlerinin yakalanabilmesi için yaklaşık 1 gün kadar sürmektedir.



**Şekil 2.2.** (a) Epi-ready altaşlar, (b) Örnek tutucular, (c) Örnek arabası, (d) Yükleme haznesinin iç görünümü ve (e) Yükleme haznesinin yükleme sonrası görünümü

❖ *Alttaşların hazırlık haznesine alınması ve kusturma işlemleri:* Yükleme haznesindeki kusturma işlemi tamamlandıktan ve vakum seviyesi iyileştikten ( $\sim 3 \times 10^{-8}$  Torr) sonra yükleme haznesi ile hazırlık haznesi arasındaki vakum sızdırmaz vana açılarak örneklerin yüklü olduğu araba mıknatıslar yardımıyla hazırlık haznesine geçirilmektedir. Daha sonra her bir örnek teker teker hazırlık haznesi içerisinde bulunan bir ısıtma istasyonunda,  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de kusturulmaktadır. Bu işlem vakum seviyesi korunarak yapıldığından uzun bir süreçtir ve her bir örnek için ısınma ve soğuma süreci ile birlikte 10 saat kadar sürmektedir. Ancak örnekler  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 10-30 dk kalmaktadır.

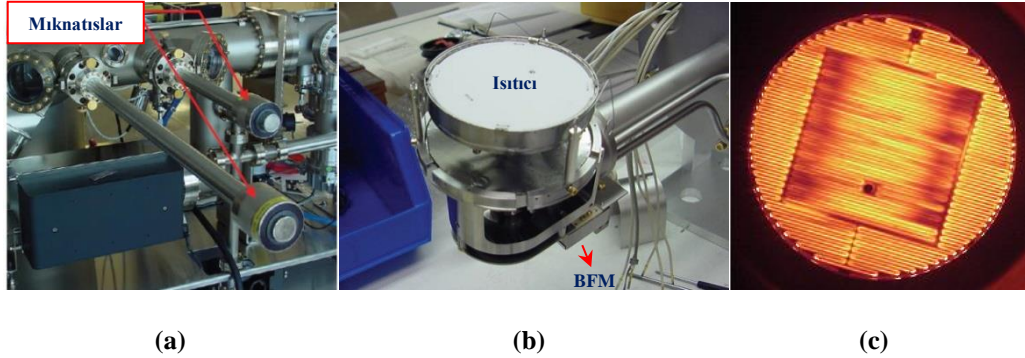


**Şekil 2.3.** (a) PBN potalar (crucibles), (b) Efüzyon hücreleri, (c) Sistem üzerine monte edildikten sonra efüzyon hücresinin dışarıdan görünümü

❖ *Efüzyon hücrelerinin ısıtılması ve akı ölçümü:* Sistem bekleme halindeyken efüzyon hücre sıcaklıkları, her malzeme için ayrı ayrı tanımlanmış, bekleme sıcaklıklarında tutulmaktadır. Büyütme yapılmadan önce büyütmede kullanılacak hücreler belirli sıcaklıklara ısıtılmakta ve bu sıcaklıklarda efüzyon hücrelerinden çıkan akı miktarları özel bir iyon ölçer (Beam Flux Monitor, BFM) yardımıyla ölçülerek kullanılacak malzeme için eşdeğer basınç değerleri (Beam Equivalent Pressure, BEP) belirlenmektedir. Belirlenen bu değerler, büyük ölçüde sistem bağımlı olmaktadır. İyon ölçerin sistemde konumlandırıldığı yer, elektrot voltajı, flaman ve elektrotların kaplanması gibi durumlar sebebiyle ölçülen değerler farklılık gösterebilmektedir [41]. Ancak akı değerleri, aynı sistemle üretilen örneklerin birbiri ile kıyaslanması açısından oldukça faydalı bir büyütme parametresidir. Büyütülecek olan malzemenin büyüme hızı, ölçülen akı miktarının büyüklüğü ile orantılı olup

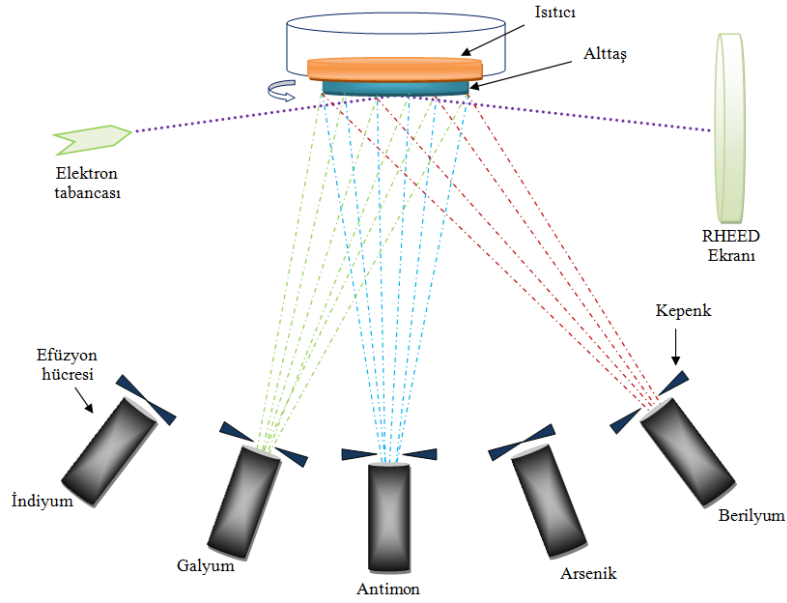
efüzyon hücresinin sıcaklığı artırılarak ya da azaltılarak büyüme hızı kontrol edilebilmektedir. MBE sisteminde, yüksek saflıktaki malzemelerin katı olarak içerisine yüklendiği seramik PBN (Pyrolytic Boron Nitride) potalar ve efüzyon hücreleri Şekil 2.3'te görülmektedir.

- ❖ *Kusturulan alttaşın büyüme için ana hazneye yüklenmesi:* Hazırlık haznesinde kusturulmuş alttaş, hazırlık haznesi ile ana hazne arasındaki vakum sızdırmaz vana açılarak transfer kolu (Şekil 2.4a) yardımıyla ana hazne içerisinde yer alan robotik kol (Şekil 2.4b) üzerine yüklenmektedir. Bu ekipman, üzerine yüklenen örneği, 0-120 rpm aralığında istenilen hızda döndürme ve üzerinde bulunan ısıtıcı (Şekil 2.4c) yardımıyla istenilen sıcaklığa (25-1000 °C) ısıtma yeteneğine sahiptir. Ayrıca, BFM bu düzeneğin arka tarafına monte edilmiş durumdadır. Akı ölçümleri yapılırken BFM, aşağıya bakar pozisyonda, büyüme yapılırken ise yukarı bakar pozisyonda konumlandırılmaktadır.



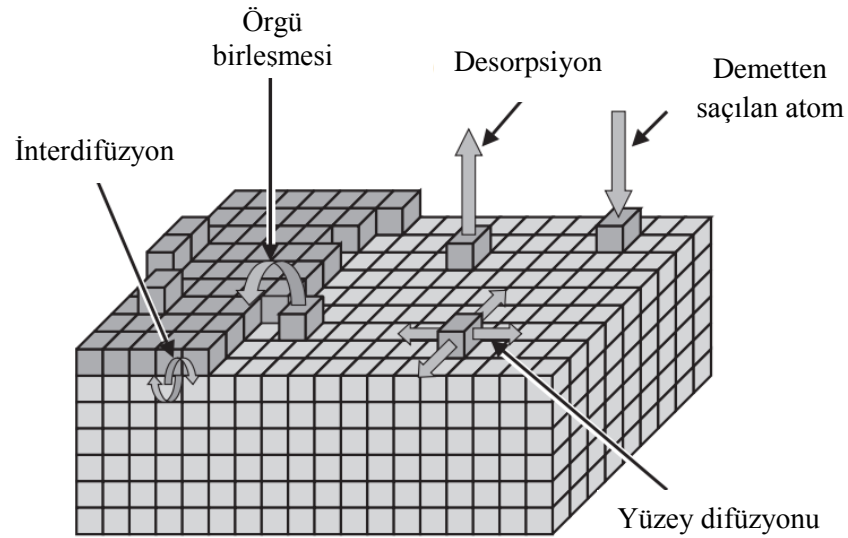
Şekil 2.4. (a) Yükleme kolları, (b) Robotik kol ve (c) Robotik kol üzerindeki ısıtıcı

- ❖ *Epitaksiyel büyüme:* Yükleme sonrasında ana hazne ile hazırlık haznesi arasındaki vana kapatılarak, örnek yükleme pozisyonundan büyüme pozisyonuna alınmaktadır. Büyütme esnasında örnek aşağı yönde, efüzyon hücrelerine  $\sim 45^\circ$ 'lik açıyla, bakar pozisyonundadır (Şekil 2.5). Daha sonra, alttaş robotik kol üzerinde bulunan ısıtıcı yardımı ile uygun sıcaklıklara ısıtılarak oksit kaldırma ve büyüme işlemleri gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.5. Epitaksiyel büyütme işleminin şematik olarak gösterimi

Bir kristalin epitaksiyel olarak yüksek kalitede büyütülmesi işleminde en önemli iki parametre, büyüme sıcaklığı ve büyüme anında ortama verilen akı miktarıdır. Çünkü, söz konusu parametreler, III ve V grubu malzemelerin adsorpsiyon (adsorption), desorpsiyon (desorption) ve yüzey difüzyonu oranlarını doğrudan etkilemektedir (Şekil 2.6) [41].



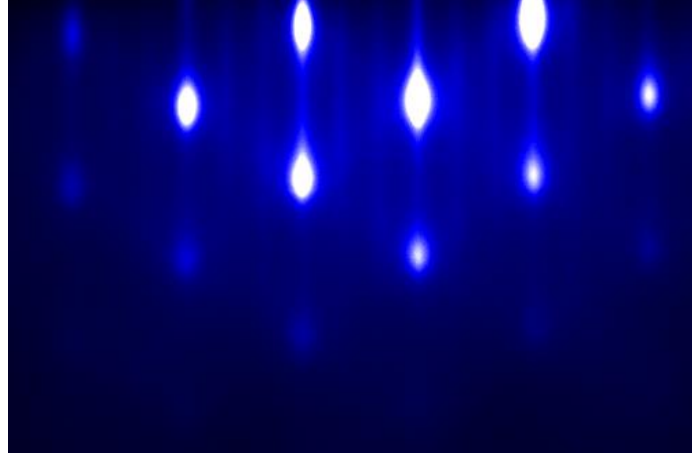
Şekil 2.6. MBE’de epitaksiyel büyüme esnasında yüzeyde gerçekleşen süreçlerin şematik çizimi [40]

Büyütmeye başlanmadan önce uygulanması gereken son işlem, alttaş yüzeyinde atmosfer ile temas neticesinde oluşan veya yüzeyi korumak amacıyla bilinçli olarak oluşturulan oksit tabakasını yüksek sıcaklıklarda termal yolla kaldırmaktır. Bu işlem oldukça titizlik gerektiren bir süreçtir. Çünkü, oksidin kaldırıldığı sıcaklıklar kristal yapının bozulabileceği sıcaklıklardır ( $T_{\text{oksit}}(\text{GaAs}) \approx 605 \pm 5$  °C,  $T_{\text{oksit}}(\text{GaSb}) \approx 550 \pm 5$  °C). Bu sebeple, alttaş ısıtılırken belirli bir sıcaklık değerinin üzerinde yapıdan kopan atomların yerini doldurmak ve buharlaşma miktarını azaltmak amacı ile ortama alttaş malzemesine uygun (GaAs alttaş için arsenik, GaSb alttaş için antimon) V-grubu akısı verilmektedir.

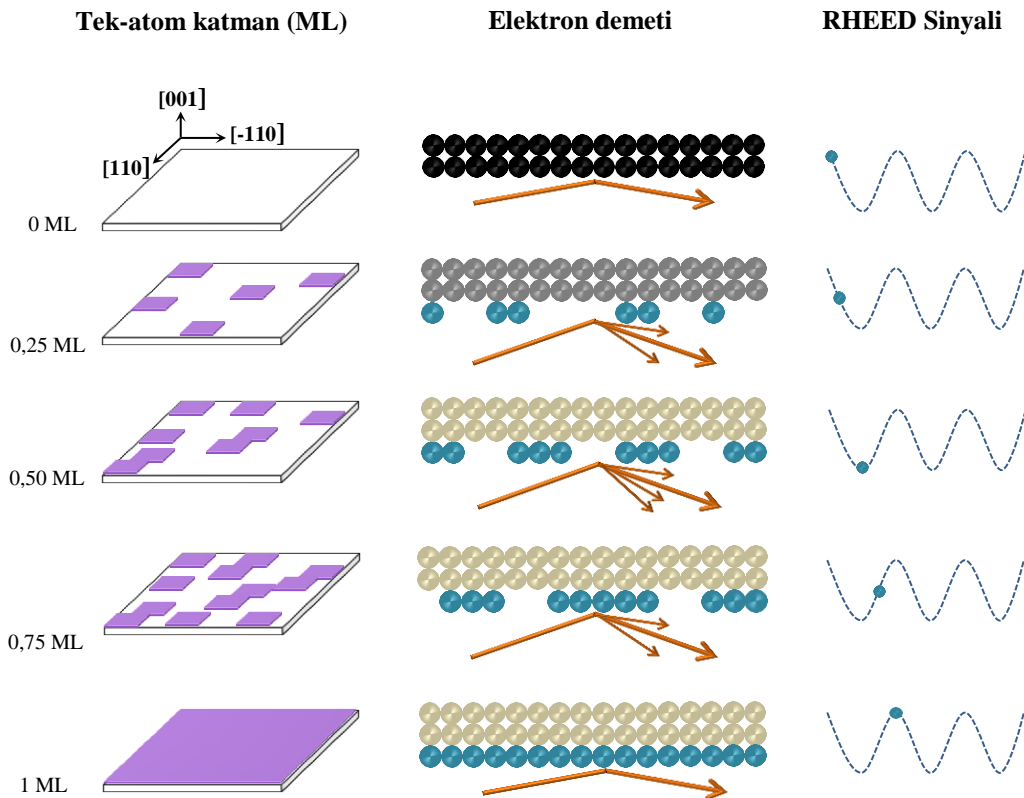
Yüzeydeki oksit kaldırıldıktan sonra, alttaş üzerine, oksit kaldırma işleminde yüzeyde oluşan termal deformasyonu düzeltmek amacıyla, belirli kalınlıkta (200-300 nm) alttaş malzemesi büyütülmektedir. Daha sonra, alttaş, büyütülmesi hedeflenen kristal yapı için uygun sıcaklık değerine soğutulmaktadır. Bu sıcaklıklar, GaAs için 580-590 °C, GaSb için 480-515 °C, InAs için 390-420 °C aralığındaki sıcaklıklardır (Bu değerler, bu çalışmada kullanılan MBE sistemi ile büyütülen örnekler üzerinde yapılan karakterizasyon sonuçları ışığında yazılmıştır.). InAs/GaSb SL yapılar ise yaygın olarak 380-410 °C sıcaklık aralığında büyütülmektedir. Uygun sıcaklık değerine gelindiğinde, büyütülmesi istenilen malzemeleri içeren efüzyon hücreleri önündeki kepenkler açılarak alttaş yüzeyine eşzamanlı olarak, belirlenen akılarda malzeme verilerek büyüme işlemi başlatılmaktadır. Büyüme işlemi gerçekleşirken alttaşın kendi etrafında dönmesi, yüzeyin homojenliği açısından oldukça önemli bir durumdur. Kepenklerin açılması işlemi, elle veya bilgisayar kontrollü bir reçete yardımı ile yapılabilmektedir. Oldukça ince katmanlı ve çok tekrarlı yapılarda ise bilgisayar kontrollü reçetelerin kullanılması kaçınılmaz olmaktadır.

Büyüme esnasında büyüme kararlılığı, yansımali yüksek enerjili elektron kırınımı (Reflection High-Energy Electron Diffraction, RHEED) tekniği yardımıyla kontrol edilmektedir. Bu teknikte, bir elektron tabancasından çıkan elektron demeti oldukça küçük açılarla (1-3°) yüzeyden kırınımına uğramakta ve fosfor bir ekran üzerinde yüzeyde büyüyen malzemenin karakteristik deseni oluşmaktadır. Şekil 2.7'de RHEED desenine örnek görülmektedir. Büyüme esnasında kırınım desenini oluşturan çizgilerdeki keskinlik ve netlik, büyümenin

kararlılığı hakkında görel olarak bilgi vermektedir. Ayrıca RHEED osilasyonları (sinyali) (Şekil 2.8) yardımı ile büyüme hızını da dolaylı bir biçimde ölçmek mümkün olabilmektedir.



Şekil 2.7. RHEED deseni örneği

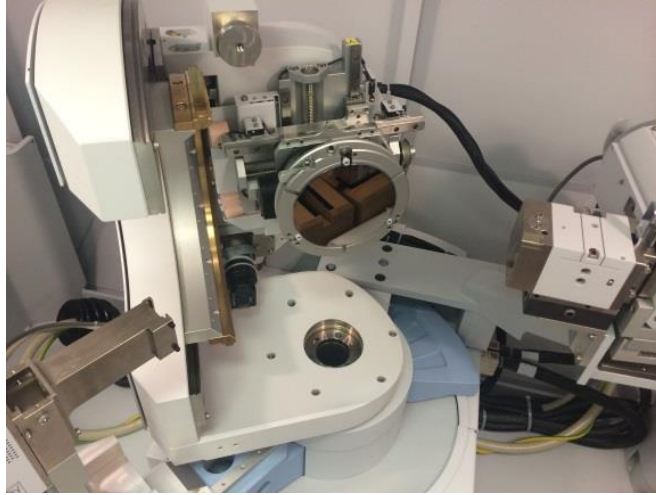


Şekil 2.8. RHEED elastik saçılım modeli ve 2-boyutlu epitaksiyel büyütmede oluşan şiddet osilasyonları (E. A. Plis tez referans alınarak yeniden çizilmiştir [8].)

❖ *Büyütülen örneğin sistemden çıkarılması:* Büyütme işlemi bittikten sonra ana haznedeki vakumun iyileşmesi beklenmektedir. Vakum iyileştikten sonra hazırlık haznesi ile aradaki vakum sızdırmaz vana açılarak yükleme kolu yardımıyla örnek tekrar örnek arabası üzerine alınmaktadır. Büyütülen örneklerin teker teker dışarıya çıkarılması çok verimli olmadığından sisteme yüklenen diğer alttaşlar üzerine de büyütme yapıldıktan sonra hazırlık haznesi ile yükleme haznesi arasındaki vakum sızdırmaz vana açılarak örnek arabası yükleme haznesine alınmaktadır. Daha sonra hazırlık haznesi ile yükleme haznesi arasındaki vana kapatılıp yükleme haznesinin vakumu bozularak örnekler dışarıya çıkarılmaktadır.

## 2.2. Kristalografik Karakterizasyon Çalışmaları

Yüksek çözünürlüklü X-ışını kırınımı (HRXRD) analiz tekniği, ince filmlerin yapısal özelliklerinin belirlenmesinde yaygın kullanılan, analiz edilen numune üzerinde herhangi bir deformasyon yapmayan, zararsız bir tekniktir.



Şekil 2.9. Panalytical XPert Pro MRD X-ışınları difraktometresi

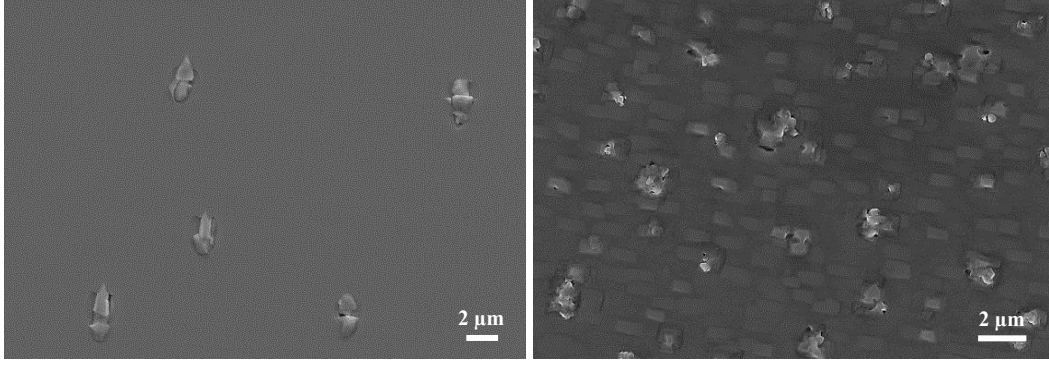
Çift-kristal X-ışını sallantı eğrisi (Double Crystal X-ray Rocking Curve, DCXRC) analizleri ile süperörgü yapılarında periyot kalınlığı (periyodisite), alttaş ile süperörgü arasındaki örgü uyumsuzluğu (lattice mismatch,  $\Delta a/a$ ), süperörgüyü oluşturan malzemelerin kristal kalitesi gibi özellikleri belirlenebilmekte,

epikatman örneklerde ise kristal kalitesinin ve kristal örgüdeki rahatlama miktarının belirlenmesinde oldukça kullanışlı ve güvenilir bilgiler edinilmektedir.

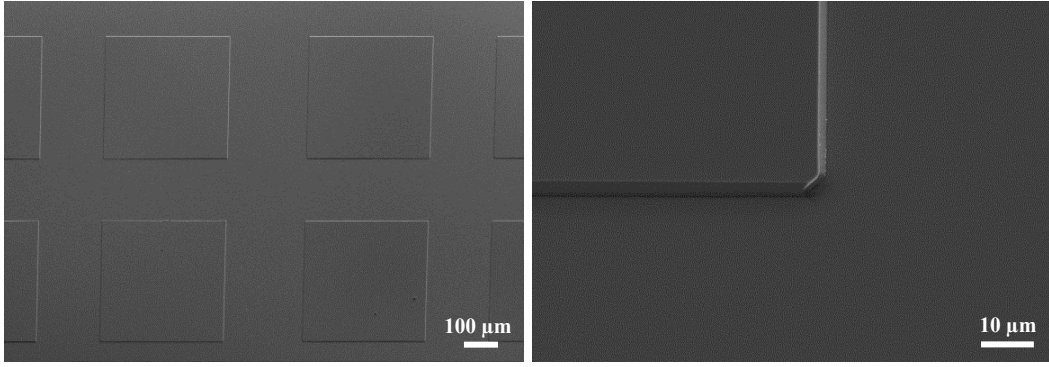
Bu çalışmada HRXRD ölçümleri, Panalytical XPert Pro MRD marka ve modeldeki yüksek çözünürlüklü X-ışını difraktometresi kullanılarak yapılmıştır (Şekil 2.9). Ölçümler Cu  $K\alpha_1$  radyasyonu ( $\lambda \approx 0,15406$  nm) kullanılarak GaSb alttaş için GaSb (0 0 4) ve GaAs alttaş için GaAs (0 0 4) simetri eksenleri etrafında, alttaş üzerinde homojenliği kontrol amacı ile alttaşın en az üç farklı bölgesinden alınmıştır. Ölçümlerde çift kristalli, dört yansımali 220 Ge monokromatör kullanılmış, örnek yüzeyinden  $0,0005^\circ$  hassasiyetle ölçümler alınmıştır.

### **2.3. Mikroskobik Karakterizasyon Çalışmaları**

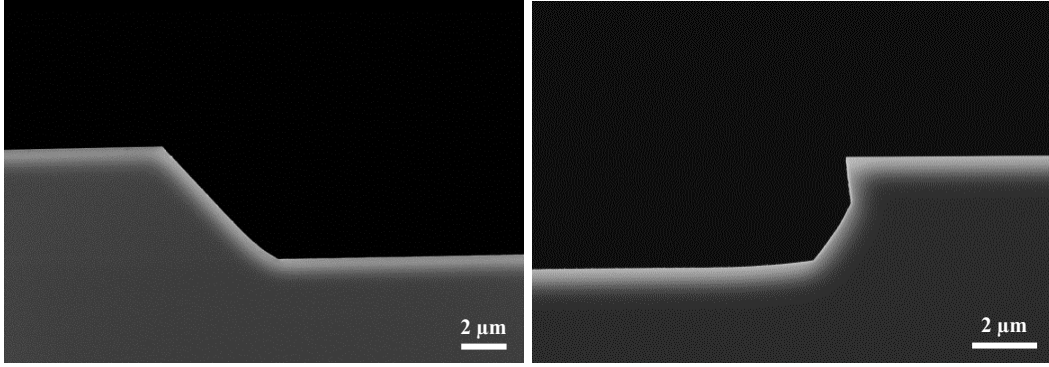
Büyütülen örneklerin yüzeyleri, taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM) ile, InAs/GaSb SL katmanları ise geçirimli elektron mikroskobu (Transmission Electron Microscope, TEM) ile incelenmiştir. İnce film yüzeylerinin SEM ile incelenmesi büyütülen filmin yüzey topografisinin belirlenmesi, yüzey morfolojisinin ortaya konulması açısından oldukça belirleyici bir yöntemdir. Film yüzeyinde örgü uyumsuzluğu veya diğer etkenlere bağlı bozulmalar ya da kusurlar bu teknik ile görsel olarak açık bir biçimde ortaya konulabilmektedir. Ayrıca aygıt üretim süreçlerinde de bu analiz yöntemi ile oldukça detaylı gözlem yapmak, aşınma profillerini gözlemek mümkün olabilmektedir. Geçirimli elektron mikroskobu ise incelenen süperörgü örneklerde katman kalınlıklarının hassas bir biçimde belirlenmesinde, süperörgüyü oluşturan InAs ve GaSb katmanların atomik ölçekte analizinde, katmanlar arası ara yüz oluşumlarının ve yapısal kusurların ortaya konulmasında oldukça etkili bir yöntemdir. Mikroskobik analizlerde ZEISS Ultraplus FESEM ve JEOL JEM-2100F HRTEM cihazları kullanılmıştır. Şekil 2.10 ve 11’de SEM ve TEM ile yapılan çalışmalara ilişkin bazı örnekler verilmiştir.



Yüzey kusurlarına örnekler

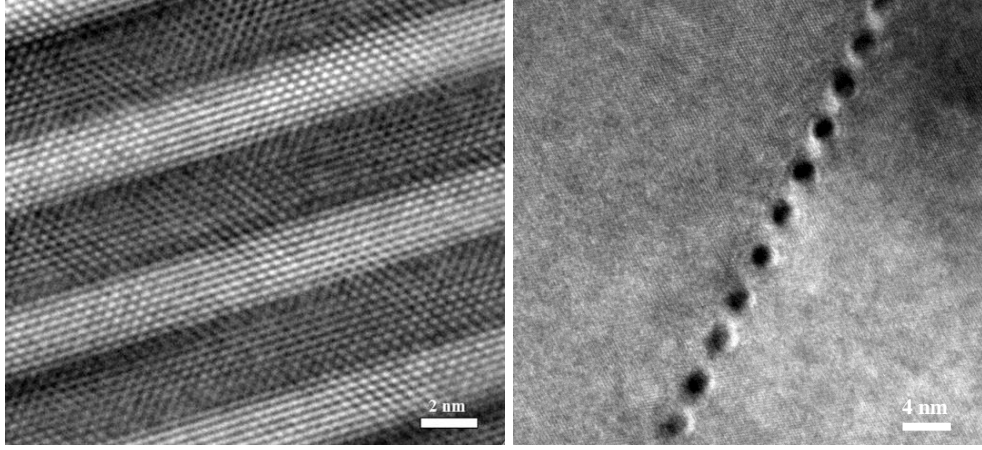


Aşındırma işlemleri sonrası mesa yapıların görüntüleri



Mesalardan alınan yanıl kesit görüntüleri

Şekil 2.10. Örnekler üzerinde yapılmış SEM çalışmalarına ilişkin örnekler



InAs/GaSb SL yapılarından ve GaAs→GaSb geçişinde kullanılan AlSb QD ara yüzden alınan HRTEM görüntüleri

Şekil 2.11. Örnekler üzerinde yapılmış TEM çalışmalarına ilişkin örnekler [42]

#### 2.4. InAs/GaSb Süperörgü Fotodedektör Yapıların Fabrikasyon Süreçleri

Çalışmanın bu kısmında, GaSb ve GaAs alttaşlar üzerine büyütülmüş InAs/GaSb SL dedektör yapılarının fabrikasyon yani büyütülen bir örneğin aygıt (tek piksel dedektör) haline getirilme süreçleri basamaklar halinde anlatılmıştır.

Tek-piksel InAs/GaSb SL dedektör yapılarının fabrikasyon işlemlerindeki temel basamaklar:

- **Temizleme** :  $6 \times 6 \text{ mm}^2$  ve  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  boyutlarında kesilen örneklerin yüzeyleri, olası organik ve inorganik kirliliklerden kurtulmak amacıyla Çizelge 2.1’de verilen reçete kullanılarak temizlenmiştir. Sırasıyla aseton, alkol ve de-iyonize su ile temizlenen örnekler, gaz azot ile kurutulmuş, kalması muhtemel nemi uzaklaştırmak amacı ile de belirli bir süre ısıtılmıştır (dehidrasyon).

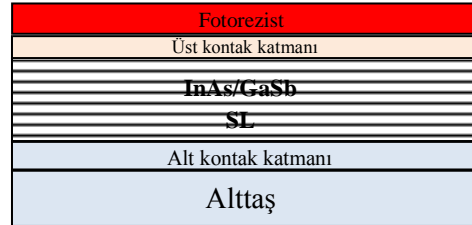
**Çizelge 2.1.** Fabrikasyon öncesi örnek temizleme reçetesi

İşlem	Süre
Aseton	5 dk
İzoproponal	5 dk
DI-Su	Akan su altında 3 dk
N <sub>2</sub> -Kurutma	1-2 dk
Dehidrasyon	5 dk (150 °C )

➤ Mesa Tanımlaması (Pozitif Litografi) : Mesa tanımlaması işleminde birinci basamak, temizlenen örneklerin yüzeylerinin döner (spin) kaplayıcı (Şekil 2.12a) yardımıyla fotorezist (AZ5214E-IR) ile kaplama işlemidir. Bu işlemde örnekler vakum yardımıyla döner kaplayıcı içerisine sabitlenmiş ve örnek üzerine enjektör ile 2-3 damla fotorezist madde damlatılarak kaplama işlemi 3000 rpm hızında, 40 s süre ile gerçekleştirilmiştir. İşlem sonunda örnekler 110 °C 'de 60 s ısıtılmıştır.



(a)

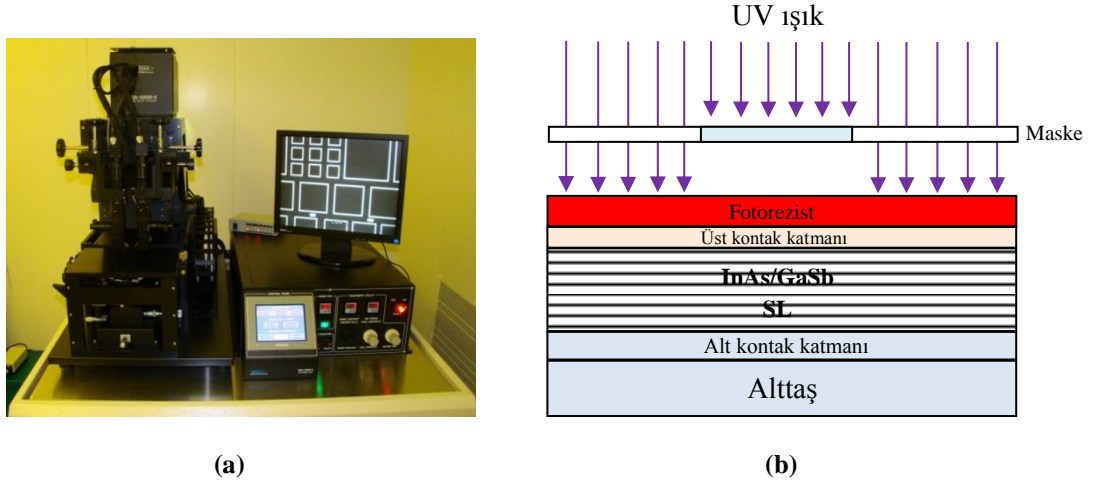


(b)

**Şekil 2.12.** (a) Döner kaplayıcı ve ısıtıcı, (b) Fotorezist kaplanan SL yapının şematik görünümü

İkinci işlem olarak, fotorezist kaplı örnekler üzerine maske hizalama cihazı kullanılarak mesa desenleri aktarılmıştır (Şekil 2.13). Bu işlem esnasında seçilen mesa deseni fotorezist kaplı örnek üzerine oturtulup maske arkasından UV ışık uygulanmaktadır. Bu sayede UV ışığa maruz kalan bölgedeki fotorezist maddenin polimer yapısında değişim sağlanmaktadır. Bu durumda UV ışığa maruz bölgelerin özel bir solüsyon ile (1:4 AZ400K/H<sub>2</sub>O)

yüzeiden kalkması mümkün olmaktadır. Bu işlem "tab etme" olarak adlandırılmaktadır. Daha sonra, tab edilen örnekler su ile temizlenerek gaz azot ile kurutulmaktadır. Örnekler 120 °C 'de 5 dk bekletildikten sonra aşındırma işlemleri için hazır hale gelmektedir.



Şekil 2.13. (a) Maske hizalayıcı, (b) Maskeleme işleminin şematik gösterimi

Aşındırma işlemleri, hazırlanan asit çözeltisi içerisinde örneklerin aynı anda batırılıp çıkarılması suretiyle yapılmaktadır. Bu işlem çalışılan örneklerde kontrollü bir biçimde 2 veya 3 basamakta gerçekleştirilmiştir. Her bir basamakta asit çözeltisi içerisinde çıkarılan örneklerin aşınma derinlikleri yüzey profilometresi (Şekil 2.14) yardımıyla tespit edilmiş ve aşınmanın istenilen derinlikte kalması sağlanmıştır. Çalışılan yapılarda zamana bağlı aşınma derinlikleri Çizelge 2.2'de görülmektedir. Kullanılan asit çözeltisi ve oranları ise aşağıda verilmiştir.

5 gr Sitrik Asit (CA) + 200 ml H<sub>2</sub>O + 10 ml Fosforik Asit (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) + 20 ml  
Hidrojen peroksit (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

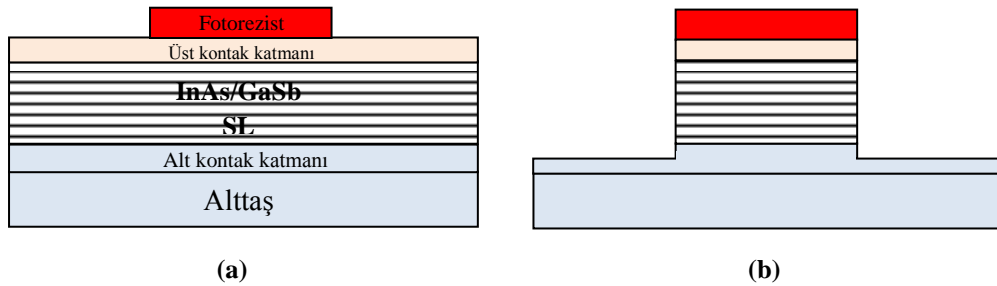


Şekil 2.14. Yüzey profilometre cihazının görüntüsü

Çizelge 2.2. GaSb alttaş üzerine büyütülmüş InAs/GaSb SL yapılarında zamana bağlı aşınma miktarları

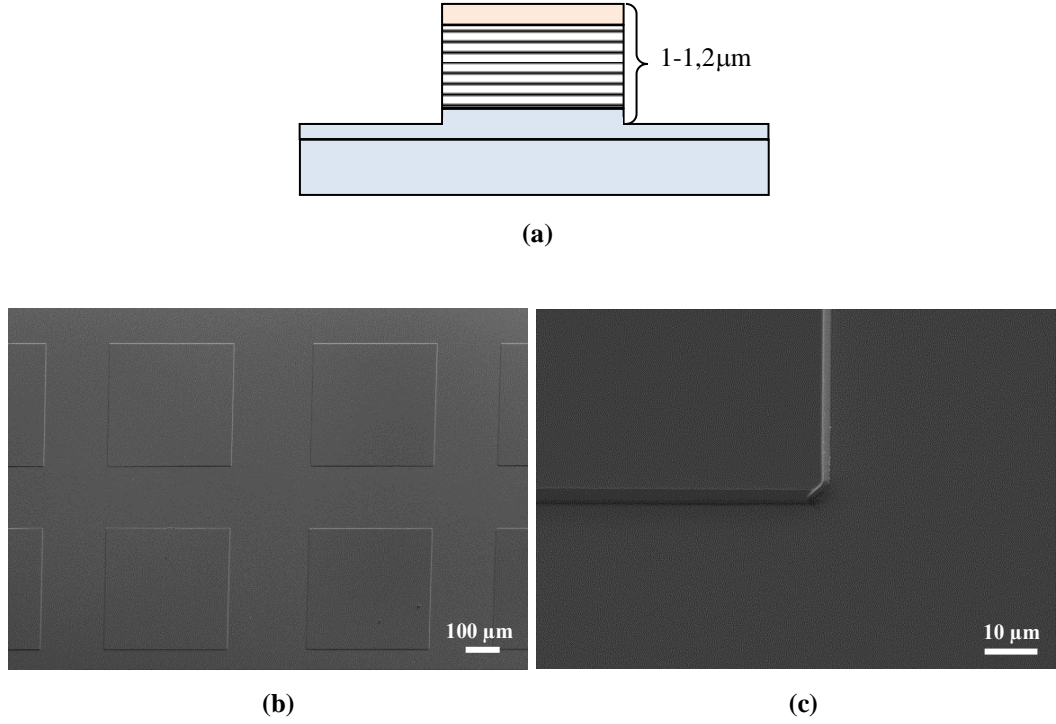
Örnek no	Fotorezist Kalınlığı (nm)	3. dk sonrası (nm)	$\Delta$ (nm)	6. dk sonrası (nm)	$\Delta$ (nm)	8,5. dk sonrası (nm)	$\Delta$ (nm)
M-1	1741	2320	579	2724	983	2959	1218
M-2	1787	2388	601	2753	966	2978	1191
M-3	1780	2343	563	2696	914	2940	1160
M-4	1754	2415	661	2668	914	2955	1195
M-5	1760	2395	635	2699	939	2977	1217

Örneklerin aşındırılma öncesi ve sonrası kesitlerinin şematik görünümü Şekil 2.15'deki gibidir. Fotorezist kaplı bölge aşınmadan kalırken diğer bölgeler alt kontak katmanının orta bölgesine kadar aşındırılmıştır.



Şekil 2.15. (a) Tab edilen örneğin şematik görünümü, (b) Aşındırılma sonrası mesanın görünümü

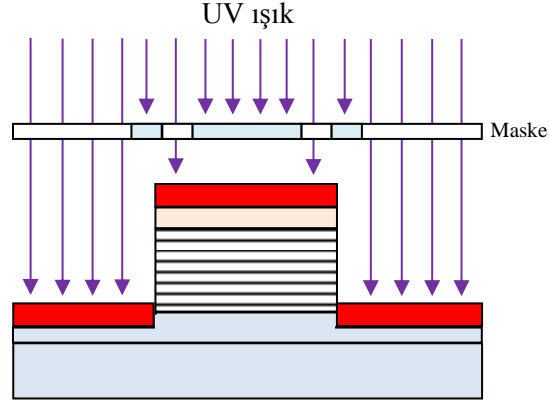
Aşındırılmış örneğin yüzeyindeki fotorezist katman aseton yardımıyla kaldırıldıktan sonraki görünümü şematik olarak Şekil 16a'daki gibidir. Şekil 2.16b ve c'deki SEM görüntülerinde ise aşındırma işlemi sonrasında yüzeydeki mesa oluşumları görülmektedir.



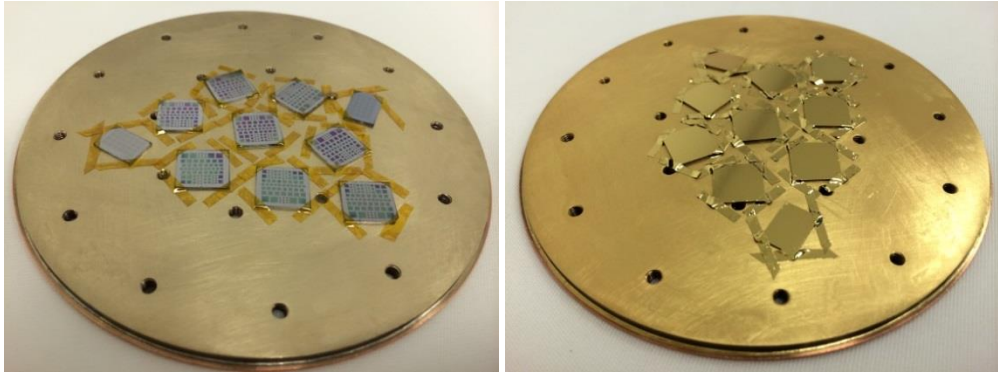
**Şekil 2.16.** (a) Aşındırılma sonrası mesanın şematik görünümü, (b ve c) Aşındırma sonrası mesaların SEM görüntüleri

➤ *Metal Kontak Bölgelerinin Oluşturulması (Metal Kaplama İşlemi)* : Aşındırılan örnekler üzerinde alt ve üst kontak desenlerini oluşturmak üzere örnekler tekrar fotorezist (AZ5214E-IR) ile kaplanarak kontak deseni, maske hizalayıcı yardımıyla, örnek üzerine aktarılmıştır (Şekil 2.17). Daha sonra, tab edilen örnekler metal kaplama cihazına konulmuş ve metal kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde, örneğin bütün yüzeyi 20 nm Ti + 200 nm Au ile kaplanmıştır. Kaplanan örnekler aseton içerisinde 10-60 dk (fabrikasyon bağımlı olarak değişebilmektedir) bekletildikten sonra örnek yüzeyinde fotorezist kaplı bölgelerin, üzerindeki metal ile birlikte yüzeyden ayrılması sağlanmaktadır. Böylece yüzeyde yalnızca alt ve üst kontak bölgeleri metal

kaplı olarak kalmaktadır (Şekil 2.18). Alt ve üst kontaktları oluşturulmuş örneklerin SEM görüntülerinden kontak kaplamalarının oldukça tekdüze ve sorunsuz olduğu gözlenmektedir (Şekil 2.19).

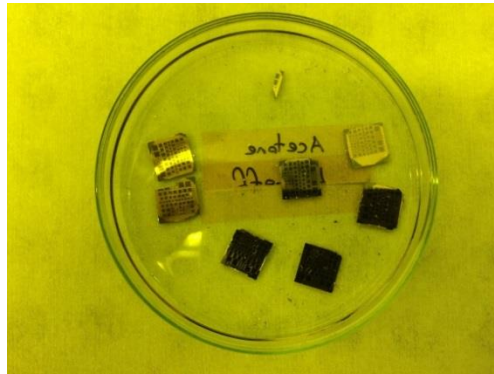


Şekil 2.17. Metal kaplama öncesindeki maskeleme işleminin şematik görünümü



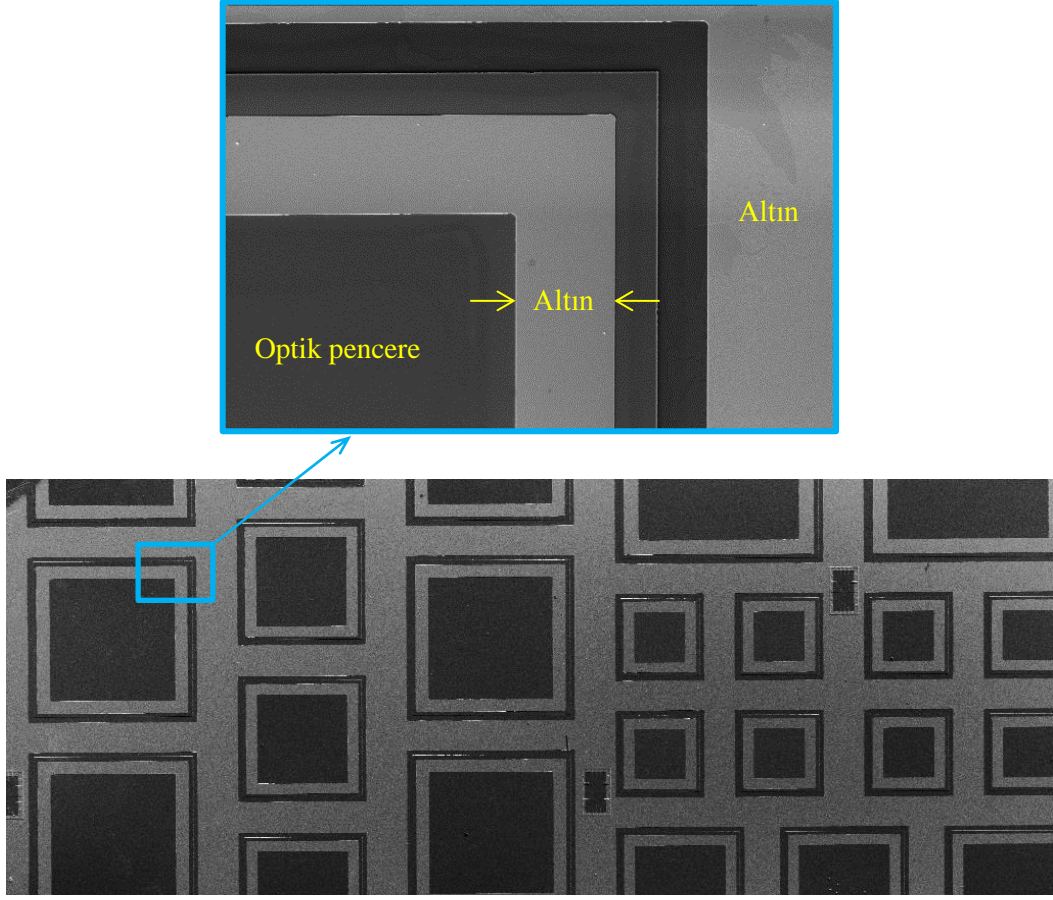
(a)

(b)



(c)

Şekil 2.18. (a) Metal kaplama işlemi öncesi, (b) Kaplama işlemi sonrası, (c) Aseton içerisinde bekletilen örneklerin görünümü



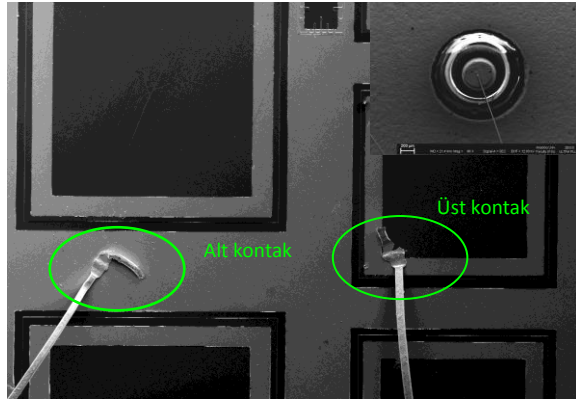
**Şekil 2.19.** Alt ve üst kontak bölgeleri metal kaplanmış örneğin SEM görüntüsü

Son olarak, metal kaplanan örnekler uygun boyutlarda kesilerek optik ölçümler yapılmak üzere altlıklara yerleştirilmiş, mesaların alt ve üst kontakları tel bağlayıcı yardımıyla alınmıştır (Şekil 2.20). Her bir örnekte  $400 \times 400 \mu\text{m}^2$  boyutlu en az ikişer mesadan kontak bağlantısı yapılmıştır. Böylece, örnekler optik ve elektriksel ölçümler için hazır hale gelmiştir. Üretilen SL tek-piksel fotodedektör yapının şematik çizimi ise Şekil 2.21’de görülmektedir.



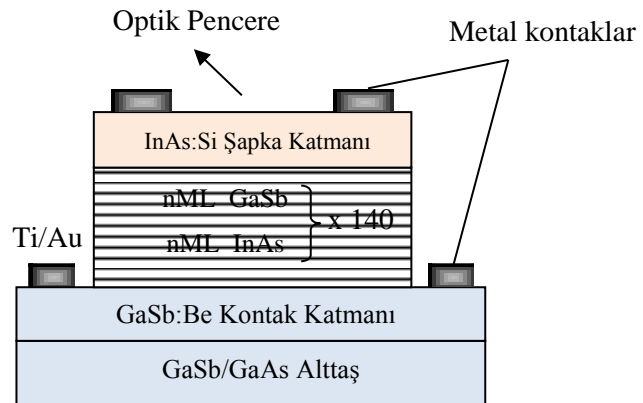
(a)

(b)



(c)

Şekil 2.20. (a) Paketlenmiş örneğin görünümü, (b) Tel Bağlama cihazı, (c) Alt ve üst kontak bağlantı noktalarının görünümü



Şekil 2.21. InAs/GaSb SL dedektör yapısının şematik görünümü

## 2.5. Elektriksel ve Optik Karakterizasyon

Bu kısımda, üretilen InAs/GaSb Tip-II SL tek-piksel fotodedektörler üzerinde yapılan elektriksel ve optik karakterizasyon işlemlerinde kullanılan yöntem ve ekipmanlar anlatılmıştır.

### 2.5.1. Karanlık akım ölçümleri

Karanlık akım ölçümleri için paketlenmiş haldeki örnekler farklı mesalar üzerinden elektriksel bağlantıların yapılabilirdiği özel bir tutucu üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 2.22). Daha sonra, ışık almayacak şekilde örneklerin üzeri kapatılmış ve tutucu, içindeki örneklerle birlikte sıvı azot içerisine daldırılarak örneğin doğrudan sıvı azot ile teması sağlanmıştır. Sıcaklığın tam olarak sıvı azot sıcaklığına ( $\sim 77$  K) düşmesi için belirli bir süre beklendikten sonra ölçümler alınmıştır.



Şekil 2.22. Karanlık akım ölçümlerinde kullanılan düzenek

Karanlık akım ölçümlerinde, voltaj kaynağından (Keithley 2635A, kaynak/ölçer) dedektöre uygulanan gerilime karşı dedektörün üzerinden geçen akım yine aynı cihazla okunarak diyotlar için akım-voltaj (I-V) ve akım

yoğunluğu-voltaj (J-V) grafikleri çizdirilmiştir. Üretilen dedektörlerin diyot özellikleri gösterip göstermedikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

*Karanlık Akım*, IR radyasyonun yokluğunda, fotodedektör boyunca akan akımdır. İdeal bir p-n eklemesinde sıfır yönlendirme voltajı (bias, V) altında karanlık akım sıfırdır ve artan voltajla birlikte artış gösterir. İleri beslemde (forward bias), p-n eklemesinin potansiyel bariyerinin azalmasına bağlı olarak akım hızla artar. Ters beslemde (reverse bias), karanlık akım düşüktür ve ideal olarak tüketim (deplasman) bölgesinin dışındaki taşıyıcıların difüzyonu ile sınırlanır.

$$J_D = J_s (e^{qV/kT} - 1) \quad (2.1)$$

Burada,  $J_s$ , doyma (saturation) akımı (A),  $q$ , elektron yükü (C),  $V$ , uygulanan voltaj (V),  $k$ , Boltzmann sabiti ( $m^2.kg.s^{-2}.K^{-1}$ ),  $T$ , dedektör sıcaklığıdır (K).

Ancak, dedektörün karanlık akım davranışını belirlemede etkili olan diğer bazı durumlar da söz konusudur. Yaratma/yeniden-birleşme (Generation/recombination) ve tünelleme akımları bunlardan en etkili olanlarıdır. Üretilen aygıtın yüzeyindeki ya da iç yapısındaki kusurlar taşıyıcıların yaratma/yeniden-birleşme oranlarını arttırarak ek bir karanlık akım mekanizması oluşturmaktadır ve akıma katkıda bulunmaktadır. Yüksek elektrik alan bölgelerinde, elektronların iletim bandından değerlik bandına (ya da boşlukların değerlik bandından iletim bandına) tünellemesiyle yaratılan banttan banda tünelleme akımı da diğer bir etkindir. Süperörgülerde elektronların etkin kütleleri boşluklara oranla 10 kat daha az olması sebebiyle bu mekanizmada elektronlar daha etkindir. Malzeme içerisinde kusurların varlığı da tünellemeyi artıran bir durumdur. Bu kusurlar, yarıiletkenin bant aralığı içinde yer alan enerji seviyeleri gibi davranan tuzak merkezleri gibi davranmaktadır. Bu durumda, oluşan ara durumlar (seviyeler) elektronların p-taraftan n-tarafa tünellemesinde kolaylaştırıcı bir rol oynamaktadır.

Diferansiyel direnç  $R(\Omega)$ , uygulanan voltajın karanlık akıma karşı türevi şeklinde tanımlanmaktadır.

$$R = \left( \frac{\partial V}{\partial I} \right) \quad (2.2)$$

Diferansiyel direnç dedektör alanı ( $A_d$ ) ile çarpılırsa, dedektör alanından bağımsız bir değer elde edilmiş olur.

$$R \cdot A = \left( \frac{\partial V}{\partial I} \right) \cdot A_d \quad (2.3)$$

Diferansiyel direnç değeri, özellikle sıfır voltaj noktasında dedektörün gürültüsünün hesaplanması açısından önemlidir [21, 43].

$R_0 \cdot A$  değeri, dedektörün elektriksel karakteristiğini belirleyen önemli parametrelerden biridir.  $R_0$  ( $V=0$ 'daki empedans), I-V ölçüm sonuçları kullanılarak aşağıdaki ifade yardımıyla hesaplanmaktadır. Burada  $A$ ,  $\text{cm}^2$  cinsinden dedektörün etkin optik alanıdır.

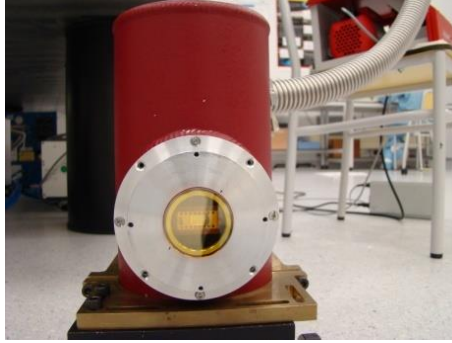
$$R_0 = \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V=0} \cong \left. \frac{\Delta V}{\Delta I} \right|_{V=0} = \left. \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} \right|_{V=0} \quad (2.4)$$

### 2.5.2. Spektral tepki ölçümleri

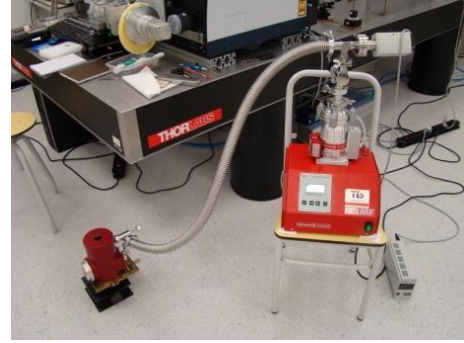
Spektral tepki ölçümleri,  $400 \times 400 \mu\text{m}^2$  mesa boyutlarında üretilen fotodedektörler üzerinden sıvı azot sıcaklığında ( $\sim 77 \text{ K}$ ) alınmıştır. Şekil 2.23a'da görüldüğü gibi paketlenen ve alt ve üst kontak bağlantıları yapılan mesa yapılar dewar kabı içerisine yerleştirilip vakumlanarak sıvı azot ile soğutulmuştur (Şekil 2.23).



(a)



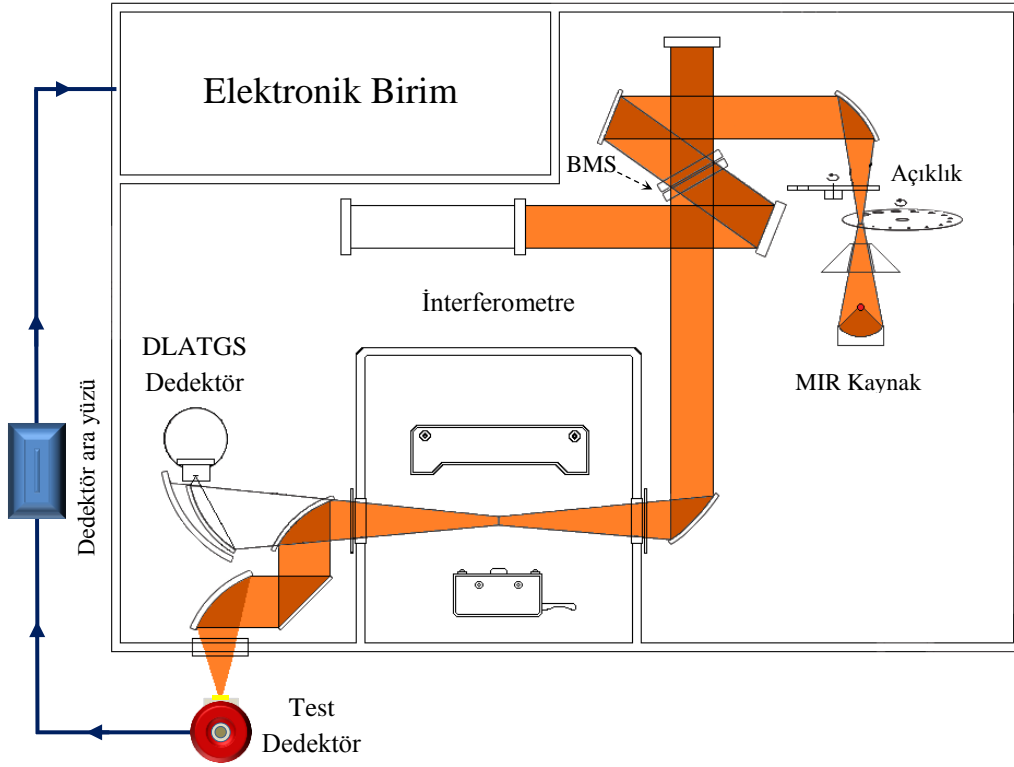
(b)



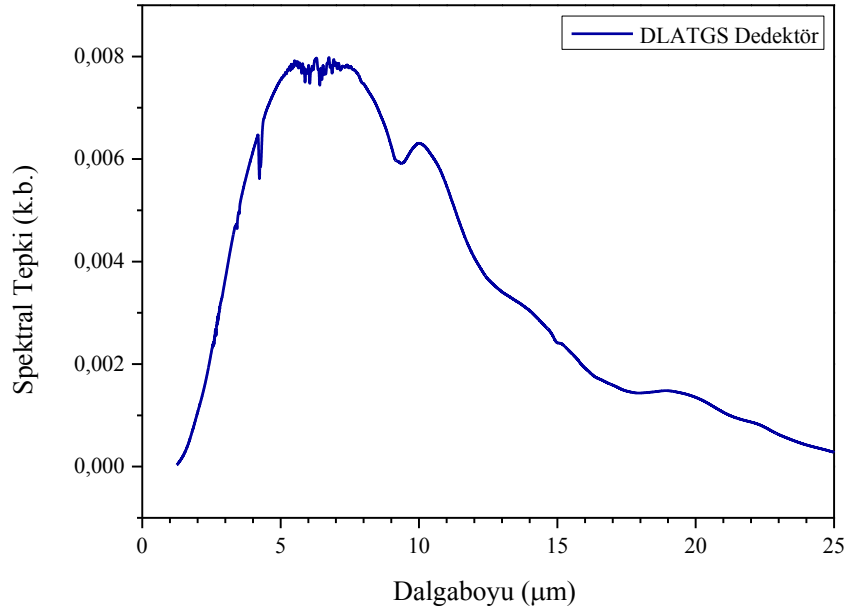
(c)

**Şekil 2.23.** (a) Paketlenmiş SL örneğin görüntüsü, (b) Dedektörlerin içine yerleştirildiği dewar kabı, (c) Dewar kabının turbo pompa ile vakumlanması

Detektörler, FTIR sisteminin Şekil 2.24'deki konfigürasyonunda harici dedektör (external detector) olarak tanımlanmış, MWIR ışık kaynağı örnekler üzerine düşürülerek fototepkiler alınmıştır. Yapılan her ölçüm sonunda FTIR sisteminde yer alan referans D1aTGS dedektör kullanılarak aynı optik konfigürasyonda ölçümler alınmış ve arka plan sinyali belirlenmiştir. Ölçüm sonuçlarında sistem kaynaklı sinyallerden kurtulmak amacıyla spektral tepki ölçümleri, referans alınan dedektörden alınan eğriye (Şekil 2.25) oranlanarak kullanılmıştır.



Şekil 2.24. Spektral tepki ölçümleri yapılırken kullanılan optik konfigürasyon, (BMS: KBr)



Şekil 2.25. Referans DLATGS dedektörün spektral tepkisi

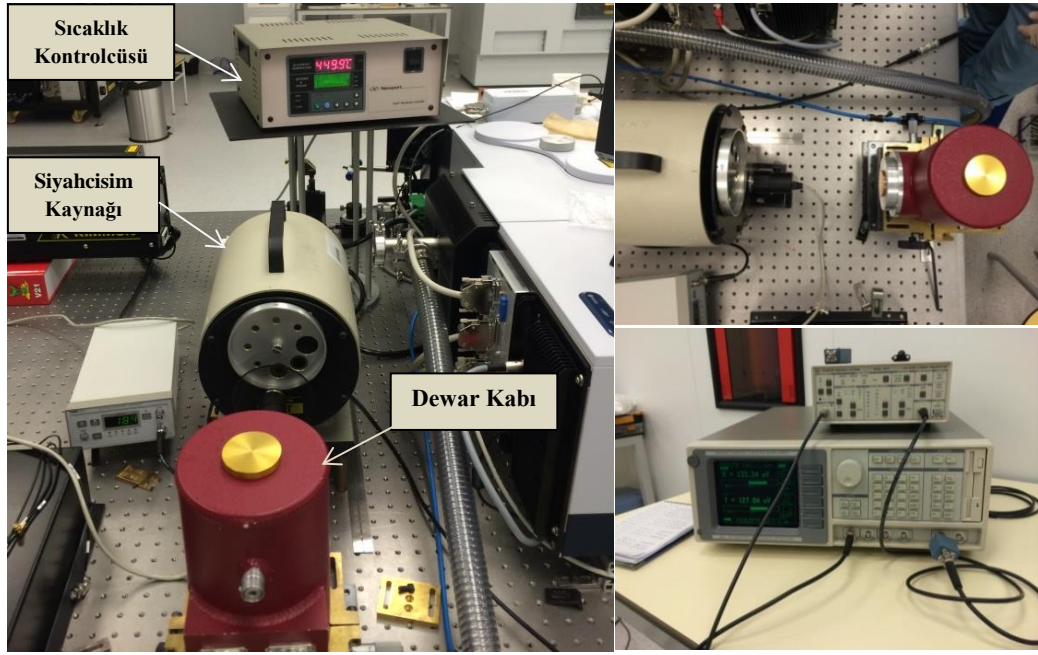
### 2.5.3. Tepkisellik ölçümleri

Bir fotodedektörün en temel işlevi, üstüne düşen ışımayı elektriksel bir sinyale çevirmektir. Süperörgü dedektörlerde bu sinyal, gerilim (V) veya akım (I) olarak görülür. Tepkisellik (R, ölçü birimi Amper/Watt [A/W] veya Volt/Watt [V/W] ), üretilen elektriksel sinyalin gelen optik sinyale oranlanması ile elde edilmektedir ve dedektörün ışımaya duyarlılık yeteneğini ifade etmektedir. Çıkışta ölçülen sinyalin türüne göre tepkisellik, voltaj modunda alınan ölçümlerde voltaj tepkiselliği, akım modunda alınan ölçümlerde akım tepkiselliği şeklinde adlandırılmaktadır [5].

Tepkisellik ölçümü, dedektöre gönderilen foton akısına karşı yaratılan elektriksel tepkinin ölçülmesi prensibine dayanmaktadır. FTIR ölçümleri ile relatif-tepki spektrumu belirlenen dedektörler, kalibre olmuş bir siyahcisim kaynağı önüne konularak oluşan elektrik sinyali ölçülmekte, dedektörlerin kesin tepkileri belirlenmektedir.

$$R_i = \frac{I_{sinyal} [Amper]}{P_{gelen} [Watt]} \quad R_V = \frac{I_{sinyal} [Volt]}{P_{gelen} [Watt]} \quad (2.5)$$

Ölçüm düzeneğinde, kalibre bir siyahcisim kaynağı, bu kaynağın hemen önüne yerleştirilmiş optik kıyıcı (chopper), dewar kabı, kilitlemeli yükseltici (lock-in amplifier) ve voltaj yükselticisi (amplifier) kullanılmıştır. Fototepkisellik ölçüm düzeneğinin fotoğrafları Şekil 2.26'da görülmektedir. Bu düzenekte, siyahcisim (Oriel 67033) kaynağından (BB) çıkan ışık demeti, optik kıyıcı üzerinden kesilerek, dışarıdan gelen gürültü yok edilmekte, ışığın etkisi ile dedektörde oluşan akım, akım ön yükselticiden geçirildikten sonra kilitlemeli yükseltici tarafından okunmaktadır. Dedektöre düşen ışığın gücü hesaplanabildiğinden fototepki değeri elde edilmektedir.



Şekil 2.26. Tepkisellik ölçümlerinde kullanılan ekipman

#### 2.5.4. Kuantum verimi ölçümleri

Bir foton dedektörünün kuantum verimi (QE),  $\eta$ , birim zamanda gelen foton sayısına karşı dedektörün çıkışında ölçülen taşıyıcıların sayısıdır. Bu değer, foton akısının elektrik akımına çeviren dedektörün yeteneğinin bir ölçütü olarak kullanılmaktadır.

$$\eta = \frac{I_{ph}}{qA_d\Phi} \quad (2.6)$$

Burada,  $I_{ph}$  yaratılan fotoakım,  $A_d$ , dedektörün etkin optik alanı,  $q$ , elektronun yükü,  $\Phi$  ise foton akısı yani dedektör alanının 1 santimetrekaresine saniyede ulaşan foton sayısıdır. QE sayısal olarak 0 ile 1 arasında değerler alır.

Kuantum veriminin tanımından yola çıkarak dedektörün tepkiselliğini ( $R$ ) hesaplamak mümkün olabilmektedir.

$$R = \frac{\eta q}{h\nu} \rightarrow \eta = \frac{hc}{q\lambda} R \quad (2.7)$$

Burada  $h\nu$ , gelen fotonların enerjisidir. Tepkiselliğin birimi,  $A/W$  ya da  $V/W$ 'tır.

### 3. EPİKATMAN BÜYÜTME ÇALIŞMALARI

III-V yarıiletken malzemelerin uygun alttaşlar üzerine yüksek kalitede epikatman olarak büyütülmesi, bu malzemelerin optoelektronik uygulamalarında oldukça önem arz etmektedir. Alttaş üretim süreçlerinden kaynaklanan kusurların üzerinin kapatılması, termal oksit kaldırma işlemleri sonucunda alttaş yüzeyinde oluşan deformasyonun tamiri, dedektör yapılarının alt ve üst kontak katmanlarının oluşturulması, külçe yapıda dedektör (InSb gibi) üretiminde epikatman uygulamalarından yararlanılmaktadır. Bütün bu uygulamaların yanı sıra alttaş malzemesi ile aralarında örgü uyumsuzluğunun söz konusu olduğu farklı türdeki malzemelerde uyumsuzluğun sebep olduğu olumsuz etkilerin giderilmesinde de epikatmanlar kullanılabilir. Alttaş üzerine kalın epikatmanlar büyütme suretiyle örgüdeki uyumsuzluğun neden olduğu kırılmalar ve bozulmaların üzeri örtülebilmektedir. InAs/GaSb Tip-II SL yapılar ile GaAs alttaş arasında ~%7,8 örgü uyumsuzluğu bulunmaktadır. Bu durum süperörgülerin GaAs alttaş üzerine doğrudan büyütülmesinin önünde engel teşkil etmektedir. Bu çalışmada, bu engelin süperörgü öncesinde büyütülen yüksek kalitede kalın GaSb epikatmanlar ile aşılması hedeflenmiştir.

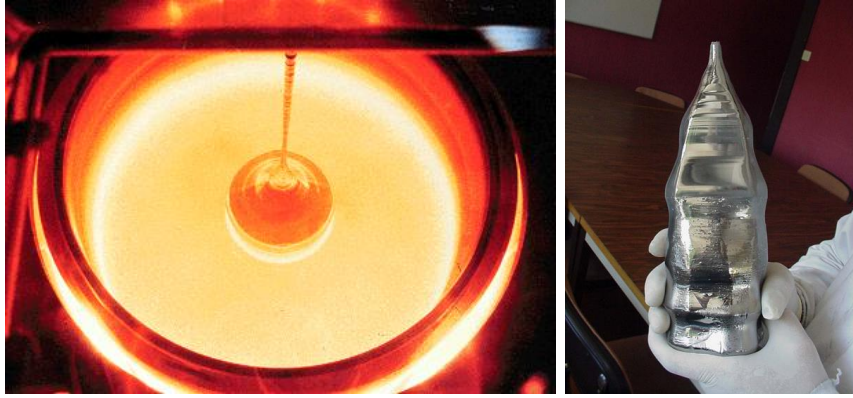
Bu bölümde, GaSb ve GaAs alttaşlar üzerine GaSb epikatmanların büyütülmesine ilişkin yapılan çalışmalar sunulmuştur.

#### 3.1. GaSb Alttaş Üzerine GaSb Epikatman Büyütme Çalışmaları

InAs/GaSb Tip-II SL yapıların GaSb alttaş üzerine büyütülmesi öncesinde, ticari olarak temin edilen GaSb alttaşlar üzerine alttaş üretim süreçlerinde oluşması muhtemel kusurların üzerinin kapatılması ve termal oksit kaldırma aşamalarında meydana gelebilecek olası bozulmaların etkilerinin azaltılması amacıyla belirli kalınlıkta (200-300 nm) GaSb epikatmanı büyütme gerekli bir uygulamadır. Aksi halde söz konusu kusurların ve bozulmaların olumsuz etkileri, üzerine büyütülecek süperörgü yapıya aynen aktarılmakta, optik ve elektriksel performans üzerinde ciddi olumsuz etkilere sebep olmaktadır. Ayrıca, InAs/GaSb

Tip-II SL yapıların alt kontak katmanını oluşturmak için de alttaş üzerine belirli kalınlıkta (500-1000 nm) katkılı GaSb epikatman büyütülmektedir.

GaSb alttaşların “Bridgman” (BG), “Travelling heater method” (THM), “Vertical gradient freze” (VGG) gibi tekniklerle üretimine ilişkin az sayıda rapor olsa da bu alttaşlar günümüzde yoğun olarak “Czochralski” (CZ) tekniği ile külçeler halinde üretilmektedir. GaSb kristalinin epitaksiyel olarak büyütülme işlemi, başlangıçta yoğun olarak sıvı faz epitaksi (LPE) tekniği ile gerçekleştirilmiştir. MBE, MOCVD gibi sistemlerin bu alandaki kullanımı daha sonraki dönemlerde gerçekleşmiştir.

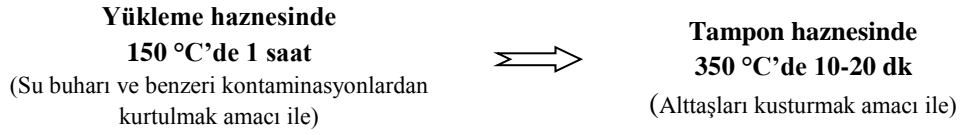


Şekil 3.1. Czochralski (CZ) tekniği ile büyütülmüş GaSb ingotun görünümü [44]

MBE tekniği ile GaSb epikatmanların büyütülmesi işleminde antimonun buhar basıncının düşük olması büyüme açısından dezavantaj yaratan bir durumdur. Büyüme esnasında Sb atomları, düşük yüzey mobilitesine sahip olduklarından kümeleşmeler ve çökeltiler oluşturacak biçimde bir araya gelme eğilimine sahiptirler. Bu da yüzeyde antimon açısından fakir, galyumca zengin bölgeler oluşturmaktadır. Bu bölgelerde kusur oluşumu söz konusudur. Bu sebeple, MBE ile yapılan GaSb büyütme çalışmalarında yüksek oranda antimon kullanılması gerekmektedir [40].

### 3.1.1. GaSb alttaşların büyütme için hazırlık süreçleri

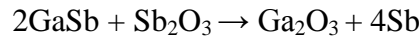
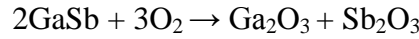
Bu kısımda büyütülen bütün örnekler, ticari olarak temin edilmiş, 500-600 µm kalınlığında, 2 inç boyutunda, (100) yöneliminde, tek tarafı parlatılmış, tellür (Te) katkılı ( $<2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ) GaSb epi-ready alttaşlar üzerine büyütülmüştür. Alttaşlar MBE sistemine yüklenmeden önce gözle görünür herhangi bir kirliliğin, kırılmanın veya bozulmanın olup olmadığından emin olmak amacıyla görsel olarak kontrol edilmiş, herhangi bir kimyasal ya da fiziksel işleme tâbi tutulmamıştır. Sisteme yüklenen alttaşlar, yükleme ve hazırlık haznesinde Şekil 3.2’de verilen ısıl reçeteler uygulanarak kusturulmuş, temizlenerek ana hazneye alınmıştır. Daha sonra, ana hazneye alınan alttaşlar, oksit kaldırma işlemlerine tâbi tutulmuş ve büyütme işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2. Büyütme öncesinde GaSb alttaşlara uygulanan ısıl reçete

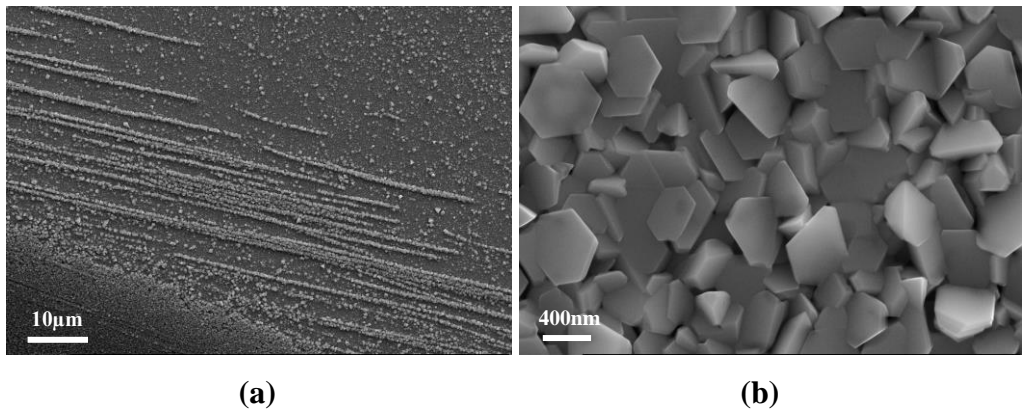
#### Alttaş yüzeyindeki oksit tabakasının kaldırılması:

Üretim süreçlerinden büyütme yapılan ana kadar geçen sürede, alttaşın hava ile temas halindeki yüzeylerinde belirli kalınlıklarda oksit tabakası oluşumu kaçınılmaz olmaktadır. Bazı durumlarda ise alttaş yüzeyini korumak amacıyla yüzeyin bilinçli şekilde oksitlendirildiği durumlar da söz konusu olabilmektedir. GaSb yüzey ile oksijenin teması durumunda oksitlenme aşağıdaki reaksiyonlar uyarınca gerçekleşmektedir [45].



Şekil 3.3a’da Sb akısı altında termal olarak oksidi kısmen kaldırılmış ve yine Sb akısı altında soğutulmuş GaSb alttaşın yüzeyinden alınmış SEM görüntüleri görülmektedir. Görüntüler, alttaşın kenar kısmından alınmıştır. Örnek tutucu ile alttaşın temas noktası, alttaşın iç bölgelerine oranla görece olarak daha soğuk olduğundan belirli bir alanda oksit tabakasının kalkmadan kristalize bir

biçimde kalmış olduğu görüntülerden anlaşılmaktadır. Alttaşın ortalarına doğru gidildikçe, yüzeydeki oksit tabakasının büyük oranda kalktığı ancak belirli bölgelerde noktasal oksit kristallerin kaldığı gözlenmektedir. Alttaş yüzeyinden alınmış yüksek büyütmedeki SEM görüntülerinde hegzagonal formdaki oksit ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ) kristalleri görülmektedir (Şekil 3.3b). Yüzeyde kalan oksit kalıntılarının, üzerine büyütülecek olan yapıyı etkilemesi aşikârdır. Bu sebeple, oksit kaldırma süreçleri sonrası bu etkileri ortadan kaldırmak amacı ile yüzeye mümkün olduğunca kalın alttaş malzemesi büyütme gerekmektedir

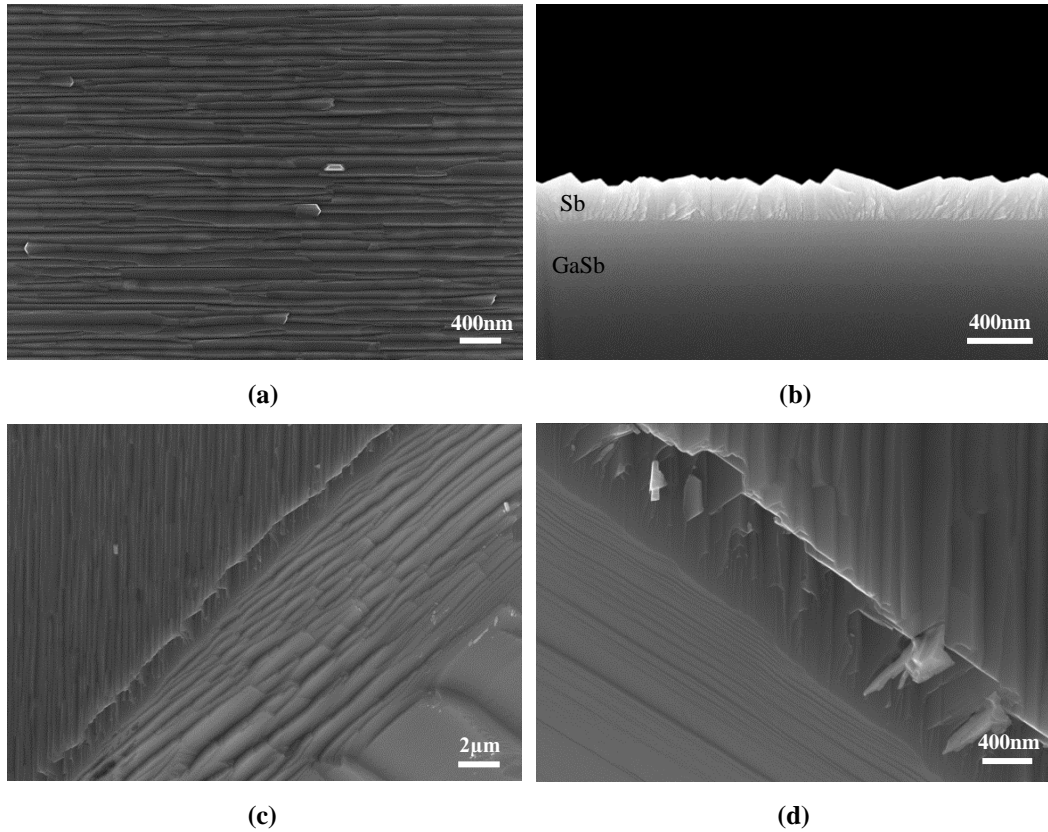


**Şekil 3.3.** GaSb alttaş yüzeyinde oluşan oksit kristallerinin SEM görüntüleri

Büyütme öncesinde yüzeydeki oksidin kaldırılma işlemi, epitaksiyel büyütme basamaklarının önemli bir aşaması olup kullanılan alttaşa ve malzemeye uygun oksit kaldırma reçetesinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada GaSb alttaşlar üzerindeki oksit tabakasının kaldırılmasına ilişkin oluşturulan reçete aşağıda anlatılmıştır.

Ana hazneye yüklenen GaSb alttaşlar, 15 °C/dk ile akı olmadan  $T_{\text{pyro}}=400$  °C'ye kadar ısıtılmaktadır. Alttaş sıcaklığı, belirli bir değere ulaşmadan yüzeye Sb akısı verilmemelidir. Aksi halde Sb atomları alttaş yüzeyinde yoğunlaşarak yüzeyi kaplamaktadır [46, 47]. Bu, büyütme öncesinde istenmeyen bir durumdur. Benzer şekilde alttaş soğutulurken de aynı hassasiyet söz konusudur. Bu sebeple alttaş, Sb akısı altında oda sıcaklığına soğutulurken akı belirli bir sıcaklıktan sonra kapatılmalıdır. Şekil 3.4'de soğutma esnasında düşük sıcaklıklara kadar ( $270\pm 10$  °C) Sb akısı altında tutulmuş bir örneğin yüzey ve kesit SEM görüntüleri

görülmektedir. Görüntülerden görüldüğü üzere, yüzeye verilen Sb atomları yoğunlaşarak kristalize olmuş, teraslı bir görünüm almıştır. Şekil 3.5’de ise referans GaSb alttaştan ve üzerine 1500 nm GaSb epikatman büyütülmüş iki ayrı örnekten alınmış geniş açı XRD (gonio) taramaları görülmektedir. Siyah renkle gösterilmiş örnek üzerinde Sb yoğunlaşması olmuş, kırmızı renkli ise yoğunlaşma olmamış örneğe ait ölçümlerdir. Yapılan denemelerde, yoğunlaşmış Sb tabakasının kalınlığının yüzeydeki Sb akısının kapatıldığı sıcaklıkla ters ( $310\text{ }^{\circ}\text{C}$ ’nin altındaki sıcaklıklar için), yüzeye verilen Sb akı miktarı ile doğru orantılı olarak değiştiği görülmüştür. Sb yoğunlaşması,  $300\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$  sıcaklığında başlamakta daha düşük sıcaklıklara doğru gidildikçe yoğunlaşma miktarı giderek artmaktadır. Burada, sıcaklığın yüzeye verilen Sb akı miktarından daha baskın bir parametre olduğu görülmektedir. Çünkü  $310\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve üzerindeki sıcaklıklarda yüzeydeki akı miktarı ne olursa olsun yoğunlaşma gözlenmemektedir.



Şekil 3.4. Yüzeyinde antimon yoğunlaşmış örneklerden alınmış SEM görüntüleri

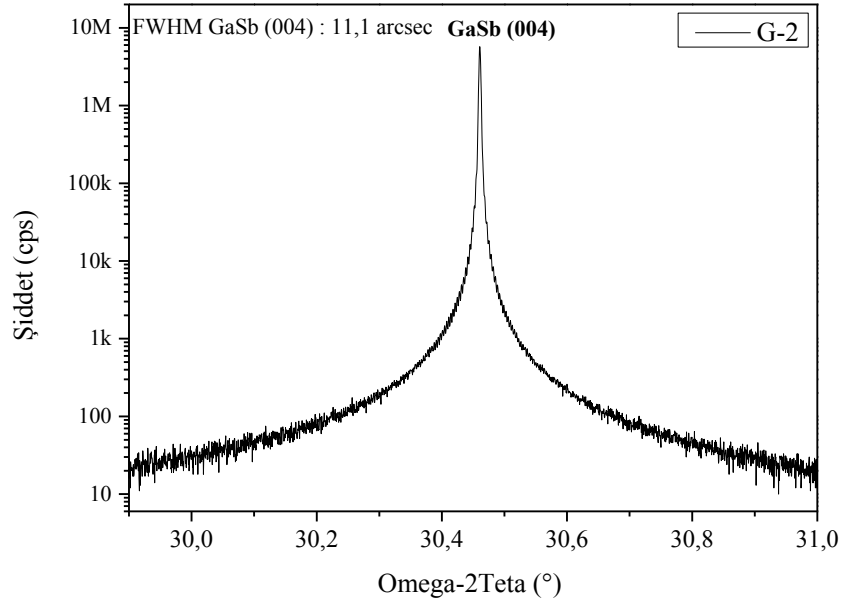


Şekil 3.5. G-1, G-2 numaralı örneklerden ve GaSb alttaştan alınmış HRXRD-gonio ölçümleri

Alttas sıcaklığı,  $T_{\text{pyro}}=400$  °C'ye ulaştığında  $\text{Sb}_2$  ( $1,20 \times 10^{-6}$  Torr) akısı yüzeye verilmeye başlanmakta ve alttas antimon akısı altında  $15$  °C/dk ile  $T_{\text{pyro}}=560$  °C'ye kadar ısıtılmaktadır.  $T_{\text{pyro}}=560 \pm 5$  °C'de  $6 \pm 1$  dk beklenecek şekilde yüzeydeki oksidin termal olarak kalkması sağlanmaktadır. Bütün bu süreç, RHEED ile kontrol altında yapılmaktadır. RHEED ekranında, alttas yüksek sıcaklıklara ısıtılana kadar yüzeydeki oksit tabakası nedeniyle hiçbir kırınım bilgisi gözlenmezken  $T_{\text{pyro}}=560 \pm 5$  °C sıcaklığında bir süre beklendikten sonra yüzeyde noktasal parlaklıklar (spotlar) oluşmaya başlamaktadır. Daha sonra bu noktasal parlaklıklar giderek belirginleşmekte ve 2-3 dk sonunda çizgiye (GaSb (1x3)) dönüşmektedir. Yüzeydeki değişimin durağanlaşması oksidin tümüyle kalktığına relatif bir göstergesi olup, alttas bir süre daha bu sıcaklıkta tutulduktan sonra büyütmenin yapılacağı sıcaklığa  $\text{Sb}_2$  akısı altında  $15$  °C/dk ile soğutulmaktadır. Alttaşlar üzerindeki oksit kalınlıkları farklılık gösterdiğinden bekleme süresi GaSb alttaşlarda  $\pm 1$  dk değişebilmektedir.

Oksit kaldırma işlemi tamamlandıktan sonra alttas sıcaklığı, GaSb'nin kararlı ve kaliteli olarak büyüdüğü sıcaklıklara ( $T_{\text{pyro}}=480-515$  °C) düşürülerek

GaSb epikatman büyütme işlemi başlatılmaktadır. GaSb için doğru büyüme sıcaklığı, farklı sıcaklıklarda (410, 450, 480, 500, 515 °C) büyütülen GaSb epikatmanlar üzerinde yapılan DCXRC analizlerinde GaSb (004) sinyalinin FWHM değerleri göz önüne alınarak belirlenmiştir. Bu değer, 480-515 °C arasında 11-20 arcsec arasında değişirken belirtilen sıcaklık aralığının dışında 30 arcsec'in üzerine çıkmaktadır. Şekil 3.6'da GaSb alttaş üzerine büyütülmüş 1500 nm kalınlıklı GaSb epikatmanın DCXRC analizi örnek olarak verilmiştir.



**Şekil 3.6.** GaSb alttaş üzerine büyütülmüş 1500 nm kalınlığındaki GaSb epikatman yapının çift-kristal X-ışını sallantı eğrisi

GaSb epikatmanların büyütülmesindeki diğer iki önemli parametre ise büyüme hızı ve büyüme esnasında kullanılan Sb ve Ga akılarının miktarları yani V/III oranıdır. Literatürde GaSb'nin 0,7-1 ML/s aralığında büyüme hızlarında büyütüldüğü epikatman çalışmaları görülmektedir [48, 49]. Ancak, InAs/GaSb SL yapılar üzerine çalışan araştırma gruplarınca yapılan çalışmalarda, yüksek büyüme hızları kullanan gruplar olsa da [30] bu değer, yaygın olarak 0,2-0,6 ML/s aralığında değişmektedir [50, 51, 52]. Bu çalışmada, GaSb ve kullanılan diğer malzemeler için düşük büyüme hızları kullanılmış, 0,5 ML/s'nin üzerine çıkılmamıştır. Düşük büyüme hızlarında çalışmanın kristal kalitesinde olumlu etkilerinin olduğu bilinmektedir. V/III oranı, çalışılan örneklerde en az 5, en fazla

20 değerine kadar çıkarılmıştır. Literatürde bu orana ilişkin değerler epikatman çalışmalarında 2,5-10 aralığındadır [49, 53, 54]. V/III oranı referans alınarak yapılan deneysel çalışmalar, bu çalışmada kullanılan epitaksiyel sistem için bu oranın 20 civarına artırılmasının DCXRC analizlerinde iyileşme sağladığını göstermektedir.

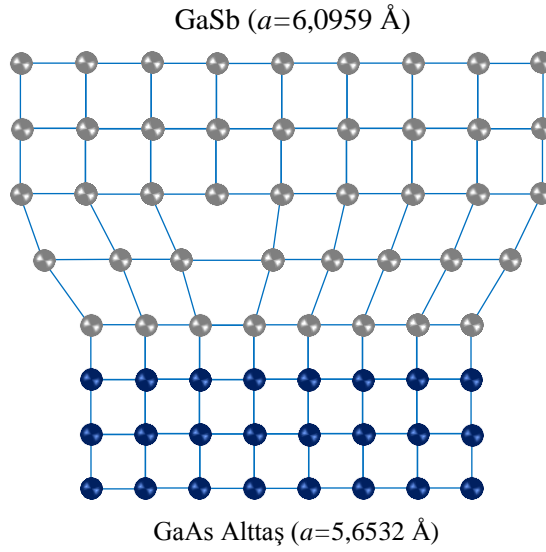
### **3.2. GaAs Alttaş Üzerine Yüksek Kalitede GaSb Epikatman Büyütme Çalışmaları**

InAs/GaSb Tip-II SL yapıların GaAs alttaş üzerine büyüme çalışmalarında, GaAs alttaş ile InAs/GaSb SL arasındaki örgü uyumsuzluğunun etkilerini azaltmak hem de SL yapının alt kontak katmanını oluşturmak amacı ile SL öncesinde belirli kalınlıkta GaSb veya InAs epikatman büyütmek gerekmektedir. Bu tür çalışmalarda GaSb malzemesi InAs'e kıyasla çok daha yoğun kullanılmaktadır. Büyütülen epikatmanın kristal kalitesi, üzerine büyütülecek olan SL yapının kristal kalitesini doğrudan etkileyecek bir durum olduğundan InAs/GaSb SL yapılardan önce GaAs alttaş üzerine yüksek kalitede GaSb epikatman büyüme çalışmaları öncelikli olarak gerçekleştirilmiştir. GaAs alttaş üzerine yüksek kalitede GaSb epikatman büyütülmesine yönelik yapılan deneysel çalışmalar sonuçlarıyla birlikte bu bölümde sunulmuştur.

GaAs kristali ile GaSb ve InAs kristalleri arasında sırasıyla %7,82 ve %7,16 oranında örgü uyumsuzluğu bulunmaktadır. Bu sebeple büyüme kararlılığı ve koşulları açısından oldukça hassas bir dengeye sahip InAs/GaSb çok tekrarlı SL hetero yapılar büyütülmeden önce söz konusu uyumsuzluğun ve etkilerinin olabildiğince azaltılması gerekmektedir. Aksi halde, bu etkilerin süperörgü yapıyı olumsuz yönde etkilemesi muhtemel bir durumdur. Bu tez çalışmasında söz konusu uyumsuzluk etkileri, GaAs alttaş üzerine makul kalınlıkta (3-4  $\mu\text{m}$ ) ve kalitede GaSb epikatmanlar büyütülerek aşılmaya çalışılmıştır.

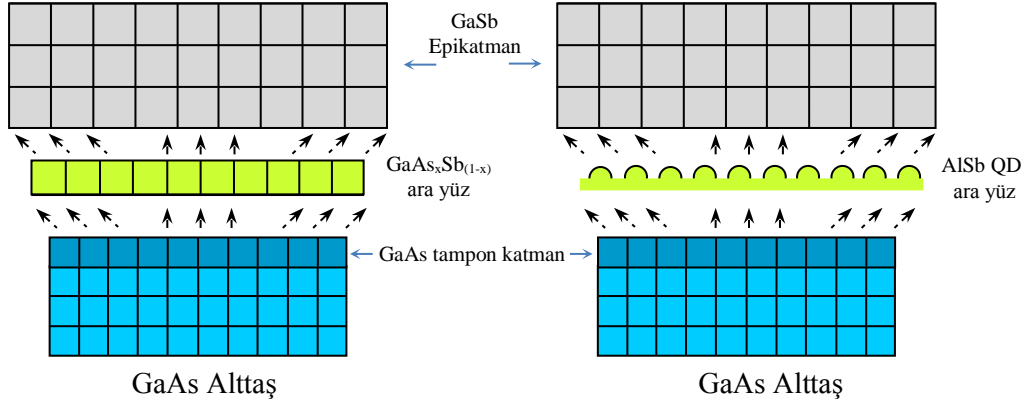
GaSb'nin GaAs üzerine doğrudan büyütülmesi durumunda, büyümekte olan GaSb, GaAs'e göre daha büyük örgü sabitine sahip olduğundan örgüyü genişletmeye çalışmakta, kalınlık belirli bir kritik değer ( $\sim 1,4$  ML) üzerine ulaştığında oluşan zor kristal örgüde kopmalara ve kaymalara sebep olmaktadır

(Şekil 3.7). Bu çalışmada, söz konusu geçiş ne kadar sert ve doğrudan olursa sözü edilen olumsuz etkilerinin çok daha büyük olacağı öngörülmüş, GaAs ile GaSb malzemeleri arasına bu etkileri azaltacak ara yüz formları oluşturmanın faydalı olacağı düşünülmüştür. Bu bağlamda,  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  üçlü kristal yapısı ve AlSb kuantum nokta (QD) yapısı GaAs→GaSb geçişinde ara yüz olarak seçilmiş ve kullanılmıştır.

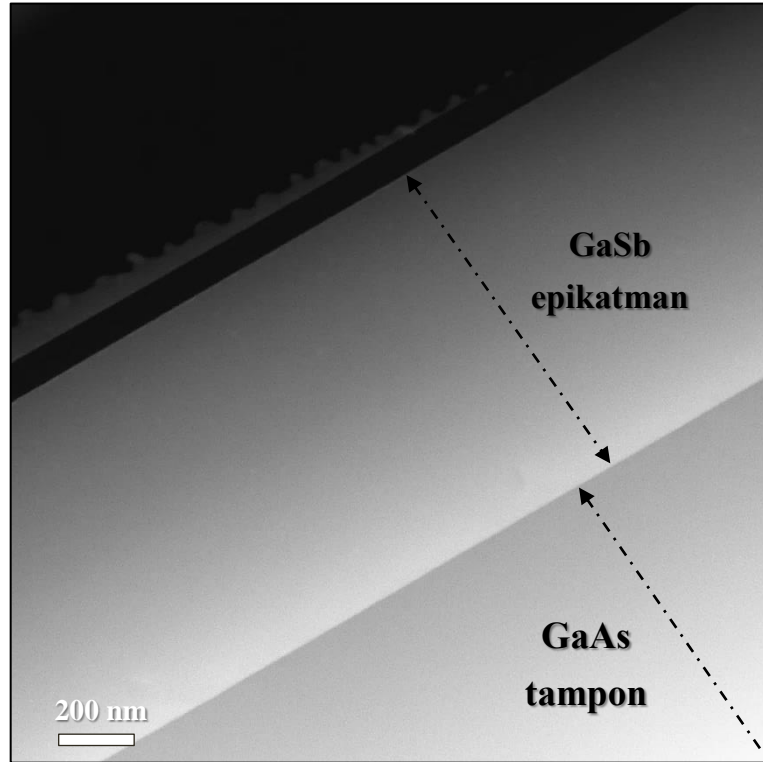


Şekil 3.7. GaAs→GaSb geçişinin şematik gösterimi

Belirli kalınlıklarda ve konsantrasyonlarda  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  üçlü kristal yapısı ve AlSb QD ara yüzler üzerine çalışmalar, yapılan büyütmelelere ilişkin reçeteler, karakterizasyon sonuçları ile birlikte ilerleyen kısımlarda sunulmuştur. GaAs→GaSb geçişinde kullanılan ara yüz uygulamalarının şematik gösterimi Şekil 3.8’de, GaAs alttaş üzerine büyütülen GaSb epikatman örnekten alınan STEM-HAADF görüntüsü ise Şekil 3.9’da görülmektedir.



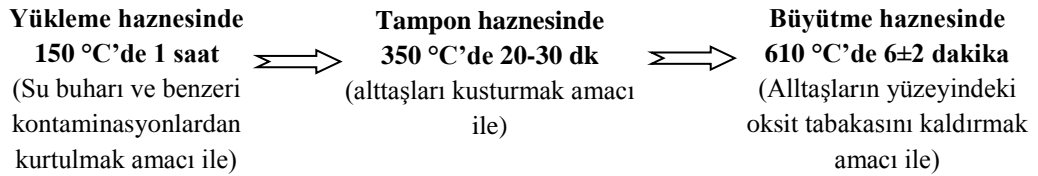
Şekil 3.8. GaAs→GaSb geçişinde kullanılan ara yüzlerin şematik gösterimi



Şekil 3.9. GaAs alttaş üzerine büyütülen GaSb epikatman örnekten alınan STEM-HAADF görüntüsü [42]

### 3.2.1. GaAs alttaşların büyütme hazırlık aşamaları

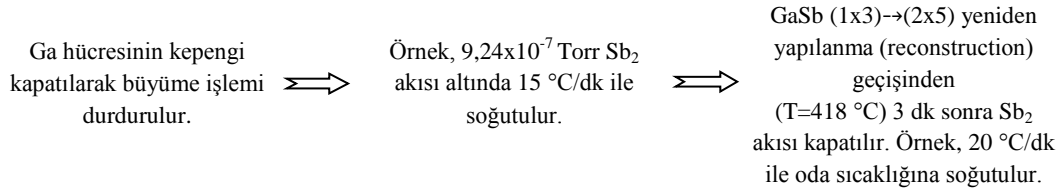
Bu kısımda çalışılan örnekler, 3 ve 4 inç (100) GaAs:SI alttaşlar üzerine büyütülmüştür. Ticari olarak temin edilen GaAs alttaşlar sisteme yüklenmiş ve büyütme için hazır hale getirilmesi amacıyla GaSb alttaşlarda olduğu gibi belirli ısıl reçeteler uygulanmıştır. Uygulanan ısıl işlemler, şematik olarak Şekil 3.10'da verilmiştir. Söz konusu ısıl süreçlerin ilk iki basamağı, yüksek vakum sistemlerinde atmosfer koşullarından içeriye herhangi bir malzeme sokulduğunda uygulanması kaçınılmaz süreçlerdir. Son basamak ise alttaşların yüzeyindeki oksit tabakasını kaldırmak amacı ile uygulanmaktadır. GaAs alttaş yüzeyindeki oksit tabakası,  $610 \pm 5$  °C alttaş sıcaklığında yaklaşık 6 dk sonunda yüzeyden kaldırılmaktadır. Ancak bütün alttaşlarda oksit kalınlığı aynı olmadığından bu süre GaAs alttaşlarda  $\pm 2$  dk kadar değişebilmektedir. Bu çalışmada alttaş sıcaklıkları IRCON pirometre yardımıyla ölçülmüş ve sistemde kullanılan pirometre ile yapılan ölçümlerde  $BEP=9,24 \times 10^{-7}$  Torr  $Sb_2$  akısı altında örnek soğutulurken GaSb (1x3)→(2x5) yeniden yapılanma (reconstruction) geçişi  $T_{pyro}=418$  °C'de gözlenmektedir. Oksit kaldırma işlemleri esnasında yüzeyde termal deformasyon kaçınılmaz bir durum olup bunu en aza indirmek için bütün bu işlemler arsenik akısı altında ( $\sim 1 \times 10^{-6}$  Torr) yapılmıştır. Alttaşlar ısıtılıken  $As_2$  akısı, alttaş sıcaklığı  $\sim 200$  °C'de yüzeye verilmekte, soğutulurken ise yine aynı sıcaklıklarda kapatılmaktadır. Yapılan çalışmalarda arseniğin verilen sıcaklık değerlerinde antimon gibi yüzeyde yoğunlaşmadığı gözlenmiştir. Aynı zamanda bu süreçler, yüzey topografisi ve kalitesi hakkında anlık bilgi verebilen bir elektron difraksiyon tekniği olan RHEED yardımıyla yine kontrol altında yapılmıştır.



Şekil 3.10. Büyütme öncesinde GaAs alttaşlara uygulanan ısıl reçete

Bütün bu işlemlerin sonunda, GaAs alttaşlar üzerinde termal süreçler nedeniyle oluşan deformasyonu yok etmek ve yüzeyi daha da iyileştirmek amacı ile 200-300 nm GaAs tampon katmanı büyütülmüş ve alttaş hazır hale getirilmiştir. Buraya kadar bütün süreçlerin, örneklerin kendi içlerinde kıyaslanabilir olması açısından, büyütülen GaSb epikatmanlar için aynı olmasına dikkat edilmiştir.

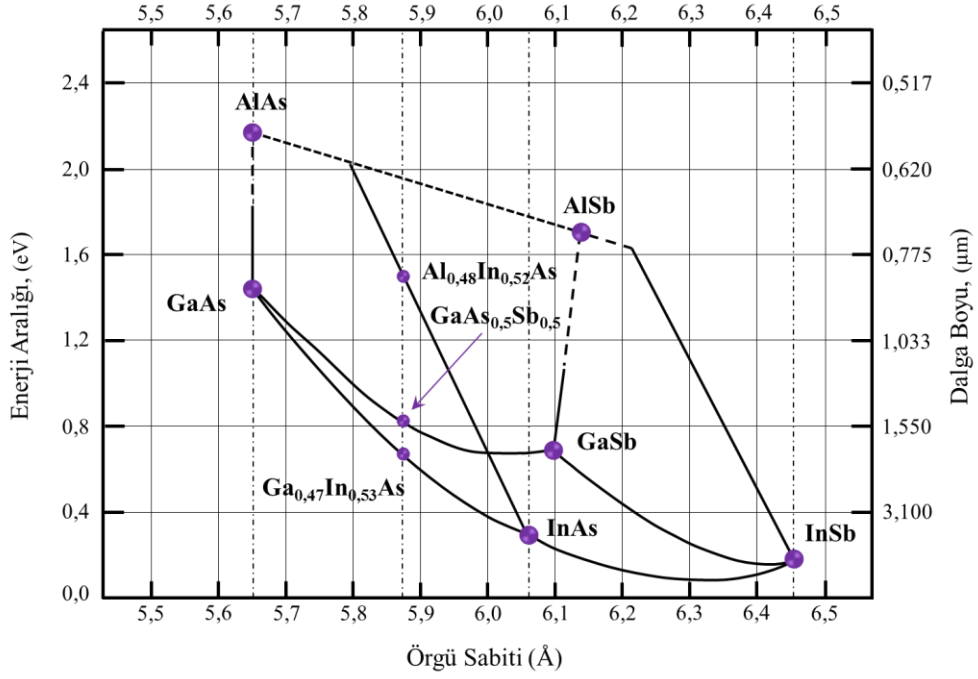
GaAs üzerine büyütülen bütün GaSb epikatman örnekler aynı soğutma reçetesi ile soğutulmuştur (Şekil 3.11). Örnekler sistemden çıkarıldıktan sonra yapılan incelemede örneklerin yüzeylerinde gözle görülebilen herhangi bir kusurun olmadığı, yüzeylerin ayna görüntüsünde olduğu gözlenmiştir.



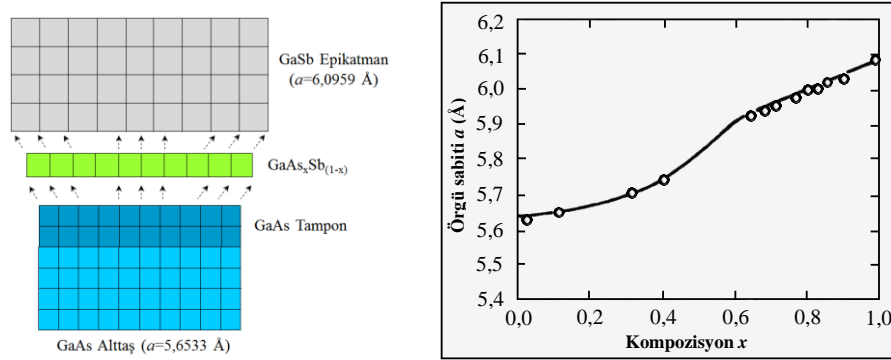
**Şekil 3.11.** Büyütme sonrası GaSb epikatman örnekler üzerinde uygulanan soğutma reçetesi

### 3.2.2. $GaAs_xSb_{(1-x)}$ üçlü ara yüz bileşiği kullanılarak büyütülen epikatman örnekler

Bu bölümde, GaAs alttaştan GaSb epikatman yapıya geçişte stres rahatlatma katmanı olarak belirli kalınlıklarda ve konsantrasyonlarda  $GaAs_xSb_{(1-x)}$  üçlü kristal yapısının kullanıldığı örnek gruplarına ilişkin büyütme ve karakterizasyon bilgileri sunulmuştur. Şekil 3.12'deki diyagramdan görüldüğü üzere  $GaAs_{0,5}Sb_{0,5}$  kompozisyonu için örgü sabiti ( $a \sim 5,88 \text{ \AA}$ ), GaAs ( $a = 5,6532 \text{ \AA}$ ) ile GaSb ( $a = 6,0959 \text{ \AA}$ ) örgü sabitleri arasında bir değerdedir.  $GaAs_xSb_{(1-x)}$  üçlü alaşımı için örgü sabitinin x'e bağlı değişimi ise Şekil 3.13'de verilmiştir. GaAs ile GaSb arasına, bu özellikte bir malzeme formunun oluşturulması ile bu iki malzeme arasındaki örgü uyumsuzluğunun belirli bir oranda azaltacağı ve buna bağlı olarak da örgü uyumsuzluğundan kaynaklanan zor ve kusurların azalacağı öngörülmüştür.



Şekil 3.12. Çeşitli III-V grubu yarıiletken kristallerin örgü sabitlerinin bant aralıkları ve dalga boylarına karşı çizilmiş grafikleri (oda sıcaklığında) [55]



Şekil 3.13. GaAs<sub>x</sub>Sb<sub>(1-x)</sub> kristalinde örgü sabitinin x'e bağlı değişimi [56]

Üçlü bileşiklerde örgü parametresi, Vegard yasasına uymaktadır. Vegard yasası uyarınca üçlü bileşiklerin örgü parametresi aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplanabilmektedir.

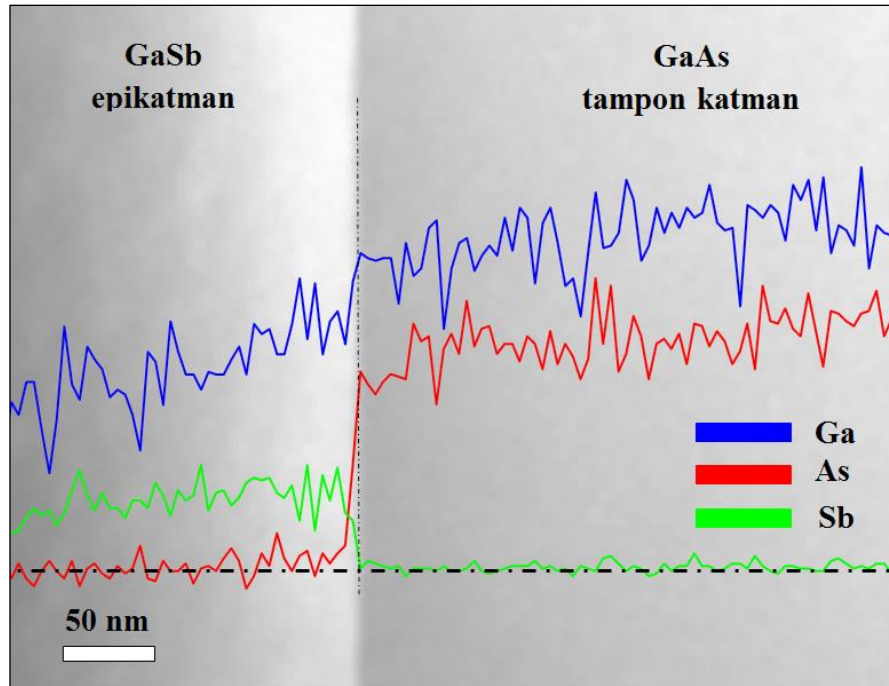
$$a_{kristal\ bileşik} = xa_A + (1 - x)a_B \quad (3.1)$$

Burada  $a_A$  ve  $a_B$ , A ve B ikili bileşiklerin örgü sabitleridir.

GaAs<sub>x</sub>Sb<sub>(1-x)</sub> için oda sıcaklığında (300 K) bant aralığı enerjisi ise  $x$  değerine bağlı olarak aşağıdaki eşitlikle verilmektedir.

$$E_g(x) = 0,726 - 0,502x + 1,2x^2 \quad (3.2)$$

GaAs→GaSb geçiş bölgesinde yapılmış STEM-EDX çizgi analizi (Şekil 3.14), geçiş hattından GaSb epikatmanın ~0-5 nm iç bölgelerine doğru Ga ve Sb ile birlikte As varlığı gözlenmektedir. As vanası ve kepenği kapatılmasına karşın ortamda halen zamanla azalan oranlarda As bulunmaktadır ve GaSb büyürken yapıya girerek GaAs<sub>x</sub>Sb<sub>(1-x)</sub> oluşumuna neden olmaktadır. Ortamdaki As oranı, GaAs→GaSb geçişinde araya bekleme süreleri konularak en aza indirilebilir fakat bu çalışmada bu durum bir avantaj olarak değerlendirilmiş ve oluşturulan ara yüz reçeteleri yardımıyla farklı kalınlıklarda ve kompozisyonlarda kontrollü olarak GaAs<sub>x</sub>Sb<sub>(1-x)</sub> oluşturulması hedeflenmiştir.

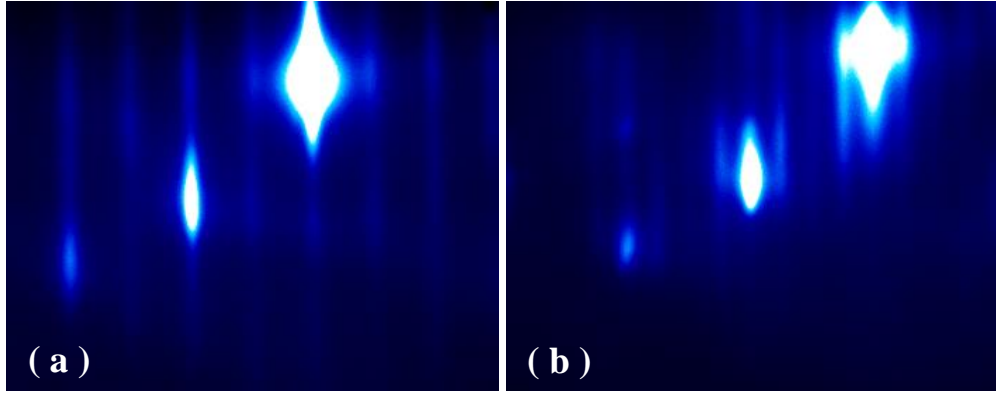


**Şekil 3.14.** GaAs alttaş üzerine büyütülmüş GaSb epikatman örnek üzerinde GaAs→GaSb geçiş bölgesinden alınmış STEM-EDX çizgi analizi [42]

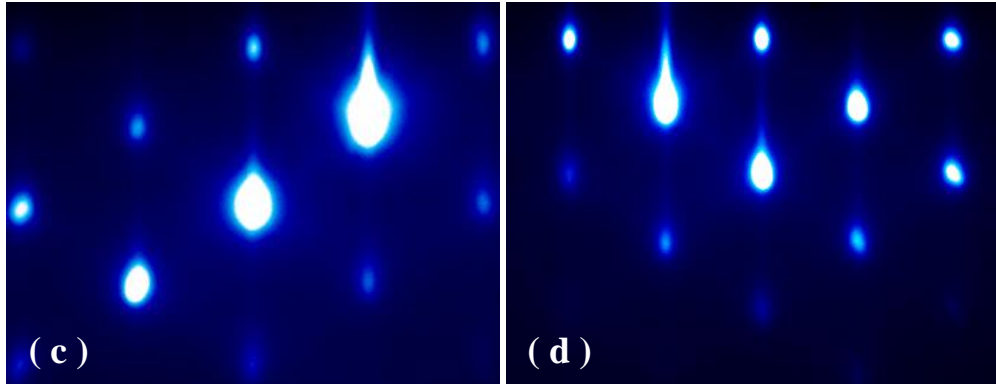
GaAs yüzey üzerine  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  kristalini çeşitli yöntemlerle oluşturmak mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada, söz konusu ara yüz oluşum reçetelerinin olabildiğince detaylandırılmasına önem verilmiştir. Bu bağlamda,  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  ara yüz katmanının oluşturulmasında uygulanan reçeteler aşağıda verilmiştir.

- (1) GaAs alttaş üzerine yüzeydeki pürüzlülüğü azaltmak amacı ile GaAs tampon katman büyütüldükten sonra yüzey, GaAs büyütme sıcaklığından ( $T_{\text{GaAs}}=590$  °C), GaSb epikatman büyütme sıcaklığına ( $T_{\text{GaSb}}=500$  °C)  $\text{As}_2$  akısı altında soğutulmuş,  $T=500$  °C'e gelindiğinde  $\text{As}_2$  akısı belirli oranda azaltılmış ve belirli bir süre yüzeye  $\text{As}_2$  ile birlikte Ga ve  $\text{Sb}_2$  akısı verilerek  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  oluşumu sağlanmıştır. Ardından  $\text{As}_2$  akısı kapatılarak GaSb epikatman büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir.
- (2) GaAs tampon katman büyütüldükten sonra yüzey,  $\text{As}_2$  akısı altında GaAs büyütme sıcaklığından GaSb epikatman büyütme sıcaklığına soğutulmuş,  $\text{As}_2$  akısı kapatılıp beklemeden yüzeye eş zamanlı  $\text{Sb}_2$  ve Ga akısı verilmiştir. Ga ve Sb kepenkleri açıldığı esnada, As kepenği kapatılmasına rağmen ortamda halen As atomları bulunacağından belirli kalınlıkta  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  oluşumu dolaylı olarak sağlanmıştır.
- (3) GaAs tampon katman büyütüldükten sonra yüzey, GaAs büyüme sıcaklığından, GaSb büyüme sıcaklığına kadar akı olmadan soğutulmuştur. Bu işlemle yüzeyden arseniğin uzaklaşması sağlanarak galyumca zengin bir yüzeyin oluşturulması amaçlanmıştır. GaSb büyüme sıcaklığında, yüzeye belirli süre  $\text{Sb}_2$  akısı verilmiş ve yüzeyde  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  oluşumu sağlanmıştır. Ardından Ga açılarak GaSb epikatman büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir.
- (4) GaAs tampon katman büyütüldükten sonra yüzey, GaAs büyüme sıcaklığından GaSb büyüme sıcaklığına kadar  $\text{As}_2$  yerine  $\text{Sb}_2$  akısı altında soğutulmuş, yüzeyden kopan As atomlarının boşalttıkları yerlerin Sb atomları ile doldurulması amaçlanarak  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  oluşumu sağlanmaya çalışılmıştır. GaSb büyüme sıcaklığında, Ga hücresinin kepenği açılarak GaSb epikatman büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir.

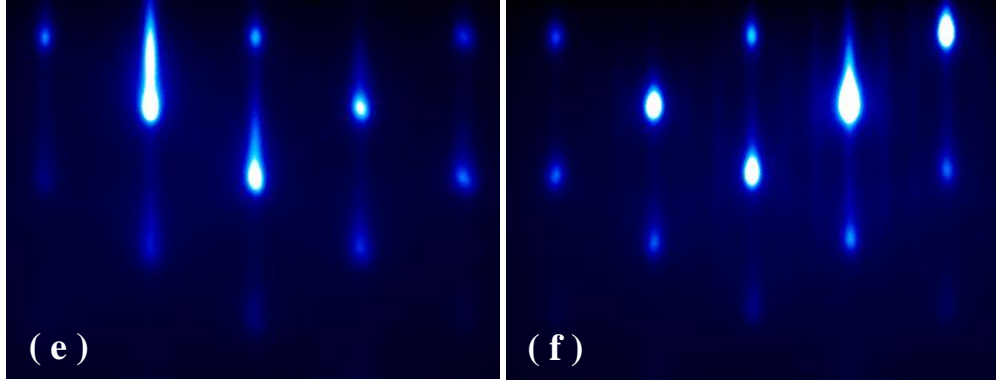
Büyüme esnasında RHEED ile yapılan analizlerde (2x4) GaAs yüzey (Şekil 3.15a, b) üzerine  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  büyümeye başladığı anda yüzeyin 5-10 saniye noktasal spotlu yani üç boyutlu (3D) olduğu (Şekil 3.15c, d), yaklaşık 20 saniye sonunda bu noktasal yapıların uzayarak çizgi formunu aldığı yani iki boyuta (2D) geçtiği görülmektedir (Şekil 3.15e, f). Daha sonra, yüzeyde kararlı (1x3) GaSb deseni oluşmaya başlamış ve yaklaşık 60 saniye sonra büyüme oldukça keskin ve kararlı (1x3) GaSb deseni ile devam etmiştir (Şekil 3.15g, h). Örnek soğutulüken (1x3)→(2x5) yeniden-yapılanma sonrasındaki GaSb (2x5) RHEED deseni ise Şekil 3.15i ve j'de görülmektedir.



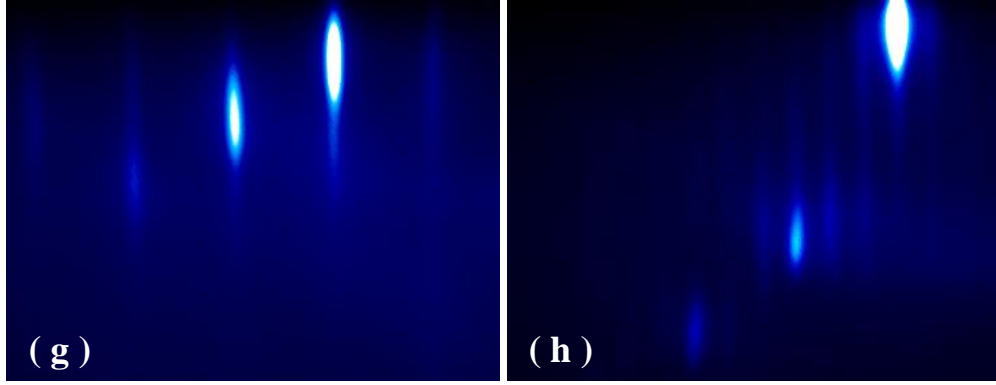
GaAs yüzeyin (2x4) RHEED deseni



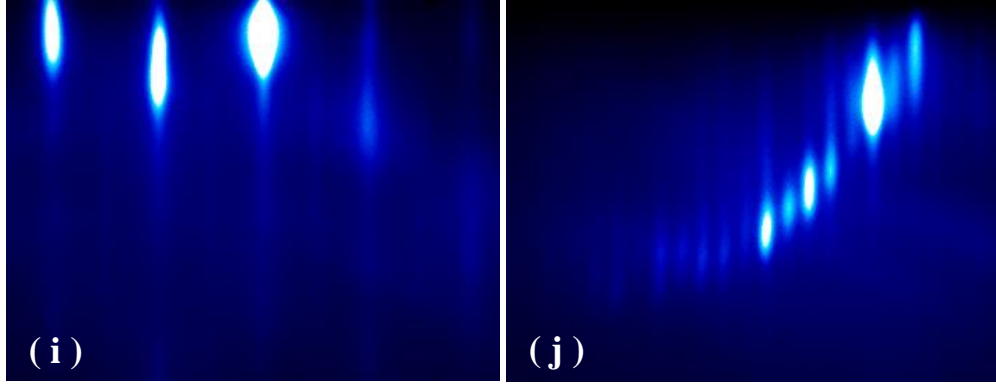
Spot görünümlü RHEED desenleri



Spot görünümünden çizgi görünüme geçiş anını gösteren RHEED desenleri



GaSb yüzeyin (1x3) RHEED deseni



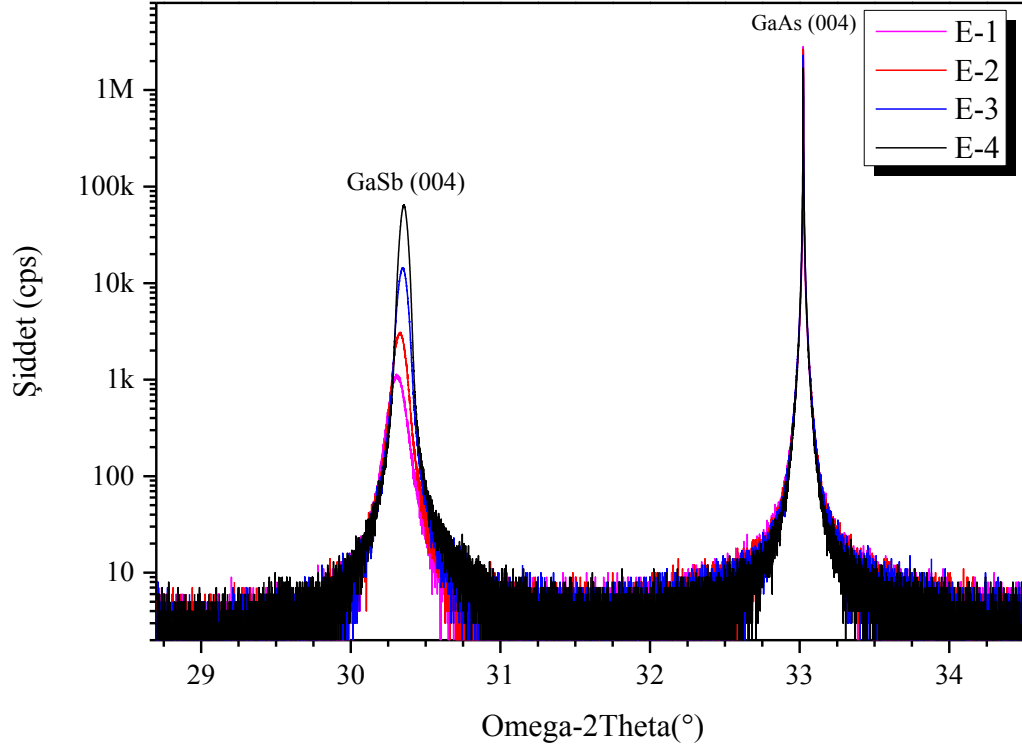
GaSb yüzeyin (2x5) RHEED deseni

**Şekil 3.15.** GaAs ve GaSb yüzeylerden büyüme anında alınmış RHEED görüntüleri, (a, b) GaAs yüzeyin (2x4) RHEED deseni, (c, d) GaAs→GaSb geçişinde gözlenen spot görünümlü RHEED desenleri, (e, f) GaAs→GaSb geçişinde spot görünümünden çizgi görünüme geçiş anını gösteren RHEED desenleri, (g, h) GaSb yüzeyin büyüme anında gözlenen (1x3) RHEED deseni, (i, j) GaSb yüzey soğutulurken yeniden-yapılanma sonrası gözlenen (2x5) RHEED deseni

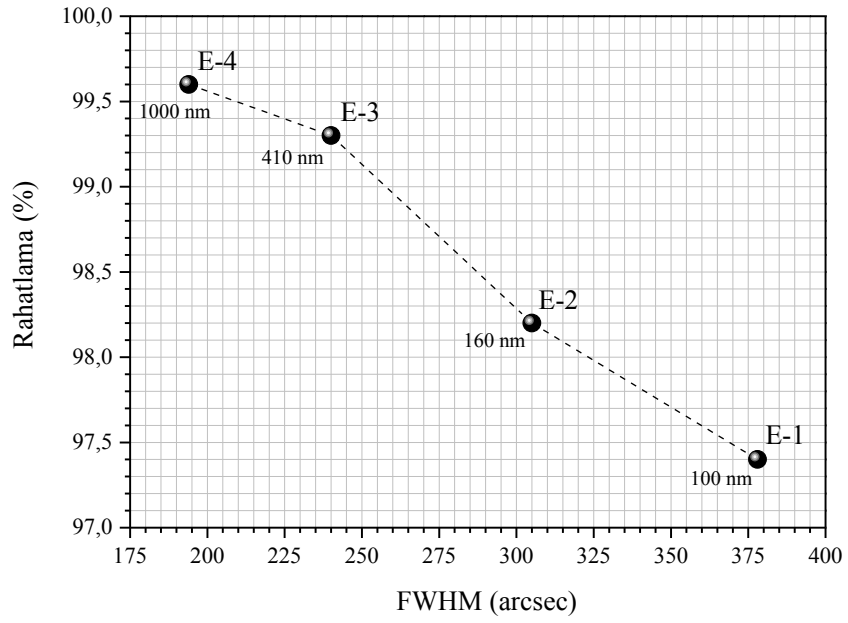
Seçilen  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  ara yüz reçetesi kullanılarak değişen kalınlıklarda (100, 160, 410 ve 1000 nm) büyütülen GaSb epikatmanlara ilişkin bilgiler Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bu gruptaki epikatmanlar  $492\pm 5$  °C sıcaklığında, 0,35 ML/s hızıyla, V/III=5 oranında büyütülmüştür. Örnekler üzerinde yapılan DCXRC analiz sonuçları, GaSb epikatman kalınlığındaki artışın GaSb pikinin şiddetini ve keskinliğini belirgin biçimde arttırdığını göstermektedir (Şekil 3.16). Kalınlıktaki artış ile birlikte GaSb pikinin FWHM değerinde de belirgin bir azalma meydana gelmektedir. Bu azalma büyük ölçüde pik şiddetindeki artışa bağlı gerçekleşmez. Bu durum aynı zamanda kristal kalitesinde görece olarak iyileşmeye işaret etmektedir. DCXRC ölçümlerinde GaSb pikinin kalınlık arttıkça sağa doğru (artan açı yönünde) hafifçe kayması dikkat çeken diğer bir husustur. Söz konusu kayma, artan kalınlıkla birlikte GaSb epikatman yapının kristal örgüsündeki rahatlama miktarındaki artış sebebiyle gerçekleşmektedir. Kristal örgüdeki rahatlama miktarı, katman kalınlığı ile doğru, FWHM değeri ile ters orantılı olarak artmakta 400 nm’nin üzerinde %99’un üzerine çıkmaktadır. Bu, kristal örgünün neredeyse tamamen rahatladığı anlamına gelmektedir (Şekil 3.17).

**Çizelge 3.1.** Aynı  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  ara yüz reçetesinin kullanıldığı farklı kalınlıklardaki GaSb epikatmanlara ilişkin bilgiler

Örnek numarası	$\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$ ara yüz oluşturma reçetesi	GaSb epikatman kalınlığı (nm)
E-1	GaAs yüzey $590\rightarrow 490$ °C sıcaklığına kademeli olarak azaltılan ( $1,00 \times 10^{-6} \rightarrow 7,43 \times 10^{-8}$ Torr) $\text{As}_2$ akısı altında soğutulmuştur. $490$ °C’de $\text{As}_2$ akısı kapatılmış, 10 s beklenerek yüzeye; 20 s Ga (0,35 ML/s) $\text{As}_2$ ( $7,43 \times 10^{-8}$ Torr) $\text{Sb}_2$ ( $2,80 \times 10^{-7}$ Torr) akıları eş zamanlı olarak verilmiştir. $\text{As}_2$ akısı kapatılarak GaSb büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir.	100
E-2		160
E-3		410
E-4		1000
Bu örnek grubunda yer alan örnekler için GaAs tampon katman kalınlıkları 300 nm, GaAs tampon katman büyüme sıcaklığı ise $590\pm 2$ °C’dir.		



Şekil 3.16. E-1, E-2, E-3 ve E-4 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri

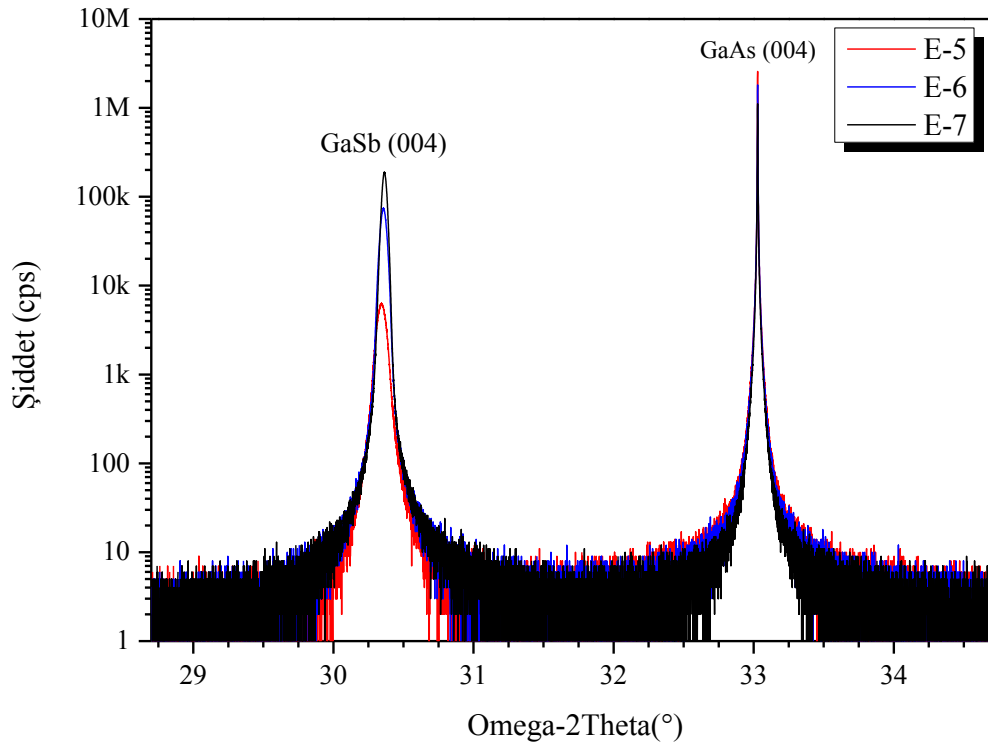


Şekil 3.17. E-1, E-2, E-3 ve E-4 numaralı örneklerin DCXRC analizleri

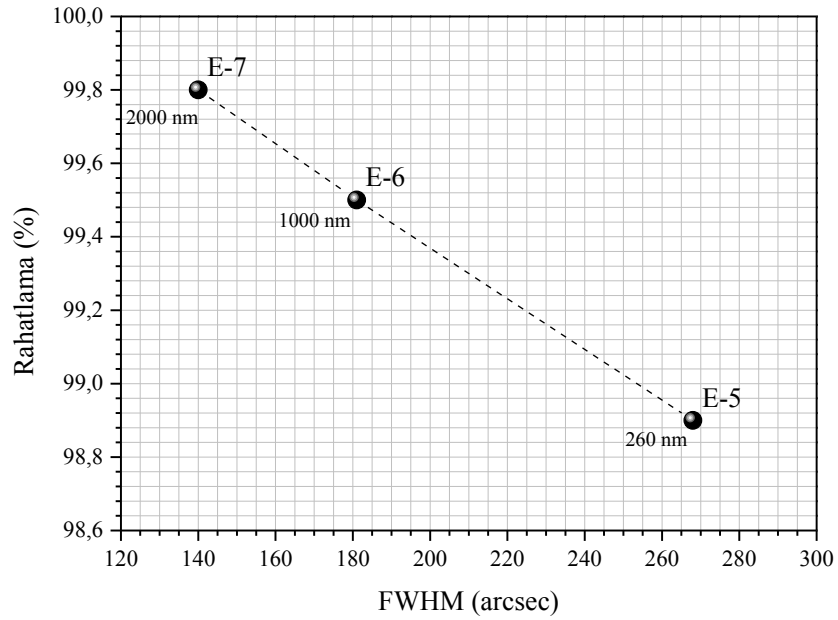
Çizelge 3.2’de bilgileri verilen örnek grubunda da bir önceki örnek grubunda olduğu gibi aynı koşullarda ve değişen kalınlıklarda büyütülen GaSb epikatmanlar incelenmiştir. Bu örnek grubunda GaAs→GaSb geçişinde kullanılan reçete ve GaSb epikatman büyüme hızı bir önceki örnek grubuna göre farklıdır. Gruptaki örnekler, 0,47 ML/s hızı ile 492±5 °C sıcaklığında, V/III=5 oranında büyütülmüştür. Şekil 3.18 ve 3.19’de verilen DCXRC analizlerine bakıldığında sonuçların bir önceki örnek grubuyla aynı doğrultuda olduğu gözlenmektedir. Katman kalınlığı arttıkça GaSb epikatmandaki rahatlama miktarı da artmakta, kristal kalitesinde iyileşme gerçekleşmektedir. FWHM değeri 260 nm’den 2000 nm kalınlığa, 268’den 139 arcsec’a kadar düşmektedir.

**Çizelge 3.2.** Aynı GaAs<sub>x</sub>Sb<sub>(1-x)</sub> ara yüz reçetesi kullanılarak farklı kalınlıklarda büyütülen ikinci grup GaSb epikatman yapılarına ilişkin bilgiler

Örnek numarası	GaAs <sub>x</sub> Sb <sub>(1-x)</sub> ara yüz oluşturma reçetesi	GaSb epikatman kalınlığı (nm)
<b>E-5</b>	GaAs yüzey, 590→490 °C sıcaklığına As <sub>2</sub> (1,00 x 10 <sup>-6</sup> Torr) akısı altında soğutulmuştur. 490 °C ‘de As <sub>2</sub> akısı kapatılarak 10 s beklenmiştir. Ga (0,47 ML/s) ve Sb <sub>2</sub> (4,00 x 10 <sup>-7</sup> Torr) akıları yüzeye aynı anda verilerek GaSb büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir.	<b>260</b>
<b>E-6</b>		<b>1000</b>
<b>E-7</b>		<b>2000</b>
Bu örnek grubunda yer alan örnekler için GaAs tampon katman kalınlıkları 300 nm, GaAs tampon katman büyüme sıcaklığı ise 590±2 °C’dir.		



Şekil 3.18. E-5, E-6 ve E-7 numaralı örneklere ait çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri

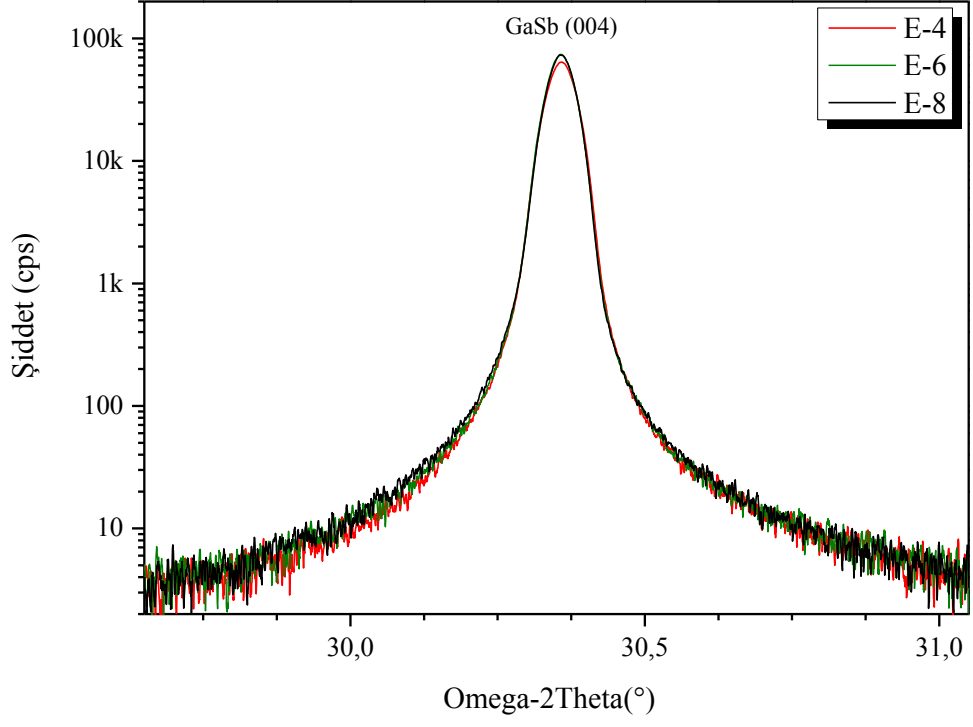


Şekil 3.19. E-5, E-6 ve E-7 numaralı örneklerin DCXRC analizleri

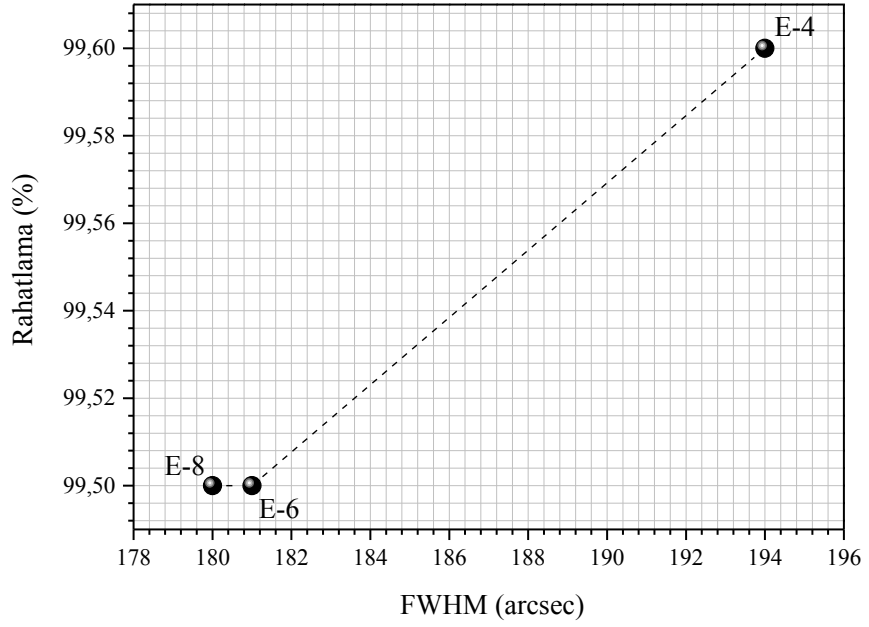
Çizelge 3.3’de farklı reçeteler ile oluşturan  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  ara yüzler üzerine büyütülmüş 1000 nm kalınlığında GaSb epikatmanlara ilişkin reçete bilgileri verilmiştir. Epikatmanlar  $492\pm 5$  °C sıcaklığında, 0,35 ML/s ve 0,47 ML/s büyüme hızlarında, V/III=5-8 oranlarında büyütülmüştür. Bu örnekler üzerinde yapılan DCXRC analizleri ile ulaşılan sonuçlar, Şekil 3.20’de ve Şekil 3.21’de verilmiştir. Analiz sonuçları, E-6 ve E-8 numaralı örneklere ait GaSb piki FWHM değerlerinin E-4 numaralı örneğe kıyasla daha düşük değerde olduğunu göstermektedir. Bu sonuç üzerinden bu iki örneğin kristal kalitesi açısından daha iyi durumda olduklarını söylemek mümkündür. Kristal örgüdeki rahatlama oranları, her üç örnek içinde yakın değerlerdedir.

**Çizelge 3.3.** Farklı biçimlerde oluşturulan  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  ara yüzler üzerine büyütülen 1000 nm kalınlığındaki GaSb epikatman yapılarına ilişkin bilgiler

Örnek numarası	$\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$ ara yüz oluşturma reçeteleri
E-4	GaAs yüzey 590→490 °C sıcaklığına kademeli olarak azaltılan ( $1,00 \times 10^{-6}$ → $7,43 \times 10^{-8}$ Torr) $\text{As}_2$ akısı altında soğutulmuştur. 490 °C’de $\text{As}_2$ akısı kapatılarak 10 s beklenmiştir. Daha sonra GaAs yüzeye; <b>20 s</b> Ga (0,35 ML/s) $\text{As}_2$ ( $7,43 \times 10^{-8}$ Torr) $\text{Sb}_2$ ( $2,80 \times 10^{-7}$ Torr) eş zamanlı olarak verilmiştir. $\text{As}_2$ akısı kapatılarak GaSb epikatman büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir.
E-6	GaAs yüzey, 590→490 °C sıcaklığına $\text{As}_2$ ( $1,00 \times 10^{-6}$ Torr) akısı altında soğutulmuştur. 490 °C’de $\text{As}_2$ akısı kapatılarak 10 s beklenmiştir. Ga (0,47 ML/s) ve $\text{Sb}_2$ ( $4,00 \times 10^{-7}$ Torr) akıları yüzeye aynı anda verilerek GaSb epikatman büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir.
E-8	GaAs yüzey 590→490 °C sıcaklığına $\text{As}_2$ akısı olmadan soğutulmuştur. 490 °C’de yüzeye 60 s $\text{Sb}_2$ ( $6,82 \times 10^{-7}$ Torr) akısı verilmiştir. Ga (0,47 ML/s) kepengi de açılarak GaSb epikatman büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir.
Bu örnek grubunda yer alan örnekler için GaAs tampon katman kalınlığı 300 nm, GaAs tampon katman büyüme sıcaklığı ise $590\pm 2$ °C’dir.	



Şekil 3.20. E-4, E-6 ve E-8 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri



Şekil 3.21. E-4, E-6 ve E-8 numaralı örneklerin DCXRC analizleri

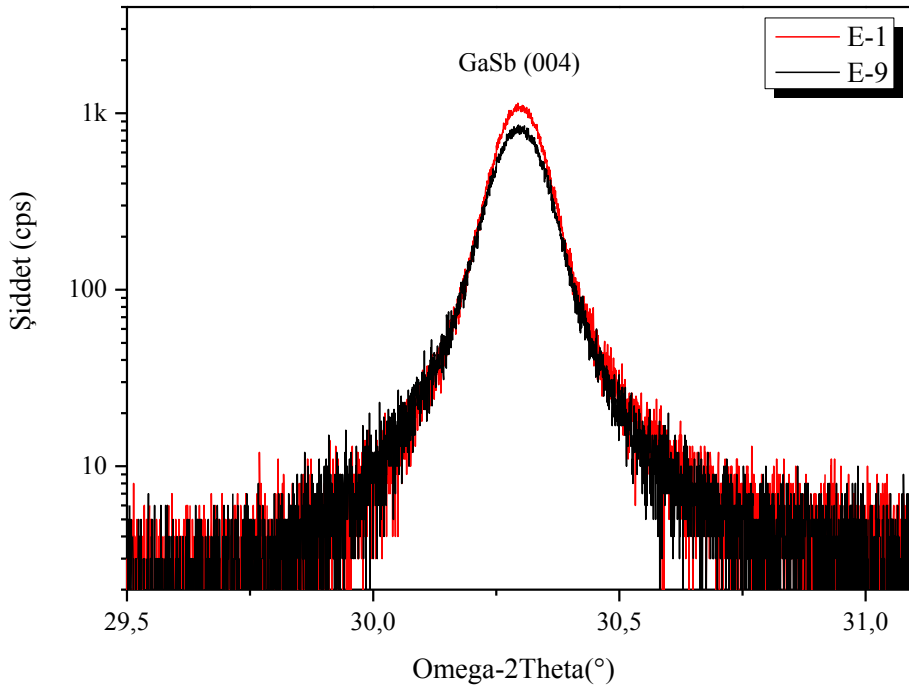
Çizelge 3.4’de farklı  $GaAs_xSb_{(1-x)}$  ara yüz oluşum reçeteleri ve farklı sıcaklıklar kullanılarak büyütülmüş 100 nm kalınlığında GaSb epikatmanlara ilişkin bilgiler bir arada verilmiştir. Bu çizelgede parametreleri verilen örnekler 0,35 ML/s hızı ile  $V/III=5$  oranında büyütülmüştür.

**Çizelge 3.4.** Farklı  $GaAs_xSb_{(1-x)}$  ara yüz oluşum reçeteleri ve farklı sıcaklıklar kullanılarak büyütülmüş 100 nm kalınlığındaki GaSb epikatmanlara ilişkin bilgiler

Örnek numarası	$GaAs_xSb_{(1-x)}$ ara yüz oluşturma reçetesi	GaSb epikatman Büyüme Sıcaklığı (°C)
E-1	GaAs yüzey 590→490 °C sıcaklığına kademeli olarak azaltılan $As_2$ akısı altında soğutulmuştur. 490 °C’de $As_2$ kapatılarak 10 s beklenmiştir. Daha sonra yüzeye; <b>20 s</b> Ga (0,35 ML/s) <b><math>As_2 (7,43 \times 10^{-8} \text{ Torr})</math></b> <b><math>Sb_2 (2,80 \times 10^{-7} \text{ Torr})</math></b>	492±5
E-9	akıları eş zamanlı olarak verilmiştir. $As_2$ akısı kapatılarak GaSb epikatman büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir.	400±10
E-10	GaAs yüzey 590→490 °C sıcaklığına kademeli olarak azaltılan $As_2$ akısı altında soğutulmuştur. 490 °C’de $As_2$ akısı kapatılarak 10 s beklenmiştir. Daha sonra yüzeye; <b>50 s</b> Ga (0,35 ML/s) <b><math>As_2 (7,43 \times 10^{-8} \text{ Torr})</math></b> <b><math>Sb_2 (2,80 \times 10^{-7} \text{ Torr})</math></b>	492±5
E-11	akıları eş zamanlı olarak verilmiştir. $As_2$ akısı kapatılarak GaSb epikatman büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir.	492±5
Bu örnek grubunda yer alan örnekler için GaAs tampon katman kalınlıkları 300 nm, GaAs tampon katman büyüme sıcaklığı ise 590±2 °C’dir.		

E-1 ve E-9 numaralı örneklerde, aynı  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  ara yüz reçetesi, farklı iki sıcaklıkta uygulanarak büyütme sıcaklığının etkisi incelenmiştir. Büyütme sıcaklığı olarak, GaSb epikatmanlar için kullanılan  $492\pm 5$  °C ve InAs/GaSb süperörgülerin büyütüldüğü sıcaklık olan  $400\pm 10$  °C sıcaklıkları seçilmiştir.

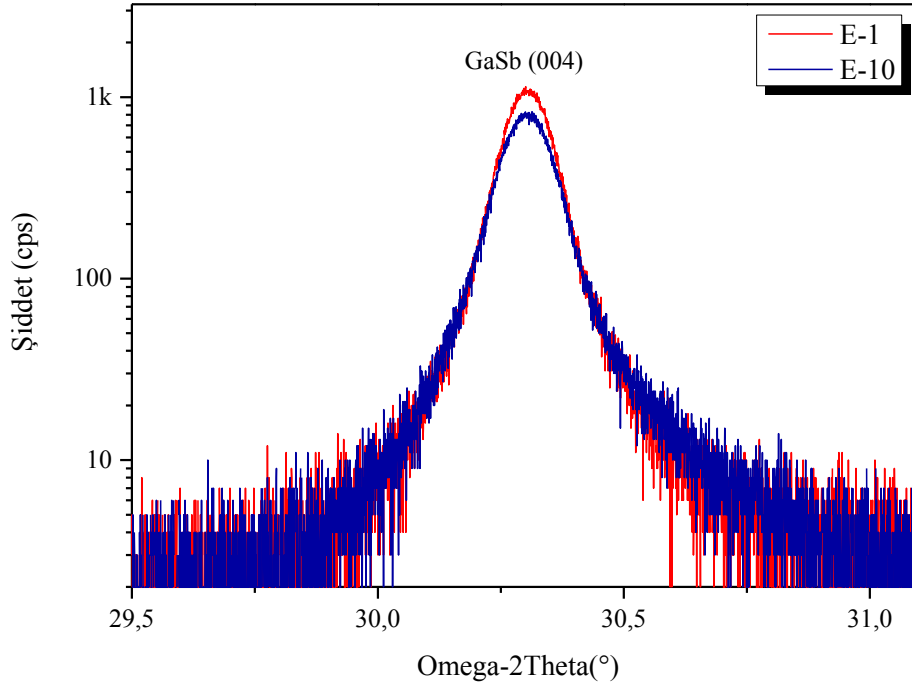
Örneklerin DCXRC analizlerine bakıldığında, yüksek sıcaklıkta büyütülen örneğin diğerine kıyasla kristal kalitesi açısından daha iyi durumda olduğu söylenebilir (Şekil 3.22).  $400\pm 10$  °C sıcaklığında büyütülen örnek (E-9) için FWHM değeri 413 arcsec iken,  $492\pm 5$  °C sıcaklığında büyütülen örnek (E-1) için bu değer, 35 arcsec daha az, 378 arcsec'dir. Örgüdeki rahatlama açısından bakılırsa, yine yüksek sıcaklıkta büyütülen örneğin görece olarak daha iyi durumda olduğunu söylemek mümkündür. Bu değerler, E-1 numaralı örnek için %97,4 iken E-9 numaralı örnek için %97,0'dır.



Şekil 3.22. E-1 ve E-9 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri

E-1 ve E-10 numaralı örneklerde,  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  oluşturulurken kullanılan reçetede Ga,  $\text{As}_2$  ve  $\text{Sb}_2$  uygulama süresi 20 s ve 50 s'dir. Uygulama süresindeki artışın  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  ara yüz oluşumunun kalınlığında artış sağlayacağı öngörülmüş ve bu artışın, üzerine büyütülen GaSb epikatman üzerindeki etkisi DCXRC

analizleri ile belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçlar, yapılan süre artışının epikatman kalitesinde olumsuz yönde etkidiğini göstermektedir. FWHM değeri 378'den 415 arcsec'a artmış, pik şiddeti görel olarak azalmış ve örgüdeki rahatlama %97,4'den %97'ye düşmüştür. Bu iki örneğe ilişkin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri Şekil 3.23'de görülmektedir.



Şekil 3.23. E-1 ve E-10 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri

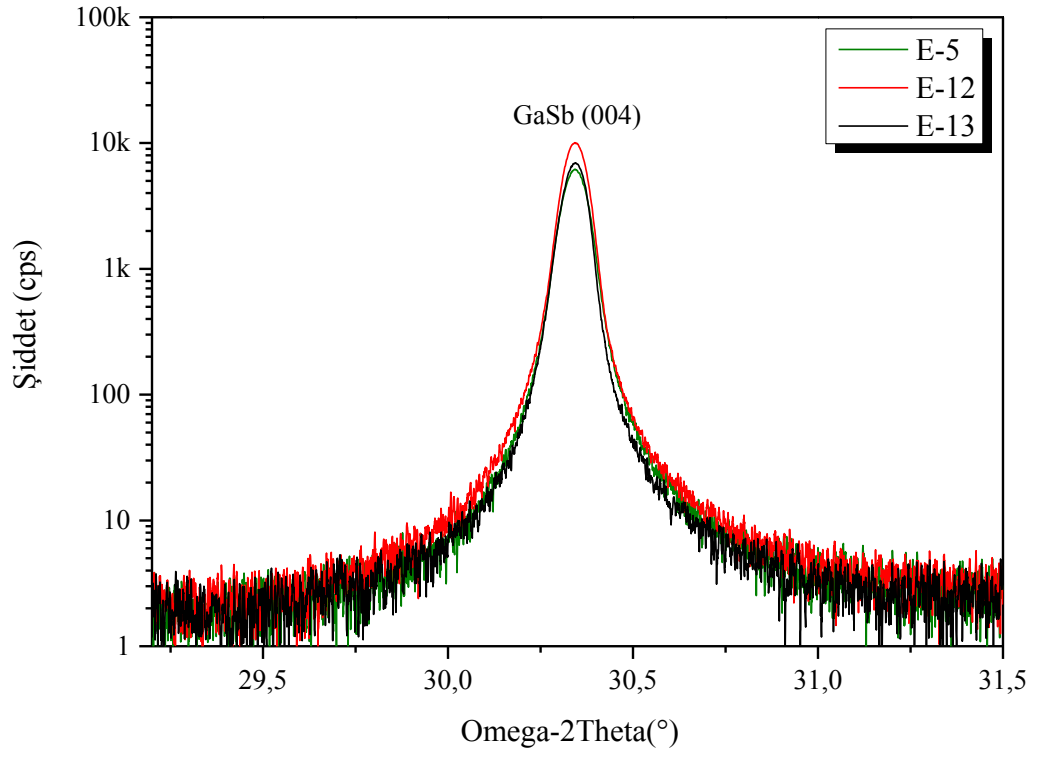
E-11 numaralı örnekte ise E-1 numaralı örnekten farklı olarak  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  oluşturulması esnasında 20 s boyunca Ga ve  $\text{Sb}_2$  ile birlikte aynı anda verilen  $\text{As}_2$  akı miktarı  $7,43 \times 10^{-8}$ 'den  $2,64 \times 10^{-7}$  Torr'a çıkarılmıştır. Bu işlem ile oluşturulan  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  üçlü bileşiğinde arsenik konsantrasyonunun artırılması hedeflenmiştir. Yüksek arsenik oranının, FWHM değerinde artışa (378→400 arcsec) yani kötüleşmeye neden olduğu görülürken, örgüdeki rahatlama açısından iki örnek kıyaslandığında, bu değişikliğin olumlu bir etki yarattığı DCXRC analizlerinden görülmüştür. Arsenikteki artış ile birlikte, E-1 örneğinde %97,4 olan rahatlama miktarı E-11 örneğinde %97,9'a yükselmiştir.

Çizelge 3.5’de büyütme parametreleri verilen örneklerin kalınlıkları aynı olup E-5 ile E-12 numaralı örnekler arasındaki tek fark V/III oranı, E-12 ile E-13 numaralı örnekler arasındaki tek fark ise GaAs→GaSb geçişinde kullanılan ara yüz reçetesidir. DCXRC sonuçlarına bakılırsa, GaSb-V/III oranındaki artış epikatman kalitesine olumlu yansımış, örgüdeki FWHM değerinde düşüş sağlamıştır. E-12 ve E-13 numaralı örneklerin FWHM değerleri birbirine çok yakın iken E-13 numaralı örnekte örgüdeki rahatlama miktarındaki düşüş dikkat çekici bir sonuçtur (Şekil 3.24 ve 25).

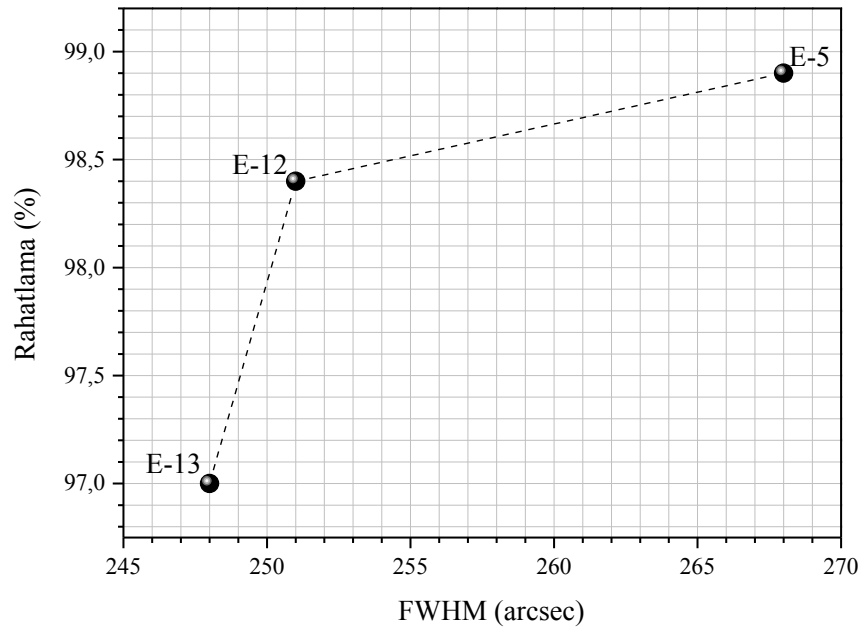
**Çizelge 3.5.** Farklı biçimlerde oluşturulan  $GaAs_xSb_{(1-x)}$  ara yüz üzerine büyütülen 260 nm kalınlığındaki GaSb epikatman yapılarına ilişkin bilgiler

Örnek numarası	GaAs <sub>x</sub> Sb <sub>(1-x)</sub> ara yüz oluşturma reçetesi	GaSb epikatman büyüme parametreleri			
		Kalınlık (nm)	Büyüme Hızı (ML/s)	V/III oranı	Sıcaklık (°C)
<b>E-5</b>	GaAs yüzey 590→490 °C sıcaklığına As <sub>2</sub> (1,00 x 10 <sup>-6</sup> Torr) akısı altında soğutulmuştur. 490 °C’de As <sub>2</sub> akısı kapatılarak beklenmeden Ga (0,47 ML/s) ve Sb <sub>2</sub> ( <b>4,00 x 10<sup>-7</sup> Torr</b> ) akıları açılmış ve GaSb epikatman büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir.	260	0,47	<b>5</b>	495±5
<b>E-12</b>	GaAs yüzey 590→490 °C sıcaklığına As <sub>2</sub> (1,00 x 10 <sup>-6</sup> Torr) akısı altında soğutulmuştur. 490 °C’de As <sub>2</sub> akısı kapatılarak beklenmeden Ga (0,47 ML/s) ve Sb <sub>2</sub> ( <b>6,82 x 10<sup>-7</sup> Torr</b> ) akıları açılarak GaSb epikatman büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir.	260	0,47	<b>8,2</b>	495±5
<b>E-13</b>	GaAs yüzey 590→490 °C sıcaklığına Sb <sub>2</sub> (6,82 x 10 <sup>-7</sup> Torr) akısı altında soğutulmuştur. 490 °C’de Ga kepengi açılarak GaSb epikatman büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir.	260	0,47	<b>8,2</b>	495±5

Bu örnek grubunda yer alan örnekler için GaAs tampon katman kalınlıkları 300 nm, GaAs tampon katman büyüme sıcaklığı ise 590±2 °C’dir.



Şekil 3.24. E-5, E-12 ve E-13 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri



Şekil 3.25. E-5, E-12 ve E-13 numaralı örneklerin DCXRC analizleri

Çalışmanın bu bölümünde ele alınan örnekler üzerinde yapılan analiz sonuçları genel olarak değerlendirilecek olursa;

☞ GaSb epikatman kalınlığındaki artışla birlikte GaSb epikatman kalitesinde önemli ölçüde iyileşme sağlanmaktadır. Kristal örgüdeki örgü uyumsuzluğu sebebiyle oluşan zorun yaklaşık 400 nm ve üzeri kalınlıklarda tümüyle rahatladığı görülmektedir.

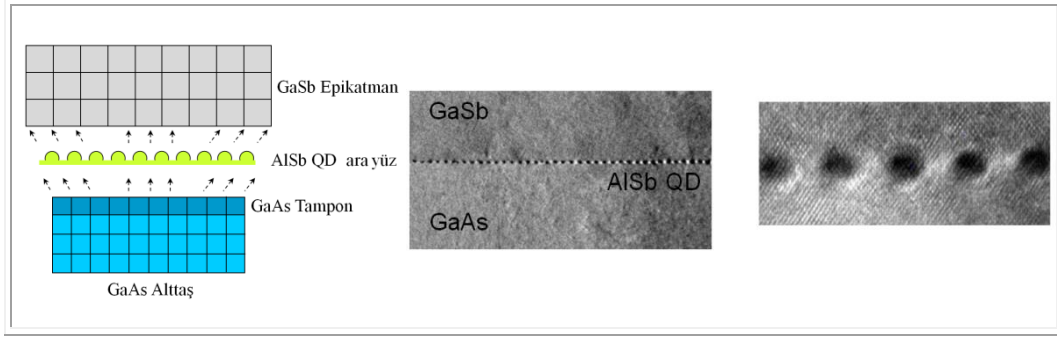
☞ GaSb epikatman büyüme sıcaklığının kristal kalitesi üzerinde belirgin bir etkisi söz konusudur. InAs/GaSb SL yapıların büyütüldüğü sıcaklıkların ( $400 \pm 10$  °C), yüksek kalitede GaSb epikatman büyütülmesi için uygun olmadığı görülmektedir. Süperörgülerin InAs katmanlar sebebiyle belirtilen sıcaklıklarda büyütülmesi kaçınılmazdır. Ancak, SL öncesindeki GaSb tampon ve kontak epikatmanların yüksek sıcaklıklarda büyütülmesinin yapının genel kalitesine olumlu yansıtacağı öngörülmektedir.

☞ Yüksek V/III oranının epikatman kalitesine olumlu etkileri söz konusur.

☞  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  ara yüz oluşumunun epikatman kalitesine pozitif yönde etkileri olduğu sonucuna varılmıştır.  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  ara yüz kalınlığındaki ve V-grubu konsantrasyonundaki (yani üçlü bileşikteki x değerinin) değişiminin GaSb epikatman kalitesi üzerinde hissedilir etkileri olmaktadır.

### **3.2.3. AlSb kuantum nokta ara yüz kullanılarak büyütülen GaSb epikatman örnekler**

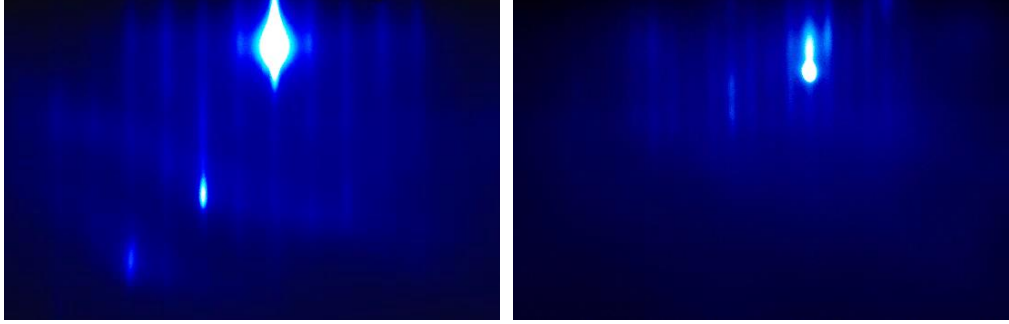
Bu tez kapsamındaki epikatman çalışmalarında GaAs→GaSb geçişinde kullanılan diğer bir ara yüz formu ise AlSb kuantum nokta (QD) yapılarıdır. AlSb, 6,1 Å ailesinin bir üyesi olup örgü parametresi ( $a_{\text{AlSb}} = 6,1355$  Å) açısından InAs ve GaSb ile büyük ölçüde uyumludur. GaAs ile %7'nin üzerindeki örgü uyumsuzluğu, GaAs üzerine AlSb QD oluşturmayı olanaklı kılmaktadır. GaAs üzerine oluşturulan AlSb QD yüzeyin (Şekil 3.26) GaSb'ye geçişini kolaylaştıracağı, örgü uyumsuzluğuna bağlı kusurları azaltacağı öngörülmüş ve bu öngörüğü doğrulamak amacıyla örnekler büyütülmüştür.



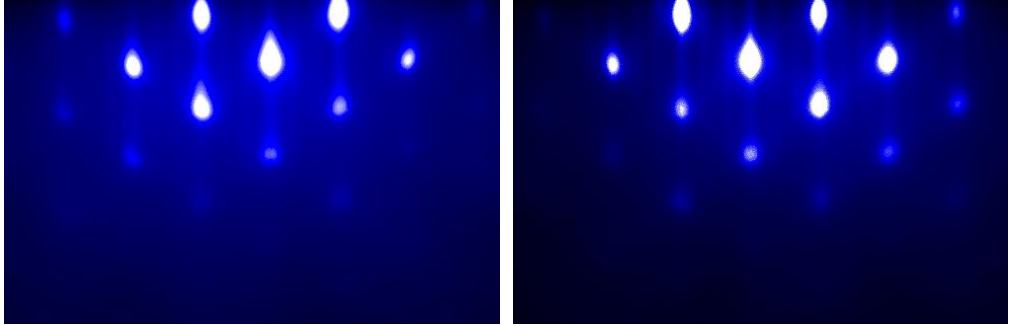
Şekil 3.26. AlSb QD ara yüzün TEM-BF görüntüleri

GaAs alttaşlar üzerine GaAs tampon katman büyütüldükten sonra yüzey,  $As_2$  akısı altında GaAs büyütme sıcaklığından ( $590 \pm 2$  °C), AlSb kuantum noktaların büyütüleceği sıcaklığa ( $450 \pm 1$  °C) soğutulmuştur. Soğutma esnasında sıcaklıktaki düşüşle birlikte yüzeydeki  $As_2$  akısı da kademeli olarak azaltılmış ve  $450$  °C’de tamamen kapatılmıştır. 30 saniye beklendikten sonra yüzeye belirli sürelerde (66, 100, 200 s) Al ve  $Sb_2$  akıları eş zamanlı verilerek AlSb kuantum nokta oluşumu sağlanmıştır. Kullanılan Al hücre sıcaklığında AlSb’nin büyüme hızı oldukça düşük olduğundan ( $<0,1$  ML/s) AlSb kalınlığını epitaksiyel parametreler açısından ifade etmek oldukça zor bir durumdur. Bu sebeple AlSb QD kalınlıkları için Al ve  $Sb_2$  akılarının aynı anda açık olduğu süreler ölçüt olarak kabul edilmiştir. Daha sonra, AlSb QD oluşturulmuş yüzey,  $Sb_2$  akısı altında GaSb epikatmanların büyütüleceği sıcaklığa ( $500 \pm 2$  °C) ısıtılmış ve yüzeye Ga akısı verilerek GaSb epikatman büyütme işlemi gerçekleştirilmiştir. GaAs alttaş üzerindeki GaSb epikatman kalınlığı arttıkça, GaSb’nin bant aralığı GaAs’dan daha küçük olduğundan alttaş ilk durumuna oranla daha fazla ısı soğurmakta ve ısınmaktadır. Bu sebeple, büyütme sırasında alttaş sıcaklığı ısıtıcı sıcaklığı düşürülerek kontrol altında tutulmuş, örneğin ısınarak büyüme kararlılığını kaybetmesinin önüne geçilmiştir. Bu gruptaki örneklerde alttaş sıcaklığının başlangıçta (ilk 5 dk)  $515$  °C kadar çıkmasına izin verilmiş ve daha sonra sıcaklık kontrollü ve yavaş bir biçimde  $500$  °C’ye düşürülerek, bu sıcaklıkta büyütme devam edilmiştir. Örnekler büyütülürken alınan RHEED görüntülerine örnekler Şekil 3.27’de ardışık olarak verilmiştir. AlSb QD oluşum anında, yüzeydeki spotlar yani üç boyutlu (3D) oluşumların yansıması oldukça belirgin bir biçimde

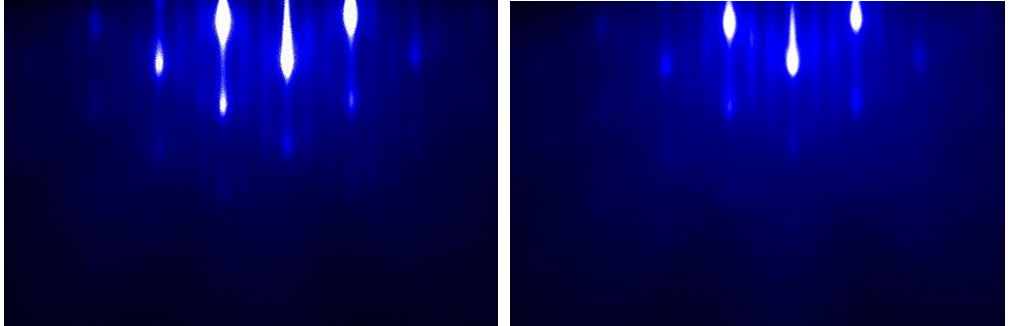
gözenmiştir. Üç boyutlu yüzey, GaSb epikatmana geçildikten sonra tekrar 2 boyutlu (çizgi görünümlü) yüzey yapısını işaret eden görünümü almıştır.



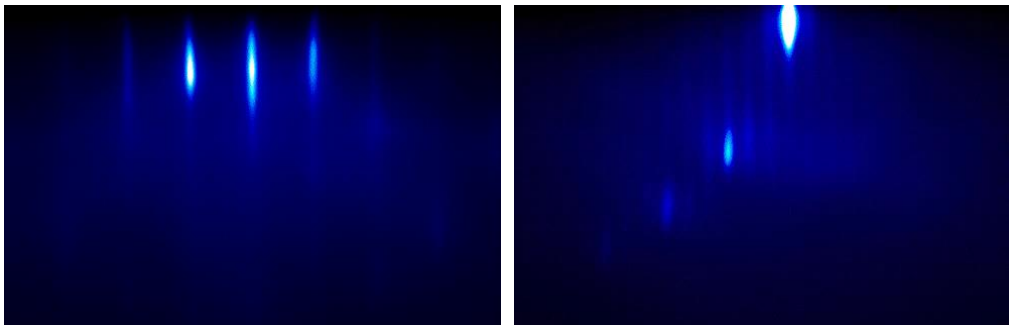
GaAs yüzey (2x4) RHEED deseni



GaAs Yüzeye Al ve Sb<sub>2</sub> verildikten 40 s sonra AlSb QD yüzeyin görünümü



GaSb epikatman büyüme başladıktan 1 dk sonrası yüzeyin görünümü

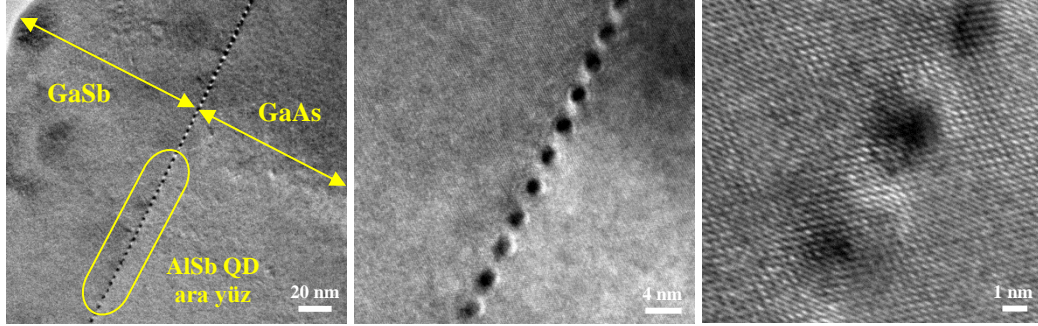


GaSb yüzeyin (1x3) RHEED deseni

Şekil 3.27. AlSb QD öncesi, oluşturulurken ve sonrası örnek yüzeyinde oluşan RHEED desenleri

Aşağıdaki kısımda, farklı zamanlarda büyütülen iki farklı örnek grubuna ilişkin deneysel çalışmalar sunulmuştur.

İlk grupta büyütülen örneklerin büyütme parametreleri Çizelge 3.6'da verilmiştir. Bu gruptaki bütün örneklerde AlSb QD kalınlığı ve büyüme reçetesi sabit tutulmuş, GaSb epikatmanlarda 3 farklı V/III oranı kullanılarak V/III oranının GaSb epikatman kalitesine etkisi araştırılmıştır. E-14 ve E-17 numaralı örnekler ile de sabit V/III oranında, kalınlığın kristal kalitesine olan etkisi gözlenmeye çalışılmıştır. Şekil 3.28'de bu grupta yer alan örneklerden alınan TEM görüntüleri sunulmuştur. Görüntülerde, AlSb QD ara yüz, GaAs tampon katman ve GaSb epikatman arasında oldukça belirgin bir hat boyunca uzanmaktadır.



Şekil 3.28. AlSb QD ara yüz oluşumlarının görüldüğü TEM görüntüleri [42]

Çizelge 3.6. E-14, E-15, E-16 ve E-17 numaralı örneklerin büyütme parametreleri

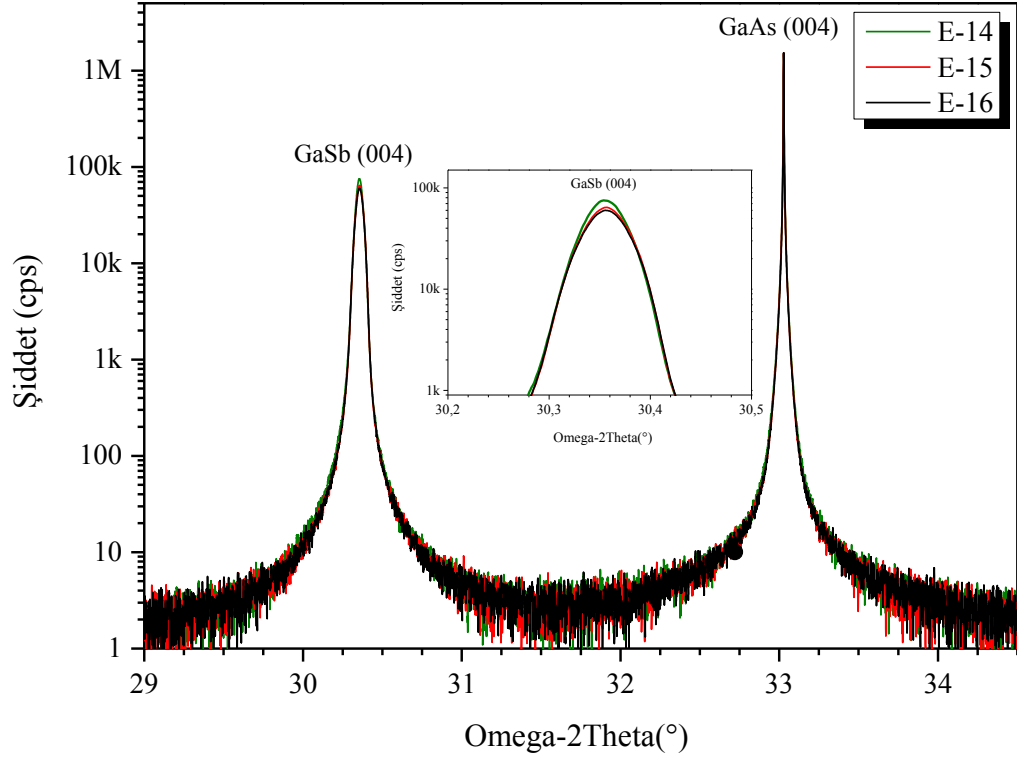
Örnek numarası	GaAs Tampon		AlSb kuantum nokta ara yüz		GaSb epikatman büyüme parametreleri			
	Kalınlık (nm)	Büyüme Sıcaklığı (°C)	AlSb oluşturma süresi (s)	Büyüme Sıcaklığı (°C)	Kalınlık (nm)	Büyüme Hızı (ML/s)	V/III oranı	Büyüme Sıcaklığı (°C)
<b>E-14</b>	175	583±2	66	450±1	1000	0,47	<b>20</b>	500±2
<b>E-15</b>	175	583±2	66	450±1	1000	0,47	<b>10</b>	500±2
<b>E-16</b>	175	583±2	66	450±1	1000	0,47	<b>5</b>	500±2
<b>E-17</b>	175	583±2	66	450±1	3000	0,47	<b>20</b>	500±2

E-14, E-15 ve E-16 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri Şekil 3.29'da, E-17 numaralı örneğin sallantı eğrisi ise E-14 numaralı örnekle birlikte Şekil 3.30'da verilmiştir. DCXRC ölçümleri üzerinde yapılan analiz sonuçları ise Çizelge 3.7'de özetlenmiştir. Epikatman örneklerin DCXRC ölçümleri, GaAs (0 0 4) simetri eksenine etrafında,  $\frac{1}{4}$  derece sapma açıklığına sahip yarı (divergence slit) ve piksel dedektörde 11 aktif kanal kullanılarak  $0,0005^\circ$  hassasiyetle alınmıştır.

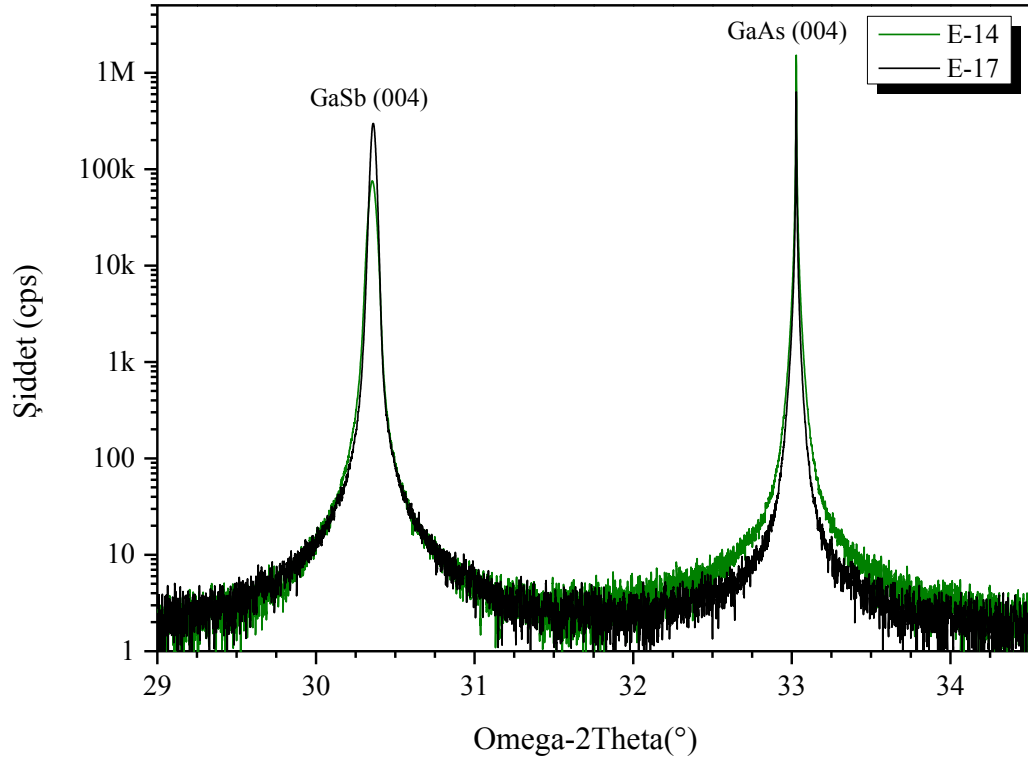
Ölçüm sonuçları, V/III oranı 10 ve 20 olan örneklerin birbirine oldukça yakın karakterde davrandığını ancak 5 oranında büyütülen örneğe ait GaSb pikinin FWHM değerinin ve kristal örgüdeki rahatlama oranının görece olarak daha kötü olduğunu göstermektedir. Çalışmada, 1  $\mu\text{m}$  kalınlık için en düşük FWHM değerine (173 arcsec) E-14 numaralı örnek ile ulaşılmıştır. Epikatman kalınlığının 3  $\mu\text{m}$ 'a çıkarıldığı E-17 numaralı örneğe ait FWHM değerinin 115 arcsec'a kadar düştüğü, yapıdaki stresin bütünüyle rahatladığı (%99,8) görülmektedir. Bu değer, 1  $\mu\text{m}$  kalınlığındaki diğer örnekler için de %99'un üzerindedir (Çizelge 3.7).

**Çizelge 3.7.** E-14, E-15, E-16 ve E-17 numaralı örneklerin DCXRC analiz sonuçları

Örnek numarası	GaSb-FWHM (arcsec)	Rahatlama
<b>E-14</b>	173	% 99,4
<b>E-15</b>	185	% 99,5
<b>E-16</b>	187	% 99,4
<b>E-17</b>	115	% 99,8

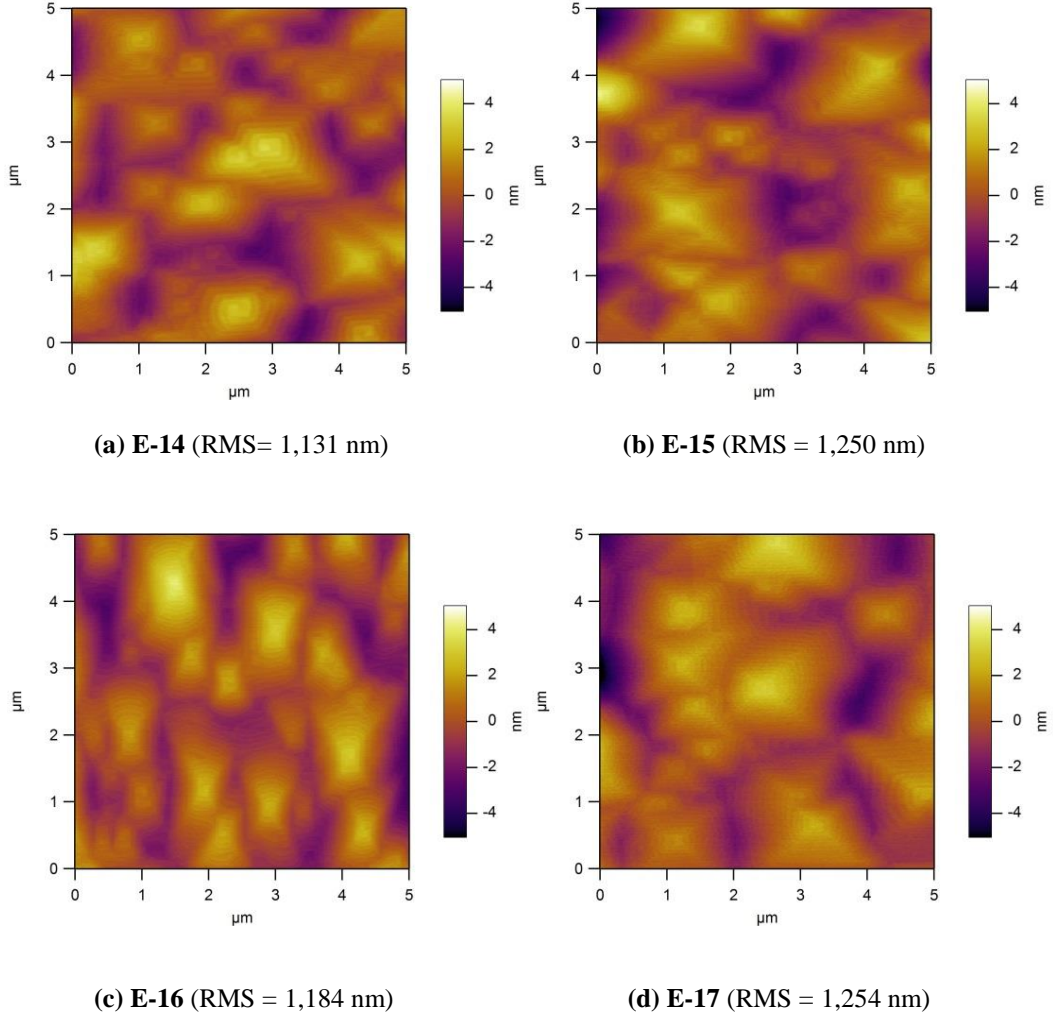


Şekil 3.29. E-14, E-15, ve E-16 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri



Şekil 3.30. E-14 ve E-17 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri

Büyütülen örneklerin yüzey pürüzlülüğünü analiz etmek üzere yapılan AFM ölçümleri ve bu ölçümlerden elde edilen yüzey pürüzlülüklerinin karekök ortalama (root mean square, RMS) değerleri Şekil 3.31a-d'de sunulmuştur. Sonuçlardan, örneklerin RMS değerlerinin 1,1-1,3 nm aralığında olduğu görülmektedir.



**Şekil 3.31.** AlSb QD ara yüz üzerine büyütülen GaSb epikatmanların AFM analizleri

İkinci grupta büyütülen örneklere ilişkin bilgiler ise Çizelge 3.8'de verilmiştir. E-18, E-19 ve E-20 numaralı örneklerde AlSb QD oluşturma süresi sırasıyla 66, 100 ve 200 s'dir. Bu örnek grubu ile AlSb QD oluşturma süresinin GaSb epikatman kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. E-21 ve 22 numaralı

örneklerde ise GaSb epikatmanlar, AlSb QD'ların oluşturulduğu sıcaklığın ~10 °C yukarısında ve iki farklı kalınlıkta büyütülmüştür.

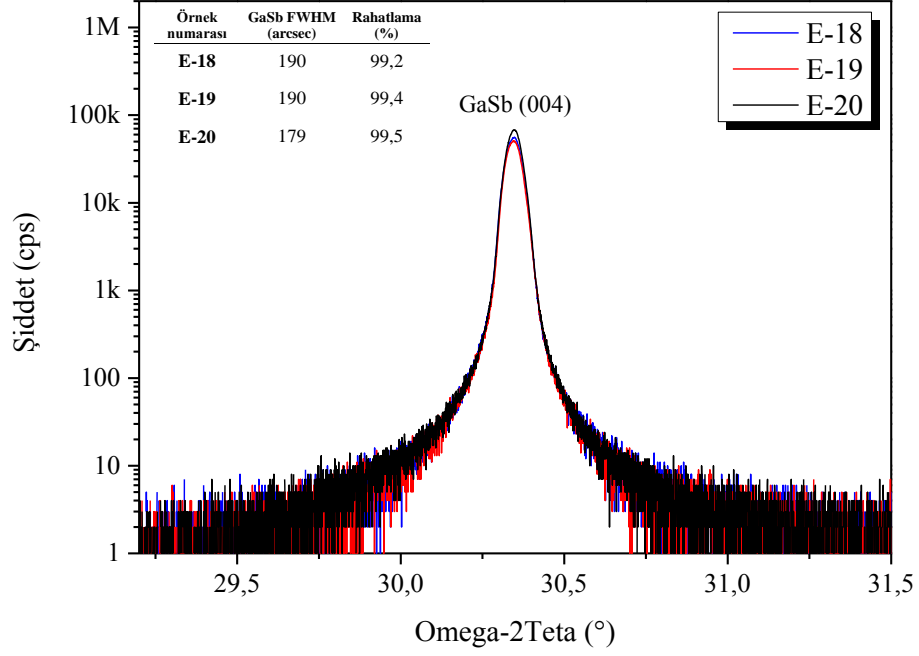
**Çizelge 3.8.** E-18-22 numaralı örneklerin büyütme değişkenleri

Örnek numarası	GaAs Tampon büyüme parametreleri		AlSb kuantum nokta ara yüz		GaSb epikatman büyüme parametreleri			
	Kalınlık (nm)	Büyüme Sıcaklığı (°C)	AlSb oluşturma süresi (s)	Büyüme Sıcaklığı (°C)	Kalınlık (nm)	Büyüme Hızı (ML/s)	V/III oranı	Büyüme Sıcaklığı (°C)
<b>E-18</b>	300	592±1	<b>66</b>	451±2	1000	0,4	20	505±5
<b>E-19</b>	300	592±1	<b>100</b>	452±2	1000	0,4	20	505±5
<b>E-20</b>	300	592±1	<b>200</b>	452±2	1000	0,4	20	505±5
<b>E-21</b>	300	592±1	100	452±2	<b>1000</b>	0,4	20	<b>465±3</b>
<b>E-22</b>	300	592±1	100	452±2	<b>3500</b>	0,4	20	<b>465±3</b>

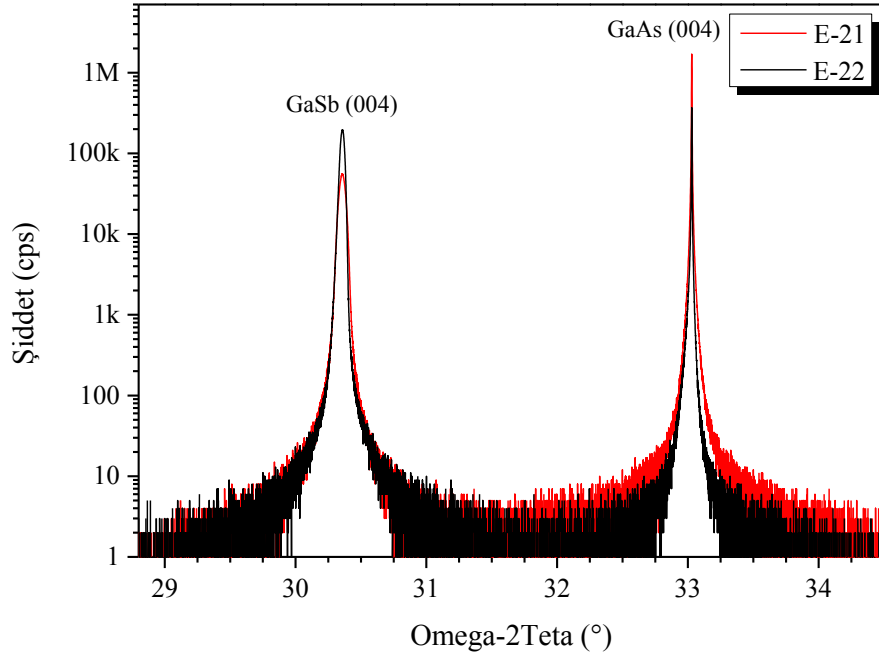
E-18, E-19 ve E-20 numaralı örneklerde uygulama sürelerindeki değişim ile QD boyutlarında değişim sağlamak amaçlanmıştır. Şekil 3.32'da verilen DCXRC analiz sonuçlarına bakıldığında, GaSb pikinin FWHM değerleri, E-18 ve 19 numaralı örnekler için aynı değerde olduğu, QD uygulama süresinin en fazla olduğu E-20 numaralı örneğe ait değer ise 10 arcsec daha aşağıda yani daha iyi olduğu görülmektedir. Bu sonuç, AlSb QD uygulama süresindeki artışın 100 saniyenin üzerinde pozitif yönde bir değişim sağladığına işaret etmektedir. GaSb pikinin FWHM değeri, E-19 numaralı örnek için 190 arcsec iken AlSb QD kalınlığının daha fazla olduğu E-20 numaralı örnek için 179 arcsec'dir. Kristal örgüdeki rahatlama miktarları da bu sonucu destekler niteliktedir. Örneklerin üçü için de rahatlama miktarı %99'un üzerinde olup örgüdeki zorun bütünüyle yenilmiş/giderilmiş olduğunu söylemek mümkündür.

E-21 ve E-22 numaralı örneklerin DCXRC analizlerine bakıldığında (Şekil 3.33), epikatman kalınlığındaki artışın GaSb pikinin FWHM değerinde önemli ölçüde düşüş sağladığı görülmektedir. 3500 nm kalınlığındaki E-22 numaralı örnek için FWHM değeri 133 arcsec iken, yaklaşık 1000 nm kalınlığındaki E-21 numaralı örnek için bu değer 197 arcsec'dir. Ayrıca, E-19 ve E-21 numaralı örnekler birlikte ele alınırsa, GaSb epikatmanı düşük sıcaklıklarda büyütmenin

kristal kalitesi üzerinde olumsuz bir etki yarattığı görülmektedir.  $505\pm 5$  °C’de büyütülen epikatman için FWHM değeri,  $190$  arcsec iken  $465\pm 3$  °C ’de büyütülen örnek için  $197$  arcsec’dir.



Şekil 3.32. E-18, E-19 ve E-20 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri



Şekil 3.33. E-21 ve E-22 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri

Bu bölümünde ele alınan örnekler üzerinde yapılan analiz sonuçları da bir önceki bölümde olduğu gibi genel olarak değerlendirilecek olursa;

☞ GaSb epikatman kalitesinde en yüksek değere V/III oranının 20 olduğu örnek ile ulaşılmıştır.

☞ AlSb QD ara yüz uygulama süresinin yani QD boyutunun epikatman kalitesine yansıyan belirgin etkisi söz konusudur.

☞ AlSb QD ve GaAs<sub>x</sub>Sb<sub>(1-x)</sub> ara yüz uygulanan örneklerden benzer kalınlığa sahip olanlar birlikte değerlendirildiğinde AlSb QD ara yüz uygulamasının görece olarak daha başarılı olduğu görülmektedir.

☞ Bu kısımda ele alınan örneklerde de GaSb epikatman kalınlığındaki artışla birlikte GaSb epikatmana ait DCXRC piklerinin FWHM değerlerinde önemli ölçüde azalma meydana gelmektedir.

☞ Düşük sıcaklıklarda (<480 °C) yapılan büyütmelemin GaSb epikatman kalitesine olumsuz etkileri söz konusudur.

#### **4. InAs/GaSb TİP-II SL FOTODEDEKTÖR YAPILARIN EPİTAKSİYEL BÜYÜTME VE KARAKTERİZASYON ÇALIŞMALARI**

Çalışmanın bu bölümünde, InAs/GaSb Tip-II SL fotodedektör yapıların GaSb ve GaAs alttaşlar üzerine büyütülmesinde edinilen deneyimler ile üretilen fotodiyotların yapısal, elektriksel ve optik karakterizasyon sonuçları sunulmuştur.

##### **4.1. InAs/GaSb Tip-II SL Fotodedektör Yapıları GaSb Alttaşlar Üzerine Büyütme Çalışmaları**

InAs/GaSb SL yapılar için örgü uyumu açısından en uygun alttaş SL yapıyı oluşturan malzemeler yani InAs ve GaSb alttaşlardır. Ancak, bu yapılar yüksek kaliteye sahip GaSb alttaş üretim teknolojisinin InAs'e kıyasla daha gelişmiş olması ve bu nedenle, InAs alttaşlardan daha büyük boyutlarda (4 inç kadar) ve daha düşük maliyetle üretilibilmeleri nedeniyle yaygın olarak GaSb alttaşlar üzerine büyütülmektedir. Ayrıca, MBE sisteminde InAs alttaş ile çalışırken oksit kaldırma ve sonrasındaki InAs tampon katman büyütme süreçlerinde ana hazneye uzun süre yoğun arsenik verilmesi kaçınılmaz olacaktır bu durumun SL yapılarında istenmeyen arsenik kontaminasyonunu artıran bir etken olabileceği düşünülmektedir. Antimon, bu açıdan arseniğe kıyasla daha avantajlı olup kısa sürede ana haznedeki miktarında hızlı bir azalma sağlanabilmektedir. Bu durum da GaSb alttaşlarla çalışmayı süperörgüler için daha avantajlı kılmaktadır.

Çalışmanın bu aşamasında, seçilen InAs/GaSb SL yapılar, GaAs alttaşlar üzerine büyütülmeden önce GaSb alttaşlar üzerine büyütülerek, süperörgüler için büyüme parametreleri ve ara yüz özellikleri açısından uygun reçetenin oluşturulması hedeflenmiştir. Bu amaçla, MWIR ve LWIR bölgede çalışmak üzere tasarlanmış InAs/GaSb Tip-II SL fotodedektör yapıları GaSb alttaşlar üzerine setler halinde büyütülmüş ve karakterizasyonları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ilgili başlıklar altında ilerleyen bölümlerde sunulmuştur.

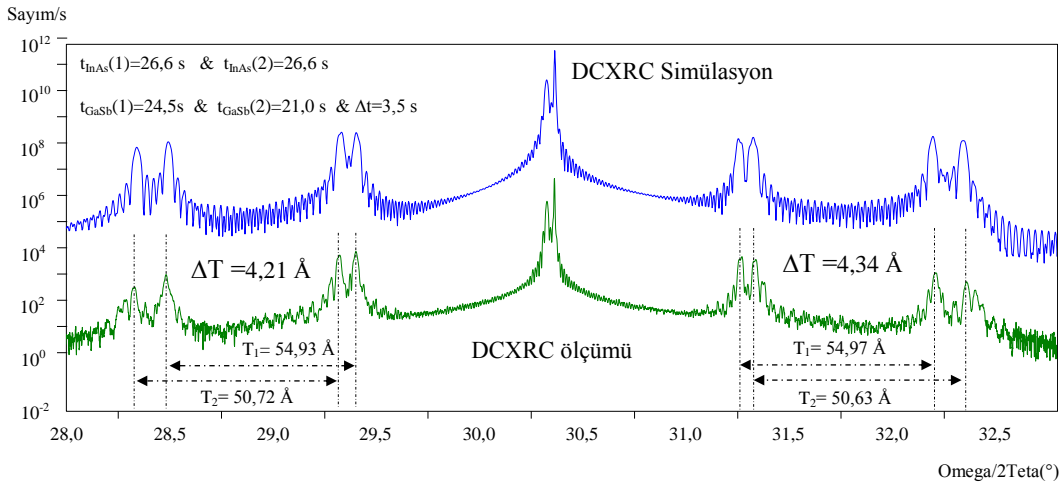
#### 4.1.1. GaSb alttaşlar üzerine büyütülen InAs/GaSb SL yapılarda kullanılan epitaksiyel büyütme basamakları ve parametreleri

GaSb alttaşlar üzerine büyütülen InAs/GaSb süperörgülerde, SL içerisindeki InAs katmanlar 0,29 ML/s ( $In_{BEP}=7,54 \times 10^{-8}$  Torr) hızıyla, V/III=6-10 arasındaki oranlarda büyütülmüştür. Süperörgünün üzerine büyütülen InAs üst kontak (şapka) katmanı ise yine aynı büyüme hızı ile V/III=4-5 arasındaki oranlarda büyütülmüştür. SL içerisindeki GaSb katmanlar için büyüme hızı olarak 0,33 ML/s ( $Ga_{BEP}=5,70 \times 10^{-8}$  Torr), V/III oranı olarak 5-8 arasında oranlar, süperörgü öncesinde büyütülen GaSb tampon ve GaSb kontak katmanı için ise 0,47 ML/s ( $Ga_{BEP}=8,20 \times 10^{-8}$  Torr) büyüme hızı, 10-13 arasında V/III oranları kullanılmıştır. GaSb tampon ve sonrasında üzerine büyütülen GaSb kontak katmanları kalın olmaları sebebiyle, bu katmanlar büyütülürken SL yapı içerisindeki GaSb katmanlara göre daha yüksek büyüme hızları kullanılmıştır. Düşük büyüme hızlarının kristal kalitesine olumlu yönde etkileri göz önüne alınarak, büyüme hızı SL yapı içerisinde düşürülmüştür. Malzeme akı oranları, büyüme kararlılığının kontrolü açısından her büyütme işlemi öncesinde düzenli olarak ölçülmüş ve zaman içerisindeki değişimlerin büyütme etkilemesinin önüne geçilmeye çalışılmıştır. Akı ölçümü, sistemde bulunan özel bir iyon ölçer (Beam Flux Monitor, BFM) yardımıyla yapılmıştır. Örneklerin tümünde, V-grubu malzemeleri ikili (dimer) formda ( $As_2$  ve  $Sb_2$ ) kullanılmıştır. Arsenik ve antimon hücreleri için bağ kırıcı bölüm (cracker) sıcaklığı, her iki malzemeye ait hücre için de 900 °C olarak belirlenmiştir. Büyüme hızları, büyütülen kalibrasyon örnekleri üzerinden HRXRD, TEM ve SEM analizleri yardımıyla belirlenmiştir. InAs ve GaSb için büyüme hızları, aynı koşullarda büyütülmüş farklı periyoda sahip iki SL örnek üzerinden ya da aynı örnek üzerine büyütülen iki farklı periyoda sahip süperörgüler üzerinde yapılan DCXRC analizleriyle belirlenebilmektedir. TEM analizleri ile de elde edilen büyüme hızı değerlerinin doğruluğu desteklenmektedir. Şekil 4.1'de iki farklı SL periyodu olan bir örneğe ilişkin çift-kristal X-ışını sallantı eğrisi ve bu ölçümün simülasyonu örnek olarak verilmiştir. Bu örnekte 60 tekrarlı süperörgü içerisindeki InAs katman büyüme süresi (26,6 s) sabit tutulmuş ve GaSb katmanlar ilk 30 tekrarda 24,5 s, ikinci 30 tekrarda ise 21

s olarak büyütülmüştür. Büyütülen örneğe ait sallantı eğrisi analizinden (Şekil 4.1), bu durumun süperörgünün uydu piklerinde ikiye yarılmaya neden olduğu, iki farklı periyodisite oluşumu sağladığı görülmektedir. Bilindiği üzere, DCXRC analizlerinde SL uydu pikleri arasındaki açısal mesafe üzerinden SL periyodu belirlenebilmektedir. Ele alınan örnek için aynı periyodisiteye sahip pikler arasındaki açısal mesafeler ölçülerek periyot kalınlıkları  $\sim 54,9 \text{ \AA}$  ve  $\sim 50,7 \text{ \AA}$  olarak belirlenmektedir. Burada, iki periyot arasındaki kalınlık farkı ( $\sim 4,2 \text{ \AA}$ ), GaSb katmanların ilk 30 tekrarda 3,5 s daha fazla büyütülmesine bağlı olarak oluşmuştur. Aşağıdaki bağıntılar kullanılarak hem InAs hem de GaSb için kullanılan hücre sıcaklıklarında büyüme hızlarını hesaplamak mümkün olmaktadır. Ulaşılan kalınlık değerleri, analizler üzerinde yapılan simülasyonlarla da desteklenmektedir.

$$GR_{\text{InAs}} \times t_{\text{InAs}}(1) + GR_{\text{GaSb}} \times t_{\text{GaSb}}(1) = T_1 \text{ (ölçülen)}$$

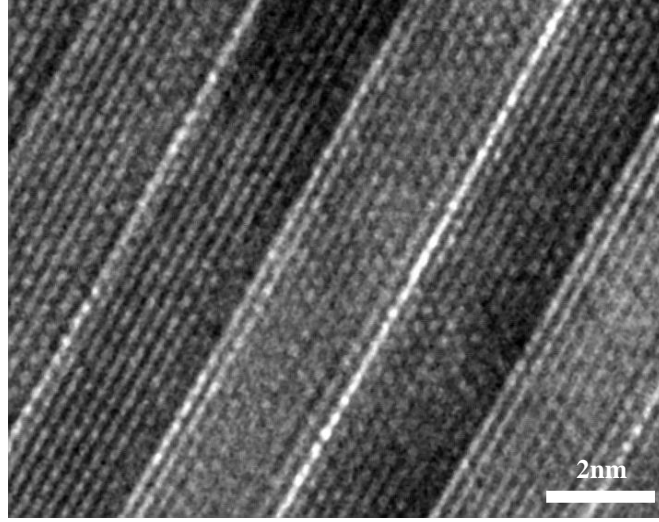
$$GR_{\text{InAs}} \times t_{\text{InAs}}(2) + GR_{\text{GaSb}} \times t_{\text{GaSb}}(2) = T_2 \text{ (ölçülen)}$$



**Şekil 4.1.** Çift periyoda sahip SL örneğin çift-kristal X-ışını sallantı eğrisi analizi ve bu analizin simülasyonu (Simülasyon eğrisi dikey eksende yukarıya kaydırılmıştır.)

Şekil 4.2’de ise farklı bir örnek üzerinde yapılmış TEM çalışmasında süperörgüyü oluşturan InAs ve GaSb katmanlar görülmektedir. Görüntüden, InAs ve GaSb katmanlarını oluşturan tek-atom katmanlar net bir biçimde görülebilmekte ve sayılabilmektedir (9 ML InAs/9 ML GaSb). Belirlenen katman kalınlıkları ve bu katmanların büyüme süreleri üzerinden de büyüme hızlarını

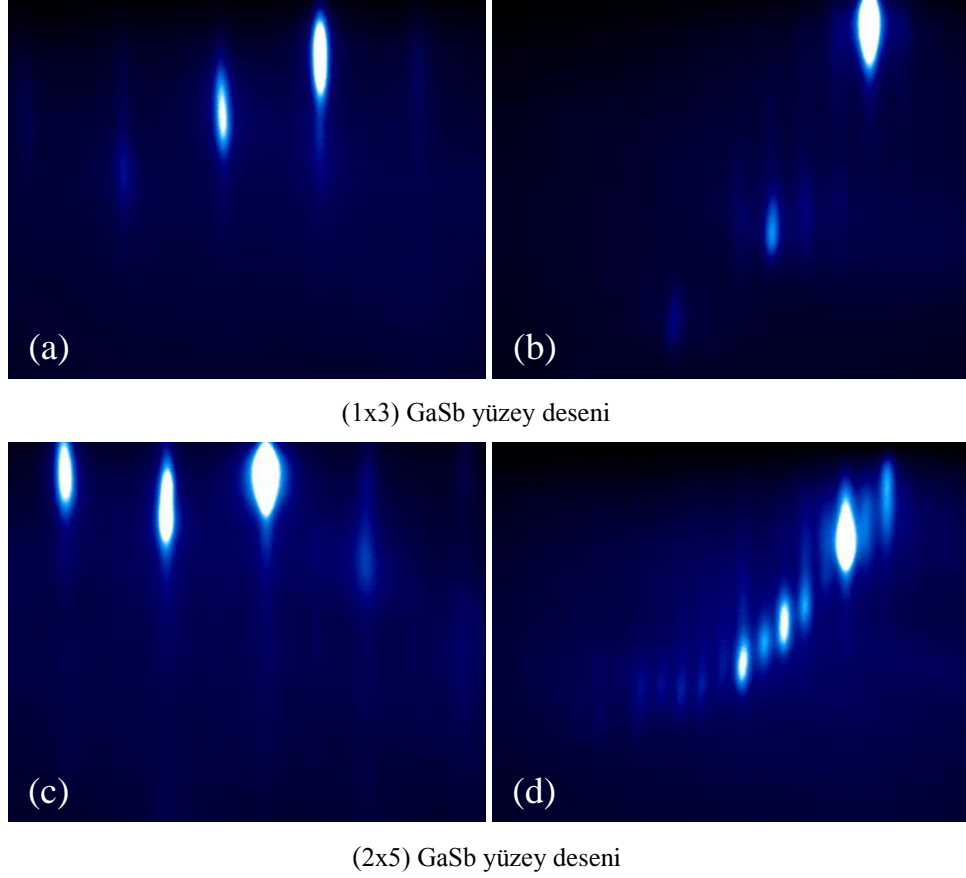
belirlemek mümkün olmaktadır. Bu çalışmada, büyüme hızlarının belirlenmesinde belirtilen her iki analiz yönteminden de yararlanılmıştır.



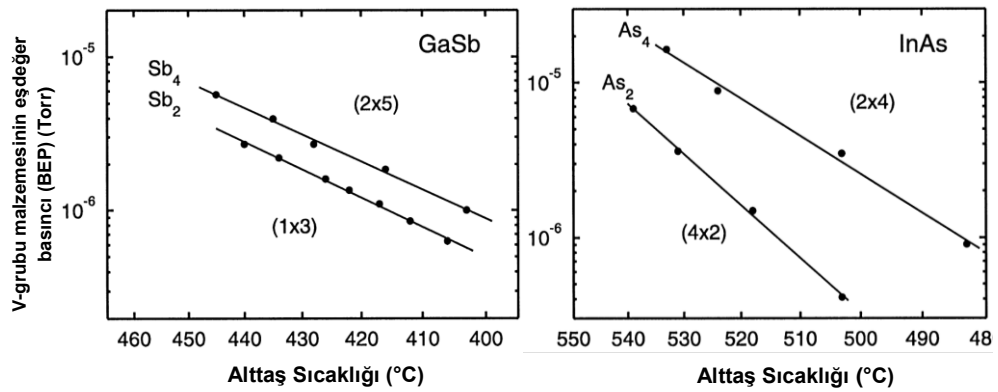
**Şekil 4.2.** B-3 numaralı örnekten alınmış HRTEM görüntüsü

Büyütülen SL örneklerde GaSb tampon ve kontak katmanı  $T=495-500$  °C arasındaki sıcaklıklarda, InAs/GaSb SL ve InAs şapka katmanları ise  $T=400-410$  °C arasındaki sıcaklıklarda büyütülmüştür. Büyütme esnasında alttaş sıcaklığı pirometre ile ölçülmüştür. Sistemde kullanılan pirometre ile yapılan ölçümlerde  $BEP=9,24 \times 10^{-7}$  Torr  $Sb_2$  akısı altında, GaSb yüzey soğutulurken GaSb  $(1 \times 3) \rightarrow (2 \times 5)$  yeniden yapılanma (reconstruction) geçişi,  $T=418$  °C'de gözlenmiştir (Şekil 4.3). GaSb ve InAs için yeniden yapılanma geçişlerine ilişkin literatürden alınan grafikler ise Şekil 4.4'de verilmiştir. Yeniden yapılanma noktasının alttaş sıcaklığı ve V-grubu akısına bağlı değişimi,  $(As_2, Sb_2)$  ve  $(As_4, Sb_4)$  için ayrı ayrı grafiklerden görülmektedir. Süperörgü büyürken alttaş üzerine uygulanan ısı miktarı sabit tutulmakta ancak SL büyürken yüzeydeki malzeme değişikçe pirometre ile okunan sıcaklık değeri  $20$  °C içerisinde salınım göstermektedir. Buna, akkor haldeki PBN potalardan ve içindeki malzemeden gelen ışınımın pirometre üzerine düşmesi neden olmaktadır. Kullanılan hücrenin sıcaklığı ne kadar yüksekse bu etki daha belirgin yaşanmaktadır. Bütün SL büyütme işlemleri, RHEED ile kontrol altında gerçekleştirilmiştir. Süperörgülerde, GaSb katmanlar büyürken gözlenen  $(1 \times 3)$  deseni Şekil 4.3a ve

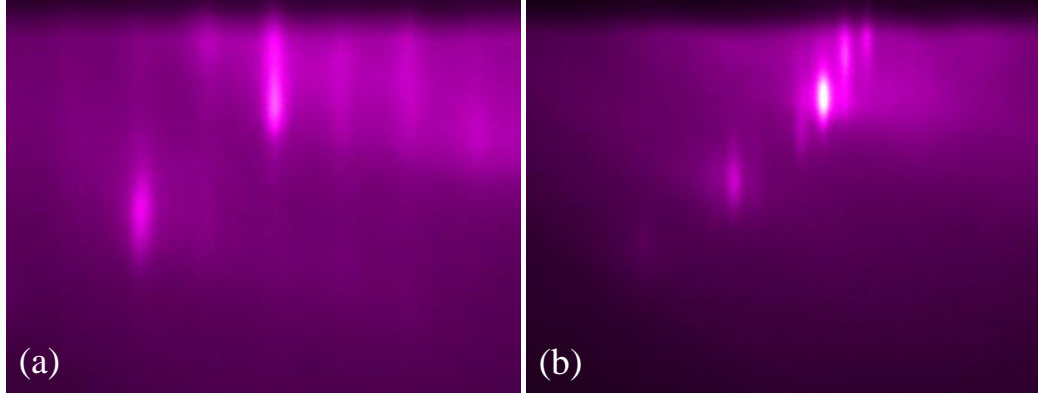
b’de, InAs katmanlar büyürken gözlenen (2x4) RHEED desenleri ise Şekil 4.5a ve b’de görülmektedir.



Şekil 4.3. (a, b) GaSb yüzeyin büyüme anındaki ve (c, b) yeniden yapılanma sonrasındaki RHEED görüntüleri



Şekil 4.4. GaSb ve InAs için alttaş sıcaklığı ve V-grubu akısına bağlı yeniden yapılanma diyagramları [41]



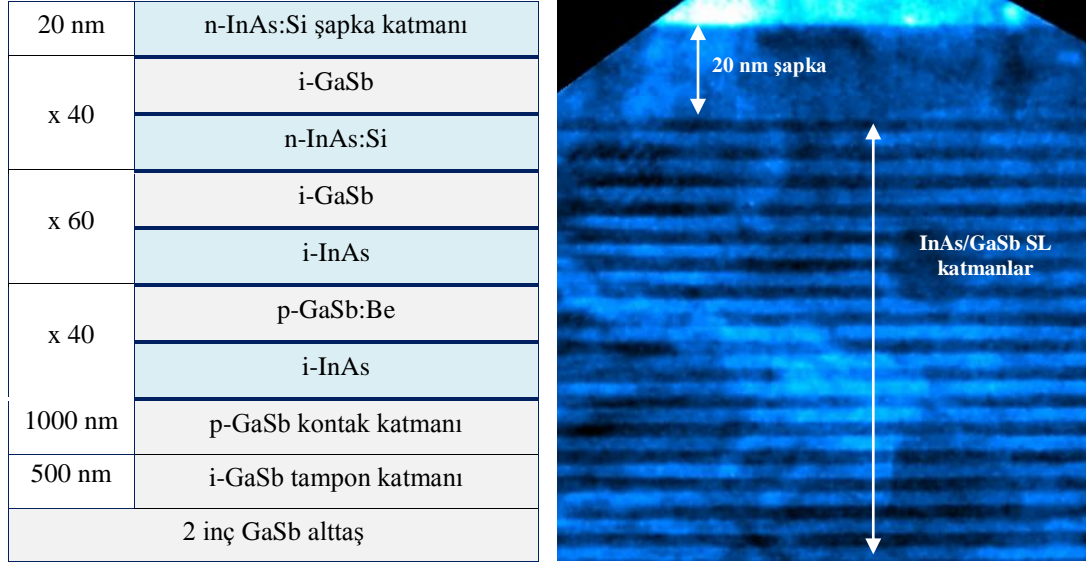
(2x4) InAs deseni

Şekil 4.5. InAs katmanın büyüme anındaki RHEED görüntüleri

#### 4.1.2. MWIR bölgede çalışan InAs/GaSb Tip-II SL fotodedektör yapıları GaSb alttaşlar üzerine büyütme çalışmaları

Bu çalışmada, MWIR dalga boyu bölgesinde çalışmak üzere tasarlanan SL yapılarda, InAs katman kalınlığı 6-9 ML, GaSb katman kalınlığı ise 7-9 ML arasında değişen kalınlıklarda büyütülmüştür. Bütün örneklerde SL katmanlar arasına InSb-benzeri ara yüz (0,5-1 ML) oluşturulmuştur. Süperörgü öncesinde sırasıyla 500 nm katkısız ve alt kontak katmanı olarak 1000 nm katkılı GaSb epikatmanı, sonrasında ise üst kontak katmanını olarak 20 nm kalınlığında katkılı InAs şapka katmanı büyütülmüştür. Şapka katmanının kalınlığı için kritik kalınlık (~19,4 nm) aşılmamış, bu durum yapı ve yüzey kalitesi açısından dikkate alınmıştır. Büyütülen süperörgülerde tekrar sayısı, bütün örnekler için 140 (40p-60i-40n)'tır. Yapılardaki optik soğurmanın gerçekleştiği n.i.d (non-intentionally doped) bölge bu örnekler yalnızca 60 tekrara sahip olup ideal bir SL dedektör için bu değer 300 ile 600 tekrar arasında olabilmektedir. Bu çalışma Ar-Ge odaklı olduğundan oldukça uzun büyüme zamanı gerektiren yapılar yerine yapısal ve performansa dayalı karakterizasyon çalışmalarını olanaklı kılan düşük tekrarlı (140 tekrar) SL yapılar ele alınmıştır. SL yapılarda yapının kontak katmanı ve ilk 40 tekrarında GaSb tabakalar berilyum (Be), son 40 tekrarında ve şapka katmanında InAs tabakalar silisyum (Si) ile katkılandırılmıştır. Arada kalan 60

tekrarda ise InAs ve GaSb katmanlar katkılanmadan büyütülmüştür. Büyütülen yapıların tekrar sayısı örneklerin birbiri ile kıyaslanabilir olması amacıyla sabit tutulmuştur. Büyütülen yapının şematik görünümü, B-3 numaralı örnekten alınmış TEM görüntüsü ile birlikte Şekil 4.6’da verilmiştir.



**Şekil 4.6.** GaSb alttaşlar üzerine büyütülen InAs/GaSb SL yapı ve B-3 numaralı örnekten alınmış TEM görüntüsü

#### 4.1.2.1 InAs/GaSb Tip-II SL yapılarda InAs ve GaSb katman kalınlıklarının sabit olduğu durumda InSb-benzeri ara yüz kalınlığındaki değişimin yapısal özellikler ve optik performans üzerindeki etkileri

InAs/GaSb SL yapılar oldukça hassas bir yapısal dengeye sahiptirler. Bu sebeple, yapıyı oluşturan malzemelerin katman kalınlıklarının ve malzeme geçişlerinde kullanılan ara yüz oluşumlarının optimizasyonu oldukça önemlidir. Çalışmanın bu kısmında büyütülen InAs/GaSb SL yapılarda, InAs ve GaSb katman kalınlıkları sabit tutularak (9 ML GaSb/ 9 ML InAs) InSb-benzeri ara yüz kalınlığı 0,5-0,8 ML aralığında değiştirilmiş ve sabit InAs ve GaSb katman kalınlıkları için değişen InSb-benzeri ara yüz kalınlığının yapının dengesini ve performansını ne ölçüde etkilediği anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu bağlamda, toplam

5 adet örnek büyütülmüş ve bu örnek grubu SET-1 olarak isimlendirilmiştir. Büyütülen örneklerde InSb-benzeri ara yüz oluşumu için kullanılan kepenk organizasyonları ile InAs ve GaSb katmanların hedeflenen kalınlıkları için büyüme süreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

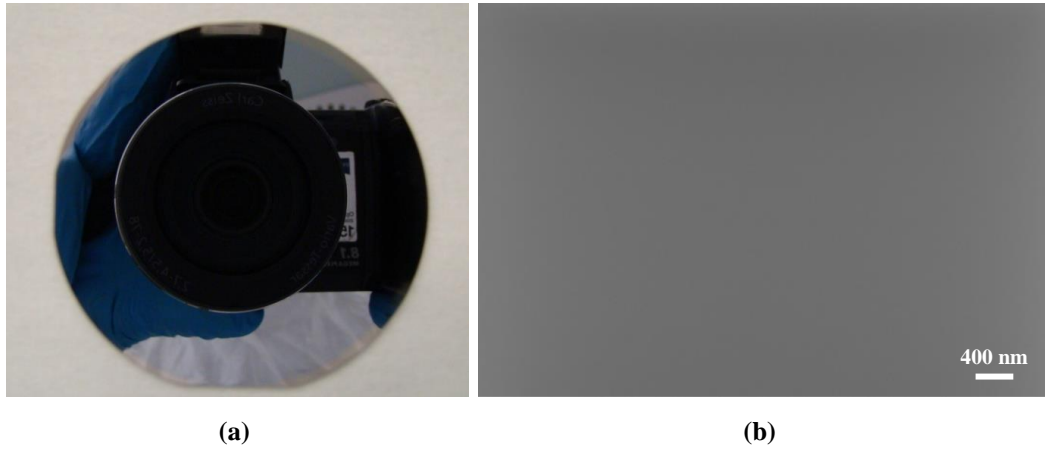
**Çizelge 4.1.** Süperörgülerde 1 periyot büyütülürken kullanılan kepenk organizasyonları (SET-1)

Örnek numarası	GaSb katman büyüme süresi	Sb <sub>2</sub> ıslatma süresi	In flaş süresi	InAs katman büyüme süresi	Bekleme süresi	In flaş süresi	Sb <sub>2</sub> ıslatma süresi	GaSb katman büyüme süresi
<b>B-1</b>	27,18 s	1,5 s	1,00 s	31,86 s	0,5 s	1,00 s	1,5 s	27,18 s
<b>B-2</b>	27,18 s	1,5 s	1,50 s	31,86 s	0,5 s	1,50 s	1,5 s	27,18 s
<b>B-3</b>	27,18 s	2,0 s	1,74 s	31,86 s	0,5 s	1,74 s	2,0 s	27,18 s
<b>B-4</b>	27,18 s	2,3 s	2,00 s	31,86 s	0,5 s	2,00 s	2,3 s	27,18 s
<b>B-5</b>	27,18 s	2,5 s	2,20 s	31,86 s	0,5 s	2,20 s	2,5 s	27,18 s

Örneklerde InAs→GaSb ve GaSb→InAs geçişlerinde yüzeye uygulanan Sb ıslatma süreleri ve In flaş süreleri, aynı örnek içerisinde eşit tutulmuş, B-1 numaralı örnekten B-5 numaralı örneğe ara yüz oluşumunun kalınlaştırılması amacıyla Sb ıslatma süreleri ve In flaş süreleri belirli oranlarda arttırılmıştır. InAs tabakadan GaSb tabakaya geçişte, InAs sonrası ortamdaki arseniği kısmen de olsa azaltmak amacıyla 0,5 s bekleme süresi reçetelere dahil edilmiştir. Burada, InAs ve GaSb yüzeylerinin büyüme dinamikleri farklı olacağından uygulan simetrik (eş sürelerin kullanıldığı) ara yüz reçeteleri için InSb-benzeri ara yüz oluşumlarının kalınlıklarının birebir aynı olmama ihtimali göz önünde bulundurulması gereken bir durumdur. DCXRC analizleri üzerinde yapılan simülasyon çalışmalarında, bu durum kendisini kısmen gösterse de söz konusu farklılığın ne kadar olduğunu yapının geneli üzerinden yapılan analizlerle ortaya koymak oldukça zor bir durumdur.

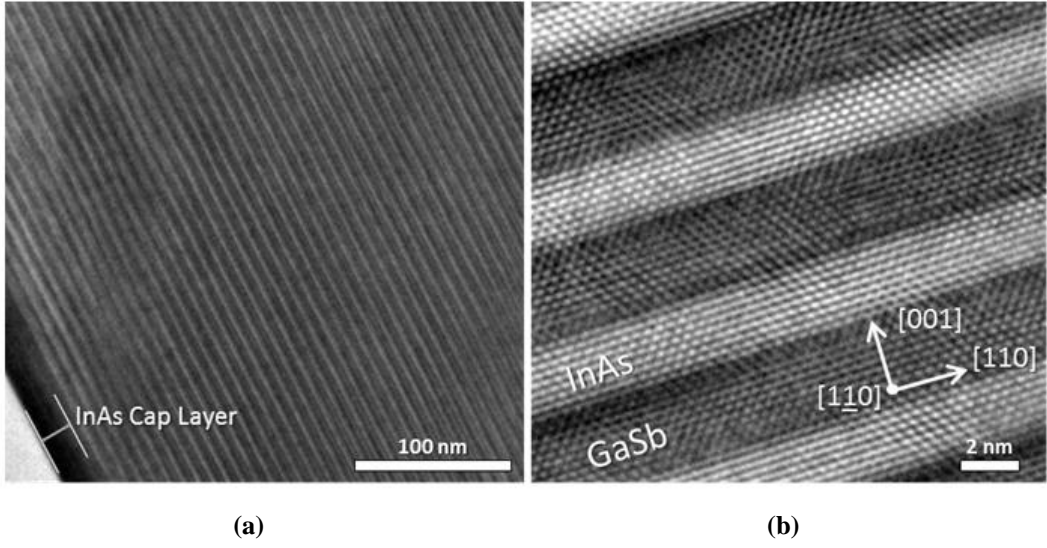
Ardışık olarak büyütülen örnekler, MBE sisteminden çıkarıldıktan sonra görsel olarak incelenmiş ve bütün örneklerin ayna görünümüne (Şekil 4.7a) sahip

olduğu görülmüştür. Bazı örneklerde, örnek tutucunun ve örnekleri tutucuya sabitlemek amacıyla kullanılan tungsten plakaların temas noktalarında belirli yüzey deformasyonları görülmüş ve bu bölgelerin karakterizasyon çalışmalarında kullanılmamasına özen gösterilmiştir. Örneklerin tutucuya temas ettiği noktalarda bölgesel ısı kayıpları olmakta, o bölgelerde (alttaşın kenar bölgelerinde) kararsız büyüme yaşanabilmektedir. B-5 numaralı örnekten alınmış SEM görüntüsü de yüzeyde belirgin noktasal mikro kusurların olmadığını göstermektedir (Şekil 4.7b).



**Şekil 4.7.** (a) InAs/GaSb SL örneğin ayna görünümlü yüzeyi, (b) örnek yüzeyinin SEM (Inlens) görüntüsü (B-5)

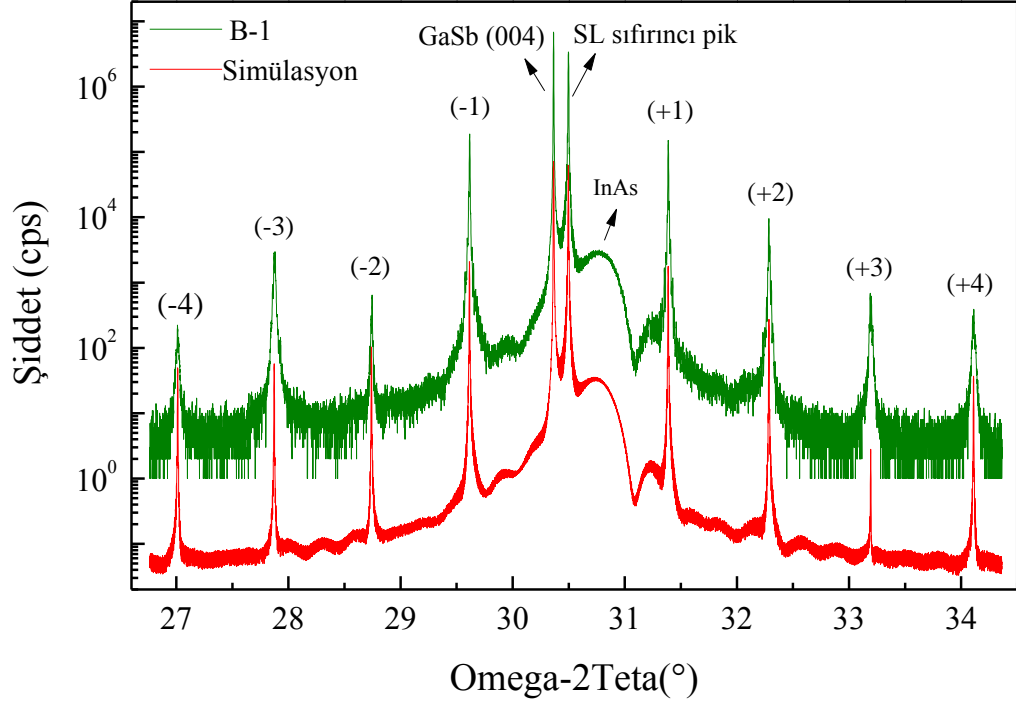
Yapılan TEM analizleri ile belirlenen InAs ve GaSb katman kalınlıklarının büyütme öncesinde hedeflenen değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür. Bu set içerisinde ele alınan B-3 numaralı örnekten alınmış HRTEM görüntülerinde (Şekil 4.8), InAs ve GaSb katmanları net bir şekilde görülebilmekte ve sayılabilmektedir. Görüntülerde, InAs katmanlar GaSb katmanlara göre, görece olarak daha açık kontrasta sahiptir. İki katmanın geçiş bölgelerinde ise ara yüzdeki InSb-benzeri oluşum görülebilmektedir. Görüntülerden, ara yüz oluşumunun 0,5-1 ML ( $a_{\text{InSb}}/2 = 3,2397 \text{ \AA}$ ) aralığında kalınlığa sahip olduğunu relatif olarak söylemek mümkündür. Bunların dışında çalışılan çözünürlükte InAs ve GaSb katmanlarda belirgin kusur ve yanlış (veya eksik) yerleşme (dislokasyon) bölgeleri gözlenmemektedir.



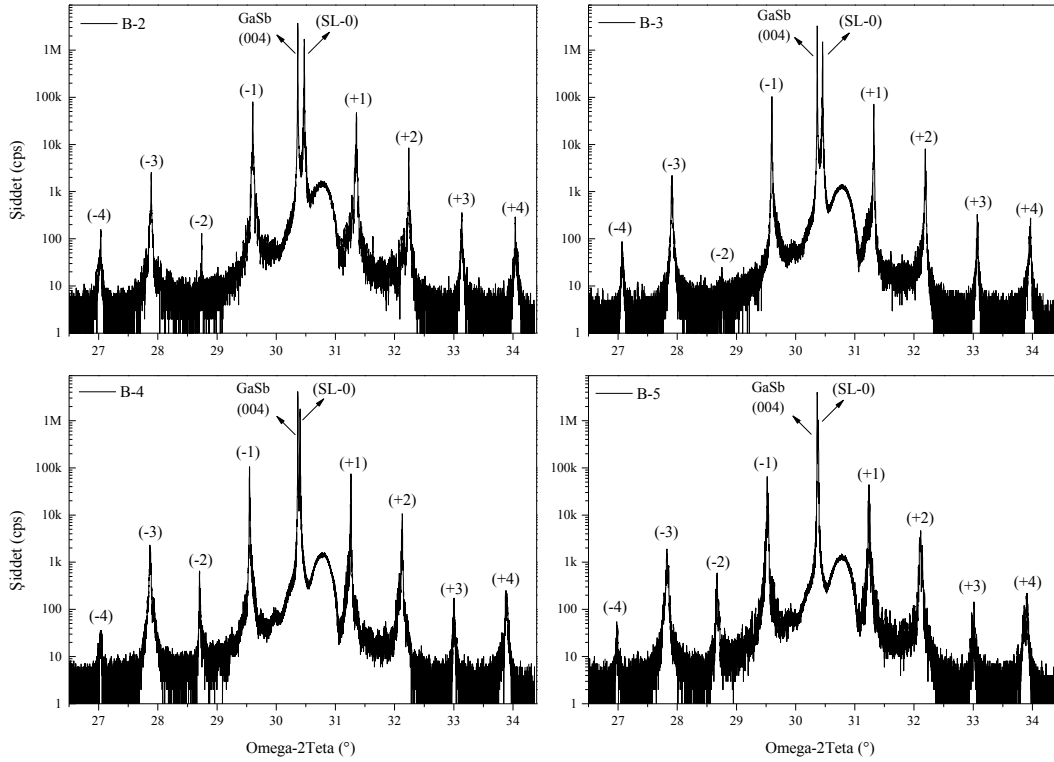
**Şekil 4.8.** B-3 numaralı örneğin kesitinden alınan (a) TEM-BF ve (b) HRTEM görüntüleri

Aşağıdaki kısımda, bu set kapsamında çalışılan örneklerin detaylı DCXRC analiz sonuçları verilmiştir. Bütün ölçümler, GaSb (0 0 4) simetri ekseninde, 2 inç alttaş üzerinde homojenliği kontrol amacı ile alttaşın en az üç farklı bölgesinden alınmış ve sonuçlarda herhangi bir farklılık gözlenmemiştir.

InAs/GaSb süperörgüler üzerinde yapılan DCXRC ölçümlerinde, GaSb alttaştan gelen kırınım piki ile o pike yakın pozisyondaki süperörgünün sıfıncı ve onun sağında ve solunda sıralanan süperörgünün diğer uydu pikleri Şekil 4.9'da ve 10'da görülmektedir. Büyütülen yapılarda süperörgünün üzerine büyütülen InAs şapka katmanına ait kırınım bilgisi ise sıfıncı pikin sağında görülmektedir. InAs'e ait pik, grafiklerden görüldüğü üzere, oldukça yayvan ve geniştir.



Şekil 4.9. B-1 numaralı örneğin DCXRC analizi ve bu analizin simülasyonu



Şekil 4.10. B-2, B-3, B-4 ve B-5 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri

Süpeörgülerden alınan ölçümlerde, GaSb (004) piki ile süperörgünün sıfıncı piki arasındaki açıl mesafe (ya da ayrılma), SL yapı ile GaSb tampon katman arasındaki örgü uyumsuzluğunun ( $\Delta a/a$ ), SL uydu pikleri arasındaki mesafe, süperörgünün periyot kalınlığının, süperörgüye ait piklerin FWHM değerleri kristal kalitesinin veya ara yüzdeki oluşumların örgüyü oluşturan kristallere etkilerinin kantitatif veya kalitatif tespitinde kullanılmaktadır. Sallantı eğrisi ölçümlerinde, pikler ne kadar dar ve keskin ise kristal örgü kalitesi o kadar yüksek anlamına gelmektedir. Bunların yanında GaSb (004) piki etrafında gözlenebilen uydu pik sayısı kalitenin dolaylı bir ölçütü olarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda, GaSb (001) alttaşlar üzerine büyütülmüş süperörgü yapıların DCXRC analizlerinde söz konusu değerler belirlenmiş ve değerlendirilmiştir. Süperörgü yapılarla ilişkin periyodisite, örgü uyumsuzluğu değerleri ( $\Delta a/a$ ) ile süperörgülerin sıfıncı piklerinin FWHM değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** SET-1’de yer alan örneklerin DCXRC analiz sonuçları (Eksi işaret süperörgü üzerindeki stresin örgüyü genişletecek yönde olduğunu göstermektedir.)

Örnek numarası	SL periyot (Å)	$\Delta a/a$ (ppm)	SL sıfıncı pike ait FWHM değeri (arcsec)
<b>B-1</b>	57,9 ± 0,1	-3929	22,8
<b>B-2</b>	58,6 ± 0,1	-3250	22,4
<b>B-3</b>	59,5 ± 0,1	-2687	22,3
<b>B-4</b>	59,7 ± 0,1	-1145	21,4
<b>B-5</b>	59,9 ± 0,1	-462	31,0 (pik çakışması)

Sallantı eğrisi ölçümlerinden hesaplanan 1 SL periyodu, InAs ve GaSb katman kalınlığı ile birlikte 2 tane InSb-benzeri ara yüz kalınlığını içermektedir. Hesaplanan periyot kalınlıkları HRTEM görüntüleri ile de büyük ölçüde uyumluluk göstermektedir. Şekil 4.8b’deki görüntüden tabaka kalınlıkların 9 ML InAs / 9 ML GaSb olduğu görülmektedir. InAs ve GaSb için tek-atom katman ( 1

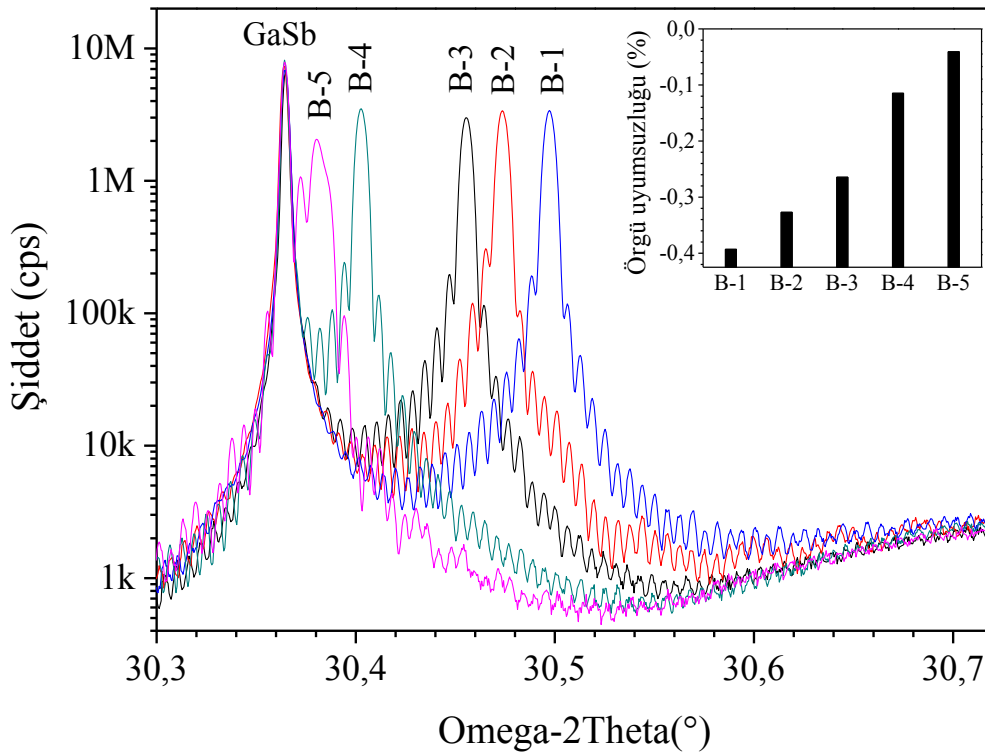
ML= $a/2$ ) kalınlıklarının teorik değerleri sırasıyla, 3,0202 Å ve 3,0479 Å'dur. Bu durumda, 9 ML InAs (27,43 Å) + 9 ML GaSb (27,26 Å) + 2×InSb-benzeri ara yüz kalınlığı = DCXRC analizlerinden ölçülen periyot kalınlığına karşılık gelmektedir [57, 58]. Bu ilişki ve analizler üzerinde yapılan simülasyonlar birlikte değerlendirilerek ara yüz kalınlıkları; B-1 örneğinden B-5 örneğine sırasıyla 0,49, 0,60, 0,74, 0,77 ve 0,80 ML şeklinde hesaplanmıştır. Bu sonuçlardan, iki malzeme arasına uygulanan ara yüz reçetesindeki indiyum flaş ve Sb<sub>2</sub> akı sürelerindeki değişimin ara yüzey kalınlığını, dolayısı ile süperörgünün periyot kalınlığını, artışla orantılı biçimde değiştirdiği görülmektedir.

InAs/GaSb SL yapıların üzerine büyütüldükleri alttaş malzemesi ile arasında belirli bir örgü uyumsuzluğu kaçınılmaz bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. InAs ile GaSb malzemeleri arasında düşükte olsa ( $\Delta a/a = -\% 0,62$ ) örgü uyumsuzluğu söz konusudur. Eksi işareti, zorun örgüyü genişletici yönde olduğunu ifade etmektedir. GaSb üzerine örgü sabiti görel olarak küçük olan InAs katmanlar SL yapı içerisinde tekrarlı biçimde büyütüldükçe örgüyü daraltan yönde zor uygulamaktadır. Buna tepki olarak yapı üzerinde genişletici yönde zor oluşmaktadır. Bu uyumsuzluğun etkisi her ne kadar kalınlıklar, kritik kalınlıkların altında olsa da (Çizelge 4.3), süperörgünün tekrar sayısı arttıkça iki malzeme arasındaki örgü uyumsuzluğunun etkileri daha baskın hale gelmektedir. Bu sebeple, SL katmanlar arasına örgüye aksi yönde zor oluşturacak örgü sabiti daha büyük bir malzemenin (InSb gibi) büyütülmesi suretiyle azaltılmaya çalışılmaktadır.

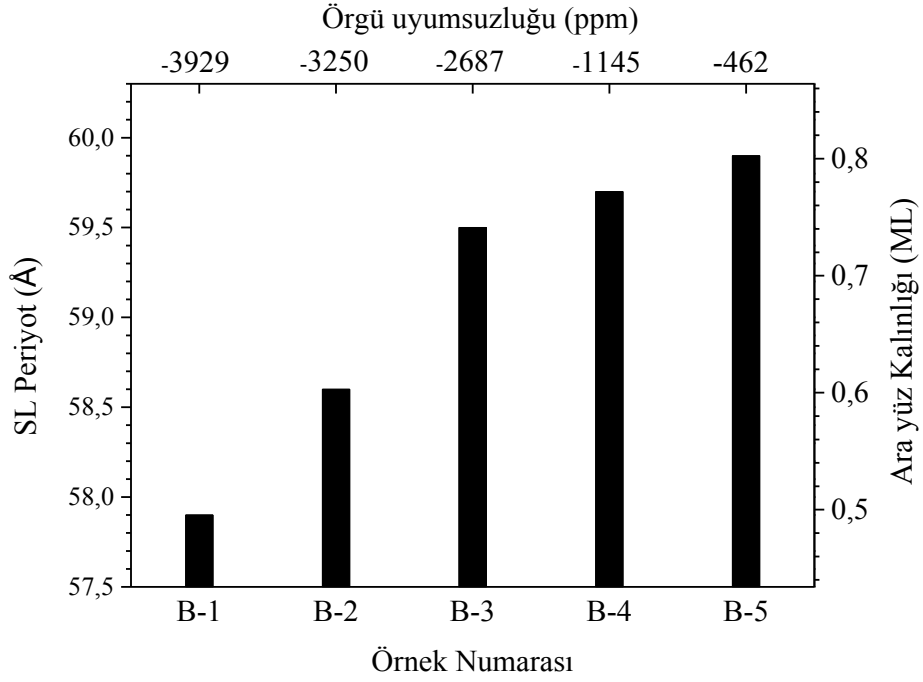
**Çizelge 4.3.** İlgili malzemeler için kritik kalınlık değerleri ve uyumsuzluk oranları [23]

Alttaş	Tek katman	Uyumsuzluk Oranı ( $f_m$ )	Kritik kalınlık (ML)	Kritik kalınlık (Å)
GaSb	InAs	$-6,2 \times 10^{-3}$	64,1	194
GaSb	InSb	$5,9 \times 10^{-2}$	2,2	7,2

Çizelge 4.2’de verilen DCXRC ölçüm sonuçlarından, InSb-benzeri ara yüzün kalınlaşmasıyla birlikte örgü uyumsuzluğun ( $\Delta a/a$ ) (-)3929 ppm’den (-)462 ppm’e kadar azaldığı görülmektedir. Şekil 4.11’deki GaSb (004) ve SL sıfıncı pikleri içine alan açı aralığında çizdirilen grafikte, süperörgünün sıfıncı pikinin B-1 numaralı örnekten B-5 numaralı örneğe ara yüzey kalınlığına bağlı olarak alttaş pikine adım adım yaklaştığı görülmektedir. Büyütülen örneklerde SL periyodu, ara yüzey kalınlığı ve örgü uyumsuzluğu arasındaki ilişkiyi gösteren grafik ise Şekil 4.12’de verilmiştir. Çizelge 4.2’den görüleceği üzere örgü uyumsuzluğunun azalması ile birlikte süperörgünün sıfıncı pikinin FWHM değeri de azaltmakta yani kristal kalitesinde fark edilir bir iyileşme gerçekleşmektedir. Bu başlık altında ele alınan çalışmanın buraya kadar olan kısmı makale olarak yayınlanmıştır [59].

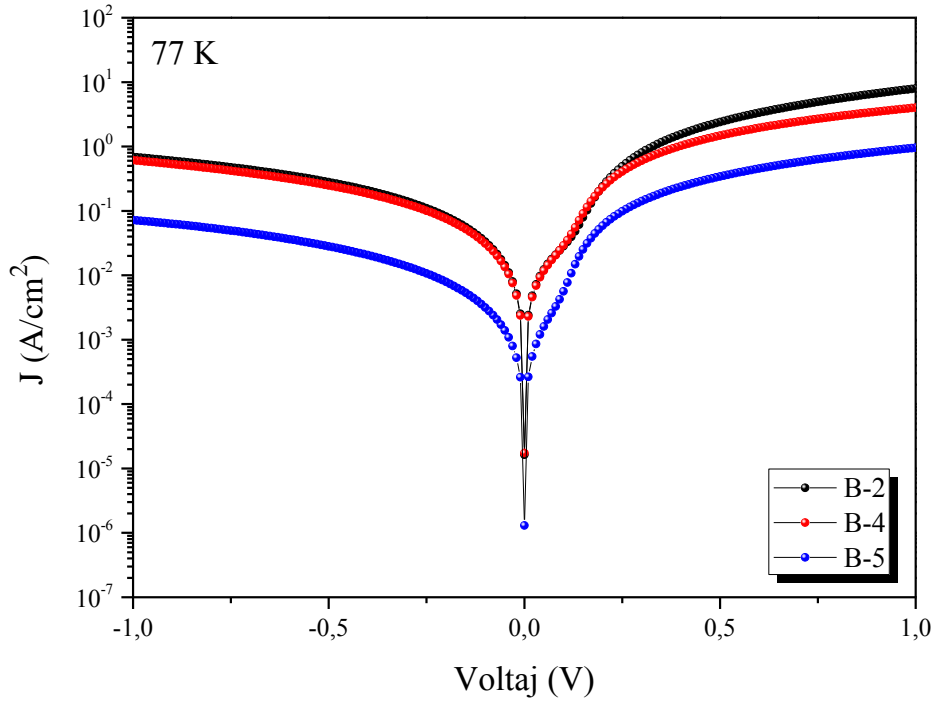


Şekil 4.11. Büyütülen süperörgülerin sıfıncı piklerinin GaSb (004) pikine göre pozisyonlarını gösteren grafik

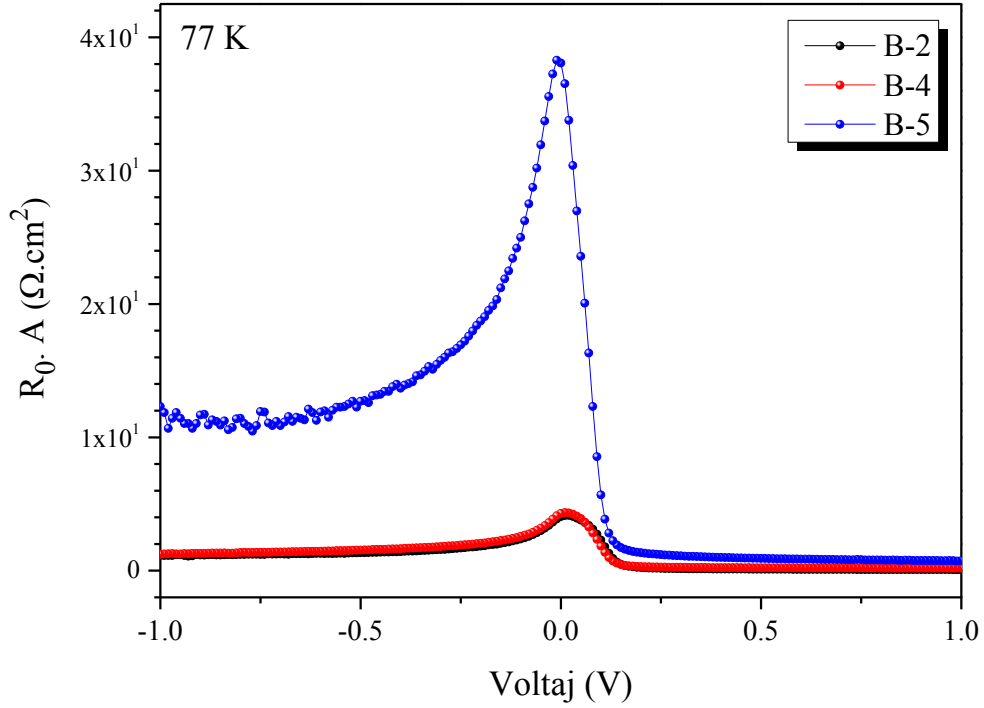


**Şekil 4.12.** Büyütülen örneklerde SL periyodu, ara yüz kalınlığı ve örgü uyumsuzluğu arasındaki ilişkiyi gösteren grafik

SET-1 kapsamında ele alınan örneklerin optik ölçümleri öncesinde, akım voltaj karakteristiklerini ortaya koymak amacıyla, sıvı azot sıcaklığında I-V ölçümleri yapılmıştır. Set içerisinde yer alan örneklerden üçünün akım yoğunluklarının ( $J$ ,  $A/cm^2$ ) voltaja karşı davranışını yansıtan grafikler Şekil 4.13'de,  $R_0.A$  çarpımlarının voltaja karşı grafikleri ise Şekil 4.14'de verilmiştir. Yapılan ölçümler, ara yüz kalınlığının en büyük olduğu B-5 numaralı örneğin diğer iki örneğe kıyasla daha baskın diyot karakteristiği gösterdiğini, direncinin görece olarak daha büyük değerlerde olduğunu göstermektedir. Ancak ulaşılan değerler, fotodiyotlarda yüzey kaçak akımlarının oldukça fazla olduğuna işaret etmektedir. Bu değerlerin uygulanacak yüzey pasivasyonu ile iyileşeceği öngörülmektedir.

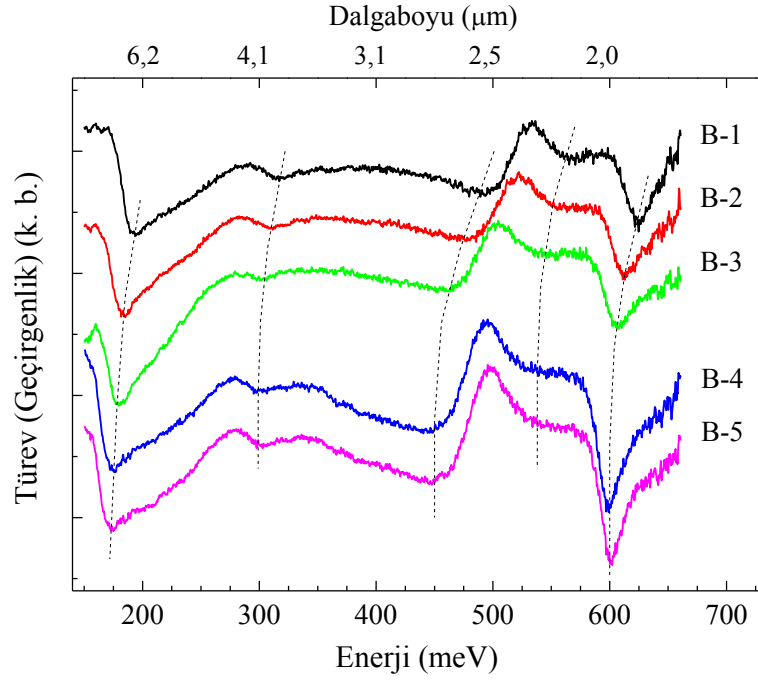


Şekil 4.13. B-2, B-4 ve B-5 numaralı örneklerin karanlık akım yoğunluğu-voltaj grafikleri



Şekil 4.14. B-2, B-4 ve B-5 numaralı örneklerin  $R_0 \cdot A$ -voltaj grafikleri

Bu grupta çalışılan SL fotodedektör örneklerin oda sıcaklığındaki geçirgenlik ölçüm sonuçları Şekil 4.15’de, 77 K sıcaklığındaki tepkisellik ve kuantum verimi ölçüm sonuçları ise Şekil 4.16 ve 17’de verilmiştir. Örneklerle ilişkin optik karakterizasyon bilgileri ise Çizelge 4.4’de listelenmiştir. Çizelgede, örneklerin 77 K’deki %50 kesim dalgaboyu ( $\%50-\lambda_c$ ) değerlerine bakıldığında ilk dört örnekte ara yüz kalınlığındaki artışla orantılı, artan yönde bir davranış görülmektedir. Ara yüz kalınlığının en kalın olduğu B-5 numaralı örnek, kendinden bir önceki B-4 numaralı örneğin çok az altında  $\%50-\lambda_c$ ’ye sahip olduğu görülmektedir. Ancak, bu durumun InSb ara yüz kalınlığındaki artışın  $\%50-\lambda_c$  üzerinde artan yönde bir eğilime sahip olduğu görüntüsünü değiştirecek büyüklükte olmadığı düşünülmektedir. Şekil 4.15’de verilen 300 K sıcaklığında yapılan geçirgenlik ölçümlerinden de ara yüz kalınlığına bağlı dalgaboyundaki değişim gözlenmektedir. Değişimin daha belirgin görülebilmesi amacıyla geçirgenlik spektrumlarının türevleri, enerjinin ve dalgaboyunun fonksiyonu olarak çizilmiştir. Geçirgenlikteki değişimin rahat takip edilebilmesi için spektrumlar y-ekseninde kaydırılmış ve karakterler kesikli çizgilerle işaretlenmiştir. Grafiklerde geçirgenliğin türevi kullanıldığından işaretli pozisyonlar doğrudan geçiş enerjilerine tekabül etmeseler de söz konusu enerjilerle ilişkilidir. 200 meV civarında gözlenen soğurma bölgesi, değerlik bandındaki en düşük boşluk (ağır boşluk, HH1) ile iletim bandındaki  $E_1$  elektron seviyeleri arasındaki temel geçişler ile ilgilidir. Yüksek enerji bölgelerinde gözlenen soğurma bölgeleri ise  $E_1$  enerji seviyesi ile değerlik bandındaki uyarılmış boşluk durumları (sırasıyla, LH1 (hafif boşluk), HH2 ve LH2) arasındaki geçişleri işaret etmektedir. Burada, yüksek enerji bölgelerde gerçekleşen bazı geçişlerin eksitonik soğurmada ziyade en düşük ve uyarılmış ( $E_1-E_2$ ) durumlar arasındaki elektronik geçişlere bağlı olması da göz önüne alınması gereken bir durumdur. Örneklerin geçirgenlik sonuçları kıyaslamalı olarak değerlendirilirse B-1’den B-5’e kıvrıma doğru bir kayma söz konusudur. Burada, InAs ve GaSb katmanlar arasına InSb ara yüz oluşturmanın etkin bant aralığını kalınlıkla orantılı bir biçimde küçük enerjilere kaydırması görülmektedir.

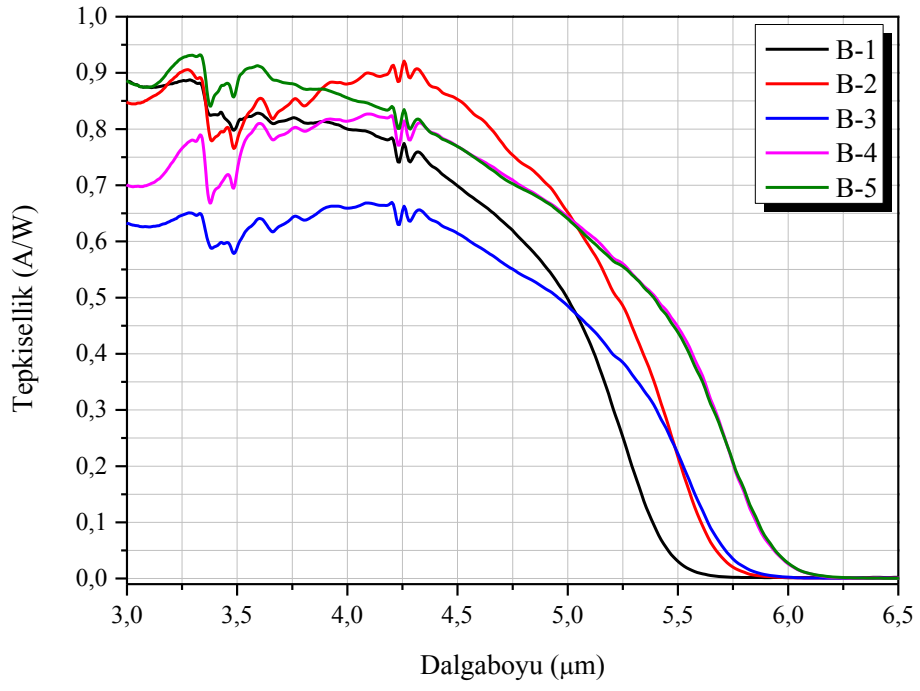


Şekil 4.15. B-1, B-2, B-3, B-4 ve B-5 numaralı örneklerin 300 K'deki geçirgenlik ölçüm sonuçları

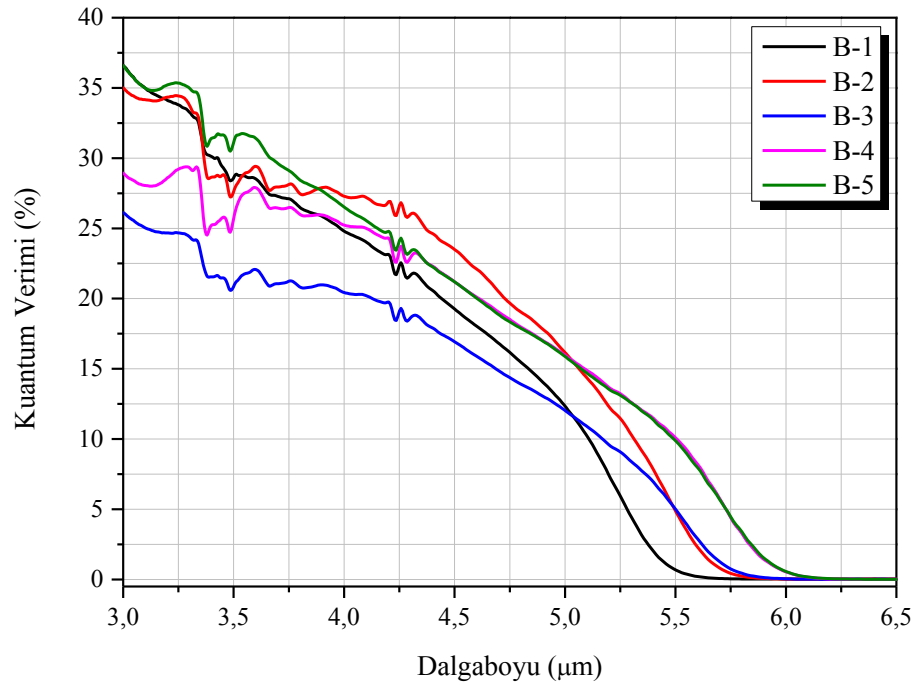
Üretilen  $400 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$  boyutlu mesalar üzerinde yapılan tepkisellik ölçümleri, çalışılan fotodedektörlerin MWIR bölgede tepkilerinin süperörgülerin tekrar sayıları göz önüne alındığında makul mertebede olduğu gözlenmektedir. Dedektörlerin 77 K'deki tepkisellik eğrileri (Şekil 4.16) analiz edildiğinde ara yüz kalınlığına bağlı belirgin bir davranış sergilemedikleri gözlenmiştir. Benzer bir davranış dedektörlerin kuantum verimleri için de söz konusudur (Şekil 4.17). Kuantum verimleri, örnek seti içerisinde  $4 \mu\text{m}$  dalgaboyu için %20 ile %27 arasında değişmektedir.

Çizelge 4.4. B-1, B-2, B-3, B-4 ve B-5 numaralı örneklerin optik karakterizasyon bilgileri

Örnek numarası	Tepkisellik ( $\lambda = 4\mu\text{m}$ ) (A/W)	Kuantum verimi ( $\lambda = 4\mu\text{m}$ ) (%)	%50 Kesim dalga boyu ( $\mu\text{m}$ )
B-1	0,799	24,79	5,07
B-2	0,880	27,28	5,28
B-3	0,659	20,42	5,35
B-4	0,814	25,22	5,55
B-5	0,855	26,51	5,51



Şekil 4.16. B-1, B-2, B-3, B-4 ve B-5 numaralı örneklerin 77 K'deki tepkisellik ölçüm sonuçları

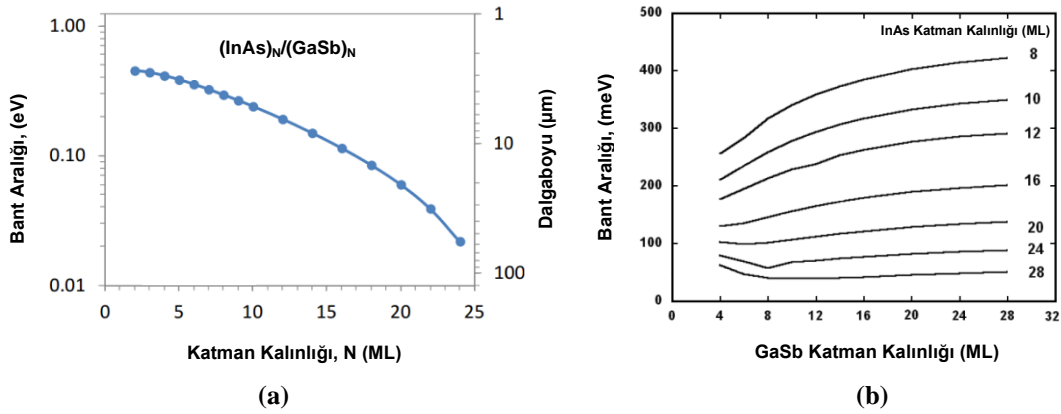


Şekil 4.17. B-1, B-2, B-3, B-4 ve B-5 numaralı örneklerin 77 K'deki kuantum verimi (QE) grafikleri

#### **4.1.2.2 InAs/GaSb Tip-II SL yapılarda InSb-benzeri ara yüz reçetesinin sabit olduğu durumda InAs ve GaSb katman kalınlıklarındaki değişimin yapısal özellikler ve optik performans üzerindeki etkileri**

Çalışmanın bu kısmında, InSb-benzeri ara yüz reçetesi sabit tutularak, InAs ve GaSb katman kalınlıklarının sistematik olarak değiştirildiği MWIR bölgede çalışmak üzere tasarlanmış InAs/GaSb Tip-II SL fotodedektör yapılarına ilişkin yapısal ve optik karakterizasyon bilgileri sunulmuştur.

SL yapılarda, etkin bant aralığı ve zor optimizasyonu, süperörgüyü oluşturan InAs ve GaSb katmanların kalınlıklarının değiştirilmesi ve ara yüzlerdeki InSb-benzeri veya GaAs-benzeri ara yüz oluşumlarının kontrolü ile mümkün olabilmektedir [29]. Zor ve bant aralığı mühendisliği yapılırken, süperörgü periyodu içerisindeki InAs ve GaSb katmanların kalınlıkları, hem yapının stres mekanizmasının kontrolü hem de dedektörün hangi dalgaboyu aralığında algılama yapacağına belirlenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu yapılarda, InAs ve GaSb katman kalınlıklarını ayrı ayrı ya da birlikte değiştirmek suretiyle aktif bant aralığını kontrol etmek mümkün olabilmekte dedektörün çalışma aralığı MWIR (3-6  $\mu\text{m}$ ) ve LWIR (6-15  $\mu\text{m}$ ) bölgelerini de içine alan, VLWIR (15-30  $\mu\text{m}$ ) bölgenin üst sınırlarına kadar ulaşan dalgaboyu bölgelerini algılayacak biçimde ayarlanabilmektedir. Bu esneklik InAs/GaSb SL yapıları kızılötesi algılama teknolojisinde bir adım öne çıkarmaktadır. InAs/GaSb hetero yapıları, Tip-II kırık “misaligned” bant hizalamasına uyarlar ve bu yapıda en düşük iletim bandı  $C_1$  ve ağır-boşluk ( $HH_1$ ) alt-bantları (subbands) arasındaki temel elektron-boşluk geçişlerinde InAs ve GaSb kalınlıkları belirleyici etkiye sahiptir [37]. Şekil 4.18’de katman kalınlığına bağlı bant aralığının değişiminin genel davranışını yansıtan literatürden alınmış grafikler görülmektedir.



**Şekil 4.18.** (a) Eşit InAs ve GaSb katman kalınlığına sahip SL yapılar da katman kalınlığındaki değişimin bant aralığı ve kesim dalgaboyu üzerindeki etkisi [60], (b) Farklı InAs ve GaSb katman kalınlığına sahip SL yapılar da katman kalınlığındaki değişimin bant aralığı üzerindeki etkisi [61]

Bu grupta yer alan örnekler de bir önceki gruptaki örnekler gibi 2 inç (001) Te-katkılı GaSb alttaşlar üzerine 140 (40-p/60-i/40-n) tekrarlı olarak büyütülmüş olup kullanılan epitaksiyel büyütme parametreleri Çizelge 4.5’de, SL katmanlar büyütülürken kullanılan kepenk organizasyonları ise Çizelge 4.6’da verilmiştir. Çizelgedeki InAs ve GaSb büyüme süreleri, büyüme hızları referans alınarak belirlenmiştir. Sürelerde yapılan değişikliklerle, katman kalınlıklarının birer ML ( $\sim 3\text{\AA}$ ) adımlarla değişimi hedeflenmiştir. InAs $\rightarrow$ GaSb, GaSb $\rightarrow$ InAs geçişlerinde kullanılan kepenk organizasyonları ve uygulama süreleri ise bu gruptaki bütün örnekler için sabit tutulmuştur. Bu gruptaki örnekler “SET-2” olarak isimlendirilmiştir. M-1, M-2 ve M-3 numaralı örneklerde (SET-2a), GaSb katman kalınlığı 9 ML’da sabit tutularak InAs katman kalınlığı 9 ML’den 7 ML’a, M-3, M-4, M-5 numaralı örneklerde (SET-2b) ise InAs katman kalınlığı 7 ML’da sabit tutularak GaSb katman kalınlıkları 9 ML’dan 7 ML’a 1 ML adımlarla değiştirilmiştir.

**Çizelge 4.5.** SET-2’de yer alan örneklerin büyütülmesinde kullanılan epitaksiyel parametreler

	<b>GaSb Kontak</b>	<b>GaSb (SL)</b>	<b>InAs (SL)</b>	<b>InAs şapka</b>
<b>Büyüme Hızları</b>	0,47 ML/s	0,33 ML/s	0,29 ML/s	0,29 ML/s
<b>V/III Oranları</b>	13-14	8	7	4
<b>Büyüme Sıcaklıkları</b>	500±2 °C	405±5 °C	405±5 °C	405±5 °C

**Çizelge 4.6.** Büyütülen süperörgülerde kullanılan kepenk organizasyonları (SET-2)

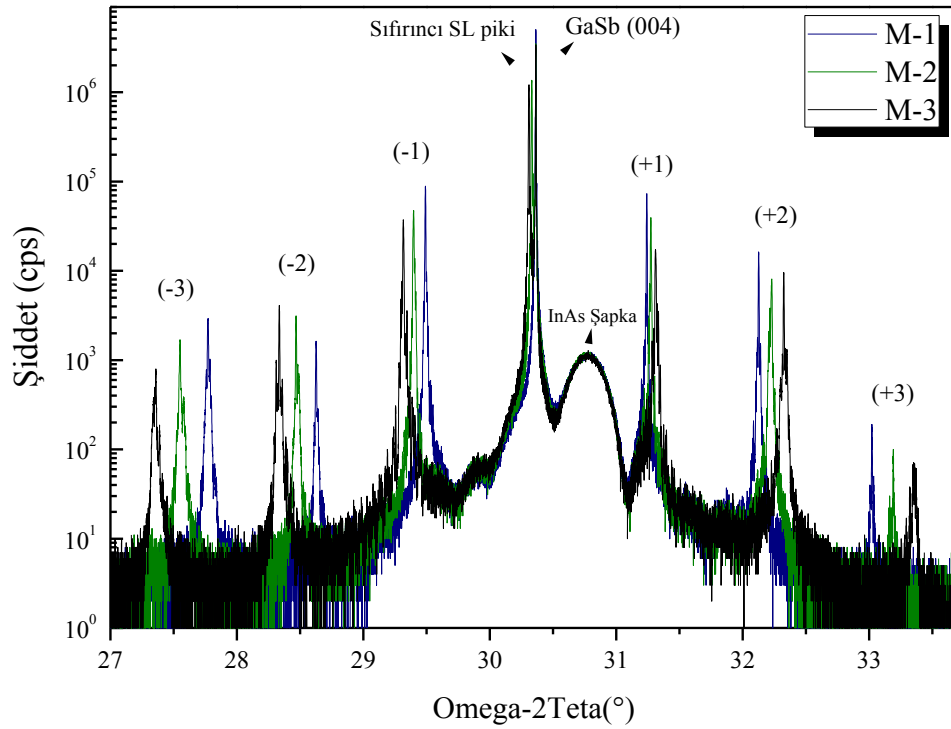
<b>Örnek numarası</b>	<b>GaSb katman büyüme süresi</b>	<b>Sb<sub>2</sub> ıslatma süresi</b>	<b>In flaş süresi</b>	<b>InAs katman büyüme süresi</b>	<b>Bekleme süresi</b>	<b>In flaş süresi</b>	<b>Sb<sub>2</sub> ıslatma süresi</b>	<b>GaSb katman büyüme süresi</b>
<b>M-1</b>	27,18 s	2,5 s	2,3 s	31,86 s	0,5 s	2,3 s	2,5 s	27,18 s
<b>M-2</b>	27,18 s	2,5 s	2,3 s	27,58 s	0,5 s	2,3 s	2,5 s	27,18 s
<b>M-3</b>	27,18 s	2,5 s	2,3 s	24,58 s	0,5 s	2,3 s	2,5 s	27,18 s
<b>M-4</b>	24,18 s	2,5 s	2,3 s	24,58 s	0,5 s	2,3 s	2,5 s	24,18 s
<b>M-5</b>	21,18 s	2,5 s	2,3 s	24,58 s	0,5 s	2,3 s	2,5 s	21,18 s

Örneklerin DCXRC analizlerinde GaSb (004) ve süperörgüye ait piklerin oldukça temiz ve keskin oldukları görülmektedir (Şekil 4.19 ve 4.20). Bu durum, yüksek kristal kalitesine işaret etmektedir. Hesaplanan SL periyotları, SL sıfıncı piklerin FWHM değerleri ve GaSb (004) ile süperörgünün sıfıncı piki arasındaki örgü uyumsuzluğu değerleri, bu sette yer alan her bir örnek için Çizelge 4.7’de listelenmiştir. Çizelgedeki ML cinsinden yazılmış InAs ve GaSb hedef kalınlıkları Å cinsinden yazılıp toplanırsa, elde edilen değerlerin ölçülen periyotların yaklaşık 3 Å aşağısında olduğu görülmektedir. Ölçülen değerler ile hedef kalınlıklar üzerinden hesaplanan değerler arasındaki farkın yarısı ise belirli bir yaklaşıklıkla SL katmanlar arasındaki InSb-benzeri ara yüz kalınlığının ~0,5 ML olduğunu göstermektedir. DCXRC analizleri üzerinde yapılan simülasyonlarda ara yüz kalınlığının belirtilen değerlerde olduğunu ortaya koymaktadır.

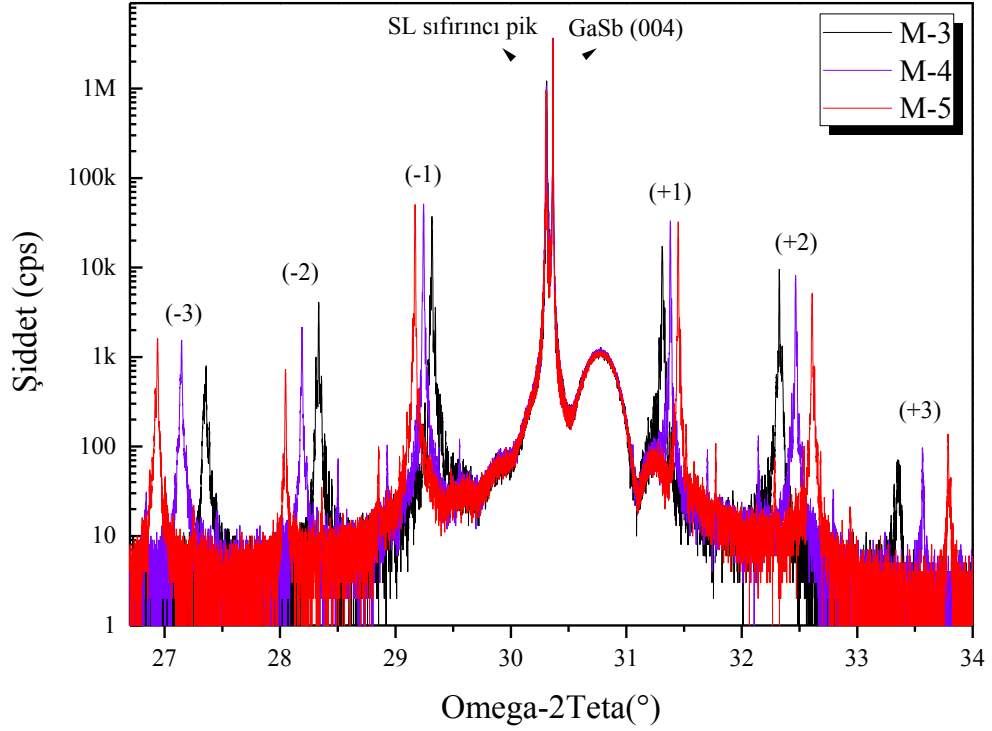
Çizelge 4.7'den görüldüğü üzere, SL sıfırcı piklerin FWHM değerleri de yine SET-1 örneklerinde olduğu gibi örgü uyumsuzluğundaki azalmayla orantılı bir şekilde azalmakta yani iyileşmektedir. En düşük FWHM değerine sahip M-1 numaralı örnek için bu değer 11,4 arcsec ( $\Delta a/a \approx 0$  ppm)'dir.

**Çizelge 4.7.** Örneklerin hedeflenen katman kalınlıkları ve DCXRC analiz sonuçları

Örnek numarası	GaSb katman (ML)	InAs katman (ML)	SL periyot (Å)	$\Delta a/a$ (ppm)	FWHM (SL sıfırcı pik) (arcsec)
M-1	9	9	58,4±0,1	~ 0	11,4
M-2	9	8	54,4±0,1	+ 945	23,9
M-3	9	7	51,3±0,1	+ 1626	25,8
M-4	8	7	47,8±0,1	+ 1701	27,5
M-5	7	7	44,8±0,1	+ 1791	28,7



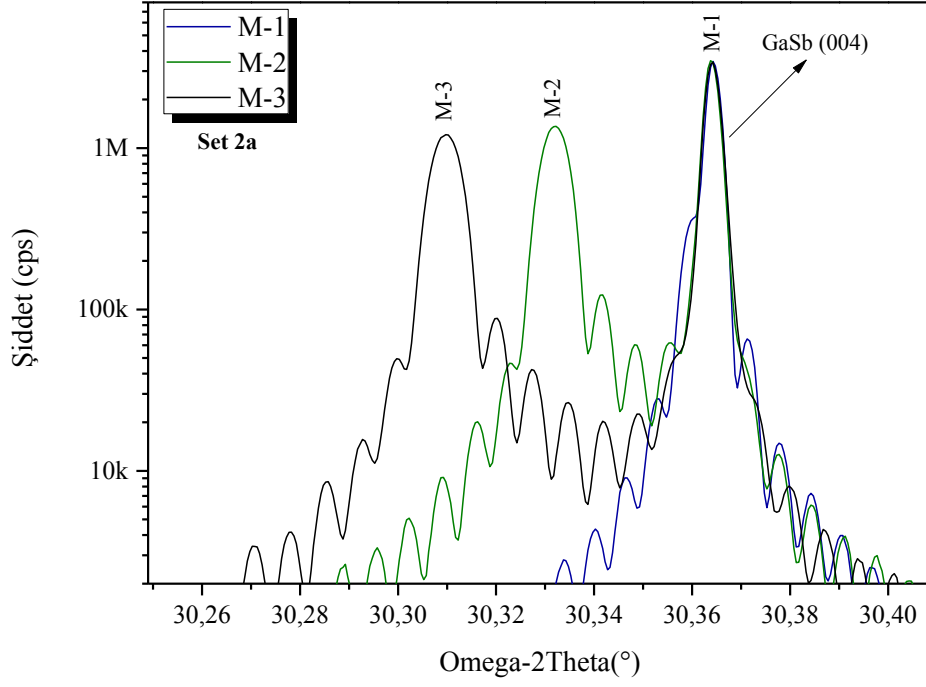
**Şekil 4.19.** M-1, M-2 ve M-3 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri



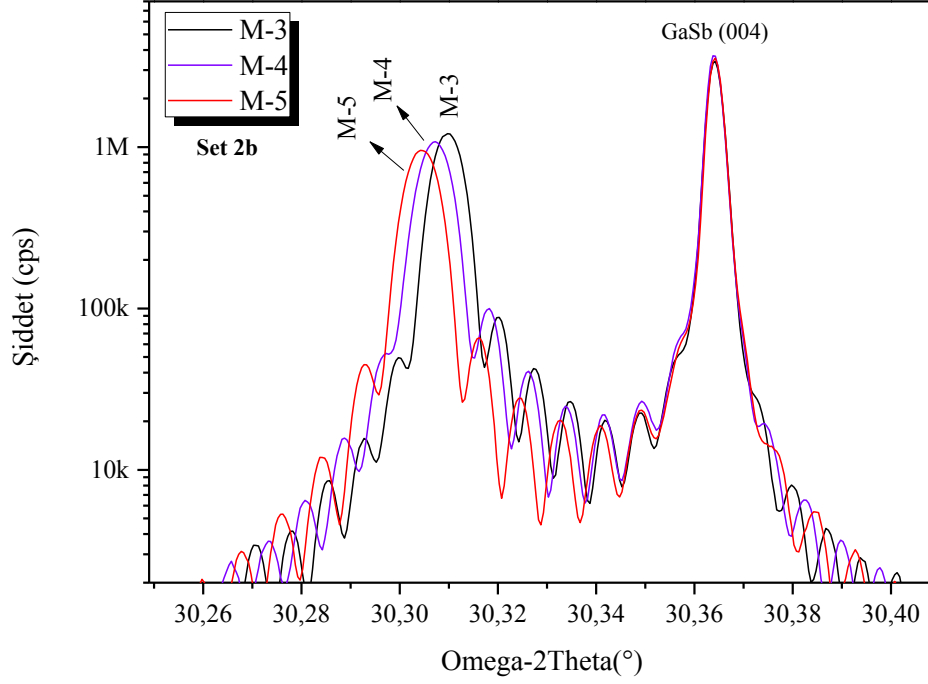
Şekil 4.20. M-3, M-4 ve M-5 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri

Sallantı eğrisi ölçümleri üzerinde yapılan analizlerde M-1 numaralı örnekte örgü uyumsuzluğunun sıfır olduğu yani süperörgünün sıfıncı piki ile GaSb tampon katmana ait pikin üst üste çakıştığı görülmektedir. InAs katman kalınlığının değiştiği diğer iki örnekte (M-2 ve M-3) ise InAs katman kalınlığındaki azalmayla orantılı olarak örgüdeki zorun bir önceki bölümde ele alınan, katman kalınlıklarının sabit tutularak ara yüz kalınlığının değiştirildiği örneklerin (SET-1) aksine pozitif yönde, yani örgüyü daraltacak (compressive) şekilde davranmaktadır. M-2 ve M-3 örnekleri için  $\Delta a/a$  değerleri, sırasıyla (+) 945 ppm ve (+) 1626 ppm olarak ölçülmektedir. İlgili açı aralığına odaklanarak çizdirilmiş grafikler Şekil 4.21’de gösterilmiştir: InAs katman kalınlığı azaldıkça SL sıfıncı piki sola doğru (küçük açılara doğru) kaymaktadır. Şekil 4.22’de grafikleri verilen InAs katman kalınlığının sabit tutularak GaSb katman kalınlığının değiştirildiği örneklerde, GaSb katman kalınlığındaki azalma (9 ML→7 ML) örgü uyumsuzluğunu arttırmaktadır (Çizelge 4.7). Ancak, GaSb kalınlığındaki değişimin, InAs kalınlığındaki değişime kıyasla  $\Delta a/a$  üzerinde daha az etkili olduğu dikkati çekmektedir.

Her iki örnek setinde (SET-1 ve 2) elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, örgü uyumsuzluğu mekanizmasında en baskın olan yapının InSb-benzeri ara yüz kalınlığı olduğu, InAs kalınlığındaki değişimin ise GaSb kalınlığındaki değişime oranla daha etkili olduğunu söylemek mümkündür.

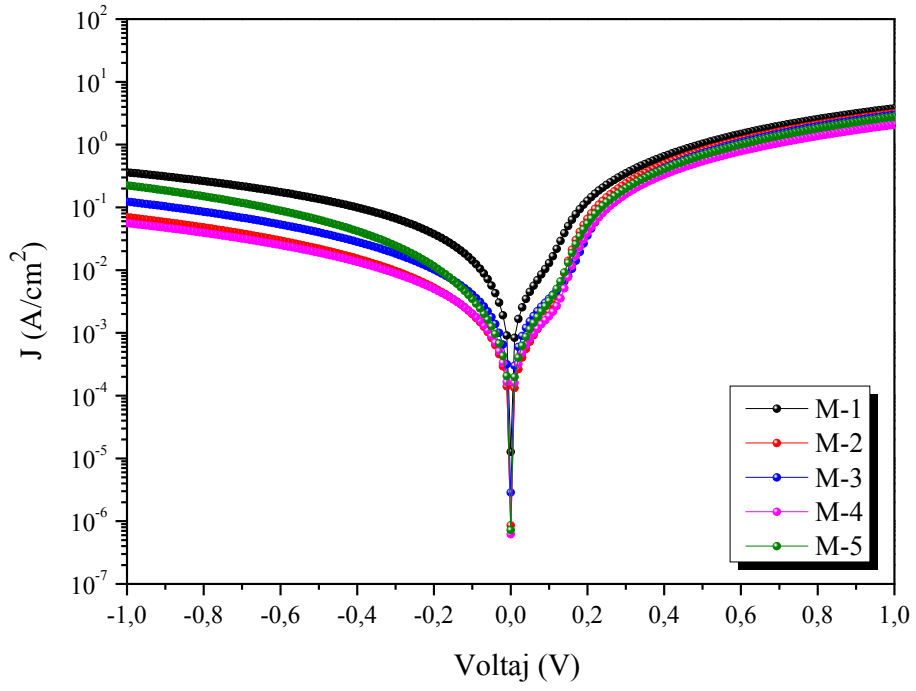


Şekil 4.21. M-1, M-2 ve M-3 numaralı örneklerde SL sıfırıncı piklerin GaSb (004) pikine göre konumlarını gösteren DCXRC grafiği

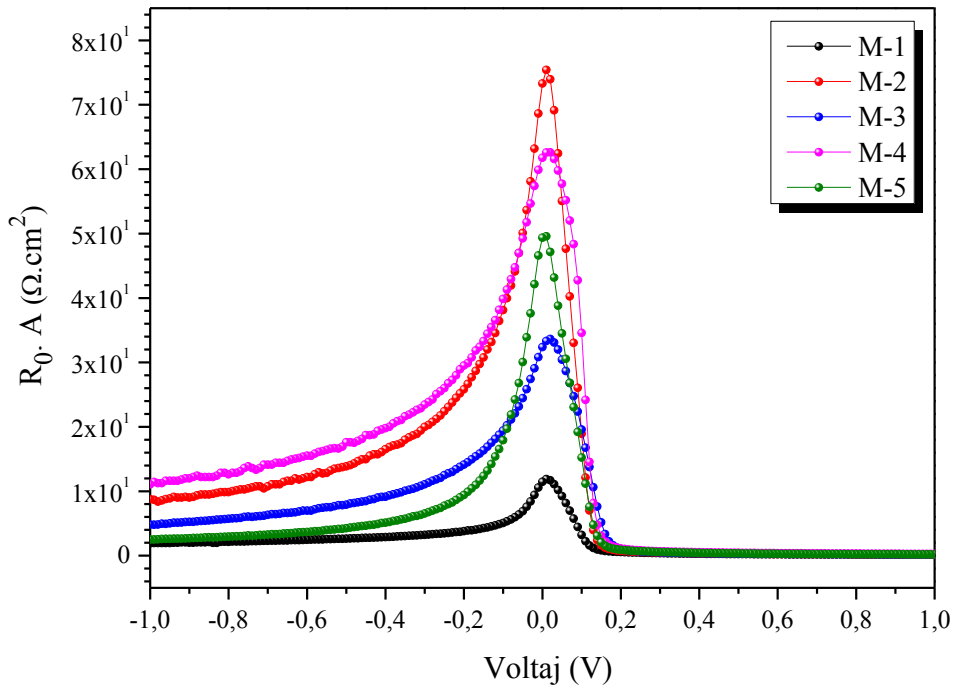


**Şekil 4.22.** M-3, M-4 ve M-5 numaralı örneklerde sıfırıncı piklerin alttaş pikine göre konumunu gösteren DCXRC grafiği

Aşağıdaki kısımda ise SL katman kalınlıklarında yapılan değişikliklerin bu grupta yer alan örneklerin elektriksel özellikleri ve optik performansları üzerindeki etkileri ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bölüm 2’de anlatılan cihaz üretim süreçleri kullanılarak üretilen SL fotodiyotların öncelikle I-V karakteristikleri gözlenmiştir (Şekil 4.23). Ölçümler, sıvı azot sıcaklığında ve 10 mV’luk adımlarla voltaj uygulanarak 400  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$  boyutunda mesalar üzerinden alınmıştır. I-V ölçümlerinden hesaplanan  $R_0.A$  çarpımlarının voltaja bağlı grafikleri ise Şekil 4.24’de verilmiştir. Sonuçlar, üretilen fotodiyotların  $R_0.A$  değerlerinin literatürdeki benzer yapıların altında olduğu görülmüştür. Bu sonuçlarda, örnekler üzerinde pasivasyon işlemi uygulanmamasına bağlı yüzey kaçaklarının baskın etken olduğu düşünülmektedir. Bu mekanizmayı etkilemesi muhtemel diğer bir husus ise yapı içerisindeki kusurların sebep olduğu kaçaklardır.



Şekil 4.23. SET-2’de yer alan örneklerin karanlık akım yoğunluğu-voltaj grafikleri



Şekil 4.24. SET-2’de yer alan örneklerin  $R_0 \cdot A$ -voltaj grafikleri

Bu grupta ele alınan SL örneklere ait tepkisellik ve kuantum verimi eğrileri (Şekil 4.25 ve 26'da) aşağıda verilmiştir. Spektrumda, 3,4  $\mu\text{m}$  civarında gözlenen optik tepkideki düşüş, ışığın optik yoldaki su buharı tarafından soğurulmasından kaynaklanmaktadır. Dedektörlerin kesim dalgaboyları ( $\lambda_c$ ), verilen spektrumda tepkiselliğin maksimum olduğu noktanın yarı değerine karşılık gelen dalgaboyu değerleri ( $\%50-\lambda_c$ ) alınarak belirlenmiştir. Bu değerler 4  $\mu\text{m}$  dalgaboyundaki tepkisellik ve QE değerleri ile birlikte Çizelge 4.8'de listelenmiştir.

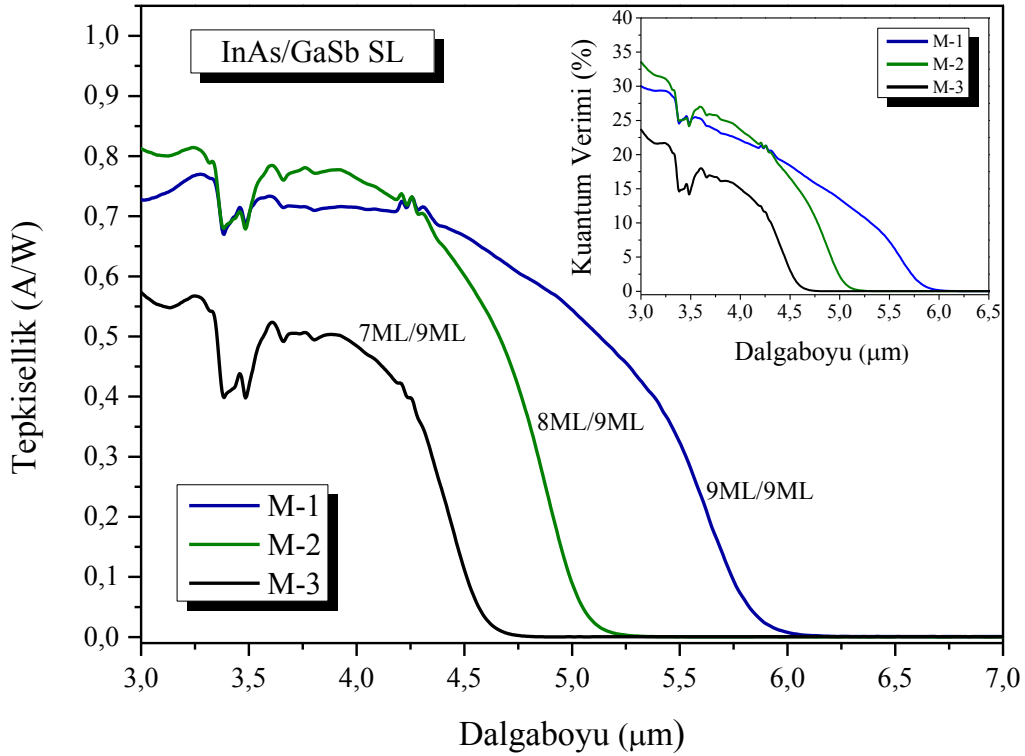
GaSb katman kalınlığının sabit olup InAs katman kalınlığının değiştiği M-1, M-2 ve M-3 örneklerinin tepkisellik ölçüm sonuçlarına bakılırsa (Şekil 4.25), ilk dikkati çeken nokta, InAs katman kalınlığındaki azalmayla birlikte, dedektörlerin kesim dalga boylarının küçük dalgaboylarına doğru (sola) belirgin bir biçimde kaydığıdır. Dedektörlere ait  $\%50-\lambda_c$  değerleri, M-1 örneği için 5,41  $\mu\text{m}$  iken M-2 ve M-3 örnekleri için sırasıyla 4,76 ve 4,36  $\mu\text{m}$ 'dir. Bu, sistemin bant aralığında yaklaşık 55,2 meV maviye kaymaya tekabül etmektedir. İletim bandındaki elektronlar için artan sınırlama (confinement) bu durumda etkilidir. Diğer bir göze çarpan durum ise InAs katmanının en ince, kesim dalgaboyunun en küçük olduğu örneğin tepkisellik değerinin diğer iki örneğe kıyasla daha düşük olmasıdır.

**Çizelge 4.8.** Örneklerin hedeflenen katman kalınlıkları ve optik ölçüm sonuçları

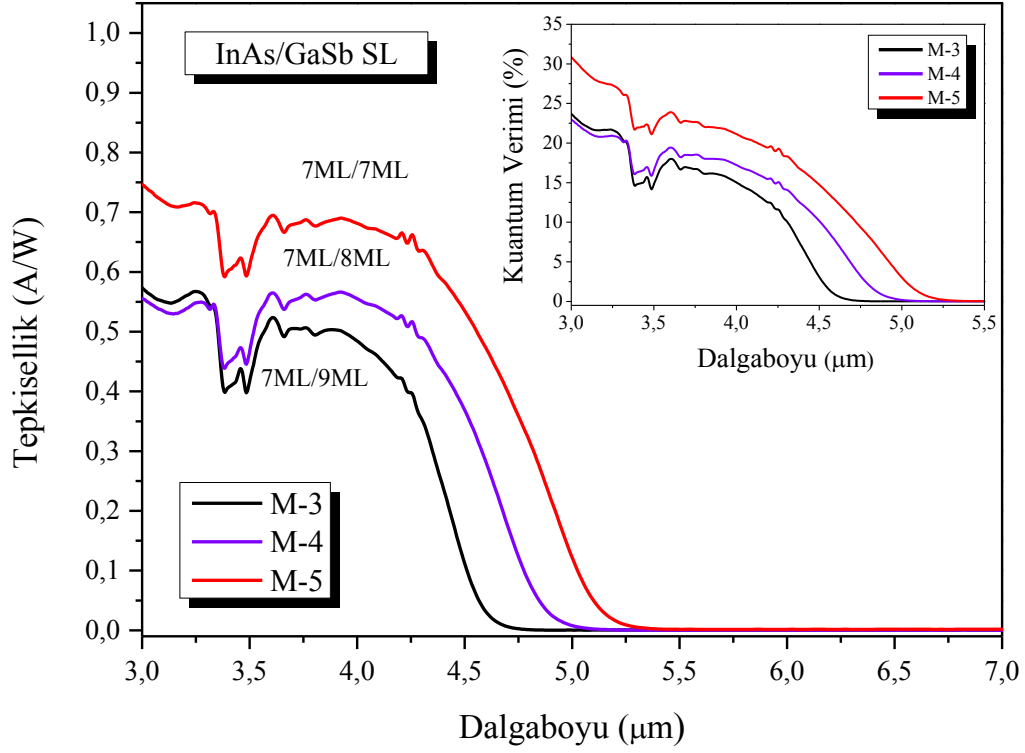
Örnek numarası	GaSb katman (ML)	InAs katman (ML)	$\%50-\lambda_c$ ( $\mu\text{m}$ )	4 $\mu\text{m}$ 'daki Tepkisellik (A/W)	4 $\mu\text{m}$ 'daki, QE (%)
<b>M-1</b>	9	9	5,41	0,7146	22,1
<b>M-2</b>	9	8	4,76	0,7631	23,6
<b>M-3</b>	9	7	4,36	0,4842	15,0
<b>M-4</b>	8	7	4,60	0,5551	17,2
<b>M-5</b>	7	7	4,73	0,6812	21,1

InAs katman kalınlığı 7 ML’da sabit tutularak GaSb katman kalınlığının değiştirildiği M-3, M-4 ve M-5 numaralı örneklere ilişkin grafikler (Şekil 4.26) ise azalan GaSb katman kalınlığının kesim dalgaboyunu büyük dalgaboylarına doğru kaydırıldığını göstermektedir (4,36’den 4,73  $\mu\text{m}$ ’ye). Bu, bant aralığı enerjisinde  $\sim 22,2$  meV kırmızıya kaymaya tekabül etmektedir. Burada, elektron dalga fonksiyonlarının üst üste binmelerinin etkisi baskın rol oynamaktadır.

Sonuçlara birlikte bakıldığında, InAs katman kalınlığındaki değişimin dedektörün kesim dalgaboyu (ya da bant aralığı) üzerindeki etkisi, GaSb kalınlığına değişime kıyasla daha baskın olduğu Şekil 4.25 ve 26’dan görülmektedir. Bu sonuç H. J. Haugan ve ark.’ın yaptığı çalışma ile uyumluluk göstermektedir [57]. Bu durumda, GaSb katmanlarda sınırlanmış boşluklar ve InAs katmanlarda sınırlanmış elektronlar arasındaki etkin kütle farklılığı önemli bir etkidir. Değerlik minibandının pozisyonu, iletim minibandı kadar katman kalınlığı değişimine tepki vermemektedir.

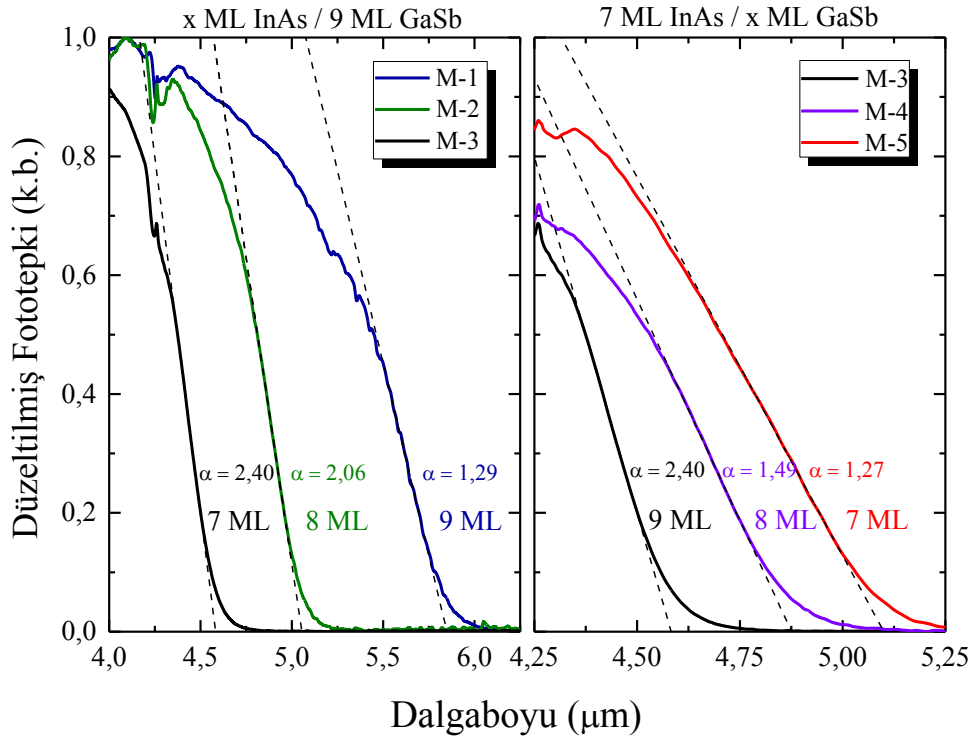


Şekil 4.25. M-1, M-2, M-3 numaralı SL fotodiyotların 77 K sıcaklığındaki tepkisellik ve kuantum verimi (QE) ölçüm sonuçları (iç grafik)

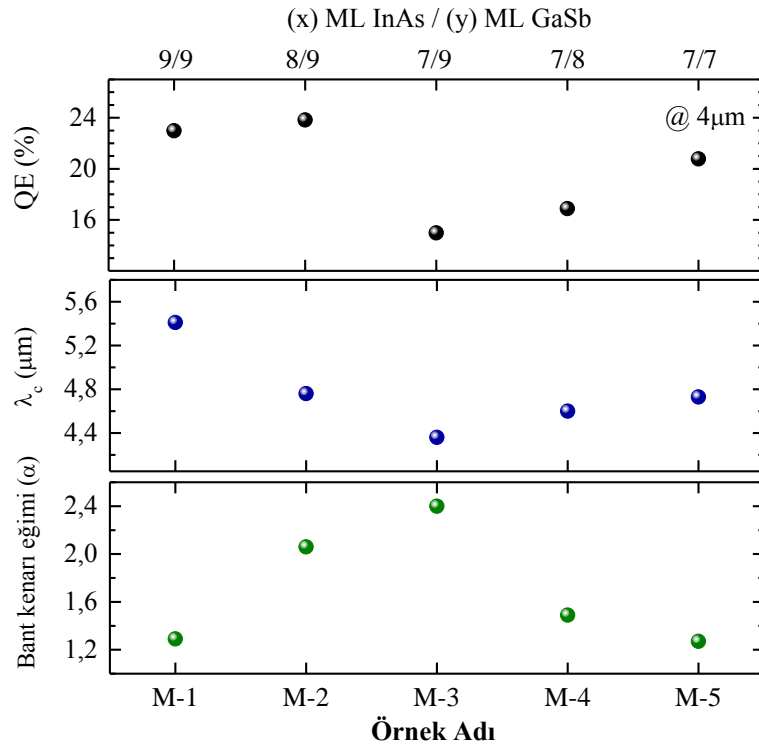


**Şekil 4.26.** M-3, M-4, M-5 numaralı SL fotodiyotların 77 K sıcaklığındaki tepkisellik ve kuantum verimi (QE) ölçüm sonuçları (iç grafik)

InAs/GaSb Tip-II SL fotodedektör yapılarında, soğurma bant kenarındaki değişim miktarları (bant kenarı eğimleri) incelenerek, SL katman kalınlıklarındaki değişimin taşıyıcılar üzerindeki sınırlama etkisi ve dalga fonksiyonları arasındaki örtüşme miktarı hakkında bir eğilim görülebileceği düşünülerek örneklerin bant kenarına karşılık gelen bölgesine yapılan lineer fit üzerinden bant kenarı eğimleri hesaplanmıştır. InAs katman kalınlığının azalmasıyla ve GaSb katman kalınlığının artmasıyla birlikte eğimde bir artış gözlenmektedir (Şekil 4.27). Söz konusu artış, elektronlar üzerindeki sınırlamanın artmasına bağlanmaktadır. Şekil 4.28’de ise 4 μm dalga boyundaki kuantum verimlerinin, kesim dalga boylarının ve bant kenarı eğimlerinin örnek numarasına göre birlikte değerlendirildiği grafik çizdirilerek sunulmuştur.



Şekil 4.27. SET-2’de yer alan örneklerde InAs ve GaSb kalınlığına bağlı olarak bant kenarı eğiminin değişimi



Şekil 4.28. Katman kalınlığındaki değişimin 77 K sıcaklığında fotodedektör parametreleri üzerindeki etkileri; QE, %50- $\lambda_c$ , bant kenarı yakınında fototepkinin eğimi

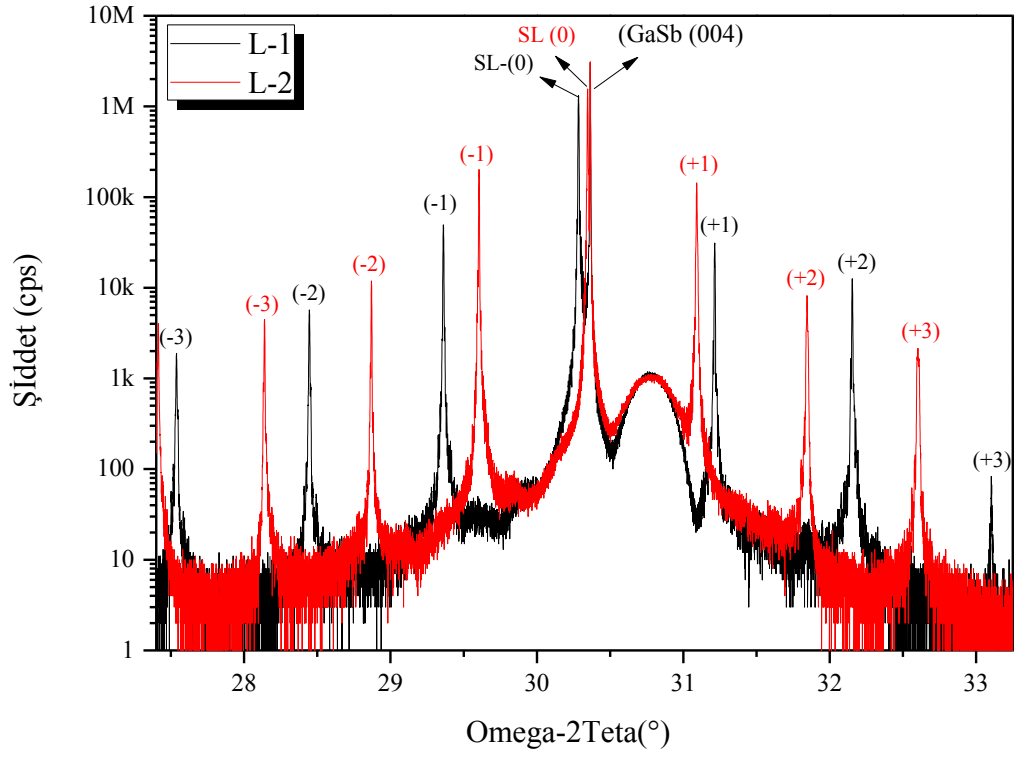
#### 4.1.3. LWIR bölgede çalışmak üzere tasarlanmış InAs/GaSb Tip-II SL fotodedektör yapıları GaSb alttaşlar üzerine büyütme çalışmaları

Çalışmanın bu kısmında, InAs ve GaSb katman kalınlıklarını değiştirilerek kesim dalgaboyu 8 ile 12  $\mu\text{m}$  arasında yer alması hedeflenen InAs/GaSb tip-II SL fotodedektör yapılarına ilişkin karakterizasyon sonuçları sunulmuştur. Hedeflenen yapı için InAs ve GaSb katman kalınlıkları sırasıyla 14 ve 7 ML olarak belirlenmiş ve tasarlanan yapı aşağıdaki kepenk organizasyonu kullanılarak büyütülmüştür (Çizelge 4.9). Toplam iki adet örnek büyütülmüş olup süperörgü içerisindeki InAs katmanlar ve şapka katmanları L-1 numaralı örnekte V/III=7 oranında, L-2 numaralı örnekte V/III=4 oranında büyütülmüştür. Diğer bütün parametreler her iki örnek için de aynı tutulmuştur. Bu grupta yer alan örnekler SET-3 olarak isimlendirilmiştir.

Çizelge 4.9. Büyütülen süperörgülerde kullanılan kepenk organizasyonları (SET-3)

Örnek numarası	GaSb katman büyüme süresi	Sb <sub>2</sub> akısı süresi	In flaş süresi	InAs Katman büyüme süresi	Bekleme süresi	In flaş süresi	Sb <sub>2</sub> akısı süresi	GaSb Katman büyüme süresi
L-1	21,14 s	3,2 s	3,0 s	49,56 s	0,5 s	3,0 s	3,2 s	21,14 s
L-2	21,14 s	3,2 s	3,0 s	49,56 s	0,5 s	3,0 s	3,2 s	21,14 s

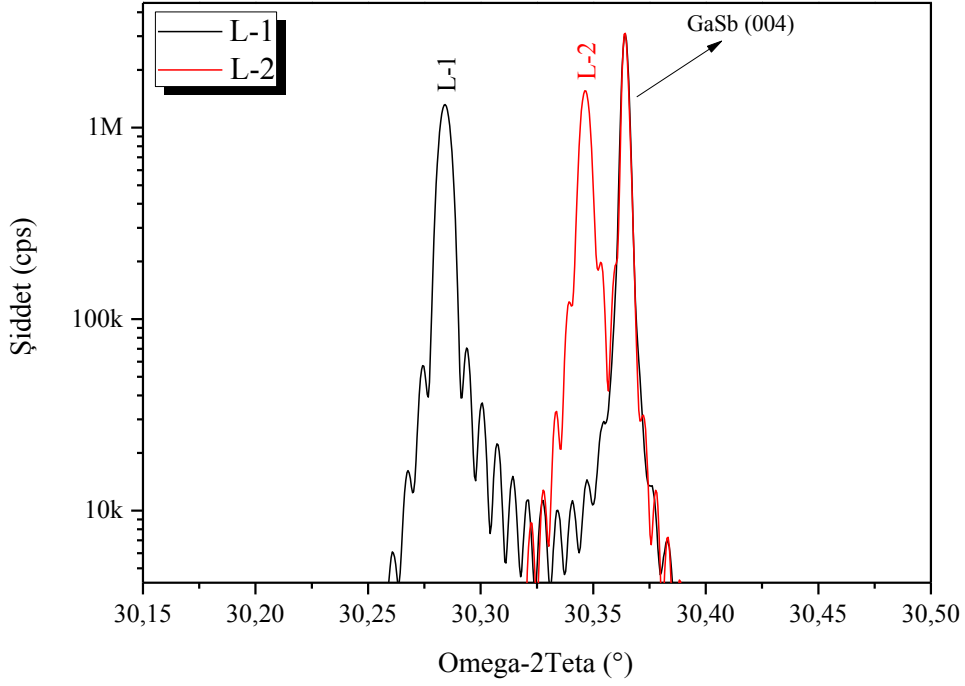
Örnekler üzerinde yapılan HRXRD sallantı eğrisi analizlerinde her iki örnekte de süperörgü piklerinin oldukça temiz ve keskin olduğu görülmektedir (Şekil 4.29). SL sıfıncı piklerin GaSb (004) pikine göre pozisyonlarını gösteren grafik ise ilgili açılı aralığına odaklanarak çizdirilmiştir (Şekil 4.30). Burada, InAs katmanların düşük arsenik akısı altında büyütmenin örgü uyumsuzluğu üzerinde fark edilir bir etkiye sebep olması ilginç bir sonuçtur. Bu durumun, V/III orandaki değişimin büyüme oranına olası etkilerinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ölçülen SL periyot değerlerinden, iki örnek arasında  $\sim 1,5 \text{ \AA}$ 'lık fark olduğu görülmektedir. Bu etkiye E. Plis tarafından yapılan tez çalışmasında da değinilmektedir [8].



Şekil 4.29. L-1 ve L-2 numaralı örneklerin çift-kristal X-ışını sallantı eğrileri

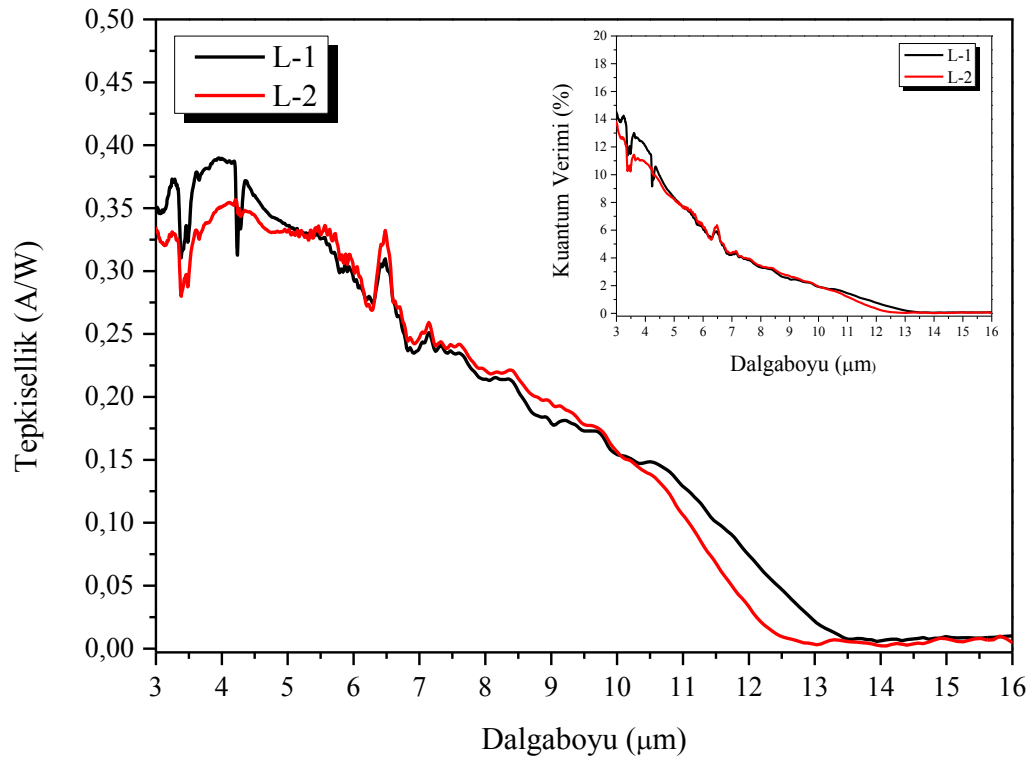
Çizelge 4.10. L-1 ve L-2 numaralı örneklerin DCXRC analiz sonuçları

Örnek numarası	SL periyot (Å)	$\Delta a/a$ (ppm)	FWHM (Sıfırıncı SL pik) (arcsec)
L-1	67,2±0.2	+ 2465	20,2
L-2	68,7±0.1	+ 529	20,0



**Şekil 4.30.** L-1 ve L-2 numaralı örneklerde SL sıfırncı piklerin GaSb (004) pikine göre konumunu gösteren DCXRC grafiği

LWIR bölge için tasarlanmış iki örneğin tepkisellik ve kuantum verimi ölçüm sonuçlarına bakılırsa, tepkiselliğin MWIR bölgede çalışan örneklere kıyasla düşük olduğu görülmektedir (Şekil 4.31). Dedektörlerin 8  $\mu\text{m}$ 'den büyük dalgaboyu bölgesindeki tepkileri referans alınarak belirlenen %50 kesim dalgaboyları L-1 ve L-2 örnekleri için sırasıyla 11,37  $\mu\text{m}$  ve 10,94  $\mu\text{m}$ 'dir. Dedektörlerin kuantum verimleri ise iki örnek için de benzer davranış göstermektedir. 8  $\mu\text{m}$  dalgaboyundaki kuantum verimleri L-1 örneği için % 3,31 iken L-2 örneği için % 3,42'dir.



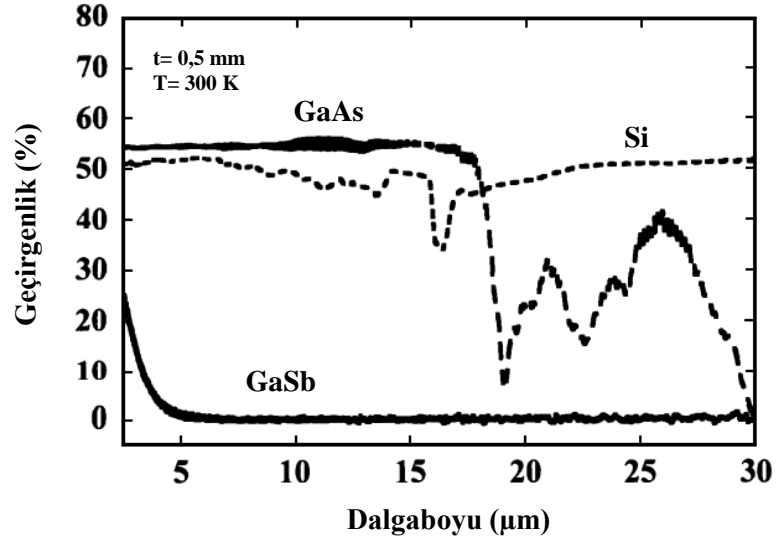
Şekil 4.31. L-1 ve L-2 numaralı örneklerin tepkisellik ve kuantum verimi (QE) ölçüm sonuçları (iç grafik)

## 4.2. InAs/GaSb Tip-II SL Fotodedektör Yapıları GaAs Alttaş Üzerine Büyütme Çalışmaları

Çalışmanın bu bölümünde, GaAs alttaşlar üzerine büyütülen MWIR bölgede çalışmak üzere tasarlanmış InAs/GaSb Tip-II SL fotodedektörlerin epitaksiyel büyütme ve karakterizasyon çalışmalarına ilişkin bilgiler sunulmuştur.

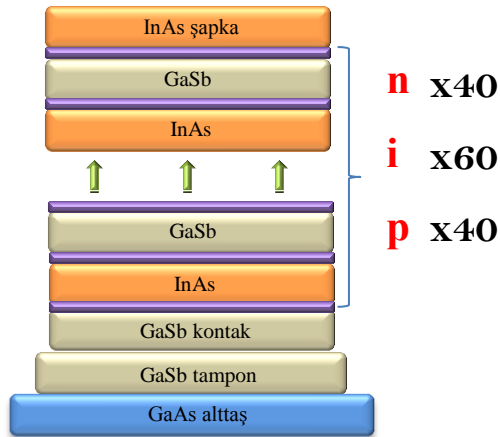
InAs/GaSb süperörgüler için örgü uyumu açısından en ideal alttaş GaSb alttaşlardır. Bu yapıların örgü uyumu açısından uyumlu alttaşlar üzerine büyütülmesi örgüdeki yanlış (ya da eksik) yerleşme yoğunluğunun ve kusur kaynaklı kaçak akımların azaltılması açısından oldukça önemlidir. Ancak, GaSb alttaş ile çalışmanın da getirdiği olumsuzluklar söz konusudur. Bunlardan birisi GaSb alttaşların katkısız olarak üretilememesi sebebiyle güçlü serbest taşıyıcı absorpsiyonuna sahip olmasıdır. İletimdeki artış IR algılamayı bozan arka plan gürültüsünü arttırmaktadır. GaAs alttaşlar ise GaSb'nin aksine katkısız, görel olarak daha yüksek kalitede, daha büyük boyutlarda ve nispeten daha düşük bir maliyetle üretilebilmektedir. Bu özellikleri nedeniyle, her ne kadar süperörgülerle aralarında yüksek örgü uyumsuzluğu (~%7,8) söz konusu olsa da InAs/GaSb SL yapıların GaAs alttaşlar üzerine büyütülmesi cazibe yaratmaktadır. Ayrıca, bu yapıların büyük boyutlu alttaşlar üzerine homojen olarak büyütülebilmesi odak düzlemlili tarla (FPA) uygulamaları açısından oldukça büyük öneme sahiptir. GaSb alttaşlar günümüzde 4 inç boyutuna kadar üretilebilmekte ve ticari olarak temin edilebilmektedir. GaAs alttaşlar ise 6 inç boyutlara kadar ve GaSb'ye kıyasla daha yüksek kristal kalitesine sahip olarak üretilebilmektedir. Bu çalışmadaki yapılar kullanılan MBE sistemi ile çalışılabilecek maksimum boyut olan 4 inç GaAs alttaşlar üzerine büyütülmüştür. GaSb alttaşların yüksek soğurma katsayıları nedeniyle 5  $\mu\text{m}$  ve ötesindeki kızılötesi radyasyonu yüksek oranda soğurduğundan arkadan aydınlatmanın yapıldığı FPA çalışmalarında alttaşın kaldırılması gerekmektedir. Bu durum üretime ekstra zahmetli bir süreci ve maliyeti dahil etmektedir. GaAs'in söz konusu bölgedeki soğurma katsayısı GaSb'ye kıyasla yaklaşık 2 kat daha düşüktür (Şekil 4.32). Tüm bunların yanında, örgü uyumsuzluğunun etkilerini minimize eden, yapıdaki zor ve yanlış (ya da eksik)

yerleşme yoğunluğunu azaltan ara yüz ve epikatman çalışmaları da bu yapıların GaAs alttaşlar üzerine sorunsuz olarak büyütülmesine destek sağlamaktadır.



Şekil 4.32. GaSb, GaAs ve Si alttaşların kızılötesi geçirgenlik spektrumları [62]

Çalışılan InAs/GaSb SL yapılar, GaSb alttaşlar üzerine büyütülen yapılar gibi büyüme doğrultusunda p-i-n yapısında tasarlanmış olup 40(p)/60(i)/40(n) olmak üzere toplam 140 tekrarlı olarak büyütülmüştür. Süperörgü öncesinde alt kontak katmanı olarak 500 ile 1000 nm arasındaki değişen kalınlıklarda p-GaSb, sonrasında ise üst kontak (şapka) olarak 20 nm n-InAs katman büyütülmüştür. Büyütülen yapılara ilişkin temel büyütme parametreleri Çizelge 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.33. InAs/GaSb süperörgü yapının katmanların şematik gösterimi

GaSb tampon ve p-GaSb kontak katmanlar kalın olmaları sebebiyle bu katmanlar büyütülürken SL yapı içerisindeki GaSb katmanlara göre yüksek büyüme hızları kullanılmıştır. Düşük büyüme hızlarında kristal kalitesinin nispeten daha iyi olması nedeniyle GaSb büyüme hızı, süperörgü içerisinde düşürülmüştür. Büyütülen örneklerde kullanılan V/III oranları ile büyüme sıcaklıkları da yine aynı çizelgede (Çizelge 4.11) verilmiştir. Büyütülen örnekler arasında zaman farklılığı olduğundan epitaksiyel büyüme parametreleri açısından farklılıklar bu tür çalışmalarda kaçınılmaz olmaktadır. Özellikle MBE sistemine yapılan servis ve yeni malzeme yükleme işlemleri sonrasında, büyüme parametreleri açısından sistem kalibrasyonunda değişiklikler olabilmekte aynı hücre sıcaklığında veya vana (valf) değerlerinde aynı büyüme hızı ve akı değerleri yakalanamamaktadır. Eski değerlerde kalibre olmak mümkün olmakla birlikte çok sayıda örnek büyütmeyi gerektirmektedir. Bu çalışmada, bu tür durumlarda seçilen makul bir noktada kalibre olunup o değerlerle büyüme işlemlerine devam edilmiştir.

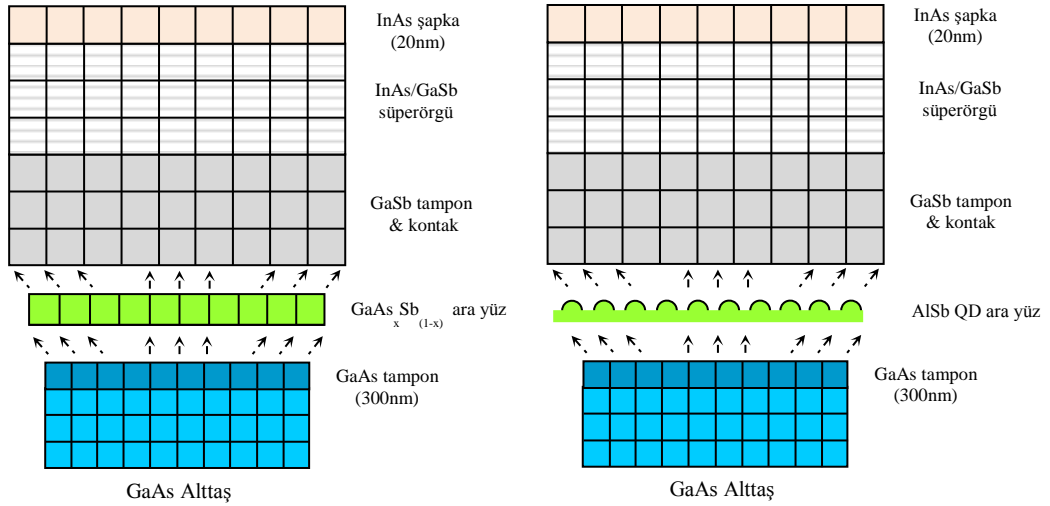
**Çizelge 4.11.** GaAs alttaşlar üzerine büyütülen örneklere ilişkin epitaksiyel büyüme parametreleri

	<b>Örnek numaraları</b>	<b>GaSb Tampon &amp; Kontak</b>	<b>GaSb (SL)</b>	<b>InAs (SL)</b>	<b>InAs şapka</b>
<b>Büyüme Hızları</b>	<b>S-1, S-2</b>	0,47 ML/s	0,35 ML/s	0,29 ML/s	0,29 ML/s
	<b>S-3</b>	0,395 ML/s	0,20 ML/s	0,316 ML/s	0,316 ML/s
	<b>S-4, S-5, S-6</b>	0,52 ML/s	0,395 ML/s	0,316 ML/s	0,316 ML/s
<b>V/III Oranları</b>	<b>S-1, S-2</b>	9,7	7,5	7	4
	<b>S-3</b>	17,7	23,8	6,9	4,6
	<b>S-4, S-5</b>	19,2	20,9	6,9	4,6
	<b>S-6</b>	19,2	23,8	6,9	6,1
<b>Büyüme Sıcaklıkları</b>	<b>S-1, S-2, S-3, S-4, S-5, S-6</b>	505±2 °C	405±5 °C	405±5 °C	405±5 °C

Örnekler için büyüme parametreleri belirlenirken epikatman çalışmaları ve GaSb alttaş üzerine yapılan SL büyütme çalışmaları referans alınmıştır. GaSb tampon katmanlar 0,4-0,52 ML/s arasındaki büyüme hızlarında, süperörgü içerisindeki GaSb katmanlar 0,2 ML/s (S-3 numaralı örnek), 0,35 ML/s (S-1, S-2 numaralı örnekler) ve 0,4 ML/s (S-4, S-5 ve S-6 numaralı örnekler) hızlarında, süperörgü içerisindeki InAs katmanlar ve InAs şapka katmanları 0,29 (S-1, S-2) ve 0,31 ML/s (S-3, S-4, S-5, S-6) büyüme hızlarında büyütülmüştür. Birden fazla büyüme hızı tanımlanmasının nedeni farklı zamanlarda büyütülen örneklerde farklı hızların kullanılmasıdır. GaSb tampon, kontak ve SL içerisindeki katmanlarında V/III oranı olarak, S-1 ve S-2 örneklerinde ~10, diğer örneklerde epikatman çalışmaları referans alınarak 18-24 arasında oranlar kullanılmıştır. Süperörgü içerisindeki InAs katmanlarda 7, şapka katmanında ise 4, 4,6 ve 6,1 oranları kullanılmıştır. Diğer bir önemli büyütme parametresi olan büyütme sıcaklığı için ise bütün örnekler için aynı değerler kullanılmıştır. GaSb tampon ve kontak katmanları  $505 \pm 2$  °C sıcaklığında, InAs/GaSb SL katmanlar ve InAs şapka katmanları da  $405 \pm 5$  °C'de (büyütmeye başlanılan sıcaklık) büyütülmüştür. Süperörgü katmanlar büyürken yüzey malzemesi sürekli olarak değiştiğinden pirometre kararlı okuma yapamamaktadır, anlık okunan sıcaklıklar değişmektedir. Örneğin, InAs katmanlar büyürken pirometreden okunan sıcaklık değeri  $415 \pm 5$  °C, GaSb büyürken okunan sıcaklık değeri  $430 \pm 5$  °C civarında değişmektedir. Süperörgü katmanlar büyürken ısıtıcı sıcaklığına herhangi bir müdahalede bulunulmamaktadır.

Bu kapsamda büyütülen örneklerde GaAs→GaSb geçişinde, GaAs üzerine GaSb epikatman büyütme çalışmalarında ele alınan  $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{(1-x)}$  ve AlSb QD ara yüz yapılar kullanılmıştır. Daha önce belirtildiği üzere, GaAs üzerine GaSb veya InAs'i herhangi bir ara yüz oluşumu kullanmaksızın doğrudan büyütme, etkileri büyütülecek süperörgüye de yansıyan kusur ve dislokasyonlara neden olmaktadır. Bu bölgeler, fotodiyot yapısı içerisinde ışınımsız yeniden birleşme (non-radiative recombination) süreçlerini artıran tuzak merkezleri veya iletken kaçak kanalları (conductive leakage channels) gibi davranabilmektedirler. Bu iki durum da cihaz performansında ciddi düşüşe sebebiyet veren hususlardır [63].

GaAs alttaşlar üzerine büyütülen InAs/GaSb SL yapılarında yüksek kaliteyi yakalayabilmek için GaAs alttaş üzerine yeterince kalın GaAs tampon katman büyütmek, GaAs→GaSb geçişinde bozulmaları azaltacak ara yüz oluşturmak, makul kalınlıkta ve kalitede GaSb tampon ve kontak epikatman büyüterek süperörgü öncesinde pürüzsüz ve düşük kusur oranına sahip bir zemin hazırlamak, kalınlık ve stres optimizasyonunun yapıldığı SL reçetesini oluşturmak oldukça önemlidir. Bu çalışmada, her bir aşama titizlikle ayrı ayrı çalışılmış, epitaksiyel büyütme parametreleri optimize edilmiş, performansı/verimi GaSb alttaş üzerine büyütülen yapılarla kıyaslanabilir dedektörler üretilmeye çalışılmıştır. Büyütülen yapılar şematik olarak şekil 4.34’de gösterilmiştir. Çizelge 4.12’de ise büyütülen örneklere kullanılan ara yüz türleri, GaSb tampon ve kontak katman kalınlıkları örnek numarasında bağlı olarak listelenmiştir.



**şekil 4.34.** GaAs alttaşlar üzerine büyütülen SL fotodedektör yapıların şematik gösterimi

Çizelge 4.2’de görüldüğü üzere, GaAs zerine büyütülen GaSb epikatman kalınlığı (tampon+kontakt) en az 2500 nm, en fazla 3500 nm’dir. Bu değer literatürde ulaşılabilen benzer çalışmalarda 4000 nm veya üzerindedir. GaAs→GaSb geçişindeki zorlanmayı ve etkilerini mümkün olduğunca ince katmanlarda yenmek, GaAs alttaş üzerine yapılan büyütmelerde zaman ve malzeme kullanımını açısından avantaj sağlayacak bir durumdur.

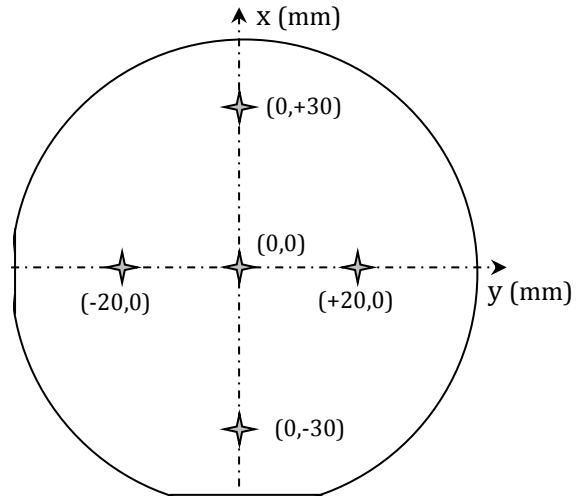
**Çizelge 4.12.** GaAs alıtışlar üzerine büyütölen InAs/GaSb süperörgölerin yapısal özelliklerine ilişkin bilgiler

Örnek Numarası	GaAs→GaSb geçiş ara yüzü	GaSb tampon kalınlığı	GaSb kontak kalınlığı	InAs/GaSb SL çalışma bölgesi
S-1	GaAs <sub>x</sub> Sb <sub>(1-x)</sub>	2000 nm	1000 nm	MWIR
S-2	GaAs <sub>x</sub> Sb <sub>(1-x)</sub>	2000 nm	1000 nm	MWIR
S-3	AlSb QD	2500 nm	500 nm	MWIR
S-4	AlSb QD	2000 nm	500 nm	MWIR
S-5	AlSb QD	2000 nm	500 nm	MWIR
S-6	GaAs <sub>x</sub> Sb <sub>(1-x)</sub>	2500 nm	1000 nm	MWIR

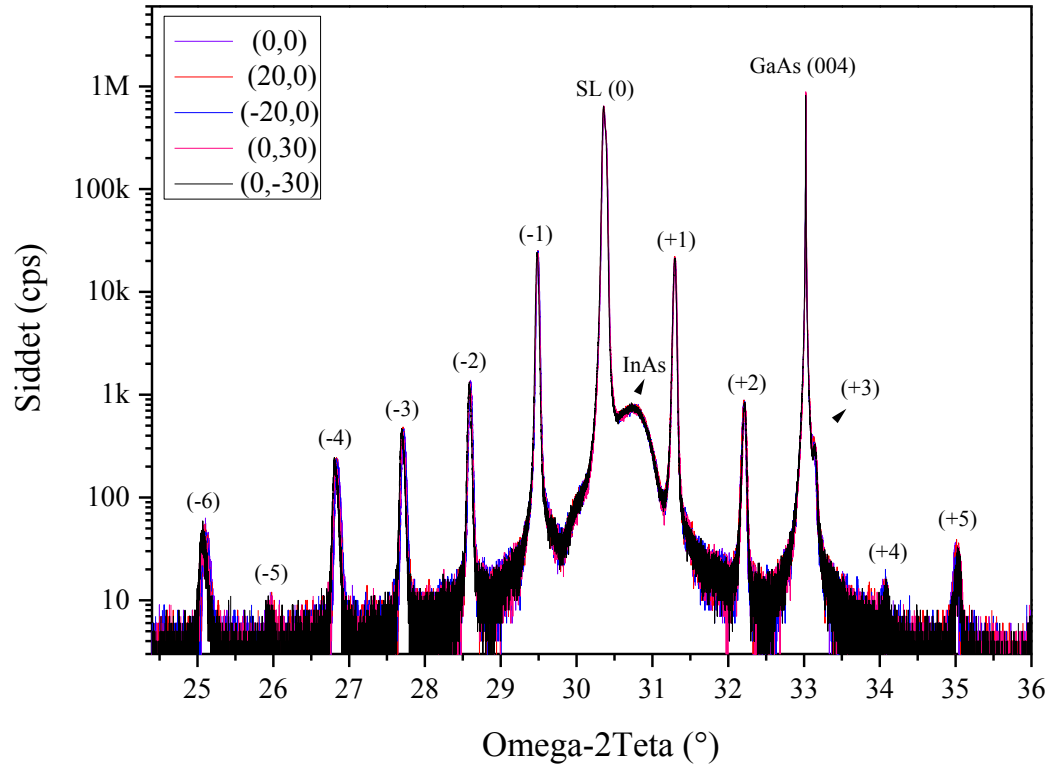
#### 4.2.1. Alıtış üzerindeki tekdüzeliğın kontrolü

GaAs alıtışlar üzerine büyütölen süperörgölerde tekdüzelik (uniformity) kontrolü, büyütme sonrasında bir tanesi alıtışın merkezinden olmak üzere toplamda 5 farklı noktadan (Şekil 4.35) DCXRC ölçümleri yapılarak gerçekleştirilmiştir.

Yapılan ölçümlere ilişkin sallantı eğrileri üst üste çizdirilmiş bir biçimde Şekil 4.36'da verilmiştir. Farklı noktalardan alınan ölçümlere ait kırınım desenlerinin bire bir aynı olması büyütölen filmin alıtış üzerinde oldukça tekdüze olduğunu göstermektedir. Bu sonuç, III-V MBE sistemi ile çalışılmasının bu bağlamdaki avantajlı yanını da doğrular niteliktedir.



Şekil 4.35. S-7 numaralı örnekten DCXRC ölçümü alınan noktalar



Şekil 4.36. S-7 numaralı örneğin DCXRC haritalaması

#### **4.2.2. MWIR bölgede çalışan InAs/GaSb SL fotodedektörleri GaAs alttaşlar üzerine büyütme çalışmaları**

GaAs alttaşlar üzerine büyütülmüş InAs/GaSb SL örneklere ilişkin yapısal, elektriksel ve optik karakterizasyon bilgileri çalışmanın bu kısmında sunulmuştur. MWIR bölgesinde çalışan toplam 6 adet dedektör yapısı çalışılmış olup bu yapılardan üçü GaSb alttaş üzerine de büyütülerek optik ve elektriksel özellikleri bakımından kıyaslamalı değerlendirilmesi yapılmıştır.

##### **4.2.2.1 GaAs alttaşlar üzerine büyütülen SL yapıların yapısal karakterizasyonu**

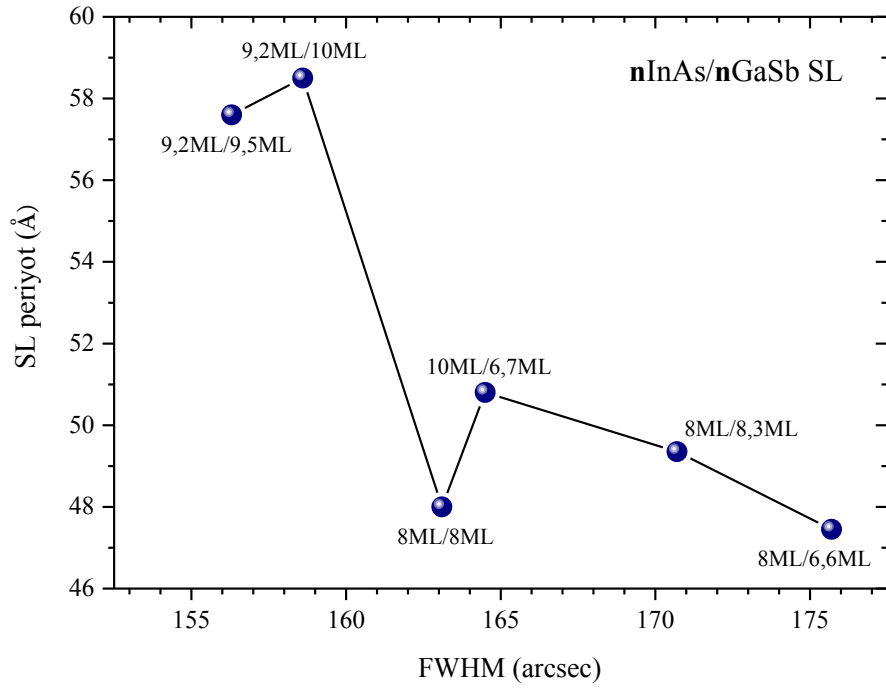
Büyütülen süperörgülerin kristal kalitesinin, periyot kalınlıklarının, GaSb tampon katmanı ile SL arasındaki örgü uyumsuzluğunun tespiti için örneklerin DCXRC ölçümleri yapılmıştır. Örneklere ait DCXRC analiz sonuçları Çizelge 4.13'de, çift-kristal sallantı eğrileri ise Şekil 4.38-42'de verilmiştir. Süperörgülerin (-1)'inci uydu piklerinin FWHM değerleri burada kristal kalitesinin bir ölçütü olarak değerlendirilmiştir. Söz konusu değerlendirme için yaygın olarak SL sıfırncı piki kullanılmaktadır. Ancak, örgü uyumsuzluğunun çok küçük olduğu örneklerde, GaSb (004) piki ile süperörgünün sıfırncı piki açısally olarak yeterince ayrışmadığından pik genişliğinin ölçümü yanıltıcı olmakta ve kalite göstergesi bakımından sağlıklı bir değerlendirmeye izin vermemektedir. GaAs üzerine büyütülen süperörgülerden elde edilen piklerin FWHM değerlerinin GaSb üzerine büyütülen benzer yapılarla kıyaslandığında 5-6 kat daha fazla olduğu görülmektedir. GaAs alttaşlar üzerine büyütülen örneklerin FWHM değerlerine dikkatle bakıldığında, düşük periyodisiteye sahip süperörgülerde değerlerde ( $\leq 50 \text{ \AA}$ ) belirgin bir artış, dolayısı ile kalitede görelly bir azalma söz konusudur (Şekil 4.37). Sallantı eğrilerine bakıldığında verilen örnekler için örgü uyumsuzluğunun ( $\Delta a/a$ ) hemen hemen olmadığı görülmektedir. Yani süperörgünün sıfırncı piki ile GaSb tampon ve kontak katmana ait pik arasında belirgin bir ayrılma görülmemektedir. Burada, var olan olası ayrılmanın piklerin geniş olmaları sebebiyle perdelenmesi de ihtimal dahilindedir. SL uydu pikleri,

GaSb üzerine büyütülen süperörgülere ait pikler kadar dar olmasalar da oldukça keskin ve temiz bir görünümde dir. S-1, S-2 ve S-4 numaralı örneklere ait sallantı eğrisi grafiklerinde SL (+3) uydu piki GaAs alttaş piki ile çakıştığından gözlenememektedir. InAs şapka katmana ait pik oluşumu ise bütün örneklerde olması gerektiği yerde ve sorunsuz görünmektedir. SL (-2) pikinin şiddetinin periyodisitenin görel i olarak yüksek olduğu örneklerde kısmen sönümlendiği grafiklerde göze çarpan diğ er bir husustur.

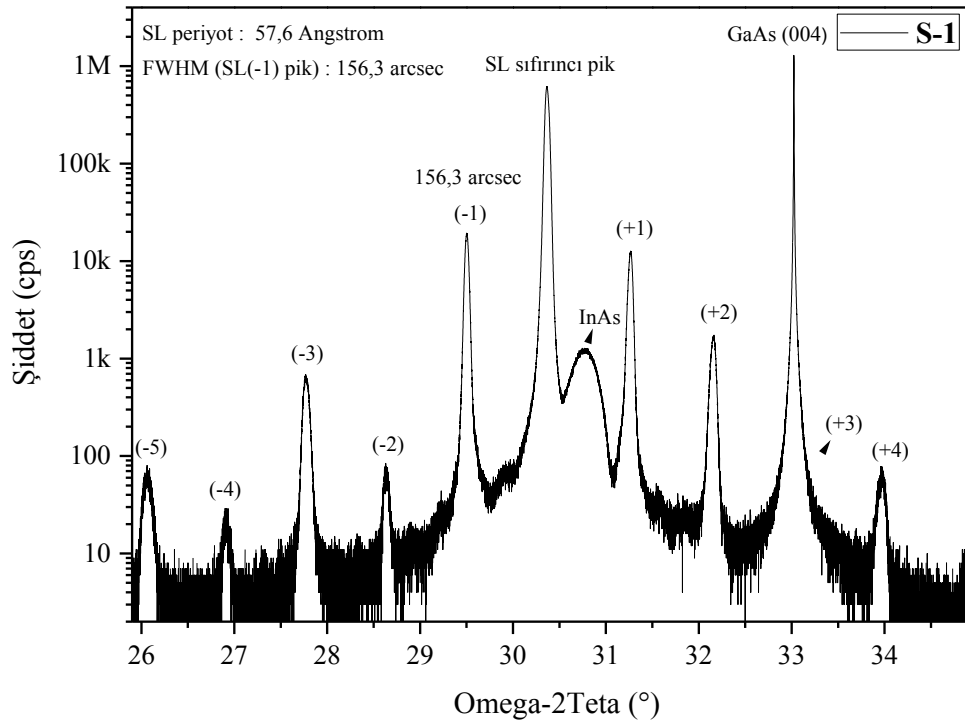
DCXRC analizlerinden elde edilen bütün bu veriler, GaAs alttaşlar üzerine SL yapıların sorunsuz bir şekilde büyütülebildiklerini, büyütülen yapıların kalite açısından oldukça iyi durumda olduklarını göstermektedir.

**Çizelge 4.13.** GaAs alttaşlar üzerine büyütülen InAs/GaSb süperörgüler için DCXRC analiz sonuçları

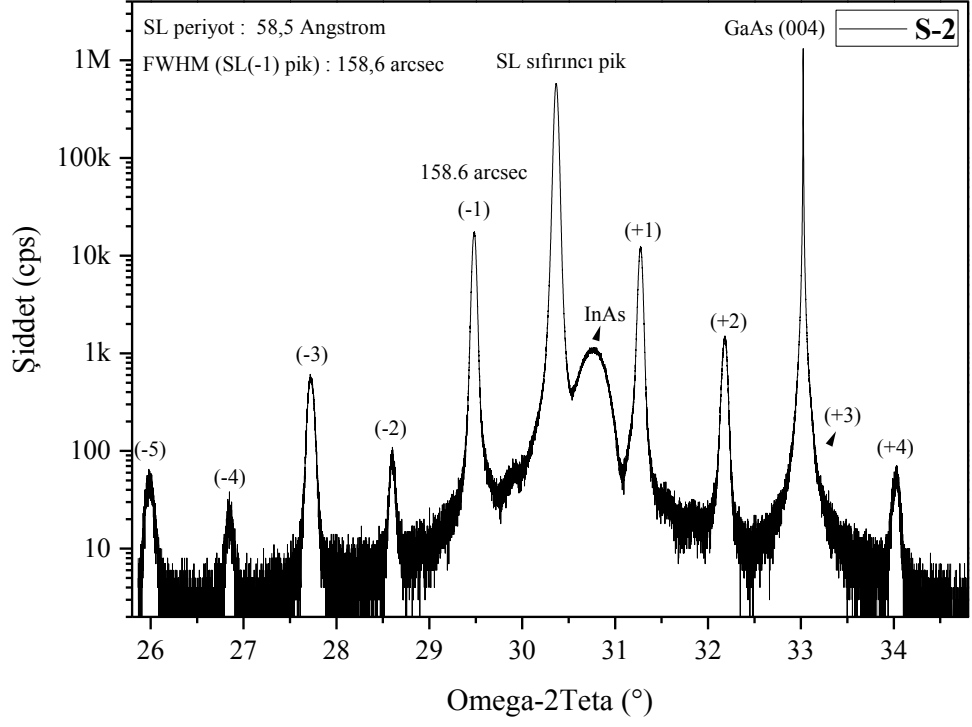
Örnek Numarası	InAs Kalınlığı (ML)	GaSb Kalınlığı (ML)	Periyot Kalınlığı (Å)	SL (-1) piki FWHM değeri (arcsec)
S-1	9,2	9,5	57,6	156,3
S-2	9,2	10	58,5	158,6
S-3	10	6,7	50,8	164,5
S-4	8	8	48,0	163,1
S-5	8	6,6	47,5	175,7
S-6	8	8,3	49,4	170,7



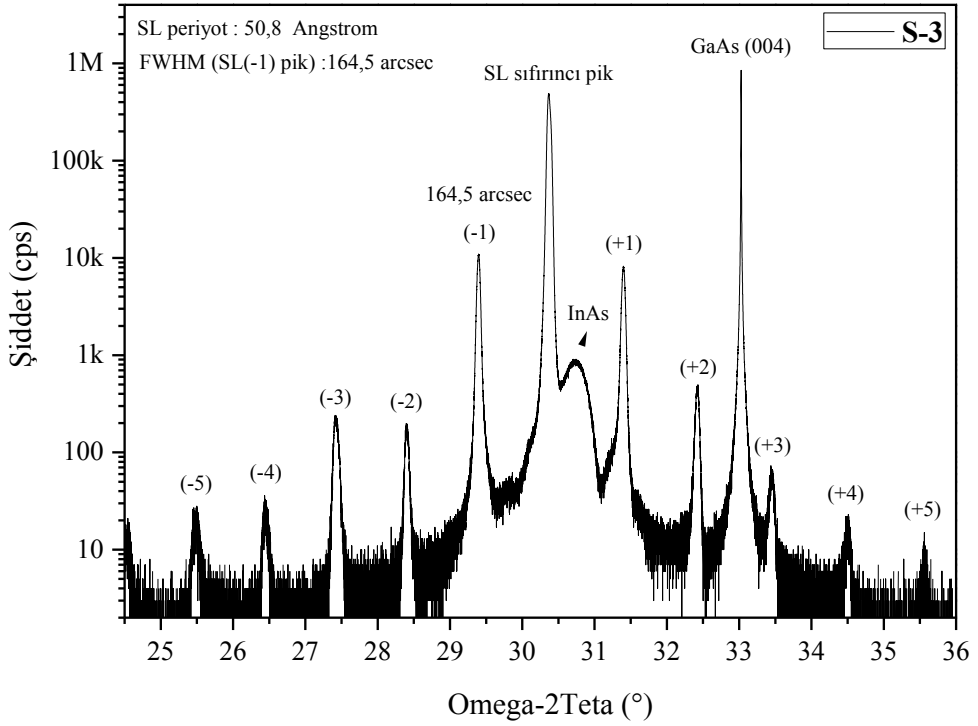
Şekil 4.37. SL periyot değerlerinin SL (-1)'inci uydu pikine ait FWHM değerine karşı grafiği



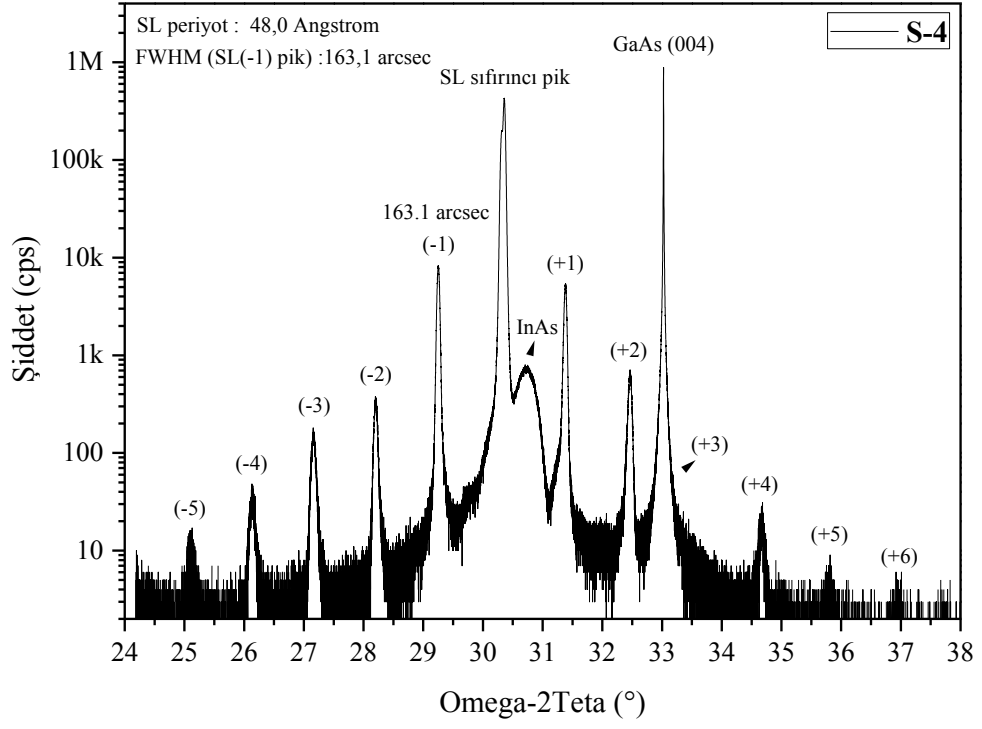
Şekil 4.38. S-1 numaralı örneğin çift-kristal X-ışını sallantı eğrisi



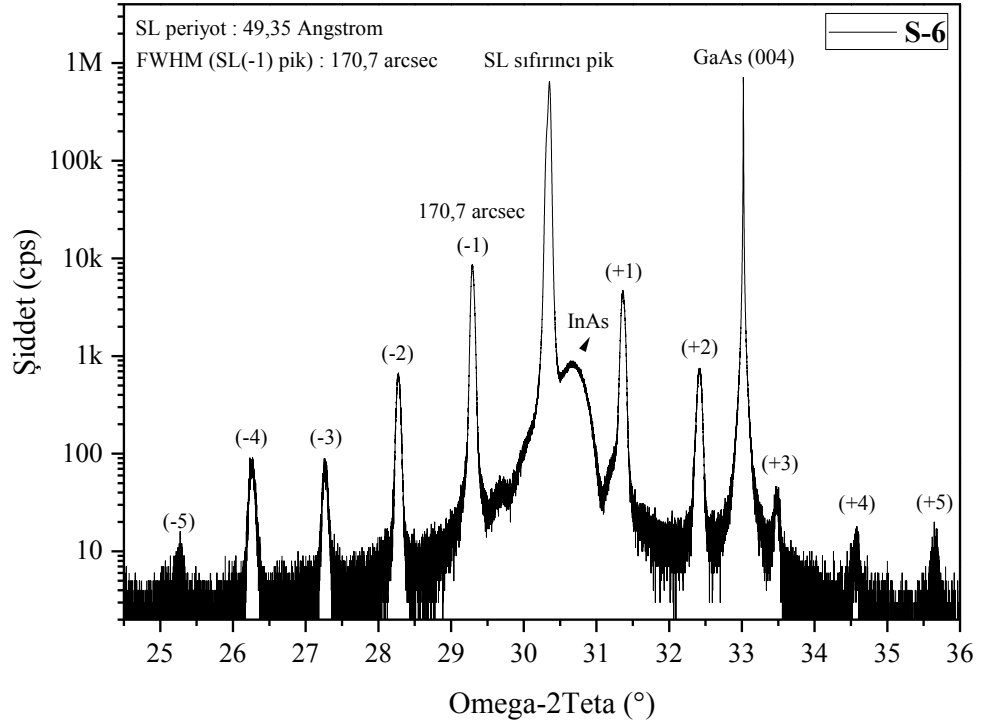
Şekil 4.39. S-2 numaralı örneğin çift-kristal X-ışını sallantı eğrisi



Şekil 4.40. S-3 numaralı örneğin çift-kristal X-ışını sallantı eğrisi



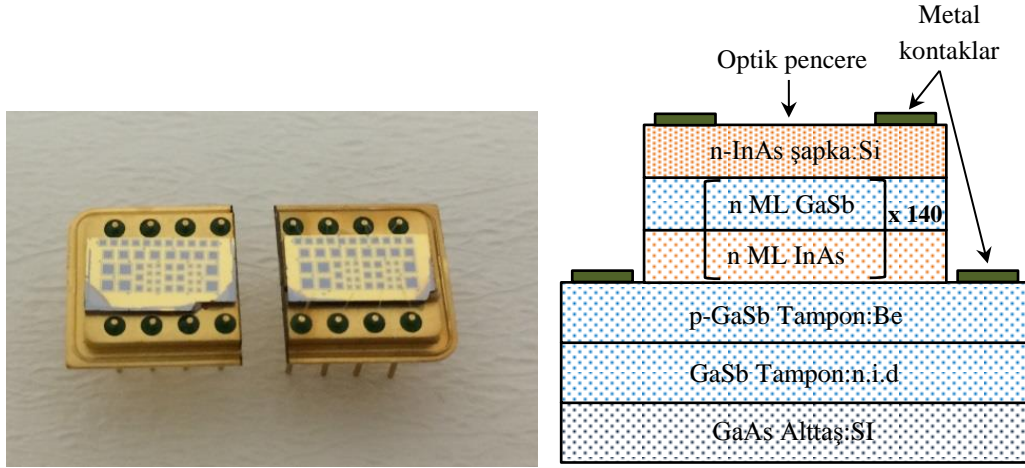
Şekil 4.41. S-4 numaralı örneğin çift-kristal X-ışını sallantı eğrisi



Şekil 4.42. S-6 numaralı örneğin çift-kristal X-ışını sallantı eğrisi

#### 4.2.2.2 GaAs alttaşlar üzerine büyütülen SL yapıların elektriksel ve optik karakterizasyonu

Bu bölümde, GaAs alttaşlar üzerine büyütülmüş S-2, S-3 ve S-4 numaralı InAs/GaSb tip-II SL fotodedektör örneklerin elektriksel ve optik karakterizasyon sonuçları sunulmuştur. S-1, S-5 ve S-6 numaralı örnekler, GaSb alttaşlar üzerine büyütülmüş muadilleri ile birlikte bir sonraki bölümde kıyaslamalı olarak ele alınacaktır. Bölüm 2’de anlatılan cihaz üretim süreçleri uygulanarak üretilen tek piksel fotodedektörler, özel altlıklar üzerine yerleştirilip tel bağlantıları yapılarak ölçüme hazır hale getirilmiştir (Şekil 4.43). Her bir örnek için birden fazla 400x400  $\mu\text{m}^2$  boyutunda mesalar üzerinden ölçümler yapılarak mesa bağımlı ölçüm hataları minimize edilmeye çalışılmıştır. Bazı örnekler için aygıt üretim süreçleri de tekrarlanmış, üretim süreçlerinin tekrarlanabilirliği sınanmıştır. Sonuçlar, uygulanan süreçlerin tekrarlanabilir olduğunu ortaya koymuştur. Dedektörlerin alt ve üst kontak noktaları Ti/Au kaplamaları ile sağlanmış, yüzey pasivasyonu uygulanmamıştır.



Şekil 4.43. Paketlenmiş SL fotodedektör örneğinin görüntüsü ve şematik yapısı

Üretilen aygıtların öncelikle I-V (akım-voltaj) ölçümleri yapılarak, örneklerin diyot karakteristikleri araştırılmıştır. Ölçümler sıvı azot sıcaklığında 10 mV’luk adımlarla voltaj uygulanarak 400  $\mu\text{m}$  x 400  $\mu\text{m}$  boyutunda mesalar

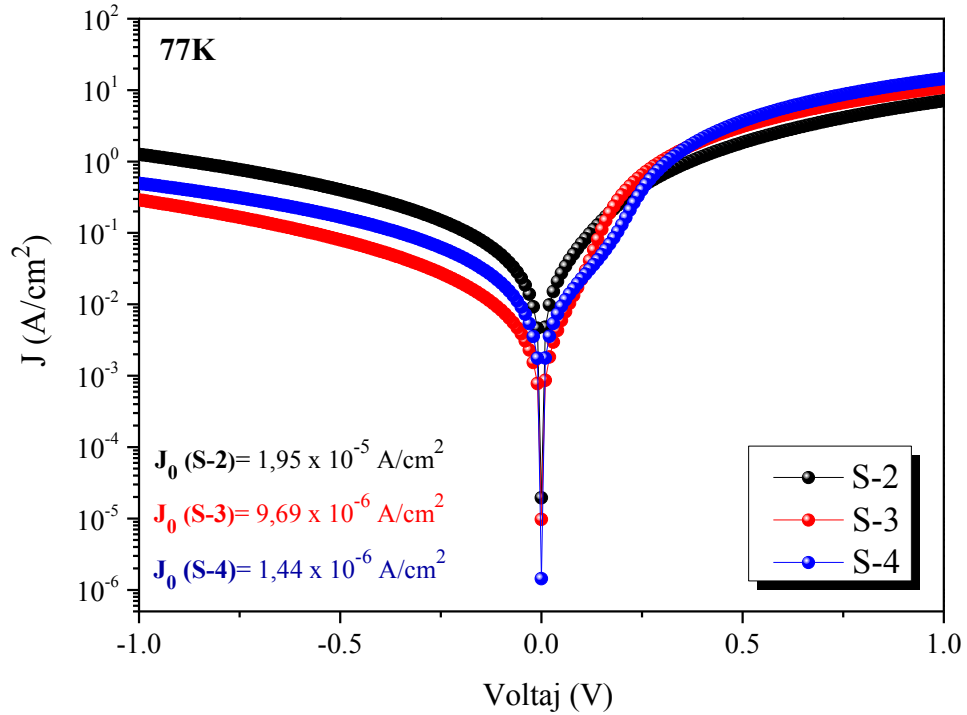
üzerinden alınmıştır. Bu bölümde çalışılan bütün örnekler için çalışan diyotlar için akım yoğunlukları ( $J$ ,  $A/cm^2$ ) ve  $R_0.A$  çarpımı hesaplanmış uygulanan voltaj değerine karşı grafikleri çizdirilmiştir.

n ve p katkılı kontak katmanları arasında katkılanmamış (n.i.d) soğurucu bölgenin bulunduğu geleneksel p-i-n yapılarıdaki SL dedektörlerde, fotodiyotun tüketim bölgesindeki Shockley-Read- Hall yaratma-yeniden birleşme (generation-recombination, G-R) merkezlerinin varlığı ile ilişkili G-R akımları başlıca önemli karanlık akım kaynaklarıdır. Ters beslemede, enerji seviyeleri bant aralığı içerisinde yer alan bu G-R merkezleri aktive olurlar ve foton soğurması olmaksızın elektron-boşluk çiftleri yaratarak fotoakıma katkıda bulunurlar. Yüksek elektrik alan bölgelerinde elektronların iletim bandından değerlik bandına (ya da boşlukların değerlik bandından iletim bandına) tünellemesiyle yaratılan banttan banda tünelleme akımı da diğer bir etkendir. Pasivasyonsuz p-i-n diyotların mesa duvarları ile ilişkili kaçak yüzey akımları da karanlık akıma katkıda bulunan diğer bir mekanizmadır [43].

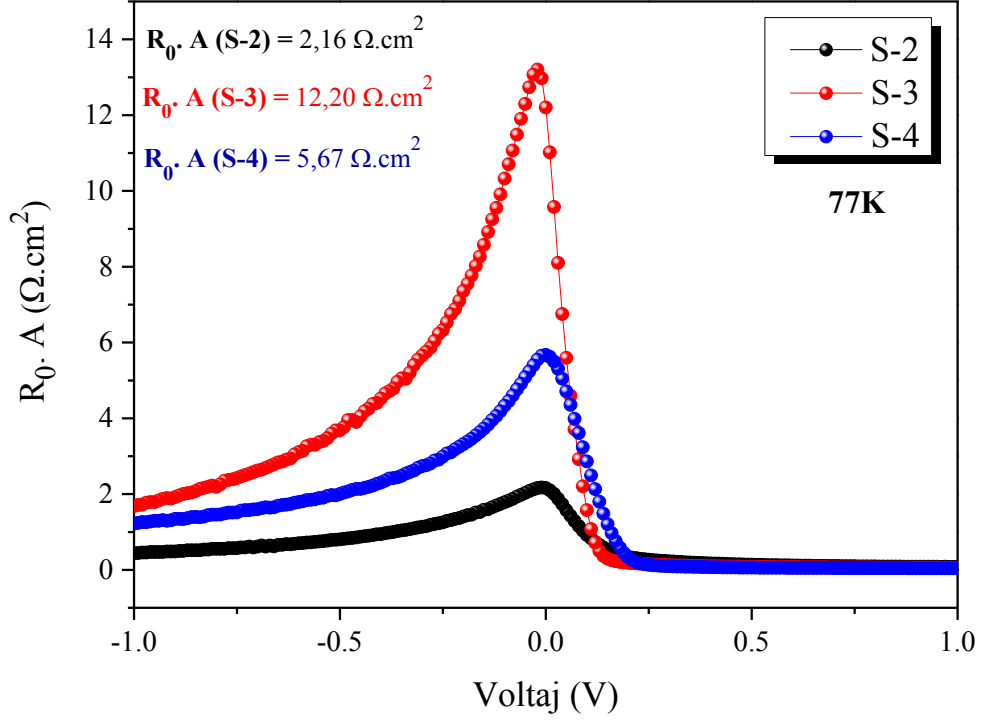
Diferansiyel direnç değeri ( $R_d = \left(\frac{\partial V}{\partial I}\right)$ , ohm), özellikle sıfır voltaj (bias) noktasında dedektörün gürültüsünün hesaplanması açısından önemlidir. Dinamik empedans (iç direnç) olarak bilinen bu değerin dedektör alanı ( $A_d$ ,  $cm^2$ ) ile çarpımı ( $R_d.A_d$ ) ise büyütülen malzemenin yapısal özelliklerine ve fabrikasyon süreçlerine bağlı cihazın iç karakteristiği hakkında bilgi verdiği için kıymetli bir parametredir. Yüksek  $R_d.A_d$  değeri yüksek performans kalitesine işaret etmektedir.

Şekil 4.44-45'de GaAs üzerine büyütülen S-2, S-3 ve S-4 numaralı fotodedektörlere ilişkin karanlık akım yoğunluğu ve  $R_d.A_d$  grafikleri verilmiştir. Grafiklere bakıldığında diyotlarda kaçak akım mekanizmalarının baskın olduğu görülmektedir. Bu mekanizmada etkenlerden birinin, aşındırılmış ve herhangi bir yalıtım uygulanmamış mesa duvarlarındaki sarkık bağların (dangling bonds) yüzey G-R akımını artırmasının olduğu düşünülmektedir. Mesa duvarlarına uygulanacak pasivasyon işlemleri ile bu yapılarıdaki yüzey kaçak akımlarının kısmen engellenebileceği öngörülmektedir. Ancak, başlı başına çalışılması gereken pasivasyon işlemleri, bu tez çalışmasının kapsamı dışında kaldığı için test diyotlarına pasivasyon işlemleri uygulanmamış ve olası olumlu ya da olumsuz

etkileri değerlendirilmemiştir. Burada göz önüne alınması icap eden diğer bir etken ise epitaksiyel büyütme kaynaklı kristal kusurlarıdır. Yapı içerisinde kusur kaynaklı oluşan ekstra enerji seviyeleri kaçak akıma katkıda bulunmaktadır. Grafikleri verilen örnekler kendi içlerinde değerlendirildiğinde, S-2 numaralı örneğin hem sergilediği J-V karakteristiği açısından hem de  $R_0.A$  değerleri açısından diğer iki örneğe kıyasla daha sorunlu bir davranış sergilediği görülmektedir. S-2 numaralı örneğin periyot kalınlığının diğer iki örneğe kıyasla daha kalın olmasının yanında, bu örnekte GaAs→GaSb geçişinde  $GaAs_xSb_{(1-x)}$  ara yüz oluşumunun, S-3 ve S-4 numaralı örneklerde ise AlSb QD ara yüz oluşumunun kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca, S-2 örneğindeki GaSb katmanlar 3 kat daha düşük V/III oranında büyütülmüştür. Belirtilen farklılıkların hangisinin bu durumda daha etkili olduğu belirlenememekle birlikte, görünen o ki bu farklılıklar kusur oranında, dolayısı ile kaçak akım mekanizmalarında artış sağlamıştır.



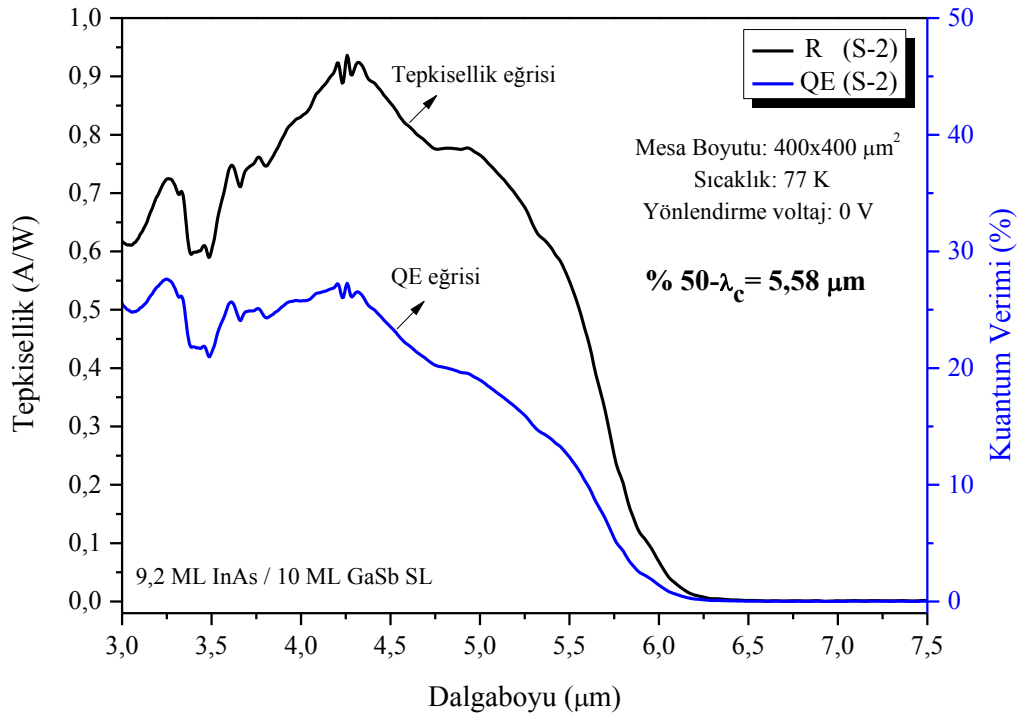
Şekil 4.44. S-2, S-3 ve S-4 numaralı örneklerin (a) Karanlık akım yoğunluğu –voltaj grafikleri



Şekil 4.45. S-2, S-3 ve S-4 numaralı örneklerin  $R_0 \cdot A$ -voltaj grafikleri

Bu kısımda ele alınan fotodedektör örnekler, MIR ışık kaynağı ile önden aydınlatılarak spektral tepkileri ve 450 °C siyahcisim kullanılarak tepkisellik ölçümleri yapılmış, kuantum verimleri hesaplanmıştır. Ölçümler, 77 K sıcaklığında ve yönlendirme voltajı uygulanmadan yapılmıştır. S-2, S-3 ve S-4 numaralı örneklere ilişkin tepkisellik ve QE grafikleri Şekil 4.46-48’de aşağıda verilmiştir.

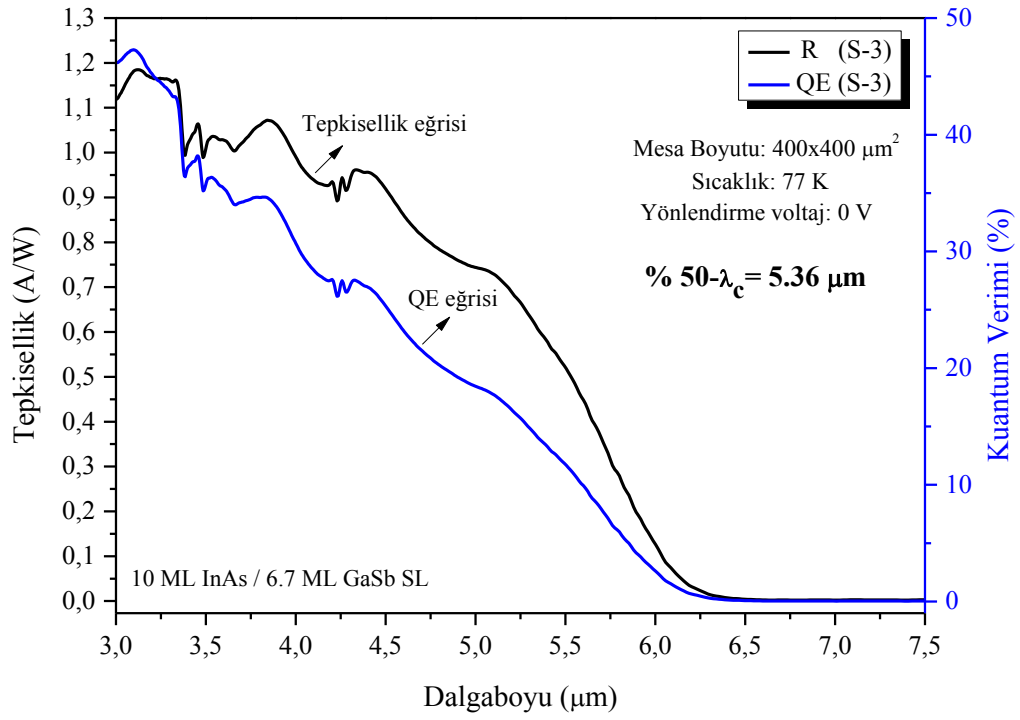
S-2 numaralı örneğin grafiğine bakılacak olursa (Şekil 4.46), dedektörün tepkiselliğinin 3  $\mu\text{m}$ ’dan 6,25  $\mu\text{m}$  dalgaboyuna kadar uzandığı, tepkisellik eğrisinin 4-4,5  $\mu\text{m}$  aralığında maksimum değerlere ulaştığı görülmektedir. Tepkiselliğin maksimum olduğu noktanın yarı değerine karşılık gelen dalgaboyu değerleri, dedektörlerin %50 noktasındaki kesim dalgaboyu (%50- $\lambda_c$ ) olarak değerlendirilmiştir. Bu değer S-2 numaralı örnek için 5,58  $\mu\text{m}$ ’dir.



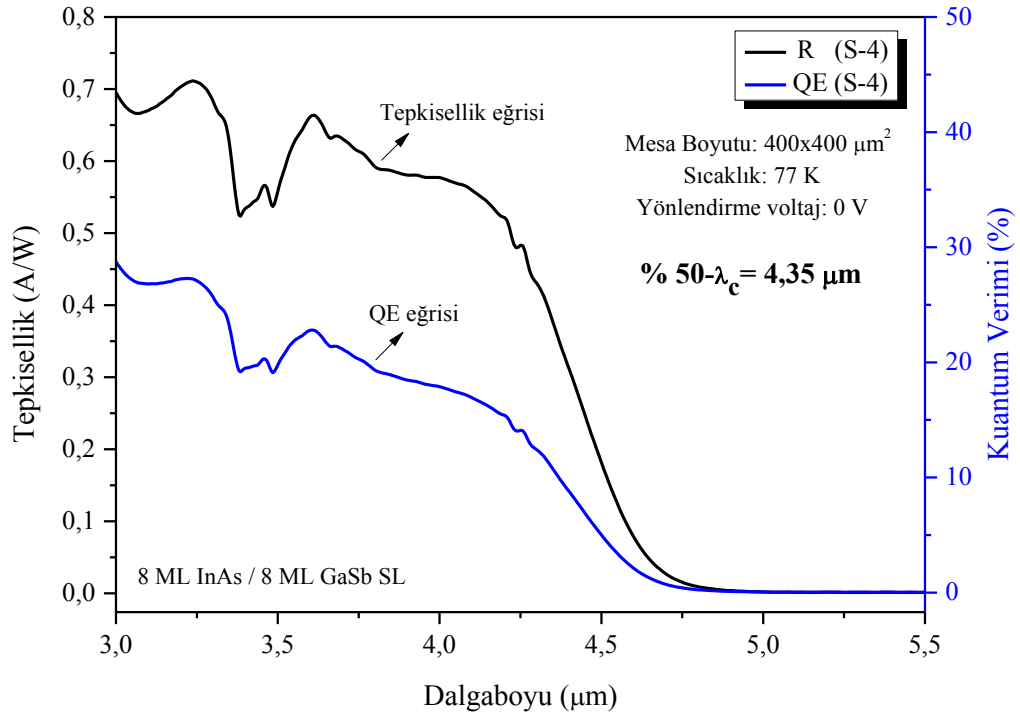
Şekil 4.46. S-2 numaralı örneğin 77 K'deki tepkisellik ve QE spektrumları

S-3 numaralı örnek, farklı InAs ve GaSb kalınlıklarında tasarlanmış olmasına rağmen S-2 numaralı örnek ile aynı dalgaboyu aralığında tepki vermektedir. Tepkisellik eğrisinin verilen dalgaboyu aralığındaki davranışı ise bir önceki örnekten farklıdır. Bu örneğin 3-4  $\mu\text{m}$  aralığındaki tepkisi görece olarak daha yüksektir. S-3 örneği için  $\%50-\lambda_c$ ,  $5,36 \mu\text{m}$ 'dir.  $4 \mu\text{m}$  ve  $5,36 \mu\text{m}$ 'deki QE değerleri ise  $\% 30,65$  ve  $\% 13,7$ 'dir. Bu sonuçlar, S-3 örneğinin QE açısından aynı dalgaboyu aralığında daha iyi performansa sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

InAs ve GaSb katman kalınlıklarının eşit olarak büyütüldüğü S-4 numaralı örnek, MWIR bölgede ele alınan diğer iki örneğe kıyasla daha dar bir bölgede algılama yapmaktadır. Dedektörün  $\% 50$  kesim dalga boyu  $4,35 \mu\text{m}$ 'dir. QE değerleri ise  $4 \mu\text{m}$  için  $\% 17,8$ ,  $4,35 \mu\text{m}$  için  $\%10,7$  civarındadır.



Şekil 4.47. S-3 numaralı örneğin 77 K'deki tepkisellik ve QE spektrumları



Şekil 4.48. S-4 numaralı örneğin 77 K'deki tepkisellik ve QE spektrumları

S-2, S-3 ve S-4 örneklerinin optik performansları birlikte değerlendirilirse, GaAs üzerine büyütülen her üç dedektörün de MWIR bölgede, dedektörlerin tekrar sayıları göz önüne alındığında, kabul edilebilir performansa sahip oldukları düşünülmektedir. Dedektörlerin I-V karakterlerindeki olumsuz görüntülerinin ve düşük direnç değerlerinin optik performansa önemli ölçüde yansımadağı sonuçlarda dikkati çeken diğeri bir husustur.

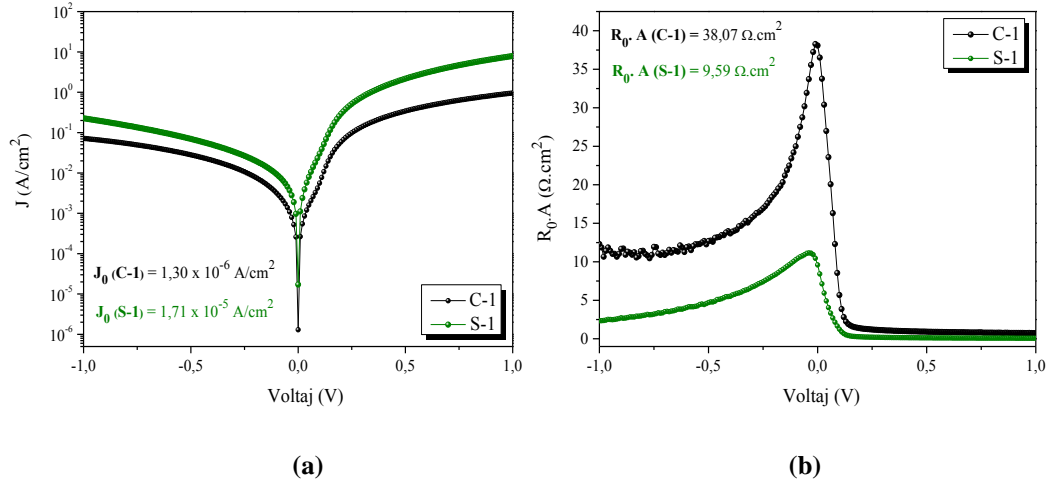
#### **4.2.4. GaSb ve GaAs alttaşlar üzerine büyütülen InAs/GaSb Tip-II SL fotodedektörlerin kıyaslamalı değerlendirilmesi**

Tez çalışmasının bu bölümünde, aynı SL fotodedektör yapısı, aynı büyütme parametreleri kullanılarak hem 2 inç GaSb hem de 4 inç GaAs alttaşlar üzerine büyütülmüştür. Toplam 3 çift (6 adet) örnek bu kısımda ele alınmıştır. C-1, C-2 ve C-3 numaralı örnekler GaSb alttaş üzerine, S-1, S-5 ve S-6 numaralı örnekler ise GaAs alttaş üzerine büyütülmüştür. Büyütülen fotodedektörlerin elektriksel ve optik karakterizasyon sonuçları aşağıda her bir örnek çifti için kıyaslamalı olarak sunulmuştur.

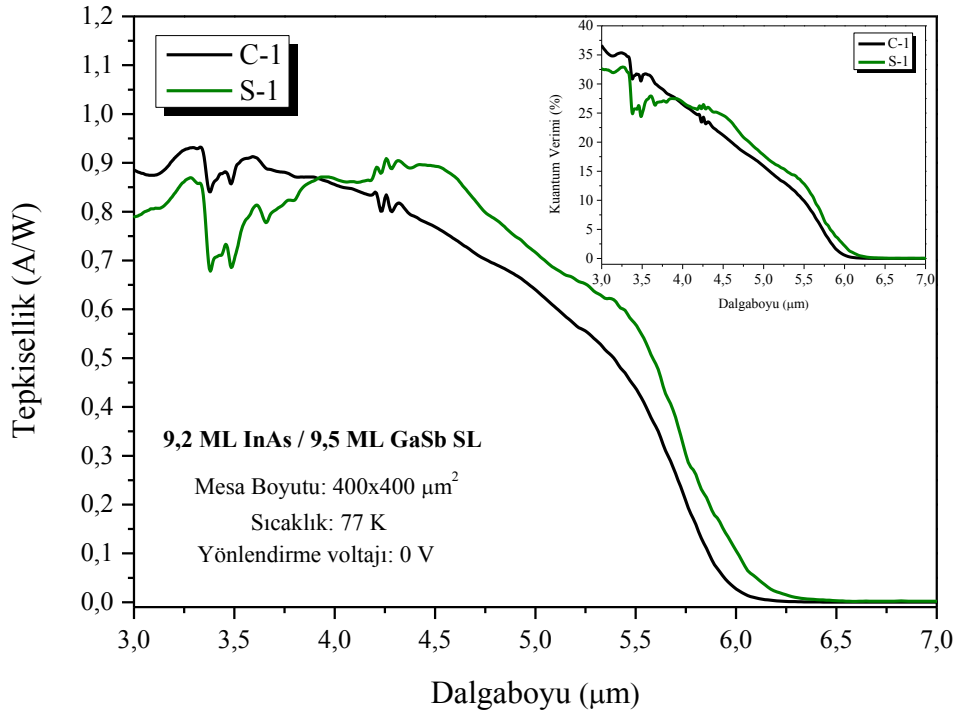
C-1 ve S-1 numaralı örneklerin karanlık akım yoğunluğu ve  $R_d.A_d$  grafikleri Şekil 4.49'da, tepkisellik ve QE spektrumları ise Şekil 4.50'de verilmiştir. Karanlık akım yoğunluğu grafikleri, GaSb üzerine büyütülen C-1 örneğinin diyot karakterinin S-1'e kıyasla daha baskın olduğu,  $R_0.A$  değerinin ise yaklaşık 4 kat daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu iki örnekte de önceki bölümlerde ele alınan SL fotodiyotlar gibi  $R_0.A$  değerleri, beklenin altında değerlerdedir. Yüzey pasivasyonu işlemi ile bu değerlerin görece olarak iyileşeceği öngörülmektedir. Tepkisellik ölçüm grafikleri, her iki fotodedektörün de MWIR bölgede birbirine oldukça yakın tepkiye sahip olduklarını göstermektedir. Örneklerin % 50 kesim dalgalıboyları C-1 örneği için 5,44  $\mu\text{m}$ , S-1 için 5,63  $\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır. Dedektörlere ait QE davranışları da her iki örnek için benzer karakterde olup verilen dalgalıboyu skalasında % 0-30 aralığında değişmektedir.

Şekil 4.51 ve 52’de elektriksel ve optik karakterizasyon sonuçları verilen C-2 ve S-5 numaralı örnekler, bir önceki örnek çiftine kıyasla SL periyot kalınlığının daha düşük olduğu örneklerdir. Özellikle InAs katmanların ince olduğu örneklerde, dedektörlerin tepkiselliği daha küçük dalgalarda sonlanmaktadır. C-2 ve S-5 örnekleri için  $\% 50-\lambda_c$  değerleri sırasıyla 4,07  $\mu\text{m}$  ve 3,96  $\mu\text{m}$ ’dur. Bu iki dedektör için QE değerleri ise  $\% 0-25$  aralığında değişmektedir. Sonuçlar, GaSb ve GaAs üzerine büyütülen örnekler arasında dikkate değer bir farklılığın varlığına işaret etmemektedir.

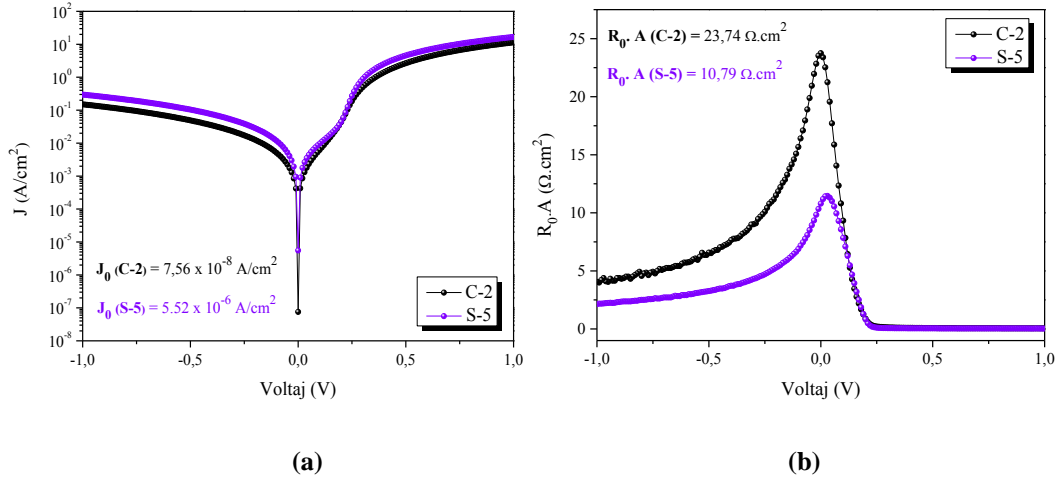
Ele alınan son örnek çifti olan C-3 ve S-6 örnekleri de GaSb üzerine büyütülen InAs/GaSb SL fotodedektörlerin GaAs üzerine de sorunsuz bir biçimde büyütülebildiğini diğer ele alınan örnekler gibi doğrular nitelik sergilemektedir. Bu iki örnek karakter ve performans açısından neredeyse aynı davranmaktadır (Şekil 4.53-54).



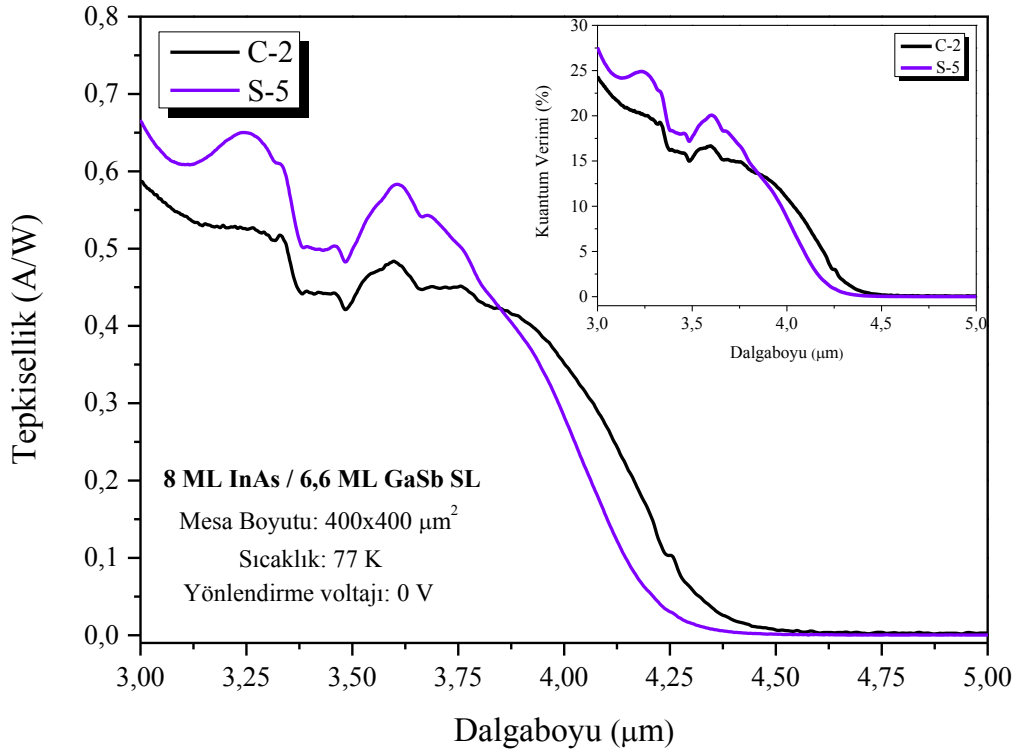
Şekil 4.49. C-1 ve S-1 numaralı örneklerin (a) Karanlık akım yoğunluğu –voltage ve (b)  $R_0$ -voltage grafikleri



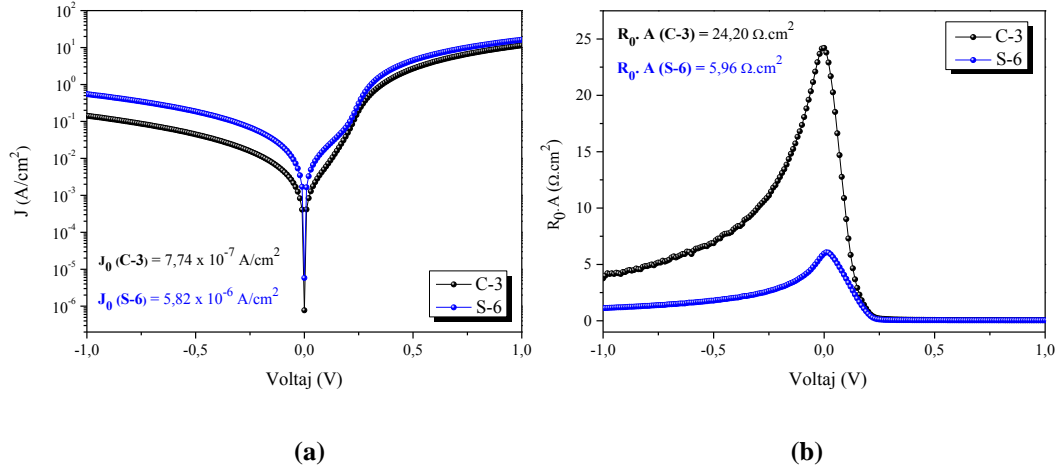
Şekil 4.50. C-1 ve S-1 numaralı örneklerin 77 K'deki tepkisellik ve QE spektrumları (C-1-%50  $\lambda_c=5,44$  µm), (S-1-%50  $\lambda_c=5,63$  µm)



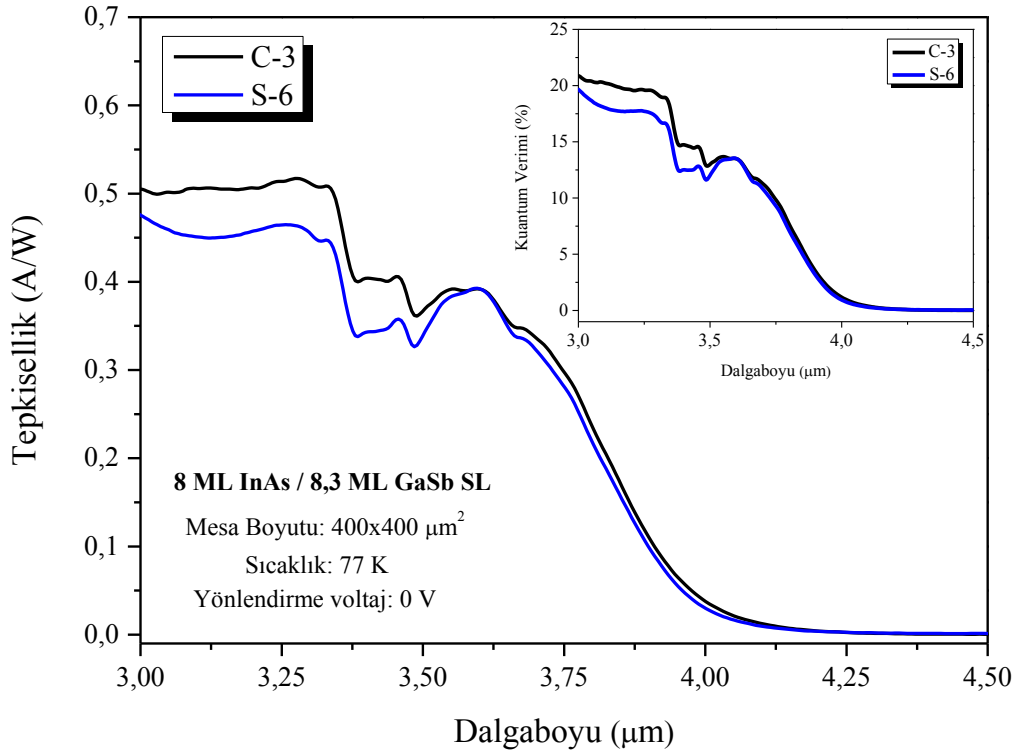
Şekil 4.51. C-2 ve S-5 numaralı örneklerin (a) Karanlık akım yoğunluğu –voltaj ve (b)  $R_0$ -A-voltaj grafikleri



Şekil 4.52. C-2 ve S-5 numaralı örneklerin 77 K'deki tepkisellik ve QE spektrumları (C-2-%50  $\lambda_c=4,07$  µm), (S-5-%50  $\lambda_c=3,96$  µm)



Şekil 4.53. C-3 ve S-6 numaralı örneklerin (a) Karanlık akım yoğunluğu –voltaj ve (b)  $R_0A$ -voltaj grafikleri



Şekil 4.54. C-3 ve S-6 numaralı örneklerin 77 K'deki tepkisellik ve QE spektrumları (C-3-%50  $\lambda_c=3,79 \mu\text{m}$ ), (S-6-%50  $\lambda_c=3,78 \mu\text{m}$ )

## 5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, orta ve uzun dalgaboyu kızılötesi bölgelerini de içine alan esnek bir çalışma aralığı sunan, yüksek sıcaklıktaki performansları/verimleri ile MCT'lere, performansları ile QWIP'lere alternatif olarak öne çıkan InAs/GaSb Tip-II fotodedektör yapıları, 2 inç GaSb ve 4 inç GaAs alttaşlar üzerine MBE tekniği ile büyütülmüş ve üretilen tek-piksel fotodedektörlerin detaylı yapısal, elektriksel ve optik karakterizasyonları yapılmıştır. GaSb alttaşlar üzerine hem MWIR hem de LWIR bölgede çalışmak üzere tasarlanmış dedektör yapıları, GaAs alttaşlar üzerine ise MWIR bölgede çalışmak üzere tasarlanmış dedektör yapıları büyütülmüştür. Bu konudaki çalışmalar, epitaksiyel sistem teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak özellikle yarıiletken teknolojisinin geliştiği ülkelerde 2000'li yılların başından günümüze kadar yoğun olarak sürdürülmektedir. Türkiye'de bu malzeme sistemi, bazı gruplar tarafından yurt dışında büyütürülen örnekler kullanılarak çalışılmıştır. Bu çalışma, InAs/GaSb SL fotodedektör yapıların epitaksiyel olarak üretilerek karakterizasyon çalışmalarının gerçekleştirildiği ilk tez çalışmasıdır.

InAs/GaSb SL yapıları GaAs alttaşlar üzerine büyütme, aradaki yüksek örgü uyumsuzluğu sebebiyle meşakkatli bir süreçtir. Süperörgülerin GaAs üzerine büyütülmesi öncesinde söz konusu bu uyumsuzluğun ortadan kaldırılması gerekmektedir. Bu çalışmada örgü uyumsuzluğu ve etkileri, GaAs→GaSb geçişinde  $GaAs_xSb_{(1-x)}$  ve AlSb QD ara yüzlerden faydalanılarak büyütülen kalın GaSb epikatmanlarla aşılmaya çalışılmıştır. Bölüm 3'te detaylı bir biçimde ele alınan GaAs alttaşlar üzerine GaSb epikatman büyütme çalışmalarında, GaAs→GaSb geçişinde  $GaAs_xSb_{(1-x)}$  ve AlSb QD ara yüzlerin kullanılmasının, büyüyen epikatman üzerinde kristal kalitesi ve örgüdeki rahatlama açısından hissedilir etkiye sahip olduğu görülmüştür. 1 µm ve üzerindeki kalınlarda kristal örgünün bütünüyle rahatladığını işaret eden sonuçlar, kullanılan ara yüzlerin söz konusu uyumsuzluk etkilerinin görece olarak daha ince epikatmanlarla yenilebileceğini göstermiştir. AlSb QD ara yüzün  $GaAs_xSb_{(1-x)}$ 'e göre daha başarılı sonuçlar sağladığı da karakterizasyon sonuçları ile ortaya konulan diğer bir husustur. GaSb epikatmanların epitaksiyel olarak büyütülmesinde, görece olarak yüksek V/III oranlarının (~20), yüksek büyütme sıcaklıklarının (500-505

°C) kullanılmasının kristal kalitesine pozitif yönde etkileri gözlenmiştir. GaAs→GaSb geçiş bölgesinde yapılan kesit mikroskop çalışmaları ile ara yüz bölgesindeki oluşumlar kısmen de olsa ortaya konulmuştur. Yapılacak yüksek çözünürlüklü mikroskop çalışmaları ile bu bölgedeki oluşumların ve bunların örgü üzerindeki olumlu ya da olumsuz etkilerinin daha açık biçimde ortaya konulabileceği düşünülmektedir.

GaSb yüzey ısıtılırken ve oda sıcaklığına soğutulurken yüzeye verilen antimon akısının makul bir sıcaklıkta açılması ( $> 310\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ve kesilmesi ( $< 310\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) gerekliliği epikatman çalışmalarında ulaşılan kıymetli bilgiler arasındadır. Aksi halde, yüzeye verilen antimonun yüzeye yoğunlaşarak kristalize bir biçimde yüzeyi kapladığı deneysel gözlemlerle ortaya konulmuştur.

GaSb alttaşlar üzerine yapılan çalışmalarla, SL yapılarıdaki stres ve zor mekanizmalarının anlaşılması hedeflenmiş, ara yüz ve katman kalınlıklarındaki varyasyonların bu mekanizmalar ve optik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bölüm 4'ün ilk kısmında ele alınan InAs/GaSb SL yapıların GaSb alttaşlar üzerine büyütme çalışmalarında, setler halinde büyütülen örnekler üzerinde yapılan ölçümlerden yapıdaki zor yönetiminde SL katmanları arasına belirli kepenk organizasyonları ile oluşturulan InSb-benzeri ara yüz kalınlığının bir araç olarak kullanılabilmesi ve zorun, bu oluşumun kalınlığını kontrol ederek dengelenebileceği görülmüştür. Başka bir örnek seti üzerinde yapılan çalışma ile de zor mühendisliği yapılırken süperörgüyü oluşturan InAs ve GaSb katman kalınlıklarında, ara yüz kalınlığı kadar etkili olmasa da, bu mekanizmada dikkate alınması gereken diğer bir değişken olduğu ortaya konulmuştur. Burada, InAs katman kalınlığındaki değişimin ara yüz kalınlığı sabit iken bu mekanizmada GaSb'ye kıyasla daha etkin olduğu görülmüştür. Ayrıca, InAs ve GaSb katman kalınlıklarındaki değişimin fotodedektörlerin algılama yaptıkları dalgaboyu aralığı (ya da kesim dalga boyları) üzerindeki etkileri, çalışılan SL örnekler üzerinden ortaya konulmuştur: InAs kalınlığındaki değişim, GaSb'ye kıyasla daha baskın bir karakter sergilemekte, dedektörün kesim dalgaboyunu daha büyük adımlarla değiştirmektedir.

Epikatman çalışmalarda ulaşılan sonuçlar ve GaSb alttaşlar üzerine yapılan süperörgü çalışmalarında edinilen deneyimler ışığında süperörgü yapılar, GaAs

altaşlar üzerine büyütülmüştür. Büyütülen örneklerin yapısal karakterizasyon sonuçları GaAs altaş ile süperörgü arasındaki örgü uyumsuzluğun olumsuz etkilerinin büyük ölçüde minimize edildiğini ortaya koymuştur. Çalışmanın son kısmında, GaAs altaşlar üzerine büyütülen InAs/GaSb Tip-II SL fotodetörlerin elektriksel özellikleri ve detör performansları, GaSb altaş üzerine büyütülen muadilleri ile kıyaslamalı bir şekilde değerlendirilmiştir. Ulaşılan sonuçlar, GaAs üzerine büyütülen yapıların GaSb üzerine büyütülen benzerleri ile tepkisellik ve QE açısından neredeyse aynı davrandığını göstermiştir. Bu durum, çalışmadaki hedeflerin gerçekleştirildiğini, InAs/GaSb süperörgü malzeme sistemi için GaAs altaşların GaSb altaşlara bu bağlamda sağladıkları; görece olarak daha büyük boyutlarda, yüksek kristal kalitesinde, düşük maliyette ve katkısız olarak üretilebilmeleri gibi avantajlarla birlikte alternatif olabileceğini göstermiştir.

Her iki altaş üzerine de büyütülen süperörgü fotodetörler üzerinde yapılan elektriksel ölçümlerden fotodiyotlarda kaçak akım mekanizmalarının baskın karakter sergilediği görülmüştür. Bu yapılardaki kaçak akım mekanizmalarının daha detaylı analizlerle ortaya konulabileceği, pasivasyon işlemleri üzerine yapılacak çalışmalarla da bu mekanizmada etkin unsurlardan biri olan yüzey kaçaklarının azaltılabileceği öngörülmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/533942/semiconductor/23380/Semiconductor-materials>
- [2] Brown, T.L., LeMay, H.E., Bursten, B.E., Murphy, C.J. ve Woodward, P., *Chemistry*, Prentice Hall; 11. Baskı, Upper Saddle River, New Jersey, A.B.D., 2008.
- [3] Rogalski, A., *Infrared Detectors*, CRC Press Taylor&Francis Group, Boca Raton, U.S., 2011.
- [4] Gin, A.V., “Electron Beam Lithography for the Fabrication of Nanopillars in Type-II InAs/GaSb Superlattices for Multicolor Infrared Focal Plane Arrays”, Doktora Tezi, Northwestern Üniversitesi, 2005.
- [5] Nguyen, B.-M., “Theoretical Design and Material Growth of Type-II Antimonide-based Superlattices for Infrared Detection and Imaging”, Doktora Tezi, Northwestern Üniversitesi, 2010.
- [6] [http://www.eumetrain.org/data/3/30/print\\_5.htm](http://www.eumetrain.org/data/3/30/print_5.htm)
- [7] Khoshakhlagh, A., “Longwave and Bi-color Type-II InAs/(In)GaSb Superlattice Infrared Detectors”, Doktora Tezi, New Mexico Üniversitesi, 2010.
- [8] Plis, E.A., “Mid-IR Type-II InAs/GaSb Nanoscale Superlattice Sensors”, Doktora Tezi, New Mexico Üniversitesi, 2007.
- [9] [http://colemanecreative.com/project-STI/full\\_body\\_scans.html](http://colemanecreative.com/project-STI/full_body_scans.html)
- [10] <http://www.infraredscreening.com/medical-thermography-history.htm>
- [11] <http://www.massagetoday.com/mpacms//at/article.php?id=30121>
- [12] <http://www.predtec.com/infrared.html>
- [13] <http://www.servicebypinnacle.com/id2.html>
- [14] [http://www.jackhaas.net/photography\\_space\\_pictures\\_hubble\\_telescope\\_NASA\\_main.htm](http://www.jackhaas.net/photography_space_pictures_hubble_telescope_NASA_main.htm)
- [15] <http://www.filetransit.com/screenshot.php?id=1625>
- [16] <http://www.militarysystems-tech.com/suppliers/thermal-vision-specialists/ulis>
- [17] <http://www.imaging1.com/thermal/monocular14.html>

- [18] Coffey, V.C., “Seeing in the dark: Defense Applications of IR imaging”, Optics & Photonics News, 2011.
- [19] Bishop, G., “InAs/Ga(In)Sb Superlattice Based Infrared Detectors using nBn Design”, Master Tezi, New Mexico Üniversitesi, 2008.
- [20] Sze, S.M. ve Ng, K.K., *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley & Sons Inc., New Jersey, A.B.D., 2007.
- [21] Delaunay, P.-Y., “Focal Plane Arrays based on Type-II InAs/GaSb superlattices”, Doktora Tezi, Northwestern Üniversitesi, 2010.
- [22] Plis, E., Rodriguez, J.B. ve Krishna, S., “InAs/(In)GaSb Type II Strain Layer Superlattice Detectors”, *Comprehensive Semiconductor Science and Technology* (Ed: Bhattacharya, P., Fornari, R., Kamimura, H.), Elsevier, 229-264, 2011.
- [23] Koerperick, E. J., “High Power Mid-Wave and Long-Wave Infrared Superlattice Light Emitting Diodes: Device Growth and Applications”, Doktora Tezi, Iowa Üniversitesi, 2009.
- [24] <http://som.web.cmu.edu/structures/S011-ZnS.html>
- [25] Sai-Halasz, G.A., Tsu, R. ve Esaki, L., Appl. Phys. Lett., **30**, 651, 1977.
- [26] Smith, D.L. ve Mailhot, C., *J. Appl. Phys.*, 62, 2545, 1987.
- [27] Haugan, H.J., Szmulowicz, F., Brown, G.J. ve Mahalingam, K., “Band gap tuning of InAs/GaSb type-II superlattices for mid-infrared detection”, *J. Appl. Phys.*, **96**, 2580-2585, 2004.
- [28] Piquini, P., Zunger, A., Magri, R., “Pseudopotential calculations of band gaps and band edges of short-period  $(\text{InAs})_n / (\text{GaSb})_m$  superlattices with different substrates, layer orientations, and interfacial bonds”, *PHYSICAL REVIEW B*, **77**, 115314-1-16, 2008.
- [29] Walther M., Schmitz J., Rehm, R., Kopta, S., Fuchs, F., Fleißner, J., Cabanski, W. ve Ziegler, J., “Growth of InAs/GaSb short-period superlattices for high resolution mid-wavelength infrared focal plane array detectors”, *Journal of Crystal Growth*, **278**, 156-161, 2005.
- [30] Rehm, R., Walther, M., Schmitz, J., Fleißner, J., Fuchs, F., Ziegler, J. ve Cabanski, W., “InAs/GaSb superlattice focal plane arrays for high-resolution thermal imaging”, *Proc SPIE*, **5957**, 595707-1-8, 2005.

- [31] Satpati, B., Rodriquez, J.B., Trampert, A., Tournie, E., Joullie, A. ve Christol, P., “Interface analysis of InAs/GaSb superlattice grown by MBE”, *Journal of Crystal Growth*, **301–302**, 889–892, 2007.
- [32] Tournie, E. ve Trampert, A., “MBE growth and interface formation of compound semiconductor heterostructures for optoelectronics”, *phys. stat. sol. (b)*, **244**, 2683-2696, 2007.
- [33] Plis, E., Annamalai, S., Posani, K., T., Krishna, S., “Midwave infrared type-II InAs/GaSb superlattice detectors with mixed interfaces” *Journal of Applied Physics*, **100**, 014510, 2006.
- [34] Kubacka-Traczyk, J., Sankowska, I. ve Kaniewski, J., “Interface influence on structural properties of InAs/GaSb type-II superlattices”, *Optica Applicata*, **39**, 2009.
- [35] Lang, X.-L. ve Xia, J.-B., “Interface effect on the electronic structure and optical properties of InAs/GaSb superlattices”, *J. Phys. D:Appl. Phys.*, **44**, 425103, 2011.
- [36] Tahraoui, A., Tomasini, P., Lassabatère, L. ve Bonnet, J., “Growth and optimization of InAs/GaSb and GaSb/InAs interfaces”, *Applied Surface Science*, **162-163**, 425-429, 2000.
- [37] Rodriquez, J.B., Christol, P., Cerutti, L., Chevrier, F. ve Joullie, A., “MBE growth and characterization of type-II InAs/GaSb superlattices for mid-infrared detection”, *Journal of Crystal Growth*, **274**, 6-13, 2005.
- [38] Hood, A.D., “Surface Passivation and Performance Characteristics of Type-II InAs/GaSb Superlattice Infrared Photodetectors for Focal Plane Arrays”, Doktora Tezi, Northwestern Üniversitesi, 2007.
- [39] Plis, E.A., “InAs/GaSb Type-II Superlattice Detectors”, *Hindawi Publishing Corporation Advances in Electronics ID:246769*, 2014.
- [40] Steiner, T. (editör), *Semiconductor Nanostructures for Optoelectronic Applications*, Artech House, Inc., Boston-London, 2004.
- [41] Bracker, A.S., Yang, M.J., Bennett, B.R., Culbertson, J.C. ve Moore, W.J., “Surface reconstruction phase diagrams for InAs, AlSb, and GaSb”, *Journal of Crystal Growth*, **220**, 384-392, 2000.
- [42] Suyolcu, Y.E., “Characterization of Epitaxially Grown III-V

- Nanostructures by Electron Microscopy”, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [43] Kim, H.s., “Investigation of InAs/GaSb Superlattice based nBn Detectors and Focal Plane Arrays”, Doktora Tezi, New Mexico üniversitesi, 2010.
- [44] Luca, S., Santailier, J.L., Rothman, J., Belle, J.P., Calvat, C., Basset, G., Passero, Khvostikov, V.P., Potapovich, N.S. ve Levin, R.V., “GaSb Crystals and Wafers for Photovoltaic Devices”, *Journal of Solar Energy Engineering*, **129**, 305-313, 2007.
- [45] Papis-Polakowska, E., “Surface Treatments of GaSb and Related Materials for the Processing of Mid-infrared Semiconductor Devices”, *Electron Technology-Internet Journal*, **37/38**, 1-34, 2005/2006.
- [46] Arpapay, B., Şahin, S., Arıkan, B. ve Serincan U., “Redundant Sb condensation on GaSb epilayers grown by molecular beam epitaxy during cooling procedure”, *Thin Solid Films*, **564**, 110-114, 2014.
- [47] Şahin, S., “GaSb Alttaş Üzerine Kaliteli GaSb Epi-katmanların Büyütülmesi ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [48] Qian, W., Skowronski, M. ve Kaspi, R., “Dislocation Density Reduction in GaSb Films Grown on GaAs Substrates by Molecular Beam Epitaxy”, *J. Electrochem. Soc.*, **144**, 1430-1434, 1997.
- [49] Hao, R., Xu, Y., Zhou, Z., Ren, Z., Ni, H., He., Z. ve Niu, Z., “Growth of GaSb layers on GaAs (001) substrate by molecular beam epitaxy”, *J. Phys.D: Appl. Phys.*, **40**, 1080-1084, 2007.
- [50] Haugan, H.J., Brown, G.J., Grazulis, L., Mahalingam, K., Tomich ve D., H., “Optimization of InAs/GaSb type-II superlattices for high performance of photodetectors”, *Physica E*, **20**, 527-530, 2004.
- [51] Plis, E., Annamalai, S., Posani, K.T., Lee, S.J. ve Krishna, S., “Room temperature operation of InAs/GaSb SLS Infrared photovoltaic detectors with cut-off wavelength  $\sim 5\mu\text{m}$ ”, *Proc. of SPIE*, **6206**, 62060O-1-9, 2006.
- [52] Wei, Y., Ma, W., Zhang, Y., Huang, J., Cao, Y. ve Cui, K., “High Structural Quality of Type II InAs/GaSb Superlattices for Very Long Wavelength Infrared Detection by Interface Control”, *IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS*, **48**, 512-515, 2012.
- [53] Koerperick, E.J., Murray, L.M., Norton, D.T., Boggess, T.F. ve Prineas,

- J.P., “Optimization of MBE-grown GaSb buffer layers and surface effects of antimony stabilization flux”, *Journal of Crystal Growth*, **312**, 185-191, 2010.
- [54] Zhou, Z.-Q., Xu, Y.-Q., Hao, R.-T., Tang, B., Ren, Z.-W. ve Niu, Z.-C., “Molecular Beam Epitaxy of GaSb on GaAs Substrates with AlSb Buffer Layers”, *CHIN. PHYS. LETT.*, **26**, 018101-1-3, 2009.
- [55] <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Course-ECSE%20Quantum%20mechanics/Ch17%20Heterostructures.pdf>
- [56] [http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/GaAsSb/Figs/b55\\_04.gif](http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/GaAsSb/Figs/b55_04.gif)
- [57] Haugan, H.J., Szmulowicz, F., Brown, G.J. ve Mahalingam, K., “Band gap tuning of InAs/GaSb type-II superlattices for mid-infrared detection”, *Journal of Applied Physics*, **96**, 2580, 2004.
- [58] Zhou, Y., Chen, J., Xu, Q. ve He, L., “Studies on InAs/GaSb superlattice structural properties by high resolution x-ray diffraction”, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, **30(5)**, 051203-1-6, 2012.
- [59] Arikan, B., Korkmaz, G., Suyolcu, Y.E., Aslan, B. ve Serincan, U., “On the structural characterization of InAs/GaSb type-II superlattices: The effect of interfaces for fixed layer thicknesses”, *Thin Solid Films*, **548**, 288-291, 2013.
- [60] Ariyawansa, G., Duran, J.M., Grupen, M., Scheihing, J.E., Nelson, T.R. ve Eismann, M.T., “Multispectral Imaging with Type II Superlattice Detectors” *Proc. of SPIE*, **8353**, 83530E-1-14, 2012.
- [61] Szmulowicz, F., Haugan, H.J. ve Brown, G.J., “Analysis of (110) indium arsenide –gallium antimonide superlattices for infrared detection”, *Journal of Applied Physics*, **104**, 074505-1-7, 2008.
- [62] Brown, G.J., Mahalingam, K., Saxler, A., Linville, R., Szmulowicz, F., Seaford, M.L., Tomich, D.H., Lin, C.-H., Kuo, C.H. ve Hwang, W.Y., “Type-II InAs/InGaSb Superlattices on Compliant GaAs Substrates”, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **607**, 107-112, 2000.
- [63] Nguyen, B.-M., Hoffman, D., Huang, E.K.-w., Delaunay, P.-Y. ve Razeghi, M., “High performance Antimony based Type-II superlattice photodiodes on GaAs substrates”, *Proc of SPIE*, **7298**, 72981T-1-13, 2009.