

**GaSb ALTTAŞ ÜZERİNE KALİTELİ  
GaSb EPİ-KATMANLARIN BÜYÜTÜLMESİ  
ve KARAKTERİZASYONU**

Seval ŞAHİN  
Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı  
Eylül 2014

**Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri  
Komisyonu Başkanlığı tarafından desteklenmiştir. Proje no: BAP-1306F252**

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Seval ŞAHİN'in "GaSb Alttaş Üzerine Kaliteli GaSb Epi-Katmanların Büyütülmesi ve Karakterizasyonu" başlıklı Fizik Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 14.07.2014 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı- Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı):	Doç. Dr. Uğur SERİNCAN	.....
Üye	: Doç. Dr. Bülent ASLAN	.....
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Aykutlu DÂNA	.....

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

Enstitü Müdürü

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **GaSb ALTTAŞ ÜZERİNE KALİTELİ GaSb EPI-KATMANLARIN BÜYÜTÜLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

**Seval ŞAHİN**

**Anadolu Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Uğur SERİNCAN**

**2014, 86 sayfa**

Moleküler demet epitaksi yöntemiyle, farklı büyüme ve soğutma parametreleri kullanılarak, GaSb alttaş üzerine GaSb epikatman yapılar büyütülerek karakterizasyonları yapılmıştır. Büyütme ve soğutma parametrelerinin kristal kalitesine ve örnek yüzeyine etkisi incelenmiştir. Büyütme sonrasında uygulanan soğutma sürecinde kullanılan Sb akı miktarının ve Sb akısının sonlandırıldığı alttaş sıcaklık değerinin epikatmanların yüzeylerinde önemli etkileri olduğu belirlendi. Ayrıca, epikatman yüzey kalitesinin aygıt haline getirilme sürecinde tanımlanan mesa yapılarının aşınma profillerine etkisi olduğu tespit edildi ve bu sorun için çözüm üretildi.

**Anahtar Kelimeler:** GaSb epikatman, Sb yoğuşması, moleküler demet epitaksi

## ABSTRACT

Master of Science Thesis

### GROWTH AND CHARACTERIZATION OF HIGH QUALITY GaSb EPILAYERS ON GaSb SUBSTRATES

Seval ŞAHİN

Anadolu University

Graduate School of Sciences

Physics Program

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Uğur SERİNCAN

2014, 86 pages

GaSb epilayers on GaSb substrates were grown by molecular beam epitaxy by using different growth and cooling procedure parameters and characterized. The effect of growth and cooling procedure parameters on the crystal quality and surface were analyzed. It was demonstrated that the amount of Sb flux and Sb termination temperature applied during the cooling period has a crucial role on the surface of the epilayers. Besides, it was shown that those surface residues affect the mesa structure which is used in device fabrication and proposed a solution to overcome that issue.

**Keywords:** GaSb epilayer, Sb condensation, molecular beam epitaxy

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübesinden yararlandığım değerli danışmanım sayın Doç. Dr. Uğur Serincan'a sağladığı imkan, yardım ve desteklerden dolayı çok teşekkür ederim. Bu süreçte göstermiş olduğu hoşgörü ve sabır için, samimiyetini ve arkadaşça tutumunu esirgemediği için ve keyifli kıldığı her dakika için minnettar olduğumu dile getirmek isterim.

Çalışmalarına, değerli bilgi ve yorumlarıyla güç katan, zor zamanlarımı kolaylaştıran ve arkadaşça tutumunu hiç esirgemeyen kıymetli hocam sayın Doç. Dr. Bülent Aslan'a, yolumu aydınlattığı bu süreçte değerli zamanını bana ayırdığı her an için, sonsuz hoşgörü ve büyük desteği için çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans tez çalışmamda, örneklerimin AFM görüntülerinin alınmasında yardımcı olan Doç. Dr. Aykutlu Dâna'ya, Raman ölçümlerinin alınmasına olanak sağlayan Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Atom ve Molekül Fiziği Araştırma grubuna teşekkür ederim.

Bilgi, tecrübe ve yorumlarıyla çalışmalarına destek olan, hoş sohbeti ve enerjisiyle motive eden değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Mustafa Kulakcı'ya teşekkür ederim.

Bu süreçte tanıdığım, bilgi, tecrübe ve yaşam enerjisinden beni mahrum bırakmayan, zor anlarımda uzak diyarlardan bana el uzatan değerli hocam Hülya Atmacan'a çok teşekkür ederim.

Laboratuvar çalışmalarım boyunca, tecrübe ve bilgisini esirgemeyen, her alanda destek sağlayan, çalışmalarına önemli katkılarda bulunan ilk öğreticim Burcu Arpapay'a ve SEM görüntülerin alınmasında yardımcı olan Bülent Arıkan'a arkadaşça yaklaşımları ve eğlenceli zamanlar için teşekkür ederim. Deneyim ve bilgilerini paylaşan, arkadaşça çalışma ortamı yaratan Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı grup üyeleri: Güven Korkmaz'a, Hülya Kuru'ya, Ayşe Şevik'e, Melih Korkmaz'a ve laboratuvar çalışmalarımın önce de hayatımda yer alan değerli arkadaşlarım Mehmet Erkuş'a, Samet Özdemir'e ve Yusuf Eren Suyolcu'a ayrı ayrı teşekkür ederim.

Uzak mesafeleri yakın kılan, çalışmalarımın her aşamasını merak eden, gücüme güç katan can dostlarım Ayşegül Öndin'e ve Uğur Turan'a teşekkür ederim.

Varlıklarıyla bana güç veren, her konuda desteklerini hissettiğim hayatımı anlamlı ve önemli kılan, cesaretimin temellini oluşturan canım aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım. İyi ki varsınız...

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
İÇİNDEKİLER .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
KISALTMALAR DİZİNİ .....	xi
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2. EPİ-KRİSTAL BÜYÜTME TEKNİKLERİ</b>	<b>6</b>
2.1. Sıvı Faz Epitaksi (LPE) .....	6
2.2. Metal Organik Buhar Faz Epitaksi (MOVPE).....	7
2.3. Moleküler Demet Epitaksi (MBE).....	9
<b>3. GaSb YARIİLETKENİNİN ÖZELLİKLERİ</b>	<b>13</b>
<b>4. DENEYSEL YÖNTEMLER</b>	<b>18</b>
4.1. GaSb Epikatman Yapılarının Büyütülmesi.....	18
4.2. GaSb Epikatman Yapılarının Aşındırılması .....	21
4.2.1. Fotolitografi.....	21
4.2.2. Islak aşındırma.....	23
4.3. Karakterizasyon Yöntemleri .....	23
4.3.1. Atomik kuvvet mikroskopisi .....	24

4.3.2. Taramalı elektron mikroskopisi.....	25
4.3.3. Yüzey profil belirlenmesi .....	26
4.3.4. X-ışını kırınım spektroskopisi .....	27
4.3.5. Raman spektroskopisi.....	29
4.3.6. Fotolüminesans spektroskopisi.....	31

## **5. DENEYSEL SONUÇLAR** **34**

5.1. Soğutma Sürecindeki Sb Akı Değerinin Epikatman Yüzeyine Etkisi .....	34
5.2. Teraslı Sb Yapısının Oluşumu .....	41
5.3. Fotolitografik Süreçlerinin Epikatman Yüzeylerine Etkileri.....	48
5.4. GaSb Epikatman Yapılarında Aşındırma.....	52
5.5. Yoğuşan Sb Katmanının Yüzeyden Uzaklaştırılması.....	57
5.5.1. Çabuk ısıl tavlama yöntemi .....	57
5.5.2. Kimyasal Aşındırma yöntemi.....	59
5.5.3. Aşınma profillerinin değerlendirilmesi .....	59
5.6. Sıcaklığa Bağlı Fotolüminesans Ölçümleri .....	63

## **6. SONUÇLAR** **67**

## **KAYNAKLAR** **69**



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

1.1. III-V grubu yarıiletken malzemelerin oda sıcaklığındaki örgü sabiti ve enerji bant aralıkları.....	2
1.2. Kızılötesi bölgede algılama yapan InAs/GaSb süperörgü dedektör yapısı .....	3
2.1. LPE sisteminde kristal büyütme işleminin şematik gösterimi .....	7
2.2. MOCVD büyütme yönteminde (a) büyüme işleminde gerçekleşen süreçler ve (b) büyüme işlemi .....	8
2.3. MOVPE sisteminin şematik gösterimi.....	9
2.4. MBE sisteminin şematik gösterimi .....	11
2.5. Anadolu Üniversitesi, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu olan Veeco GEN20MC MBE sistemi.....	12
3.1. III-V grubu yarıiletkenlerin çinko-sülfür kristal yapısı: III-grubu atomları siyah ve V-grubu atomları turkuaz renkle gösterilmiştir .....	13
3.2. Yarıiletken bileşikler için (a) (0 0 1), (b) (1 1 0) ve (c) (1 1 1) düzlemlerinde çinko-sülfür kristal yapıları.....	14
3.3. 300 K sıcaklıkta GaSb bant yapısı ve enerji değerleri .....	15
4.1. Desen aktarma işleminin şematik gösterimi .....	22
4.2. AFM cihazının çalışma mekanizmasının şematik gösterimi .....	24
4.3. SEM cihazına oluşturan birimlerin şematik gösterimi.....	26
4.4. Basamak yüksekliği ölçümünün şematik gösterimi.....	27
4.5. X-ışınlarının kristal düzlemlerindeki kırınımının şematik gösterimi.....	29
4.6. Rayleigh ve Raman saçılmasında enerji diyagramı .....	30
4.7. PL ölçümlerinde kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi .....	32
5.1. GaSb (0 0 4) simetri ekseninde alınan XRD (a) geniş açı sallantı eğrisi ve (b) normalize edilmiş GaSb sinyallerinin karşılaştırmalı grafikleri.....	36
5.2. Hiçbir işleme maruz kalmamış örnek yüzeylerinin AFM görüntüleri; (a) Epi-01, (b) Epi-02, (c) Epi-03, (d) Epi-04 .....	38
5.3. Aşınmaya maruz kalmış örnek yüzeylerinin AFM görüntüleri; (a) Epi-01, (b) Epi-02, (c) Epi-03, (d) Epi-04 .....	39
5.4. (a) Epi-01, (b) Epi-02, (c) Epi-03 örneklerinin yan kesit SEM görüntüleri....	40

5.5. Epi-01, Epi-02, Epi-03 ve Epi-04 örneklerinin (a) aşındırılmamış ve (b) aşındırılmış yüzeylerinden alınan Raman spektrumları .....	41
5.6. Farklı büyütme koşullarında büyütülen örneklerin AFM yüzey görüntüleri; (a) Epi-05, (b) Epi-01, (c) Epi-03, (d) Epi-06, (e) Epi-07, (f) Epi-08, (g) Epi-09, (h) Epi-10 .....	43
5.7. (a) Epi-05 ve (b) Epi-10 örneklerine ait geniş açı XRD ölçüm grafikleri .....	46
5.8. Hegzagonal Sb kristal sinyalinin yüzeyde yoğunlaşan Sb miktarına bağlı olarak değişimini gösteren XRD ölçümü.....	47
5.9. GaSb epikatman örneklerinin oda sıcaklığında alınan Raman ölçümleri .....	48
5.10. (a)Yüzeydeki Sb yoğunlaşmasının işlem uygulanmadan önceki ve (b) aynı örneğin alkole maruz kaldıktan sonraki farklı büyütmelerde alınan yüzey SEM görüntüleri .....	50
5.11. GaSb epikatman yapısının (a) yüzeyinde yoğunlaşan teraslı Sb yapısının, (b) teraslı Sb yoğunlaşmasının fotorezistin 200 °C’de ısıtmaya maruz kaldıktan sonra fotorezisten arındırılmış yüzey SEM görüntüsü .....	52
5.12. GaSb alttaşın C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> çözeltisi içerisinde zaman bağlı aşınma miktarını gösteren grafik .....	53
5.13. GaSb epikatman örneklerine ait basamak yüksekliği aşınma profilleri.....	54
5.14. Epi-05 örneğinin yanal yüzey SEM görüntüsü .....	55
5.15. GaSb epikatman örneklerinin zamana bağlı aşınma derinlik grafiği .....	55
5.16. GaSb epikatman yapılarından Epi-12 örneğinin (a) aşınmamış, (b) aşınmış (500 nm) yüzey SEM görüntüleri ile Epi-11 numaralı örneğin (c) aşınmamış, (d) aşınmış (500 nm) yüzey SEM görüntüleri.....	56
5.17. Epi-14 örneğine ait tavlama sonrasında yüzey SEM görüntüleri; (a) tavlınmamış yüzey ve 350°C (b) 5 dk, (c) 10 dk ve (d) 30 dk tavlınmış.....	58
5.18. Epi-14 örneğine ait 400 °C sıcaklığında (a) 30 dk, (b) 60 dk sürelerinde tavlınan yüzey SEM görüntüleri .....	58
5.19. Epi-14 örneğine ait yüzey SEM görüntüleri; (a) aşındırılmamış ve CA asitinde (b) 20 sn, (c) 30 sn, (d) 60 sn aşınma sonrası.....	59
5.20. Referans GaSb alttaşa ait aşınma profilleri .....	61
5.21. Epi-14 örneğine ait aşınma profilleri .....	61

5.22. (a) Epi-09, (b) Epi-08 ve (c) Epi-15 örneklerine ait aşınma profilleri .....	62
5.23. (a) Epi-06, (b) Epi-14 örneklerine ait aşınma profilleri .....	63
5.24. Uygulanan işleme bağlı $\Delta S$ değişim grafiği.....	63
5.25. Epi-05 örneğinin (a) optik deney düzeneğinde, (b) FTIR deney düzeneğinde alınan fotoluminesans ölçüm grafikleri (8K).....	64
5.26. Epi-05 ve Epi-10 örneklerinin sıcaklığa bağlı doruk pozisyon değişme grafiki .....	66

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Oda sıcaklığında katkısız GaSb kristalinin temel elektriksel özellikleri.....	16
Çizelge 3.2. GaSb kristali için optik sabitlerin farklı dalga boylarındaki değerleri .....	17
Çizelge 4.1. MBE sisteminde büyütülen örnekler ve kullanılan büyütme parametreleri.....	20
Çizelge 5.1. 515 °C’de büyütülen örneklerin soğutma parametreleri.....	35
Çizelge 5.2. Örneklerin büyütme parametreleri.....	42
Çizelge 5.3. Örneklerin AFM yüzey pürüzlülükleri ve RMS değerleri.....	45
Çizelge 5.4. Epi-14 örneği üzerinde yapılan işlemler ve bu işlemlerin gerçekleşme sıraları.....	60
Çizelge 5.5. GaSb kristali için düşük sıcaklık PL ölçümlerinde görünen sinyaller .....	65

## KISALTMALAR DİZİNİ

<b>A</b>	: Akseptör
<b>AFM</b>	: Atomik Kuvvet Mikroskop
<b>AlSb</b>	: Alüminyum Antimon
<b>Au</b>	: Altın
<b>BE</b>	: Bant Eksiton
<b>CA</b>	: Sitrik Asit
<b>CaF<sub>2</sub></b>	: Kalsiyum Florür
<b>CdSe</b>	: Kadmiyum Selenit
<b>CLT</b>	: Kritik kalınlık
<b>CVD</b>	: Kimyasal Buhar Biriktirme
<b>FE</b>	: Serbest Eksiton
<b>FT-IR</b>	: Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektroskopi
<b>FWHM</b>	: Yarı Maksimum Genişlik
<b>Ga</b>	: Galyum
<b>GaAs</b>	: Galyum Arsenik
<b>GaSb</b>	: Galyum Antimon
<b>Ge</b>	: Germanyum
<b>InAs</b>	: İndiyum Arsenik
<b>LO</b>	: Boyuna Optik
<b>LPE</b>	: Sıvı faz epitaksi
<b>MBE</b>	: Moleküler Demet Epitaksi
<b>MOVPE</b>	: Metal Organik Buhar Faz Epitaksi
<b>N<sub>2</sub></b>	: Kuru Azot
<b>NIR</b>	: Yakın Kızılötesi
<b>PL</b>	: Fotolüminesans
<b>Pd</b>	: Paladyum
<b>Pt</b>	: Platin

<b>RHEED</b>	: Yansı Yüksek Enerji Elektron Kırınımı
<b>RGA</b>	: Artık Gaz Analiz Cihazı
<b>RMS</b>	: Karekök Ortalama Değer
<b>RTP</b>	: Çabuk Isıl Tavlama
<b>Sb</b>	: Antimon
<b>SE<sub>2</sub></b>	: İkincil Elektron
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskop
<b>Si</b>	: Silisyum
<b>TO</b>	: Enine Optik
<b>UV</b>	: Morötesi
<b>VIS</b>	: Görünür Bölge
<b>XRD</b>	: X-Işını Kırınımı
<b>ΔS</b>	: Mesa Tabanı ve Mesa Üstü Arasındaki Yanal Mesafe

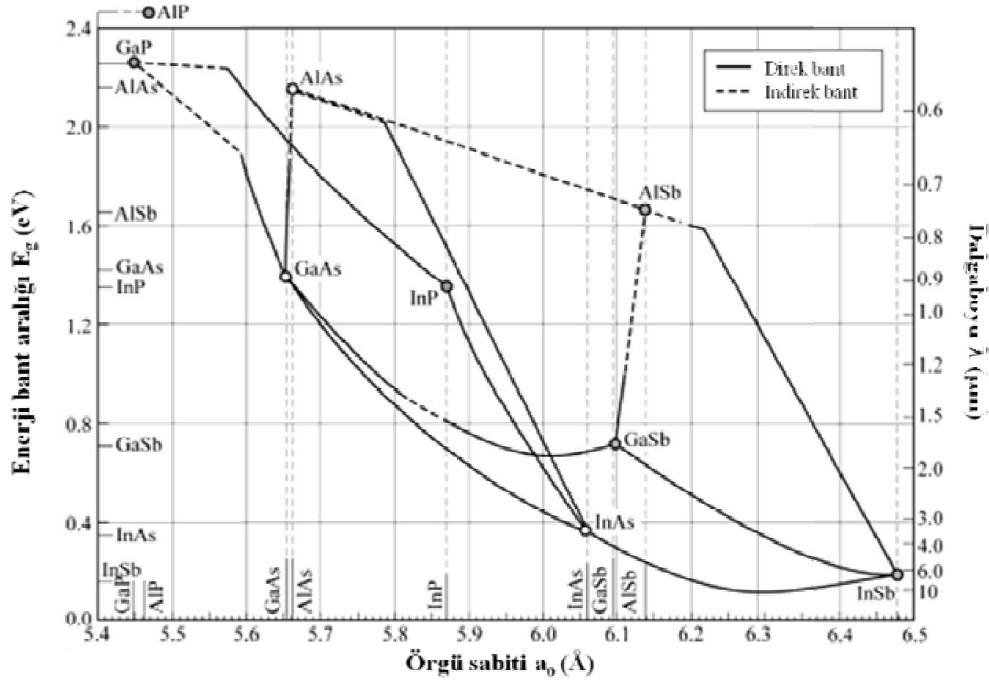
## 1. GİRİŞ

Yarıiletkenler, iletkenlikleri metaller ile yalıtkanlar arasında olan ve değerlik elektron sayısının değiştirilmesiyle iletkenlikleri değiştirilebilen malzemelerdir. Amorf ve sıvı yarıiletkenler de olmasına rağmen en çok bilinen ve kullanılan yarıiletken malzemeler katı kristal olanlardır. Genel olarak yarıiletkenler iki grupta sınıflandırılır: Tek atomlu yarıiletkenler ve bileşik yarıiletkenler. Periyodik cetvelin IV. grubunda yer alan Ge ve Si elementleri tek atomlu yarıiletkenlere, II-VI ve III-V gruplarındaki elementlerden oluşan CdSe ve GaAs ise bileşik yarıiletkenlere örnektir. Periyodik cetvelin II-VI, III-V ve IV gruplarındaki elementler kendi içlerinde ikili (örn. ZnSe, InAs, SiGe), üçlü (örn. HgCdTe, AlGaAs) ve dördü (örn. AlInGaP, InGaNaNs) bileşik yaparak farklı özelliklerde yarıiletken kristalleri oluştururlar. Yarıiletkenlerin tarihteki temeli yaklaşık 180 yıl önce (1833 yılında) Micheal Faraday'ın sıcaklığı artan gümüş sülfatın direncinin -metallerin aksine- azaldığını gözlemesine dayanmaktadır [1]. Geçen zaman içinde gelişen yarıiletken teknolojisi pek çok alanda pratik uygulama imkânı bulmuştur. Günlük hayatta sıklıkla kullanılan cep telefonları, kameralar, bilgisayarlar ve fotoğraf makineleri gibi çoğu teknolojik cihazın temelinde yer alan yarıiletken malzemeler, uydu-uzay, sağlık, askeri ve çok sayıda sivil uygulama alanına sahiptir. Bu alanlarda genel ve özel amaçlı kullanılan dedektörler, lazerler, transistörler ve diyotların aktif mekanizmaları yarıiletken malzemelerden üretilmektedir.

Her yarıiletken kristalinin kendine özgü bir örgü sabiti vardır (Şekil 1.1). Aygıt tasarımı ve üretiminde farklı yarıiletken malzemelerin ardışık olarak kullanılmasına ihtiyaç duyulması nedeniyle, malzemeler arasındaki örgü uyumunun sağlanması kritik öneme sahiptir. Bir yarıiletken malzemenin farklı örgü sabitine sahip başka bir yarıiletken malzeme üzerine, yapı içinde stresten kaynaklı kusurlar oluşmadan epitaksiyel olarak büyüyebileceği bir katman kalınlığı vardır. *Kritik kalınlık* (Critical Layer Thickness, CLT) adı verilen bu katman kalınlığının üzerindeki büyütmelede, malzeme kararlılığını kaybederek yapıda kusurlar oluşur. Dolayısıyla, yarıiletken aygıtların büyütülmesi sürecinde katmanlar arasındaki örgü uyumsuzlukları ve kritik kalınlık değerinin aşılması

gibi durumlarda yapıda çok sayıda çıkıklar (dislocations) ve kusurlar meydana gelir. Oluşan yüksek kusur yoğunluğu, üretilen cihazın kalite göstergelerinde düşmeye neden olduğundan yarıiletken aygıt tasarımlarında, kusurların azalmasını sağlayacak destek (tampon) katmanlarına ihtiyaç duyulur.

III-V grubu yarıiletkenlerinden 6,1 Å ailesi olarak bilinen GaSb, InAs ve AlSb, hem örgü parametrelerinin yakın olması hem de birbirlerine göre farklı bant hizalanmalarına sahip olduklarından birçok farklı aygıt tasarımına olanak tanımaları nedeniyle ikili bileşikler içerisinde önemli bir yere sahiptir. Bunların arasında yüksek kaliteli tek kristal alttaş üretim teknolojisi son yıllarda hızla gelişen GaSb, elektriksel ve optiksel özelliklerinden dolayı III-V grubu pek çok yarıiletken aygıtta uyum sağlayabilmektedir.

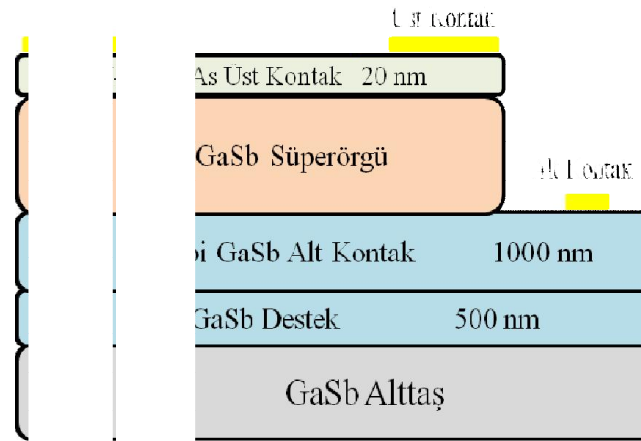


Şekil 1.1. III-V grubu yarıiletken malzemelerin oda sıcaklığındaki örgü sabiti ve enerji bant aralıkları [2].

Özellikle 2000'li yıllarda, üzerine epitaksiyel büyütme yapmaya hazır GaSb alttaşların yaygınlaşması ve kristal kalitelerindeki artış, başta 6,1 Å ailesinin kullanıldığı sistemler olmak üzere farklı uygulama alanlarına yönelik tasarımlarda dikkate değer performans iyileşmesine sebep olmuştur. Bu durum, tasarımlarda kullanılan ve aygıt performanslarının belirlenmesinde büyük payı olan kalın



GaSb destek ve kontak katmanlarının önemini arttırmıştır. Yapısal özelliklerinden dolayı günümüzde en çok çalışılan ve GaSb alttaşla kısmi örgü uyumuna sahip malzemeler InAs/GaSb tabanlı süperörgü yapılarıdır [2]. Bahsi geçen bu süperörgü yapılar günümüzde üçüncü nesil kızılötesi dedektörler sınıfına aday olarak gösterilmektedir. Kızılötesi dedektörler, üzerine düşen optik sinyali, elektrik sinyaline çevirerek algılanmasını sağlayan sistemlerdir. Çok sayıda askeri ve sivil uygulama alanı olan kızılötesi dedektörler, çalışma ilkelerine göre kendi içinde ısı (termal) ve foton dedektörler olmak üzere ikiye ayrılır. Isıl dedektörler, üzerine düşen fotonun yapıda yarattığı sıcaklık değişimini voltaj, direnç, sığa gibi ölçülebilir büyüklüğe çeviren devre mekanizmaları yardımıyla algılayan dedektörlerdir [3]. Bu dedektörlerin soğutmaya ihtiyaç duymadan çalışmaları en büyük avantajıken, tepki sürelerinin uzun olması ise dezavantajıdır. Foton dedektörlerinde ise algılanacak foton, malzeme içindeki kristal örgü ile etkileşerek yapı içindeki aktif taşıyıcıları (elektron veya deşik) uyarır. Gelen radyasyon sonucunda üretilen fotoelektronlar yine akım, voltaj, direnç gibi ölçülebilir büyüklüğe çevrilerek algılama gerçekleştirilmiş olur [3]. Foton dedektör grubunda yer alan tipik bir InAs/GaSb tabanlı süperörgü dedektör yapısı Şekil 1.2’de gösterilmiştir [4]. Yapıda, alttaş üzerine kalın GaSb destek ve kontak katmanlarının kullanıldığı görülmektedir.



Şekil 1.2. Kızılötesi bölgede algılama yapan InAs/GaSb süperörgü dedektör yapısı [4].

GaSb epikatman yapıları sadece süperörgü kızılötesi dedektör yapılarında değil aynı zamanda farklı tasarımlarla lazer yapılarında da destek ve kontak

katmanı olarak kullanılmaktadır. Lazerler, enerji düzeyleri arasında elektron geçişi ile oluşan fotonlar temeline dayanan ışık kaynaklarıdır. Yarıiletken lazerlerin büyük kısmı, bir p-n eklemine doğrudan elektrik akımı uygulanmasıyla taşıyıcılarda yaratılan nüfus terslenmesi ilkesine dayanır [2]. InGaAs/InAs/AlSb kızılötesi lazer yapıları, InAs/AlSb kuantum çağlayan lazer yapıları kontak ve destek katmanı olarak GaSb epikatmanın kullanıldığı yapılardan sadece bazılarıdır [5,6]. Bunlara ek olarak, GaSb alttaş üzerine II-VI grubu güneş pili yapılarında da GaSb destek katmanlarının kullanıldığı çalışmalar görülmektedir [7]. Yarıiletken aygıtlarda istenen özellikler olan düşük kontak direnci ve ısıl kararlılık, ancak mükemmel yüzey ve ara yüzeylerin elde edilmesiyle sağlanabilir [8]. Düzgün hazırlanmış bir yüzeyden elde edilecek düşük kontak direnci, kayıpların ve güç tüketiminin daha az olmasını sağlar. GaSb katman üzerine düşük dirençli omik kontak elde edilmesine dair yapılan çalışmalarda, germanyum (Ge), altın (Au), platin (Pt), paladyum (Pd) gibi malzemeler kullanılmaktadır [9,10].

Yarıiletken aygıt tasarımında kullanılan destek ve kontak katmanların dışında şapka katmanı olarak adlandırılan ve yapının korunmasını amaçlayan katmanlar da kullanılmaktadır. Büyütülen yapıların yüzeylerinin atmosferle karşılaştıklarında oluşan doğal oksitten korunması için büyütme sonrasında örnek yüzeyine şapka katmanı eklenir. Bu amaçla kullanılan malzemelerden biri de Sb'dir [11,12]. Şapka katmanı, yapının aygıt haline gelmesi için uygulanacak işlemlerden önce tavlama veya aşındırma ile esas yapıya zarar vermeden yüzeyden uzaklaştırılır.

Bu tezde, GaSb alttaş üzerine yüksek kalitede GaSb epikatman yapılarının büyütülmesi ve karakterizasyonu üzerine ayrıntılı bir çalışma yürütülmüştür. İlk bölümde, GaSb epikatman ve Sb katman yapılarının kullanım alanları ve yarıiletken teknolojisindeki yeri ve öneminden bahsedilmiştir. İkinci bölümde, epikatman kristal yapıların büyütme tekniklerinden, üçüncü bölümde ise GaSb yarıiletken kristalinin genel özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. Bir sonraki (dördüncü) bölümde, bu tez kapsamında çalışılan örneklerin büyütülmesi, uygulanan fotolitografik işlemler, aşındırma ve kullanılan karakterizasyon teknikleri anlatılmıştır. Beşinci bölümde ise büyütme koşullarının örnek yüzeyine ve epikatman yapısına olan etkileri farklı karakterizasyon tekniklerinden

faýdalanýlarak incelenmiştir. Ek olarak, epikatman yapılarının kimyasal aşındırmayla mesa tanımlamaları yapıp dokunmalı yüzey profil belirleme cihazıyla aşınma profilleri çıkartılarak sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Son olarak, altıncı bölümde çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

## 2. EPI-KRİSTAL BÜYÜTME TEKNİKLERİ

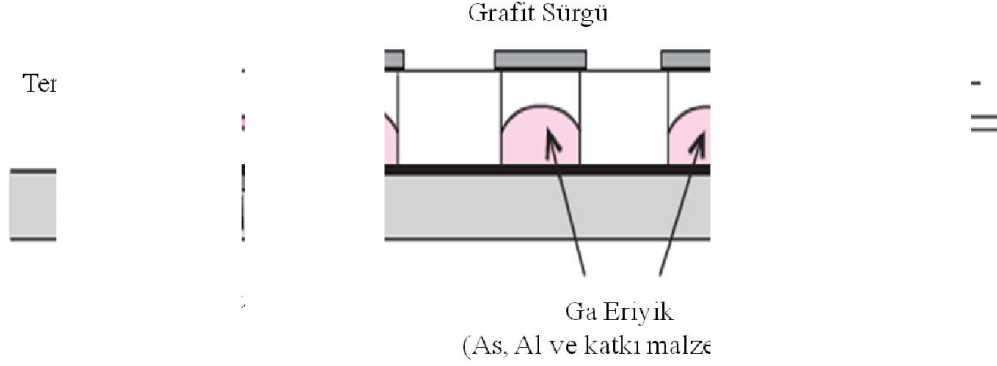
Tek kristal yarıiletken malzemeler kullanılarak üretilen aygıtların verimlilikleri, yapı içinde kullanılan malzemelerin kalitesiyle doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle, yüksek kaliteli malzeme üretiminde kullanılan epitaksiyel büyütmeye yöntemleri geliştirilmiştir [13]. Bu bölümde, günümüzde kullanılan en önemli büyütmeye teknikleri olan sıvı faz epitaksi (liquid phase epitaxy, LPE), kimyasal buhar biriktirme (chemical vapor deposition, CVD) ve moleküler demet epitaksi (molecular beam epitaxy, MBE) tekniklerden kısaca bahsedilecektir.

### 2.1. Sıvı Faz Epitaksi (LPE)

Bu yöntem kısaca, büyütülmesi istenen yarıiletken kristal malzemenin bir eriyik içinde çözülmesiyle elde edilen sıvı fazından altta üzerine katılaştırılması olarak tanımlanabilir. III-V grubu malzeme sistemlerinde başarıyla kullanılan LPE tekniğinde, genel olarak grup-III metali (örn: Ga, In), grup-V elementi için (örn. As) çözücü olarak kullanılır [14]. Sıvı fazdaki bu çözücü, üzerine büyütmeye yapılacak altta ile temasa geçtiğinde grup-V elementiyle aşırı doymuş bir hal olarak altta üzerinde çekirdeklenmeye (büyümeye) başlar. Eriyik malzemenin sıcaklığı, alttan erime sıcaklığından daha düşük olduğundan, tek kristal yarıiletken tabaka altta üzerinde kolayca büyümektedir. Alttan veya Şekil 2.1'de gösterildiği gibi içinde farklı büyütülecek malzemelerin (alaşım ve katkı elementlerini içeren eriyik) bulunduğu botların hareket ettirilmesiyle ardışık katmanların büyütülmesi yapılır [14].

LPE tekniğinde büyütmeyi etkileyen başlıca parametreler, eriyik kompozisyonu, büyütmeye sıcaklığı ve büyütmeye süresi şeklinde sıralanabilir [3]. Bu yöntemin yüksek büyütmeye oranı, yüksek safsızlık ve düşük maliyet gibi avantajlı durumları vardır. Ancak, yüksek yüzey pürüzlülüğü, yüzeyin homojen olmaması, eriyikten kaynaklı kusurlar gibi yarıiletken teknolojisi için olumsuzlukları bünyesinde taşımaktadır. LPE yönteminde karşılaşılan tüm olumsuzluklara

rağmen, yarıiletken teknolojisinin pek çok uygulama alanında (özellikle GaAs diyot lazer büyütülmesinde) halen kullanılmaktadır.



Şekil 2.1. LPE sisteminde kristal büyütme işleminin şematik gösterimi [14].

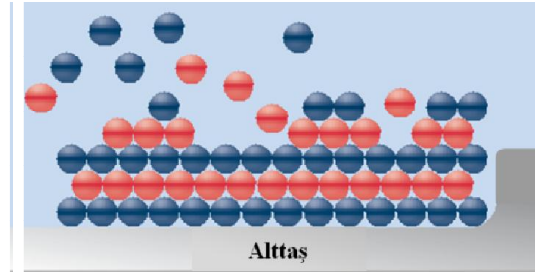
## 2.2. Metal Organik Buhar Faz Epitaksi (MOVPE)

MOVPE büyütme yöntemi, aynı zamanda metal organik kimyasal buharlı büyütme (MOCVD) ya da organometalik buhar faz epitaksi (OMVPE) olarak da isimlendirilir. MOVPE ince film büyütme yöntemi, yarıiletkenler dışında metal ve seramik malzemeler için de kullanılan bir tekniktir [3].

MOVPE sistemleri genellikle dört ana bölümden oluşur: (i) gaz taşıma sistemi, (ii) reaktör odası, (iii) güvenlik sistemi ve (iv) ısıtma ve egzoz ünitesi. Gaz taşıma sistemleri, alkil ve hidrit kaynaklar, vanalar, pompalar, gaz akışı ve kontrolünün sağlandığı diğer ekipmanların yer aldığı bölümdür. Genellikle, alkiller periyodik cetvelin II ve III grubundan, hidritler ise V ve VI grubu elementlerinden seçilir. Bu yöntemde ultra saf gazlar, hatlar yardımıyla reaktör odasına enjekte edilerek yarıiletken alttaş üzerinde atomların çok ince katmanlar oluşturması sağlanır. Organik bileşiklerin yüzey reaksiyonu ve hidrürlerin gerekli kimyasal elementleri içermesi yarıiletken bileşiklerin veya malzemelerin kristal halinde büyümesi için uygun koşulları yaratır. Büyüme işleminde gerçekleşen süreçlerin sıralaması Şekil 2.2a'da, büyüme işleminin nasıl gerçekleştiğini gösteren yüzey kinetiği ise Şekil 2.2b'de verilmiştir.



(a)



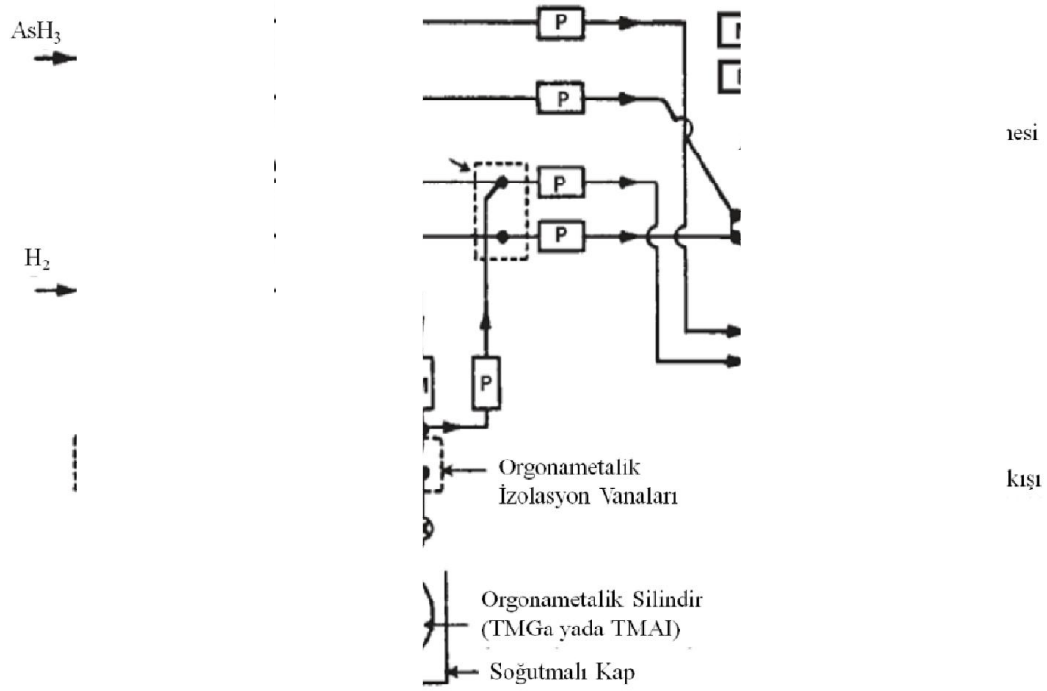
(b)

**Şekil 2.2.** MOCVD büyütme yönteminde (a) büyüme işleminde gerçekleşen süreçler ve (b) büyüme işlemi [15].

Bu sistemde büyütme, yüzey reaksiyonuyla ilişkili olduğundan büyüme, alttaş yüzeyindeki kimyasal tepkimeye bağlıdır. Periyodik cetvelin III-V grubu yarıiletken birleşikleri için yüzey reaksiyon tepkimelerini;



şeklinde genelleyebiliriz [3]. Burada, grup-III elementleri M, grup-V elementleri E ve alkiler ( $CH_3-C_2H_5$ ) ise R harfleriyle temsil edilmiştir. Böylece yüzey reaksiyon tepkimesi sonucunda büyüyecek malzeme bileşiğinin oluşumu gerçekleşmiş olur. Genel olarak bir MOVPE sisteminde bulunan bağlantılar ve sistemin genel görüntüsü şematik olarak Şekil 2.3’de sunulmuştur.



Şekil 2.3. MOVPE sisteminin şematik gösterimi [16].

MOVPE sistemlerinde aynı anda çok sayıda örneğin hızlı olarak büyütülebilmesi, bu sistemin diğerlerine kıyasla avantajı olarak söylenebilir. Ancak büyütmede kullanılan tehlikeli gazlardan dolayı, gaz taşıma sisteminin sızdırmaz olması büyük önem taşır. Bu nedenle ciddi güvenlik önlemlerinin alınması gerekir. Buna ek olarak, büyüme sonrasında oluşan atık gazların atıldığı bir egzoz ünitesi de bulunduğundan gerekli koşullar sağlanmadığında çevre için zararlı durumlar oluşturabilir.

### 2.3. Moleküler Demet Epitaksi (MBE)

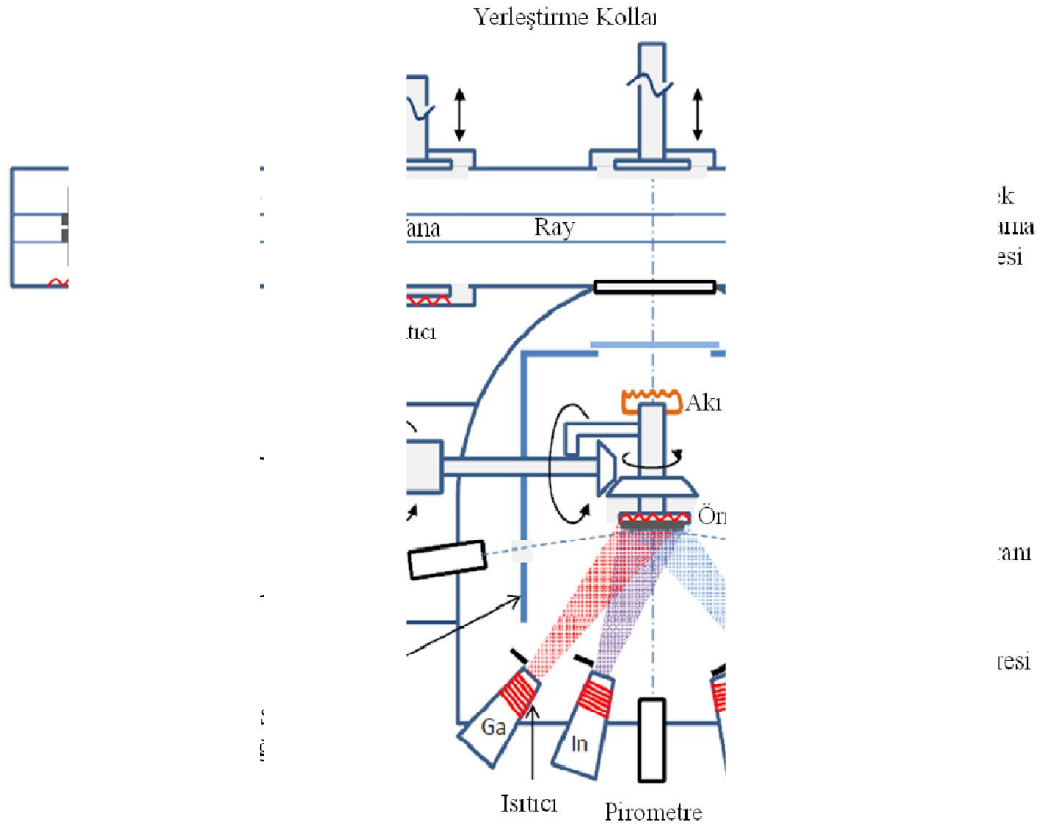
Epitaksiyel ince film büyütmede kullanılan ileri teknolojilerden biri de MBE yöntemidir. Bir MBE sistemi; örnek yükleme haznesi, örnek hazırlama haznesi ve büyütme haznesi olmak üzere başlıca 3 bölümden oluşur. Genel hatlarıyla bir MBE sistemi vakum haznelere, vakum pompaları, vakum ölçerler, efüzyon hücreleri, sıcaklık okuyucular, yansı yüksek enerji elektron kırınımı (reflection high energy electron diffraction, RHEED) cihazı ve artık gaz analiz cihazı

(residual gas analyzer, RGA) gibi bileşenlerden oluşur. Bu yöntem kısaca, ultra yüksek vakum altında uygun sıcaklıktaki kristal alttaş üzerine moleküler ya da atomik demetin kontrollü oranda biriktirilmesi şeklinde tanımlanabilir.

Sistemde büyütme sürecinin ilk adımı, üzerine yüksek saflıkta tabakaların büyütüleceği alttaşın, giriş haznesindeki hareketli alttaş arabasına yerleştirilerek bu bölmenin vakuma alınmasıdır. Arabaya yerleştirilen alttaşlar giriş haznesinde yaklaşık 150 °C'ye kadar ısıtılarak üzerlerindeki su buharı gibi kirliliklerden arındırılır. Ray üzerinden örnek hazırlama haznesine aktarılan alttaşlar, bu bölgede tek tek daha yüksek sıcaklıklarda (~350 °C) kirliliklerinden arındırılır. Bu işlemden sonra alttaş transfer kolları aracılığıyla çok yüksek vakum ( $\sim 10^{-9}$ - $10^{-11}$  Torr) altındaki büyütme haznesine transfer edilir. Büyütme haznesinde, alttaş üzerine büyütülecek her bir malzeme için yüksek sıcaklıklara dayanıklı, birbirlerinden bağımsız ve kullanılan malzemeye özgü tasarlanmış “efüzyon hücresi” olarak adlandırılan malzeme kaynakları bulunur. Her efüzyon hücresinin, büyütme esnasında malzemenin hazneye istenildiği zaman gönderilebilmesini sağlayan kepenkleri mevcuttur.

Büyütülecek malzemenin içinde olduğu efüzyon hücresi ısıtıldığında malzeme buharlaşmaya başlar. Buharlaşan malzeme efüzyon hücre kepenğinin açılmasıyla alttaş üzerine ulaşır ve böylece büyüme işlemi başlamış olur. Büyümenin homojen olması için alttaş tutucusu belirli bir hızda döndürülürken, birleşik oluşturacak atomların yüzey difüzyonu için gerekli enerjiyi sağlamak amacıyla da alttaş tutucusu ısıtılır.



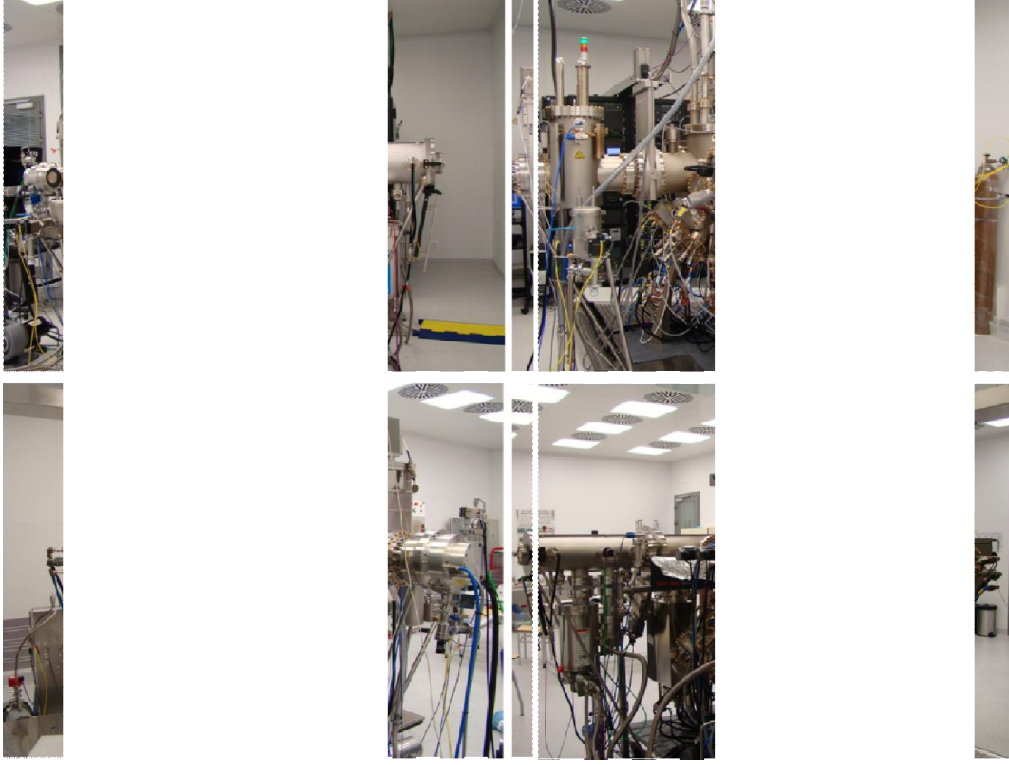


Şekil 2.4. MBE sisteminin şematik gösterimi [17].

Büyütme esnasında yüzey ve kristal yapısı hakkında bilgi sahibi olmak için RHEED tekniğinden faydalanılır [3]. Bu teknik için büyütme haznesine bağlanmış bir elektron tabancası ve fosfor kaplı ekran bulunur. Elektron tabancasıyla üretilen elektron demeti, birkaç derece açı yapacak şekilde örnek yüzeyine gönderilir. Yüzeğe gelen elektron demeti, kristal düzlemler tarafından kırınıma uğrayarak fosfor kaplı ekrana yansır ve bir kamera yardımıyla bilgisayar ekranına aktarılır. Ekranda oluşan kırınım desenleri, kırınıma sebep olan kristal düzlemleri hakkında bilgi verir [18,19]. MBE tekniği, yarıiletken uygulamalarında geniş bir yelpaze sunarken, aynı zamanda kolay ve kontrol edilebilir tekniklerden biridir. Katman kalınlığı, bileşik ve katkı seviyeleri, akı oranı yardımıyla istenildiği şekilde ayarlanabilir [3]. Sağladığı bu kolaylıkların yanı sıra yüksek vakuma ihtiyaç duymasından dolayı maliyeti yüksek ve karmaşık bir sistemdir.

Bu tez kapsamında çalışılan örnekler, bahsi geçen epikatman büyütme tekniklerinden biri olan MBE ile büyütülmüştür. Örneklerin büyütülmesi, Anadolu Üniversitesi, Fizik Bölümü, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı

bünyesinde bulunan Veeco GEN20MC MBE sisteminde yapılmıştır. Bu sisteme ait genel görüntü Şekil 2.5’de verilmiştir.



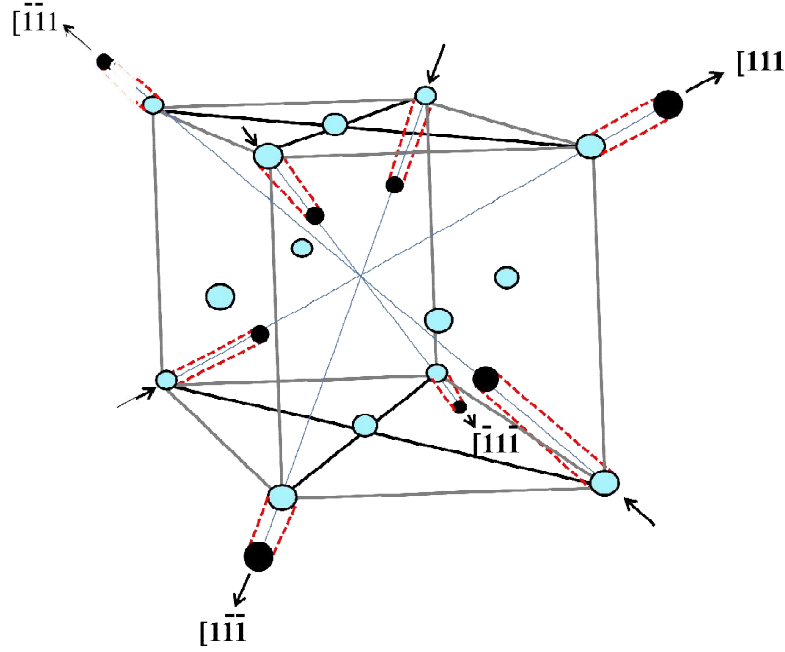
Şekil 2.5. Anadolu Üniversitesi, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı’nda kurulu olan Veeco GEN20MC MBE sistemi.

### 3. GaSb YARIİLETKENİNİN ÖZELLİKLERİ

6,1 Å ailesi bileşiklerinden biri olan GaSb yarıiletkeni, periyodik cetvelin III grubundaki Ga ve V grubundaki Sb atomlarından meydana gelir [20]. GaSb kristali Şekil 3.1’de gösterilen çinko-sülfür kristal yapısına sahip olup örgü sabiti 298,15 K’de 6,09593(4) Å değerindedir [21]. Sıcaklığa bağlı örgü sabiti (680 °C’ye kadar olan sıcaklıklar için)

$$a = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 \quad (3.1)$$

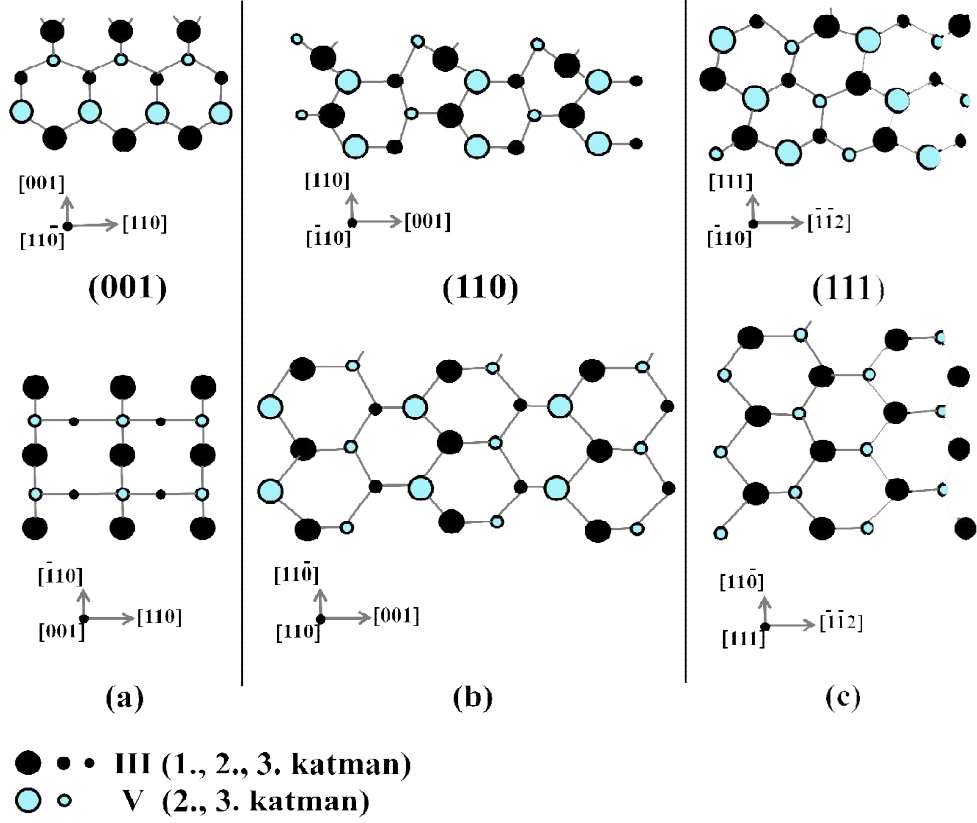
denklemleri yardımıyla hesaplanabilir. Burada  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  ve  $a_4$  sabitleri sırasıyla 6,0958 Å,  $3,4963 \times 10^{-5}$  Å °C<sup>-1</sup>,  $3,3456 \times 10^{-8}$  Å °C<sup>-2</sup>,  $-4,6309 \times 10^{-11}$  Å °C<sup>-3</sup> ve  $2,6369 \times 10^{-14}$  Å °C<sup>-4</sup> şeklindedir.  $T$  ise °C cinsinden sıcaklıktır [22].



Şekil 3.1. III-V grubu yarıiletkenlerin çinko-sülfür kristal yapısı: III-grubu atomları siyah ve V-grubu atomları turkuaz renkle gösterilmiştir [23].

GaSb kristali içindeki her Ga atomu, dört tane Sb atomuyla tetrahedral (dört yüzlü) yapı oluşturacak şekilde bağlanmıştır (bkz. Şekil 3.1) [22]. Ga ve Sb atomlarının elektronegatiflikleri eşit olmadığından kimyasal bağ yapısı

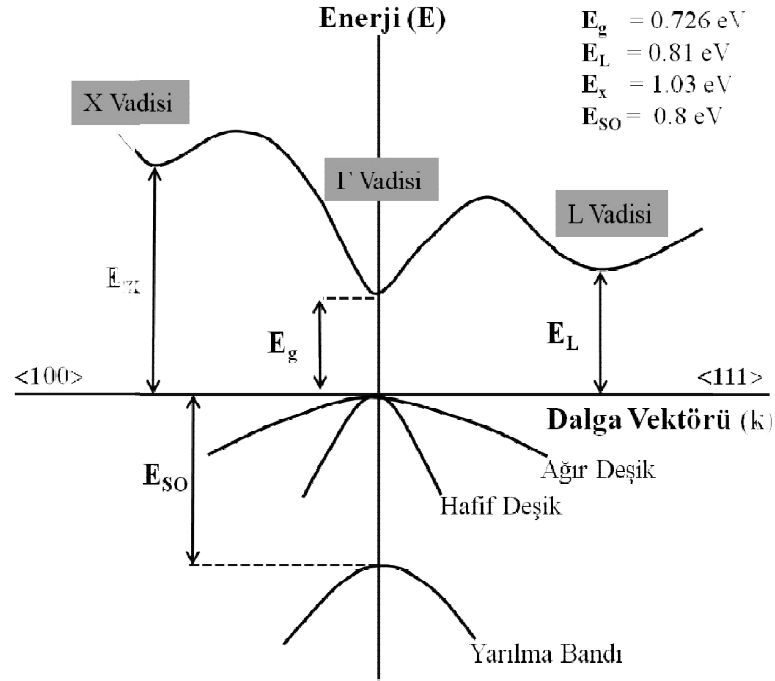
0,33 oranında iyonik olacak şekilde karma bağ yapısı olan kovalent-iyonik bağ yapısına sahiptir [22,23].



Şekil 3.2. Yarıiletken bileşikler için (a) (0 0 1), (b) (1 1 0) ve (c) (1 1 1) düzlemlerinde çinko-sülfür kristal yapıları [23].

Tek kristal GaSb yarıiletken yapılarda, üzerine büyütme yapılan yüzeyin (0 0 1), (1 1 0) veya (1 1 1) düzlemi olması ve dolayısıyla da yüzeyde açıkta kalan atomların farklılık göstermesi önemlidir. (0 0 1) düzlemine sahip kristal yüzeyinde kademeli olarak hem Ga hem de Sb atomlarını bulunur (Şekil 3.2a). Bölünme düzlemi olarak bilenen (1 1 0) düzlemine sahip yüzeylerde Ga ve Sb atomları eşit sayılarda olup (Şekil 3.2b) elektriksel olarak nötrdür. Kristalin (1 1 1) düzlemine sahip yüzeyinde ise ya Ga atomları ya da Sb atomları vardır (Şekil 3.2c): Yüzeyde Ga atomlarının bulunması halinde Ga zengin (Ga-rich), Sb atomlarının bulunması halinde ise Sb zengin (Sb-rich) olarak ifade edilir [24]. Bu iki farklı durum kristalin elektriksel ve optik özelliklerinde farklılıklara neden olmaktadır.

Yarıiletkenin elektronik, optik ve manyetik özelliklerini malzemenin bant yapısı belirler. Opto-elektronik aygıtlarda sıklıkla kullanılan GaSb yarıiletken kristali doğrudan bant aralığına sahip olup oda sıcaklığındaki değeri 0,726 eV'dur [21]. 300 K'de GaSb yarıiletken kristaline ait enerji bant diyagramı Şekil 3.3'de verilmiştir. GaSb kristalinin iletkenlik bandı minimum 3 ayrı vadi ile karakterize edilir ve her bir vadi bir düzlemi ifade eder. Değerlik bandı ise tüm çinko-sülfür kristal yapısındaki yarı iletkenlerle ortak özelliktedir [1,25].



Şekil 3.3. 300 K sıcaklıkta GaSb bant yapısı ve enerji değerleri.

Yarıiletken kristalleri sıcaklığa bağlı olarak enerji bant aralığı değişim gösterir. Sıcaklık arttıkça değerlik bandı ve iletkenlik bandı arasındaki  $E_g$  aralığı azalır. Böylece iletkenlik bandına geçiş için elektronların ihtiyaç duyduğu enerji miktarı azalır. 0 K'de 0,812 eV bant aralığına sahip olan GaSb için sıcaklığa bağlı bant aralığı,

$$E_g(T) = 0,812 - \frac{4,17 \times 10^{-4} T^2}{140 + T} \quad (3.1)$$

şeklinde verilen deneysel verilere dayalı Varshni eşitliğiyle bulunabilir [26]. Burada  $E_g$  elektron volt cinsinden bant aralığı ve  $T$  ise Kelvin cinsinden sıcaklıktır.

GaSb bant yapısında L vadisi, iletkenlik bandının minimum değeri olan  $\Gamma$  vadisine çok yakındır ve oda sıcaklığında L vadisinde daha çok elektronun bulunma olasılığı vardır [25]. Bu durum, iletim bandındaki elektron miktarını etkileyecek ve böylece elektron mobilitesini değiştirecektir. Yarıiletkenlerde elektron ve deşik mobilitesi katkı miktarının belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Oda sıcaklığında, katkılama  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  seviyesinde elektron mobilite aralığı  $4000\text{-}5000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , katkılama  $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  seviyelerinde deşik mobilete aralığı  $500\text{-}600 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  dir [21,25]. GaSb yarıiletkeninin elektriksel temel bazı özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Oda sıcaklığında katkısız GaSb kristalinin temel elektriksel özellikleri [27].

<i>Kırılma Elektrik Alanı</i>	$\approx 5 \times 10^4 \text{ V cm}^{-1}$
<i>Elektron Mobilitesi</i>	$\leq 3000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$
<i>Deşik Mobilitesi</i>	$\leq 1000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$
<i>Elektron Difüzyon Katsayısı</i>	$\leq 75 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
<i>Deşik Difüzyon Katsayısı</i>	$\leq 25 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
<i>Elektron Termal Hızı</i>	$5,8 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$
<i>Deşik Termal Hızı</i>	$2,1 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$

Oda sıcaklığında, boşluğun dielektrik sabitiyle GaSb’nin yansıma ölçümlerindeki dielektrik sabitlerinin çarpımı  $\epsilon_0 \times \epsilon(0)$  ve  $\epsilon_0 \times \epsilon(\infty)$  sırasıyla 15,69 ve 14,44 şeklindedir [28]. Spektroskopik elipsometri yöntemiyle gerçek ve sanal dielektrik sabitinin ölçülebilmesi kırılma indisi (n), sönümleme katsayısı (k) ve yansıma katsayısı (R) gibi parametrelerin hesaplanmasına olanak sağlar. Çizelge 3.2’de 1,5 ile 6 eV aralığındaki farklı dalga boylarına göre GaSb yapısına ait optik sabitleri sunulmuştur.

**Çizelge 3.2.** GaSb kristali için optik sabitlerin farklı dalga boylarındaki değerleri [27].

<b>h<math>\nu</math> (eV)</b>	<b><math>\epsilon_1</math></b>	<b><math>\epsilon_2</math></b>	<b>n</b>	<b>k</b>	<b>R</b>
1,5	19,135	3,023	4,388	0,344	0,398
2,0	25,545	14,442	5,239	1,378	0,487
2,5	13,367	19,705	4,312	2,285	0,484
3,0	9,479	15,738	3,832	2,109	0,444
3,5	7,852	19,267	3,785	2,545	0,485
4,0	-1,374	25,138	3,450	3,643	0,583
4,5	-8,989	10,763	1,586	3,392	0,651
5,0	-5,693	7,529	1,369	2,751	0,585
5,5	-5,527	6,410	1,212	2,645	0,592
6,0	-4,962	4,520	0,935	2,416	0,610

## 4. DENEYSEL YÖNTEMLER

Tezin bu bölümünde, çalışmada kullanılan GaSb epikatman yapılarının büyütme ve karakterizasyon yöntemlerinden bahsedilecek ve kullanılan deney düzenekleri hakkında bilgi verilecektir.

Bu tez çalışmasında, GaSb alttaş üzerine farklı büyütme ve soğutma değişkenleri kullanılarak GaSb epikatmanlar büyütülmüştür. Büyütme koşullarında yapılan değişikliklerin epikatmanlar üzerindeki etkilerinin anlaşılması için farklı karakterizasyon yöntemleri kullanılmış ve sonuçlar bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Büyütülen GaSb epikatmanların kristal kalitesini belirlemek ve örneklerin yüzeyinde oluşan yoğunlaşma katmanının tanımlanabilmesi için XRD sallantı eğrisi ölçümleri ve geniş açı taramaları yapılmıştır. Örneklerin yüzey analizleri/karakterizasyonları AFM ve SEM teknikleri kullanılarak yapılmış, sonuçlar Raman ölçümleriyle desteklenmeye çalışılmıştır. Bütünleyici olması bakımından bunlara ek olarak sıcaklık bağımlı PL ölçümleri yapılmıştır. Ayrıca, epikatmanlar üzerinde fotolitografik olarak mesa tanımlamaları yapılmış, kimyasal (ıslak) olarak aşındırılmış ve aşınma profilleri dokunmalı yüzey profil belirleme cihazıyla incelenmiştir.

Yapılan büyütme çalışmaları, fotolitografik işlemler, aşınma profil ölçümleri, XRD ve PL ölçümlerinin tamamı Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Çalışmada sonuçları verilen Raman ölçümleri için Anadolu Üniversitesi Fizik Bölümü bünyesinde bulunan Raman cihazından faydalanılmıştır. Örneklerin yüzey karakterizasyonunda, Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi'nde bulunan SEM cihazı ve Bilkent Üniversitesi UNAM'da bulunan AFM cihazı kullanılmıştır.

### 4.1. GaSb Epikatman Yapılarının Büyütülmesi

GaSb epikatman yapıları (100) kristal yönelimindeki GaSb alttaş üzerine MBE tekniği kullanılarak büyütülmüştür. Büyütme süreci kendi içerisinde 3 aşamalı olarak düşünülebilir: (i) alttaşın sisteme yüklenmesi, (ii) alttaşın



büyütmeye hazırlanması ve (iii) alttaş üzerine epikatman yapılarının büyütülmesi. Süreç, alttaşların MBE sisteminin atmosfere açıldığı örnek yükleme haznesine yerleştirilmesiyle başlamıştır. Taban vakum seviyesi  $10^{-8}$  Torr olan bu haznenin vakum seviyesi  $1 \times 10^{-7}$  Torr değerinin altına inmesine izin verilmeden alttaşlar  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtılarak 1 saat beklenmiştir. Böylece alttaşın yüzeyindeki su buharı ve olası organik kirlilikler kusturularak kaba yüzey temizliği yapılmıştır. Raylı araba sistemi yardımıyla taban vakum seviyesi  $10^{-10}$  Torr olan örnek hazırlama haznesine alınan alttaşlar, burada  $\sim 350 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtılarak yüzeylerinde kalan ve ana haznede kirliliğe sebep olabilecek kalıntılardan arındırılmıştır. Bu işlem esnasında, haznenin vakum seviyesi sürekli kontrol edilerek  $2 \times 10^{-8}$  Torr seviyesinin altına inmesi engellenmiştir. Örneklerin her biri bu aşamadan geçtikten sonra büyüme sürecine geçebilmek için örnek hazırlama haznesinin vakum değerinin taban vakum değerine gelmesi için bir süre beklenmiştir. Bu esnada büyümede kullanılacak Ga ve Sb efüzyon hücreleri büyüme yapılacak sıcaklıklara kadar ısıtılarak her bir hücre için akı oranları kontrol edilmiştir. MBE sistemimizde, Ga (% 99,99999 saflıkta) çift filamanlı SUMO hücresinde ve Sb (%99,99999 saflıkta) malzemesi ise vana kontrollü kırıcı bölge (valved cracker) efüzyon hücresinde bulunmaktadır. Üzerine büyüme yapılacak alttaş, iletim kolu yardımıyla ana haznedeki ısıtma ve dönme kabiliyetine sahip örnek tutucuya yerleştirilmiş ve büyüme işleminden önce yüzeyindeki doğal oksit tabakasının kaldırılması için  $\sim 600\text{-}630 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar ısıtılmıştır. Alttaş yüzeyindeki oksidin kalktığı RHEED deseninden tespit edildikten sonra alttaşın sıcaklığı büyüme işleminin yapılacağı sıcaklığa düşürülmüştür.

Bu tez kapsamında kullanılan MBE sisteminde sıcaklık okumak için iki tür sensör kullanılmaktadır: Pirometre ve örnek tutucu üzerinde bulunan termoçiftler. Pirometre, optik yöntemle sıcaklık okuduğu için alttaşın gerçek sıcaklığını vermekle birlikte düşük sıcaklıklarda ( $<400 \text{ }^\circ\text{C}$ ) işlevsel değildir. Bu nedenle  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  ve altındaki sıcaklık değerleri örnek tutucuda bulunan termoçiftler kullanılarak ölçülmektedir. Pirometrenin  $\sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$  gösterdiği noktalarda termoçiftten okunan sıcaklık değeri yaklaşık  $70\text{-}80 \text{ }^\circ\text{C}$  daha fazladır. Bu tezde verilen sıcaklık değerleri,  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  ve üstündeki sıcaklıklarda pirometreden,

altındaki sıcaklıklarda ise termoçiftlerden okunan değerlerdir. Bu durumda, 400 °C altındaki sıcaklıklarda alttaşın gerçek sıcaklığının 70-80 °C daha soğuk olduğu kabul edilebilir. Bu tez kapsamında MBE sisteminde üretilen örnekler ve temel büyütme parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** MBE sisteminde büyütülen örnekler ve kullanılan büyütme parametreleri.

Örnek	Büyütme Sıcaklığı (°C) (Pirometre)	V/III Oranı	Oksit kaldırma-Sb akı miktarı (Torr)	Soğutma-Sb akı miktarı (Torr)	Soğutma-Sb akı kesme sıcaklığı (°C) (Termoçift)
Epi-01	515	9	$3 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	350
Epi-02	515	9	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	350
Epi-03	515	9	$3 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$ $3 \times 10^{-7}$	400 350
Epi-04	515	9	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	400
Epi-05	515	30	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	350
Epi-06	515	30	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	400
Epi-07	480	3	$3 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	400
Epi-08	480	3	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-7}$	400
Epi-09	515	30	$3 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-7}$	400
Epi-10	480	5	$3 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-7}$	400
Epi-11	480	3	$1 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-7}$	400
Epi-12	515	3	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$ $3 \times 10^{-7}$	400 350
Epi-13	480	3	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$ $3 \times 10^{-7}$	400 350
Epi-14	480	30	$3 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-6}$	350
Epi-15	515	5	$3 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-7}$	400

## 4.2. GaSb Epikatman Yapılarının Aşındırılması

Yarıiletken aygıt teknolojisinde aşındırma işlemlerinde kuru veya ıslak aşındırma teknikleri kullanılır. Kuru aşındırma karışık ve her malzemeye uygulanması noktasında zorlukları olan bir yöntemdir. Bu nedenle, hemen hemen her malzemeye uygulanabilir, ucuz ve seçiciliği yüksek bir yöntem olan ıslak aşındırma, yarıiletken teknolojisinde kullanımı daha yaygındır. Basitçe ıslak aşındırma işlemi, aşındırıcı kimyasalın yüzeye tepkimeye girmesi sonucunda yüzey katmanının kaldırılması şeklinde tanımlanabilir. Bu işlem, büyütme öncesi kirli yüzeylerin temizlenmesi, yüzeyde oluşan doğal oksidin kaldırılması ve aygıt üretiminde mesa tanımlaması gibi aşamalarda kullanılır. Islak aşındırma işlemi için aşındırıcının belirlenmesinde aşındırıcının seçiciliği, homojenliği, aşındırma hızı, aşındırma profili ve yüzey hasarı gibi nitelikleri büyük önem taşımaktadır.

Bu tez kapsamında çalışılan GaSb epikatmanların yüzeylerinde büyütme koşullarına bağlı olarak oluşan Sb yoğunlaşma tabakası ve/veya kusurların yapıya etkisinin anlaşılabilmesi için örnek yüzeyleri ıslak aşındırma yöntemleriyle aşındırılmıştır. Çalışılan örnek gruplarının bir kısmında, örnek yüzeylerine fotolitografik olarak aktarılan desenler üzerinden yapılan aşındırmalarla mesa tanımlamaları yapılmış ve aşındırma profilleri incelenmiştir. Yapılan çalışmaların sonuçları Bölüm 5’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

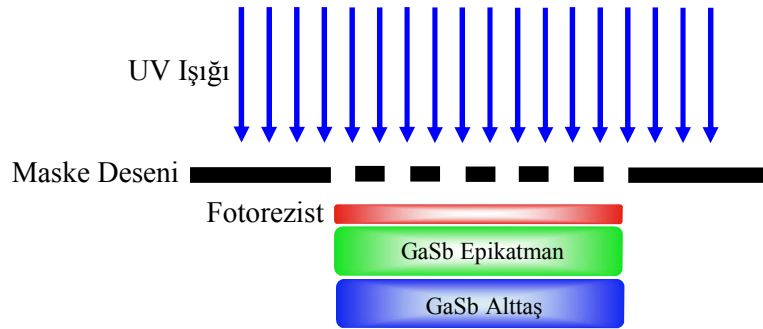
### 4.2.1. Fotolitografi

Islak aşındırma işleminden önce yüzeyde aşınmaya maruz kalacak bölgelerin belirlenmesi için örnekler fotolitografi sürecinden geçirildi. Özetle bu süreç; temizlik, yüzey kaplama, hafif ısıtma, desen aktarma, tab etme ve sert ısıtma basamaklarından oluşur.

- *Temizleme*; örnek yüzeyinde zamanla organik kalıntı, toz ve kristal parçacıkları nedeniyle istenmeyen kirlilikler meydana gelir. Yüzeydeki bu kirliliklerin temizlenmesi için örnekler sırasıyla 5 dk aseton ve 80 °C sıcaklığında 5 dk alkol (izopropanol) içerisinde bekletilmiştir. Daha sonra

direnci yüksek, iyonlarından arındırılmış saf su (deionize) ile durulanan örnekler kuru azot (N<sub>2</sub>) ile kurutulmuştur.

- Yüzey kaplama: bu aşamada morötesi (Ultraviolet-UV) ışığa karşı duyarlı olan “AZ5214E-IR” fotorezist malzemesi kullanıldı. Üzerine fotorezist damlatılan örnek, döner kaplayıcı (Laurell WS-400BZ-6NPP-spin coater) yardımıyla 40 sn boyunca, 3000 rpm hızında döndürülerek fotorezistin örnek yüzeyine homojen bir şekilde dağıtılarak (~1,750 µm kalınlığında) kaplanması sağlanmıştır.
- Hafif ısıtma (soft bake): kaplanan örnekler fotorezistin yüzeye daha iyi tutunması ve kuruması için ısıtıcıda 110 °C’de 1 dk ısıtılmıştır.
- Maske deseni aktarma: Maske hizalayıcısı (MIDAS, MDA-400M-6) yardımıyla, maske üzerindeki aygıt deseni hizalanarak üzeri fotorezist kaplı örnek yüzeyine aktarılmıştır (Şekil 4.1). Bu işlemde örnekler yaklaşık 12 sn UV ışığına maruz bırakılarak aygıt deseni aktarılmıştır.



Şekil 4.1. Desen aktarma işleminin şematik gösterimi.

- Tab etme: örnek üzerinde UV ışığına maruz kalan bölgelerdeki fotorezistin polimerik yapısı bozulur. Uygun çözücü içerisinde bozulan fotorezistin yüzeyden uzaklaştırılması işlemine tab etme denir. Bu süreçte AZ400K:H<sub>2</sub>O tab çözültisi (developer) 1:4 oranında kullanılmış ve örneklerin yüzeyinde aygıt deseninin belirmesi için örnekler çözülti içinde ~20 sn bekletilmiştir. Çözültiden çıkartılan örnekler deiyonize su ile durulanmış ve kuru azot ile kurutulmuştur.

- *Sert ısıtma (hard bake)*; aygıt deseni aktarıldıktan sonra aşınma sürecinde yüzeydeki fotorezistin kimyasala karşı dayanıklı olması gerekir. Fotorezistin kimyasala olan direncini artırmak için örnekler 120 °C sıcaklıkta 5 dk boyunca ısıtılmıştır. Bu işlem için seçilen sıcaklık ve süre, kullanılan fotorezistin cinsine göre farklılık gösterir. Sert ısıtma sonrasında fotorezistin kalınlığında ~100 nm kadar azalma meydana gelmiştir.

Tüm bu süreçlerden sonra fotolitografi işlemi tamamlanmış, örnekler ıslak aşındırmaya hazır hale gelmiştir.

#### 4.2.2. Islak aşındırma

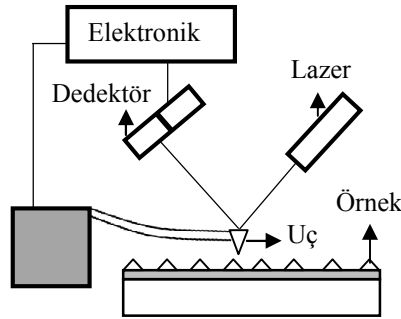
GaSb epikatman yapıları için uygun aşındırma çözeltisinin belirlenmesinde literatürden faydalanıldı. GaSb epikatman yapıları için birden fazla aşındırıcı (hidroklorik asit, nitrik asit, sitrik asit, hidroflorik asit ve fosforik asit) kullanılarak denemeler yapıldı ve her bir aşındırıcının yapıdaki etkileri gözlemlendi. Aşındırma sonucunda yüzey hasarları, aşınma profil bozuklukları, aşındırma hızı gibi etmenler dikkate alındığında sitrik asit ( $C_6H_8O_7$ ) tabanlı çözeltilerin GaSb epikatman yapılar için en uygun aşındırıcı olduğu kararlaştırıldı. GaSb epikatman yapıları  $C_6H_8O_7$ , hidrojen peroksit ( $H_2O_2$ ) ve saf su ( $H_2O$ ) karışımından oluşan çözelti kullanılarak aşındırıldı [29]. Çözeltinin hazırlanmasında katı halde bulunan  $C_6H_8O_7$  aşındırıcısı  $C_6H_8O_7:H_2O$  (1:1) oranında su içinde çözülerek sıvı hale getirildi.  $H_2O$  içinde  $C_6H_8O_7$  çözünmesi tamamlandıktan sonra  $C_6H_8O_7+H_2O:H_2O_2$  (1+1:1) oranında sitrik asit (CA) çözeltisi hazırlandı. İlk aşamada yapılar oda sıcaklığında aşındırıldı. Ancak aşındırıcının hızının çok düşük olması ve yüksek derinlikteki aşındırmalar için dezavantaj yaratmasından dolayı oda sıcaklığı aşındırma için uygun bulunmadı. Çözeltinin sıcaklığını arttırarak örnek yüzeyinde meydana gelen kimyasal tepkimeler hızlandırıldı ve aşınma hızının artması sağlandı. Böylece GaSb için aşınma hızının yarattığı olumsuz durum ortadan kaldırıldı.

### 4.3. Karakterizasyon Yöntemleri

Bu tezde çalışılan örnekler, hem hiçbir işleme tabi tutulmadan büyütme yapılmış halleriyle, hem de yukarıda bahsedilen ıslak aşındırma gibi kimyasal süreçlerden geçirildikten sonra farklı teknikler kullanılarak karakterize edilmişlerdir. Bu süreçte kullanılan ve sonuçları sonraki bölümde verilen karakterizasyon yöntemlerinden aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

#### 4.3.1. Atomik kuvvet mikroskopisi

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), örnek yüzeyini atomik boyuta kadar inceltilmiş sivri bir ucun taraması sonucunda yüzeyin görüntülenmesi prensibine dayanır. Temel olarak bu sistemler, sivri uç, ucun hassas hareketini sağlayan piezo-elektrik bileşenleri ve bilgisayar donanımından oluşmaktadır. AFM sistemlerinde yüzey taramaları temaslı, temassız ve vurmali tarama şeklinde yapılabilir. Bu çalışma kapsamında örneklerin görüntüleri temassız tarama yöntemiyle alınmıştır. Temassız taramada, Şekil 4.2’de şematik olarak gösterilen sivri ucun bağlı olduğu esnek kolun, belirlenen frekansta salınması sağlanır. Yüzeyde bulunan yükselti ve alçaltılar nedeniyle salınım genliği değişir ve genlik değişimi bir yazılım yardımıyla görüntüye dönüştürülür. Böylece yüzey topografyası elde edilmiş olur.



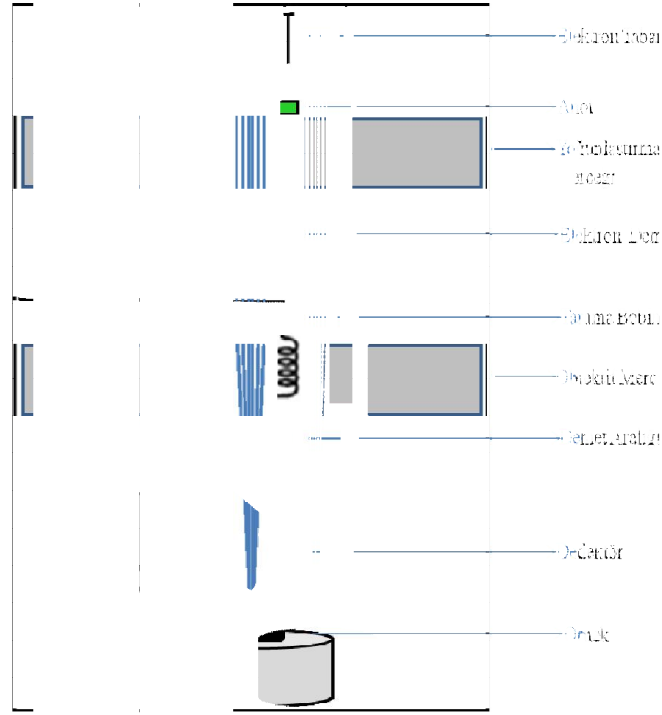
Şekil 4.2. AFM cihazının çalışma mekanizmasının şematik gösterimi [30].

AFM görüntüleme sonucunda yazılım tarafından tanımlanan renk farklılıkları örnek yüzeyine ait yükseklik ölçümünün (elde edilen elektronik sinyal) doğrudan yansımasıdır. Bu sistemlerde ortamın vakuma ihtiyacı yoktur ve hem iletken hem de iletken olmayan yüzeylere doğrudan bakma olanağı vardır.

#### 4.3.2. Taramalı elektron mikroskopisi

Görünür ışık kaynaklarının kullanıldığı optik mikroskopların çözme gücünden daha küçük detayların görülebilmesi için elektronik ve optik ekipmanlarla desteklenmiş görüntü iletimi sağlayan, ışık yollarının merceklerle değiştirildiği cihazlar geliştirilmiştir. Bu cihazlardan biri de taramalı elektron mikroskopudur (SEM). Bir SEM cihazı, örnek haznesi, optik hazne ve görüntüleme sisteminden oluşur. Bu sistem kısaca, vakum altında elektron demetinin örnek yüzeyini taraması prensibine dayanmaktadır. Elektron tabancası tarafından üretilen elektronlar uygulanan voltaj ile hızlandırılarak yoğunlaştırma merceğinden geçirilir ve ince bir elektron demeti haline getirilir (Şekil 4.3). Daha sonra manyetik mercek ile örnek üzerine odaklanarak tarama bobinleri yardımıyla örnek yüzeyi taranır. Örnek ile yüksek enerjili elektron demeti arasında gerçekleşen elastik olmayan çarpışmalar sonucunda düşük enerjili elektronlar oluşur. Örnek yüzeyi hakkında bilgi taşıyan bu elektronlar çeşitli dedektörler tarafından toplanır ve bir bilgisayar yazılımı yardımıyla yüksek çözünürlükte yüzey görüntüsü elde edilir.

Bu çalışma kapsamında, incelenen örneklerin yüzey görüntüleri Zeiss Supra-55VP SEM cihazı kullanılarak alınmıştır. Alınan görüntülerde; hızlandırma gerilimi 15-20 kV, örnek ile elektron demeti arasındaki çalışma aralığı ~4-5 mm ve dedektör olarak hem In-lens hem de SE<sub>2</sub> (secondary electron) dedektörleri kullanılmıştır.

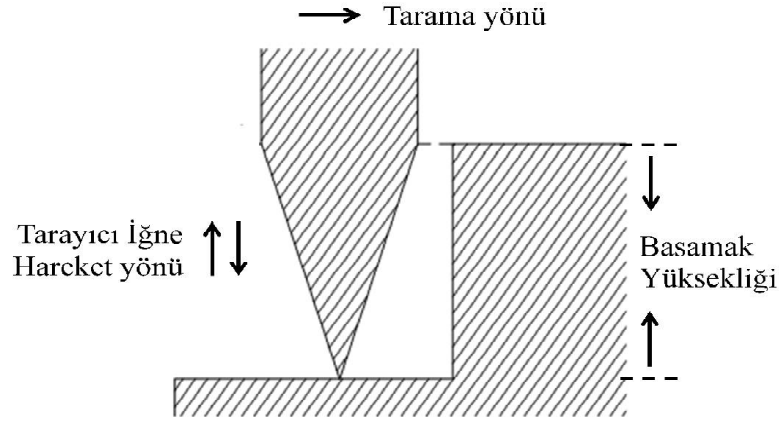


Şekil 4.3. SEM cihazını oluşturan birimlerin şematik gösterimi.

#### 4.3.3. Yüzey profil belirlenmesi

Dokunmalı yüzey profil belirleme cihazı, üzerine çok hafif bir kuvvet uygulanan tarayıcı iğnenin (stylus) örnek yüzeyine temas ederek basamak yüksekliği, pürüzlülük ve eğim gibi yükseklik farkı değerlerinin okunduğu cihazdır. Cihazda hareketli örnek tablası, tarayıcı iğnenin bulunduğu asansörlü sistem ve kameradan oluşan ölçüm kabini ve ölçüm komutlarının verilip verilerin toplandığı bilgisayarlı kontrol sistemi vardır. Basamak yüksekliğinin ölçümüne ait şematik gösterim Şekil 4.4’de verilmiştir.





Şekil 4.4. Basamak yüksekliği ölçümünün şematik gösterimi.

Çalışmada kullanılan aşınma profil ölçümleri KLA-Tencor P-6 cihazıyla yapılmıştır. Ölçümler, uç çapı 2  $\mu\text{m}$  olan tarama iğnesi üzerine 2 mg kuvvet uygulanarak alınmıştır. Ölçümlerde, tarama hızı ve veri alma frekansı olarak sırasıyla 20  $\mu\text{m/s}$  ve 20 Hz değerleri kullanılmıştır.

#### 4.3.4. X-ışını kırınım spektroskopisi

Dalga boyları 0,01-10 nm arasındaki X-ışınları, yüksek enerjili (hızlı) elektronların hedef malzemeye çarparak yavaşlatılması sonucu oluşan elektromanyetik dalgadır. Bu süreçte, elektron demeti hedef atom çekirdeğinin elektrik alanından etkilenmesi sonucunda ivmeli hareket yapmaya zorlanır ve dışarıya sürekli enerjiye sahip foton salınır. Bu, X-ışını kaynaklarının geniş dalga boyu aralığına yayılan sürekli spektrumunu oluşturur. XRD cihazlarında kullanılan temel dalga boyu ise, kullanılan kaynağın hedef malzemesinin karakteristik spektrumundaki dalga boyudur. Elektron demeti hedef atomun yörüngesindeki elektronlar ile etkileşir ve aldıkları enerjiyle bir üst yörüngeye çıkarlar. Kararsız durumdaki bu enerji seviyesinden tekrar kararlı enerji seviyesine dönerken foton salınmasıyla gerçekleşir.

Üretilen X-ışınları bir kristal yapıya gönderildiğinde, kristal düzlemleri ile etkileşerek kırınımına uğrar. Kırınım, saçılma merkezlerinin arasındaki mesafe

mertebesinde dalga boyuna sahip ışıma ve saçılma merkezlerinin tekrar edilebilir düzende olması temeline dayanır. Bunun sonucunda ise, yol farkından kaynaklı faz farkı ve faz farkından kaynaklı genlikte değişim meydana gelir [31]. X-ışını kırınım tekniği, kristalin yapısı, düzlemler arası mesafe, atom büyüklüğü gibi kristal özelliklerini belirlemede kullanılan ve kristal yapıya zarar vermeyen bir yöntemdir.

Bu teknikte, örnek üzerine gönderilen X-ışınının kristal düzlemlerine gelme açısı ve yansıma açısı  $\theta$ 'dır (Şekil 4.5). Gelen ışın, yansıyan ışın ve normal aynı düzlemedir. Şematik olarak kristal düzlemlerinde gerçekleşen kırınımın gösterildiği Şekil 4.5'te ilk atom düzlemine gelen 1 ışını  $K$  atomundan  $1'$  şeklinde ve  $1a$  ışını ise  $P$  atomundan  $1a'$  şeklinde yansımıştır. X-ışınlarının aldıkları yolların farkı alındığında, aynı düzlemde bulunan atomlara gelen ve yansıyan ışınlar arası yol farkı olmadığı görülür:

$$QK - PR = PK \cos \theta - PK \cos \theta = 0 \quad (4.1)$$

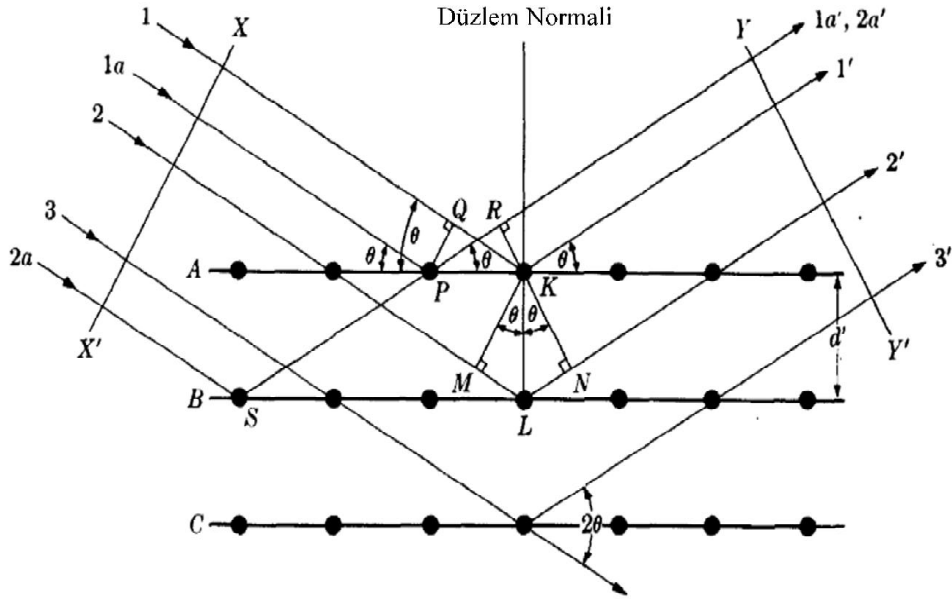
Kristal yapıya gelen X ışınlarının paralel düzlemlerden yansımaları durumunda ise, yani 1 ışınının  $K$  atomundan, 2 ışınının  $L$  atomundan yansımaları durumunda, yol farkı,

$$ML + LN = d' \sin \theta + d' \sin \theta \quad (4.2)$$

olarak bulunur. En yüksek saçılma şiddeti, bu yol farkının dalga boyu  $\lambda$ 'nın tam katlarına eşit olduğu durumda gözlenir:

$$n\lambda = 2d' \sin \theta \quad (4.3)$$

Bragg kanunu olarak bilinen bu eşitlikte  $n$  bir tam sayıdır.

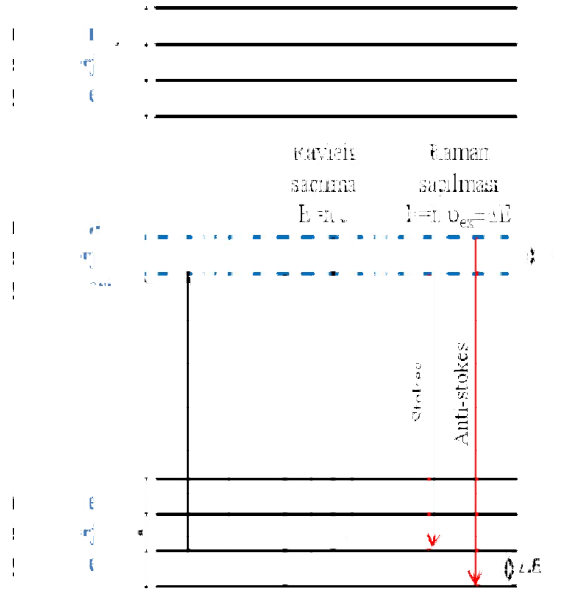


Şekil 4.5. X-ışınlarının kristal düzlemlerindeki kırınımının şematik gösterimi [31].

Bu çalışmada verilen XRD ölçümleri, Cu-K $\alpha$  X-ışını tüpü ve Pixcel-1D dedektörüne sahip Panalytical X-Pert PRO cihazıyla yapılmıştır. Ölçümlerde, X-ışını tüpünden çıkan demetin paralel ve monokromatik olarak örnek üzerine gönderilebilmesi için X-ışını aynası (Cu W/Si) ile bütünleşik hibrit monokrometre kullanılmıştır. Örnek üzerine gelen X-ışınının genişliği ve yüksekliği ise  $\frac{1}{2}^\circ$  yarık ve 4 mm maske kullanılarak sınırlanmıştır. Örnekten kırınımına uğrayan X-ışınları, dedektör alma açıklığı (receiving slit)  $1,04^\circ$  olacak şekilde kaydedilmiştir.

#### 4.3.5. Raman spektroskopisi

Raman spektroskopisi, örnek üzerine gelen fotonla saçılan foton arasındaki enerji farkının gözlenmesi temeline dayanır. Bu yöntemle katı, sıvı ve gaz formundaki örnekler uygun uyarma gücü seçildiği takdirde zarar görmeden incelenebilir.



Şekil 4.6. Rayleigh ve Raman saçılmasında enerji diyagramı.

Bir lazer ışık kaynağından çıkan monokromatik ışık örnek üzerine gönderildiğinde, örnekle etkileşen fotonlarda elastik ve elastik olmayan çarpışmalar sonucunda saçılmalar meydana gelir; Raman spektrumu fotonların elastik olmayan saçılmalarından oluşur. Bu teknikte, kullanılan ışık kaynağının enerjisi yapı içindeki elektronları kararlı halden uyarılmış hale getirecek enerjiye sahip değilse, elektronlar kararlı ve uyarılmış enerji seviyeleri arasında var olduğu düşünülen sanal enerji seviyesine uyarılır (Şekil 4.6). Örnek üzerinden saçılan ışığın frekansı, kullanılan ışık kaynağının frekansına eşit ise (elastik saçılma) buna Rayleigh saçılması denir. Saçılan ışığın frekansının kullanılan ışığın frekansından daha küçük ve daha büyük olması durumu ise Raman saçılması olarak adlandırılır (Şekil 4.6). Stokes Raman saçılması olarak bilinen saçılan fotonların enerjilerinin daha küçük olduğu durum, yapıdaki atom veya moleküllerin gelen fotonlardan enerji soğurması durumuna karşılık gelir. Anti-Stokes Raman saçılması olarak bilinen saçılan fotonların enerjilerinin daha büyük olduğu durum ise, yapıdaki atom veya moleküllerin enerjilerinin bir kısmını gelen fotonlara aktardığı durumdur. Dolayısıyla, bu saçılmaların enerji kaymaları moleküler yapı hakkında bilgi verir; moleküllerin titreşimleri fotonların enerjilerini belirler. Bu enerji etkileşimleri, sadece atom veya moleküllerle değil, yapı içinde olabilecek elektronik geçişler sonucunda da gerçekleşebilir.

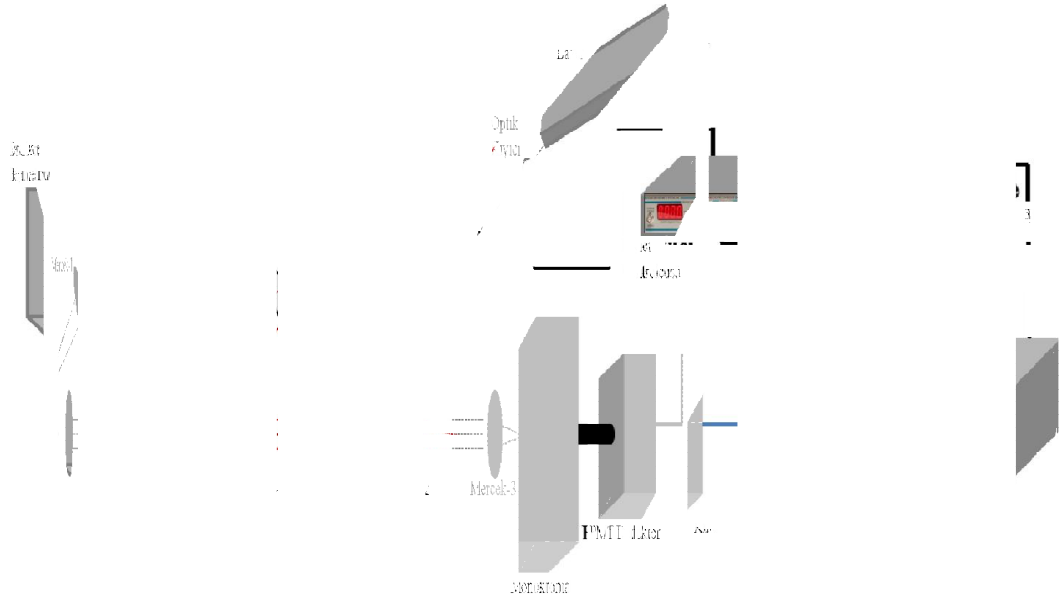
Sonuçları sonraki bölümde verilen Raman ölçümleri Bruker FT-Raman III cihazında yapılmıştır. Ölçümlerde 532 nm dalga boyuna sahip 2 mW gücünde lazer ışık kaynağı,  $25 \times 1000 \mu\text{m}^2$  optik açıklık ve 100X büyütme objektif merceği kullanılmıştır. Örnek taramaları 10 tekrarlı olup 20 sn boyunca veri biriktirilerek ölçümler alınmıştır.

#### 4.3.6. Fotoluminesans spektroskopisi

Fotoluminesans (PL) spektroskopisi, yarıiletken malzemelerin karakterizasyonunda sıklıkla kullanılan önemli tekniklerden biridir. PL spektroskopisi yapıya zarar vermeyen, optiksel analiz olduğu için elektriksel bağlantılar gerektirmeyen, hassas ve kolay uygulanabilir bir yöntemdir. PL, uyarılmış taşıyıcıların yeniden birleşmesiyle açığa çıkan fotonların algılanması temeline dayanır. Yüksek enerjili bir lazer veya ışık kaynağından çıkan fotonlar malzemeyi uyararak foto-uyarımı gerçekleştirir. Yarıiletken malzeme tarafından soğurulan enerji sayesinde elektronlar geride deşikler bırakarak izinli üst enerji durumlarına uyarılırlar. Ancak elektronlar kararlı oldukları denge durumuna geri dönme eğiliminde olduğundan soğurduğu enerjiyi ışımalı veya ışımasız geçişlerle kaybederek denge durumuna dönerler. Bu foto-uyarım sonucunda oluşan kendiliğinden ışımaya PL veya foto-ışınım adı verilir. PL, yapıya zarar vermeden yapı hakkında bilgi edinilmesine olanak sağlar [32]. Malzeme kalitesi, bant aralığı, safsızlık ve kusurlar gibi yapıya ait karakteristik davranışların belirlenmesinde yardımcı olur.

Bu tez kapsamında Şekil 4.7’de şematik olarak gösterilen PL deney düzeneği kullanılmıştır. PL ölçümlerinde bantlar arası geçişlerin belirginleşmesi ve ısı enerji nedeniyle birbirleri içine girmiş sinyallerin ayrışması için ölçümler düşük sıcaklıkta yapılmış, ek olarak sinyallerin sıcaklığa bağlı olarak değişimleri takip edilmiştir. Düşük sıcaklık ölçümlerinde örnekler kapalı devre helyum soğutucusuna yerleştirilerek sistem vakuma alınmıştır. Vakum değeri  $10^{-5}$  Torr seviyelerine düştüğünde soğutmaya başlanmış ve sıcaklık kontrolcüsü yardımıyla sistem içindeki örnek sıcaklıkları istenen seviyelerde sabit tutularak ölçümler

yapılmıştır. Ölçümler, 8 K ile 120 K aralığında belirlenen çalışma sıcaklıklarında yapılmıştır. Deney düzeneğinde, 35 mW gücünde 632 nm dalga boyuna sahip helyum-neon lazer uyarıcı ışık kaynağı olarak kullanılmıştır. Lazer ışığını kapalı devre helyum soğutucusunda bulunan örnek üzerine odaklayabilmek için Şekil 4.7’de gösterildiği gibi bir mercekle kullanılmıştır. Örnekten yayılan ışık bir mercek ile toplanarak paralel ışın demeti haline getirildikten sonra bir başka mercek ile monokrometrenin girişine odaklanmıştır.



Şekil 4.7. PL ölçümlerinde kullanılan deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Monokrometreye (Oriel MS257) gelen ışın burada optik ızgaralar (grating) yardımıyla dalga boylarına ayrıldıktan sonra foton çoğaltıcı tüp (photomultiplier tube, PMT: Hamamatsu R5509-72) detektöre yönlendirilerek elektrik sinyaline dönüştürülmüştür. Dedektörün çıkış sinyali, optik kısıyıcı ile aynı frekansta ölçüm yapılmasını sağlayan kilitlemeli yükselticiye (lock-in amplifier: SR850) bağlanmış ve bir yazılım sayesinde sinyalin dalga boyuna bağlı olarak değişimi kaydedilerek PL spektrumu elde edilmiştir.

PL ölçümleri için ayrıca Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR) sisteminden de faydalanılmıştır. Bu sistemde 100 mW maksimum güç çıkışı olan 532 nm lazer, CaF<sub>2</sub> UV-VIS-NIR

demet bölücü ve soğutmasız oda sıcaklığında çalışan yüksek kazançlı InGaAs dedektör kullanılmıştır.

## 5. DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde, GaSb epikatman yapıların aktif büyütmesi tamamlandıktan sonraki soğutma sürecinde kullanılan Sb akı değerinin epikatman yüzeyi üzerindeki etkileri ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Yüzeyde gözlenen Sb yoğunlaşma katmanının oluşum dinamiklerinin anlaşılabilmesi için örneklere etki eden alttaş sıcaklığı ve farklı aşamalarda kullanılan Sb akı değerlerinin sistematik olarak değiştirildiği örnek grupları oluşturulmuş ve yüzey etkileri farklı karakterizasyon yöntemleriyle ayrıntılı olarak incelenmiştir. Ek olarak, büyütme koşullarına bağlı olarak yüzeyde oluşan Sb yoğunlaşma tabakasının ve yapıdaki kusurların, büyütme sonrasındaki müdahalelerle kaldırılması aşamalarının yapıda yarattığı etkiler incelenmiş ve sonuçlar farklı başlıklar altında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu bölümde sunulan her alt başlık, kendi içinde bir bütün olmakla beraber, birlikte değerlendirildiğinde genel bir resim sunacak şekilde düzenlenmiştir.

### 5.1. Soğutma Sürecindeki Sb Akı Değerinin Epikatman Yüzeyine Etkisi

MBE sisteminde, III-V grubu yarıiletken bileşikleri büyütülürken akı oranlarına dikkat edilir. Büyütmede, daha hareketli atomlara/moleküllere sahip V grubu akısı, III grubu akısına göre yüksek tutulur. Bu tür büyütmelelerde büyütme katsayısını belirleyen III grubudur ve V grubu, epikatmanların doğru kristal yapıda büyütülmesi amacıyla belli bir oranda tutulur. Büyütme esnasında kullanılan bu akılar oranına V/III oranı denir. Bunun yanında, büyütme işlemi tamamlanıp örneğin çıkarılmaya hazır hale gelebilmesi için yüksek sıcaklıktaki (büyütme sıcaklığı) örneğin soğutulması gerekir. Yüksek hareketliliğe sahip V grubu atomların/moleküllerin yüzeyden uçup yapının zarar görmemesi için soğutma süreci belli bir sıcaklığa kadar V grubu akısı altında yapılır. Seçilen bu akı miktarı ve akı kesme sıcaklık değerleri, epikatmanların yüzey morfolojisini belli etmektedir. GaSb epikatmanlar üzerinde bu etkilerin incelenebilmesi için 4 farklı soğutma sürecinin uygulandığı bir grup örnek hazırlanmıştır. Her bir örneğin soğutma sürecinde kullanılan Sb akı değeri ve/veya Sb akısının kesildiği



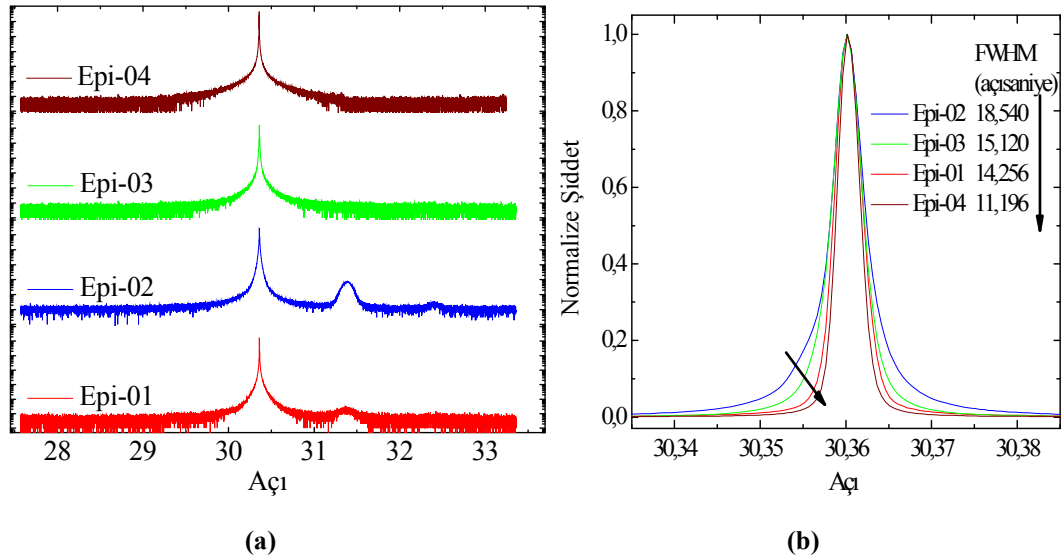
alttaş sıcaklık değerleri birbirinden farklı tutulmuş ve bu değerler Çizelge 5.1’de gösterilmiştir. Epi-03 örneğinin soğutma süreci aşamalı olarak düşünölmüş ve iki farklı akı değeri kullanılmıştır. Bu örnek grubunda aynı değerlerde kullanılan V/III büyüme oranı, büyüme sıcaklığı ve oksit kaldırırken uygulanan Sb akı miktarları sırasıyla 9, 515 °C ve  $3 \times 10^{-6}$  Torr şeklindedir.

**Çizelge 5.1.** 515 °C’de büyüöülen örneklerin soğutma parametreleri.

Örnek Adı	Soğutma-Sb Akı Miktarı (Torr)	Soğutma-Sb Akı Kesme Sıcaklığı (°C)
Epi-01	$1 \times 10^{-6}$	350
Epi-02	$3 \times 10^{-6}$	350
Epi-03	$1 \times 10^{-6}$	400
	$3 \times 10^{-7}$	350
Epi-04	$3 \times 10^{-6}$	400

Büyöüöülen epikatmanların kristal kalitesi hakkında bilgi almak amacıyla örneklerin GaSb (0 0 4) simetri eksenini etrafında alınan XRD sallantı eğrisi grafikleri Şekil 5.1’de verilmiştir. Grafiklerde, 2 µm kalınlığında büyüöülen GaSb tek kristal yapı kendisini göstermektedir: büyüöülen GaSb kristal yapısının bozuk olması durumunda daha yayvan bir tepe göröüntüsü beklenen XRD ölçüm sonucunda,  $\theta = 30,36$  derecede göröünen GaSb sinyalinin yarı maksimumundaki genişlik (FWHM) değerleri 0,00311 derece (11,196 açısaniye, Epi-04) ile 0,00515 derece (18,540 açısaniye, Epi-02) arasında bulunmuştur. Bahsi geöen örnek grubuna ait FWHM değerleri Şekil 5.1b’de, GaSb sinyalindeki genişlemenin daha iyi göröülebilmesi için şiddetleri normalize edilerek yeniden çizilen grafik üzerinde belirtilmiştir. Grafiklerde, örneklerin XRD cihazına yerleştirmesinden kaynaklanan geröek GaSb (0 0 4) simetrisine göre olan kaymalar (offset) giderilerek, GaSb sinyallerinin açısali değerleri üst öste çakıştırılmıştır. Epi-04 örneğinden elde edilen FWHM değeri, üzerine büyüöüldüğü aynı GaSb alttaş grubundan elde edilen ~12,096 açısaniye (arcsec) değerinden daha iyidir. FWHM değeri en büyük olan Epi-02 örneğinde GaSb

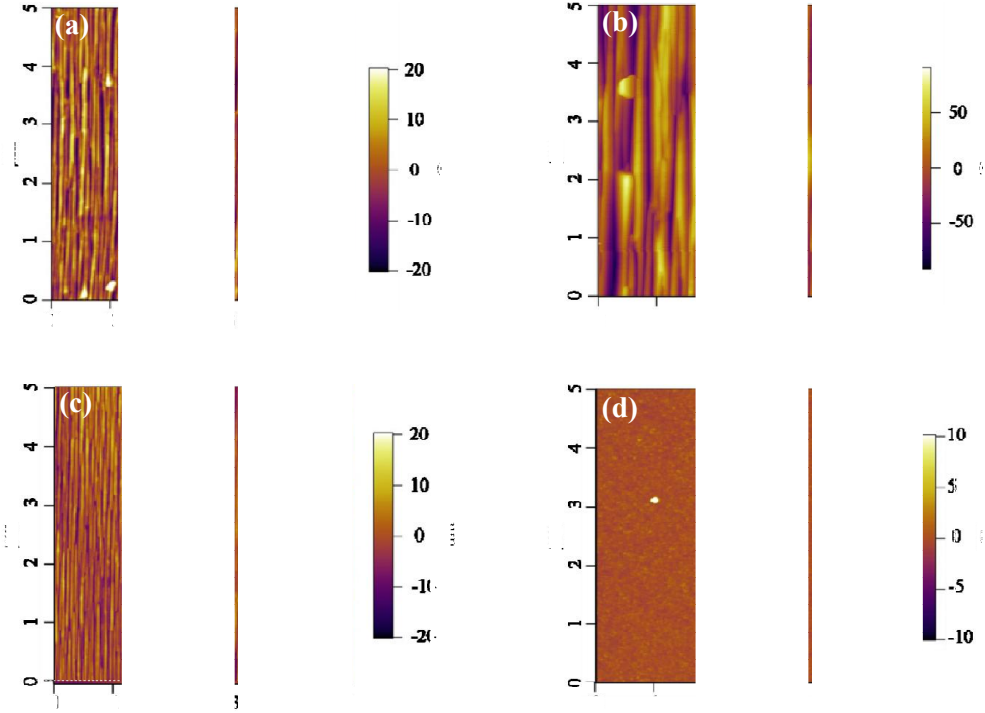
yapısına ait sinyal dışında  $\sim 31,38$  ve  $\sim 32,39$  derecede ek sinyallerin olduğu görülmektedir. Benzer davranış, FWHM değeri Epi-03 örneğinden daha iyi olan Epi-01 örneğinde de görünürken, Epi-03 örneğinde bu sinyaller yoktur. Yapılan araştırmalar sonucunda adı geçen açı değerlerinin hegzagonal Sb kristal yapısına ait sinyallerle uyumlu olduğu görülmüştür. Görünen bu sinyallerin FWHM değerleriyle doğrudan ilişkili olmaması, örneklerin yüzeylerinde Sb'ye ait bir katman olabileceğini göstermektedir. XRD sallantı eğrisi ölçümleri yüzey morfolojisine çok hassas bir teknik olmadığından, örnek yüzeylerinin analizleri için başka yöntemler kullanılmıştır.



Şekil 5.1. GaSb (0 0 4) simetri ekseninde alınan XRD (a) geniş açı sallantı eğrisi ve (b) normalize edilmiş GaSb sinyallerinin karşılaştırmalı grafikleri.

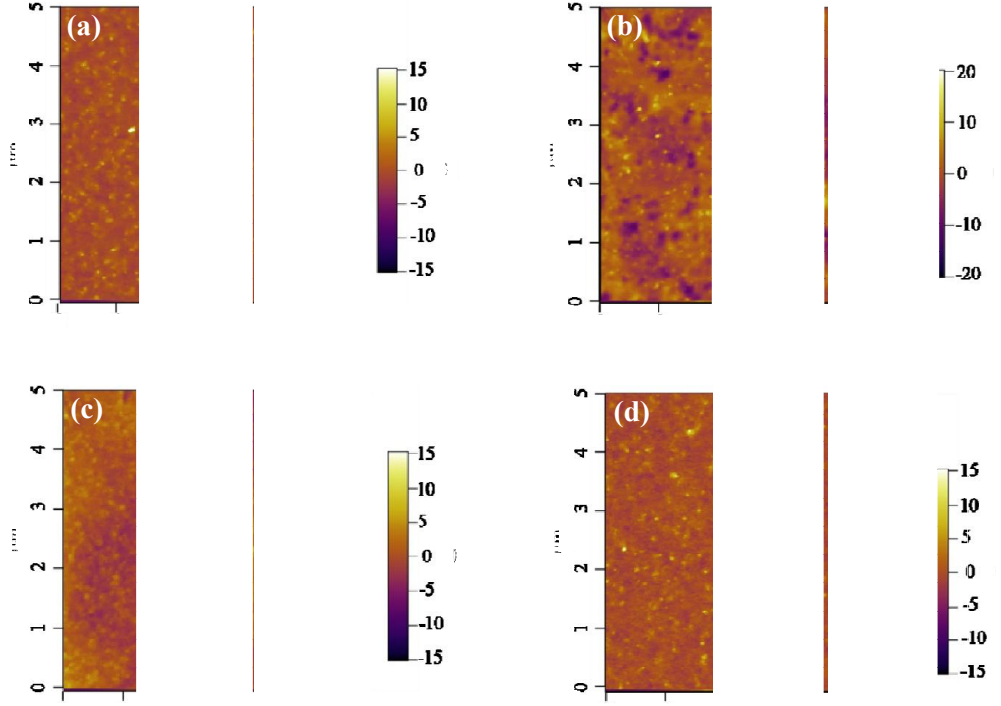
Şekil 5.1’de XRD sallantı eğrisi grafikleri verilen örnek grubunun yüzey kalitesi hakkında bilgi sahibi olmak için örneklerin yüzey morfolojileri AFM tekniğiyle incelenmiş ve örnek görüntüleri Şekil 5.2’de verilmiştir. Epi-01, Epi-02 ve Epi-03 örneklerinin yüzeylerinde *teras* ya da *oluk* olarak nitelendirilen yapılarla karşılaşmıştır. Yapılan yüzey analizlerinde, örneklerin yüzey pürüzlülüklerinin karekök ortalama değerleri (root mean square - RMS) sırasıyla 6,276, 33,844, 4,352 ve 0,550 nm olarak bulunmuştur. Bu bulgular örneklerin epitaksiyel büyütme sonrasındaki soğutma süreçlerinde kullanılan Sb akı miktarı ve Sb akı kesme sıcaklık değerleri ile ilişkilendirildiğinde, yüksek Sb akısının

düşük sıcaklıkta kesilmesinin yüzeyde daha fazla Sb yoğuşmasına sebep verdiği görülmektedir. Aynı akı değerine sahip Epi-02 ve Epi-04 örnekleri karşılaştırıldığında 350 °C alttaş sıcaklığında kesilen Sb akısının yüzeyde yoğuşmaya neden olduğu görülmüştür. Epi-02 örneğiyle kıyaslandığında, aynı Sb akı kesme sıcaklığına kadar daha düşük Sb akısı altında soğutulan Epi-01 örneğinde ise yüzeyde yoğuşan Sb miktarının, Sb akı miktarıyla orantılı olarak azaldığı görülmektedir. Epi-03 örneğinde kullanılan aşamalı soğutma süreci ve akı değerleri dikkate alındığında, Sb yoğuşmasının 400-350 °C aralığında gerçekleştiği anlaşılmaktadır. AFM görüntüleri ve örneklere ait yüzey pürüzlülüğü RMS değerleri düşünüldüğünde, Epi-01, Epi-02 ve Epi-03 örneklerinde Sb yoğuşması gözlenmesine rağmen, Şekil 5.1’de verilen XRD sallantı eğrisi ölçümlerinde sadece Epi-01 ve Epi-02 örneklerinde hegzagonal Sb’ye ait sinyaller görülmektedir. Bu durum, Epi-03 örneğinin yüzeyinde yoğuşan Sb miktarının diğer örneklere göre daha az olduğunun bir göstergesi olarak kabul edilebilir. Bunlara ek olarak, Epi-03 örneğinin XRD ölçümlerinden elde edilen FWHM değerinin Epi-01 örneğine kıyasla daha büyük çıkmasının bu örnek içindeki kristal kusurlarının Epi-01 örneğine göre daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



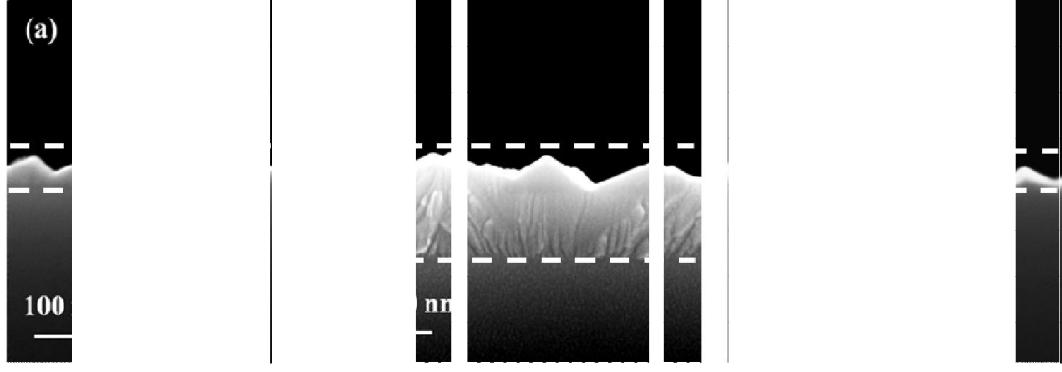
Şekil 5.2. Hiçbir işleme maruz kalmamış örnek yüzeylerinin AFM görüntüleri; (a) Epi-01, (b) Epi-02, (c) Epi-03, (d) Epi-04.

Büyütme koşullarında yapılan değişikliklerin yüzeyde oluşan Sb yoğunlaşma tabakasının kalınlığına etkilerinin anlaşılması ve bu tabakanın kaldırılması durumunda altındaki GaSb epikatman yüzeye etkileri hakkında bilgi sahibi olabilmek için örnekler kimyasal aşındırmaya maruz bırakılmıştır. CA çözeltisinde 15 dk bekletilerek yaklaşık 500 nm aşındırılan örneklerin AFM yüzey görüntüleri Şekil 5.3’de verilmiştir. Aşındırma sonrasında yüzeydeki teraslı yapının kaybolduğu ve yüzey pürüzlülüklerinin azaldığı gözlenmiştir. Aşındırma işlemi sonrasında Epi-01, Epi-02, Epi-03 ve Epi-04 örneklerinin yüzey pürüzlülüklerinin RMS değerleri sırasıyla 1,150 nm, 3,539 nm, 1,917 nm ve 0,830 nm olarak hesaplanmıştır. Aşındırma sonrasında örneklerin yüzey pürüzlülükleri birbirlerine yaklaşmış ve aşındırılmamış örneklere kıyasla RMS değerleri oldukça azalmıştır.



**Şekil 5.3.** Aşınmaya maruz kalmış örnek yüzeylerinin AFM görüntüleri; (a) Epi-01, (b) Epi-02, (c) Epi-03, (d) Epi-04.

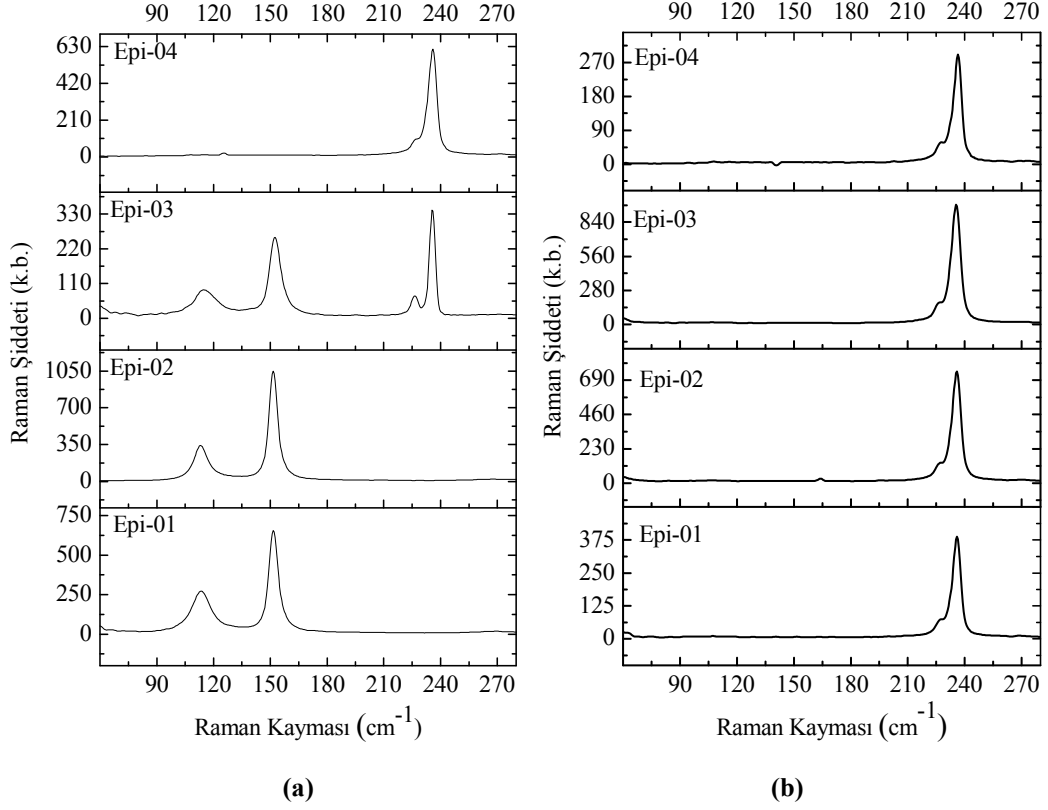
Örneklerin üzerinde yoğunlaşmış Sb teraslı tabakalarının kalınlığını net olarak öğrenmek için örneklerin yan kesitlerinden SEM görüntüleri alınmıştır. Yan kesit SEM görüntüleri Şekil 5.4’de verilen Epi-01, Epi-02 ve Epi-03 örneklerinin yüzeylerindeki teraslı Sb katman kalınlıkları sırasıyla ~55, ~300 ve ~20 nm olarak ölçülmüştür. Yukarıda bahsedildiği gibi, büyütme sonrasındaki soğutma süreçlerinde kullanılan yüksek Sb akısının düşük sıcaklıkta kesilmesinin yüzeyde daha fazla Sb yoğunlaşmasına sebep verdiği görülmektedir. Sb akısının azaltılması veya daha yüksek sıcaklıkta kesilmesi, yüzeyde oluşan Sb yoğunlaşma katmanının kalınlığını azaltmaktadır. Ölçülen bu kalınlıklar aynı zamanda Şekil 5.1’de verilen XRD ölçüm sonuçlarını da desteklemektedir: Epi-02 ve Epi-01 örneklerinin yüzeyinde yoğunlaşmış Sb katmanının kalın olmasından dolayı hegzagonal Sb fazlarına ait sinyal şiddetleri, katman kalınlığıyla doğru orantılı olarak azalmıştır. Epi-03 örneğinde ise Sb katmanı diğer örneklerle kıyasla çok daha ince olduğundan, XRD ölçümlerinde algılanabilecek mertebede sinyal alınamamıştır.



Şekil 5.4. (a) Epi-01, (b) Epi-02, (c) Epi-03 örneklerinin yan kesit SEM görüntüleri.

Örneklerin yüzeylerinde görünen teraslı yapının Sb yoğuşması olduğunu teyit etmek amacıyla örnekler üzerinde Raman ölçümleri yapılmıştır. Yüzey görüntüleri Şekil 5.2’de verilen işlem yapılmamış ham örneklerden ve Şekil 5.3’de verilen yüzeyleri ~500 nm aşındırılmış örneklerden alından Raman ölçüm sonuçları Şekil 5.5’de verilmiştir. Grafiklerde 227 ve 236  $\text{cm}^{-1}$  dalgalı boylarındaki Raman sinyalleri, GaSb enine optik (transverse optical, TO) ve boyuna optik (longitudinal optical, LO) fonon modlarına karşılık gelmektedir [34]. Yüzeyinde herhangi bir Sb yoğuşma tabakası gözlenmeyen Epi-04 örneğinin Raman spektrumunda sadece bahsi geçen GaSb LO ve TO fonon sinyalleri görülmektedir. Kontrol amaçlı kullanılan GaSb alttaş referans örneğinden alınan Raman ölçüm sonuçları bu örnekten (Epi-04) alınan sinyalle aynı olduğundan grafiklerde gösterilmemiştir. Epi-01 ve Epi-02 örneklerinin Raman spektrumlarında, GaSb’ye ait sinyaller kaybolmuş, ancak 114 ve 151  $\text{cm}^{-1}$  dalgalı boylarında Sb fonon modlarından kaynaklanan yeni Raman sinyalleri görülmüştür [33]. Bu örneklerde, GaSb epikatman üzerinde yoğuşan Sb katmanının kalın olması epikatmandan sinyal alınmasını engellediği için sadece Sb’ye ait sinyaller görülmüştür. Yüzeyinde Sb yoğuşması en az olan Epi-03 örneğinde ise hem GaSb’ye ait fonon modları hem de Sb’ye ait fonon modları gözlenmiş, ince Sb katmanı her iki katmandan da sinyallerin toplanabilmesine olanak sağlamıştır. Sb katmanından alınan sinyallerin şiddetleri yüzeyde yoğuşan Sb kalınlığı ile orantılıdır: Yoğuşan Sb miktarı arttıkça Sb sinyal şiddeti de artmıştır. Yüzeyleri aşındırılmış örneklerin Raman spektrumlarına bakıldığında

ise yüzeyde yoğunlaşan Sb kaynaklı sinyallerin tamamen kaybolduğu, bütün örneklerin benzer davranışlar gösterdiği görülmektedir (Şekil 5.5b).



Şekil 5.5. Epi-01, Epi-02, Epi-03 ve Epi-04 örneklerinin (a) aşındırılmamış ve (b) aşındırılmış yüzeylerinden alınan Raman spektrumları.

Yüzeyleri aşındırılmış örneklerde yapılan XRD ölçümlerinde de Raman ölçümlerinde olduğu gibi Sb ilişkili sinyallerin kaybolduğu ve bütün örneklerin benzer davranışlar gösterdiği gözlenmiştir. Bu durumdan sonraki bölümde ayrıntılı olarak bahsedilmiştir.

## 5.2. Teraslı Sb Yapısının Oluşumu

Bir önceki bölümde, örnek yüzeylerinde karşılaşılan teraslı Sb yoğunlaşmasının soğutma parametreleriyle ilişkili olduğu gösterilmiştir. Bu bölümde ise yoğunlaşmadan kaynaklanan teraslı yapıların oluşum ve gelişim dinamiği daha ayrıntılı olarak incelenecektir. Bu amaçla, önceden büyütülen örnekler ek olarak

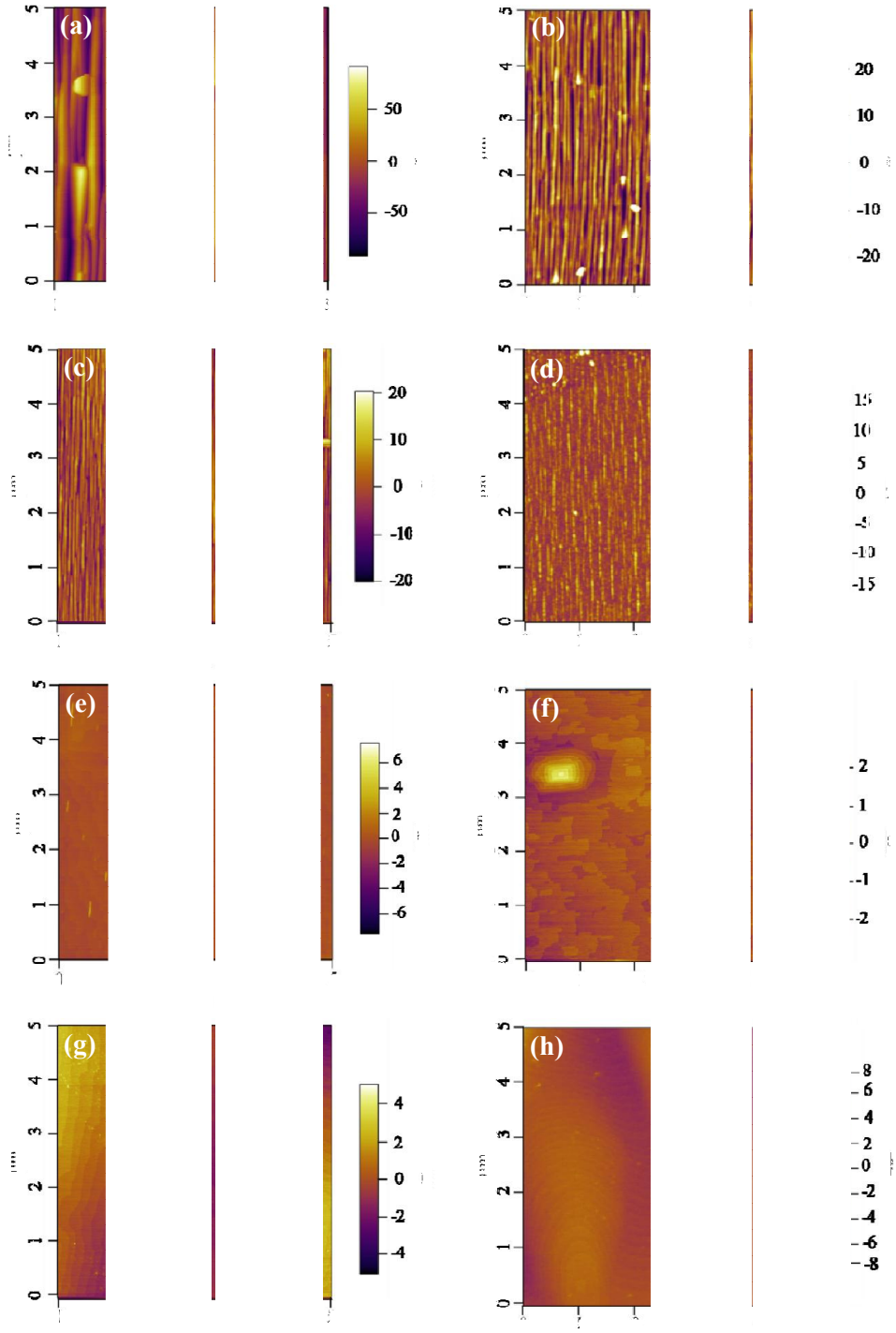
yeni bir örnek grubu tasarlanıp büyütülmüştür. Yoğuşmanın kaynağı olan etkin parametreyi belirleyebilmek adına, GaSb epi-katmanın büyütüldüğü V/III akı oranı, örnek soğutması sırasındaki Sb akı miktarı ve Sb akısının kesildiği andaki alttaş sıcaklıkları üç ana değişken olarak ele alınmıştır. Bu bölümde ele alınan örneklerin sistematik olarak değiştirilen büyütme parametreleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

**Çizelge 5.2.** Örneklerin büyütme parametreleri.

Örnek Adı	V/III oranı	Soğutma-Sb Akı Miktarı (Torr)	Soğutma-Sb Akı Kesme Sıcaklığı (°C)
<b>Epi-01</b>	9	$1 \times 10^{-6}$	350
<b>Epi-03</b>	9	$1 \times 10^{-6}$ $3 \times 10^{-7}$	400 350
<b>Epi-05</b>	30	$3 \times 10^{-6}$	350
<b>Epi-06</b>	30	$3 \times 10^{-6}$	400
<b>Epi-07</b>	3	$1 \times 10^{-6}$	400
<b>Epi-08</b>	3	$3 \times 10^{-7}$	400
<b>Epi-09</b>	30	$5 \times 10^{-7}$	400
<b>Epi-10</b>	3	$5 \times 10^{-7}$	400

Büyütülen örneklerin yüzeyleri hiçbir işleme maruz bırakılmadan alınan AFM yüzey görüntüleri Şekil 5.6’da verilmiştir. Önceki bölümde bahsedilen örnek grubundan elde edilen bilgiler doğrultusunda beklenen teraslı Sb yoğuşması, büyütme ve soğutma değerlerine göre yeni grup örneklerin bir kısmının yüzeylerinde gözlenmiş, bir kısmında ise gözlenmemiştir.





Şekil 5.6. Farklı büyütme koşullarında büyütülen örneklerin AFM yüzey görüntüleri; (a) Epi-05, (b) Epi-01, (c) Epi-03, (d) Epi-06, (e) Epi-07, (f) Epi-08, (g) Epi-09, (h) Epi-10.

İlk aşamada, farklı V/III oranı kullanılarak büyütülen ve Sb akısının 350 °C sıcaklıkta kesildiği örnekler incelenmiştir. V/III oranı 30'dan 9'a ve soğutma sürecindeki Sb akı miktarı  $3 \times 10^{-6}$  Torr'dan  $1 \times 10^{-6}$  Torr'a çekildiğinde (Epi-05 ve

Epi-01 örnekleri), yüzeydeki teras çizgilerinin incelendiği görülmüştür (Şekil 5.6a,b). V/III oranı 9'da sabit tutulup iki aşamalı Sb akı miktarı ve kesme sıcaklığı kullanıldığında ise teras çizgileri biraz daha ince bir hal almıştır (Şekil 5.6c, Epi-03). Bu durumdan bir öndeki bölümde ayrıntılı olarak bahsedilmiştir. Aynı V/III oranı (30) ve Sb akı miktarı ( $1 \times 10^{-6}$  Torr) altında büyütülen örneklerde Sb akısı daha yüksek sıcaklıkta (400 °C) kesildiğinde, yüzeyde oluşan Sb teras çizgilerinin Sb akı kesme sıcaklığı 350 °C olan örneğe kıyasla daha ince olduğu görülmüştür (Şekil 5.6a,d). Bir önceki bölümde anlatıldığı gibi V/III oranının 9 olarak kullanıldığı örneklerde de benzer sonuç elde edilmiş olması teraslı Sb yoğuşmasında Sb akısının kesildiği andaki alttaş sıcaklığının etkisini göstermektedir. Eldeki bu verilerden faydalanarak büyütülen sonraki örneklerde Sb akısı alttaş sıcaklığının 400 °C olduğu anda kesilmiştir (Epi-06, Epi-07, Epi-08, Epi-09 ve Epi-10 örnekleri). Böylece, diğer iki parametrenin (V/III oranı ve Sb akı miktarı) Sb yoğuşmasına olan etkisi daha belirgin kılınmıştır. V/III oranının 30'dan 3'e, Sb akı miktarının ise  $3 \times 10^{-6}$  Torr'dan  $1 \times 10^{-6}$  Torr'a düşürüldüğü Epi-07 örneğinin yüzeyinde, seyrek ve kısa çizgi halinde teras yapısının ilk oluşum süreciyle karşılaşılmıştır (Şekil 5.6e). Büyütme sırasından kullanılan V/III oranından bağımsız olarak Sb akı miktarı  $5 \times 10^{-7}$  Torr veya daha düşük akı değerlerine kadar azaltılan örneklerin (Epi-08, Epi-09 ve Epi-10) yüzeylerde ise teras oluşumuna dair bir iz bulunmamıştır (Şekil 5.6f,g,h).

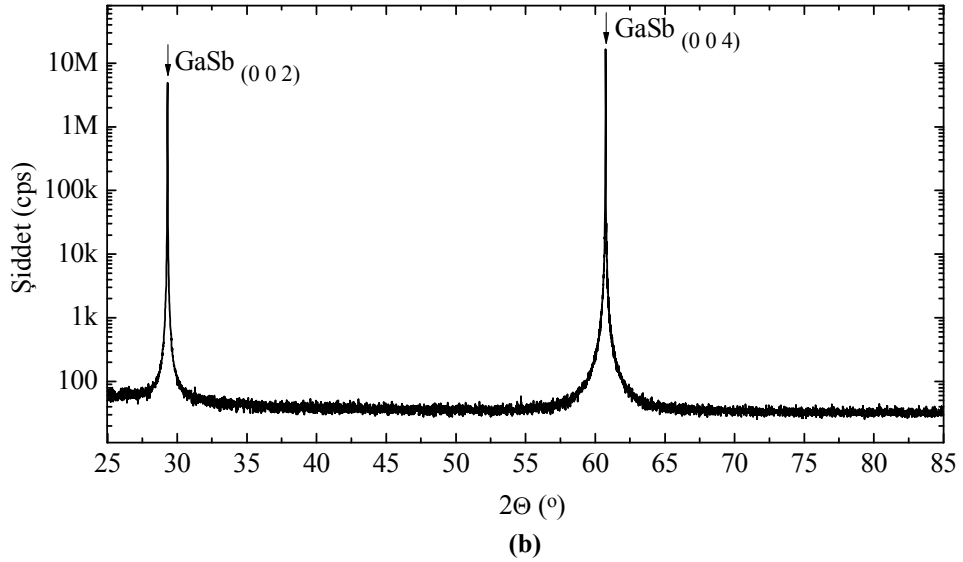
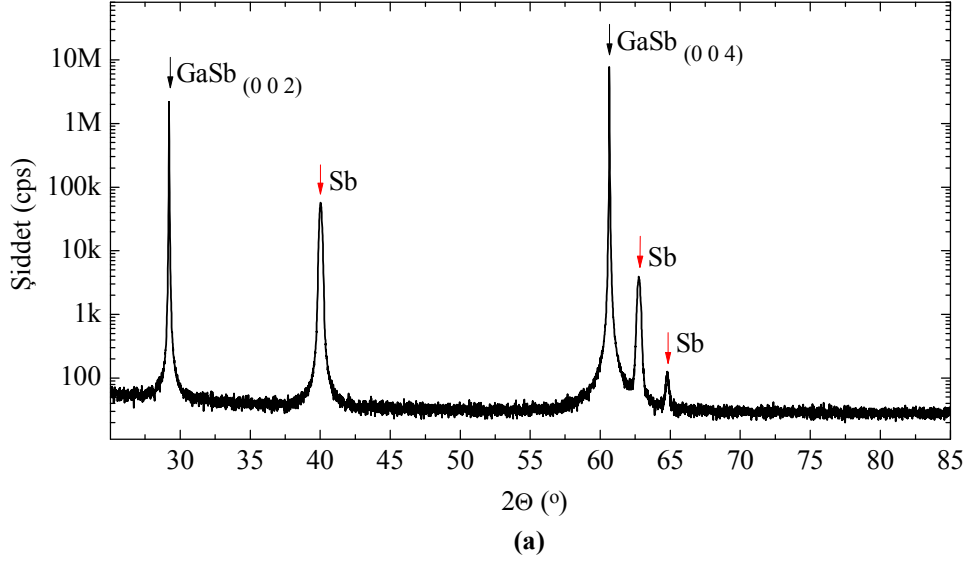
Çizelge 5.2'de ayrıntıları verilen örnek grubunun AFM yüzey analizleri yapıldığında bulunan yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 5.3'de özetlenmiştir. Pürüzlülük RMS değerleri düşünüldüğünde, soğutma sürecinde kullanılan düşük Sb akı değerlerinde, büyütmede kullanılan V/III oranının etkili olduğu; oranın artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir. Daha büyük V/III oranında ise, soğutmada kullanılan Sb akısının artması pürüzlülüğü daha fazla arttırmaktadır. En yüksek pürüzlülük değerleri ise soğutma sürecinde Sb akısının daha düşük alttaş sıcaklıklarına kadar verildiği örneklerde gözlenmiştir. Bu süreçte, epikatmanların büyütüldüğü alttaş sıcaklığının 480 veya 515 °C olarak seçilmesinin etkin bir rol almadığı gözlenmiştir (bkz. Çizelge 4.1).

**Çizelge 5.3.** Örneklerin AFM yüzey pürüzlülükleri ve RMS değerleri.

<b>Örnek Adı</b>	<b>En yüksek (nm)</b>	<b>En düşük (nm)</b>	<b>RMS (nm)</b>
<b>Epi-05</b>	263,966	-85,839	33,844
<b>Epi-01</b>	50,631	-20,342	6,726
<b>Epi-03</b>	25,195	-15,524	4,352
<b>Epi-06</b>	23,824	-4,643	2,307
<b>Epi-07</b>	7,347	-1,900	0,293
<b>Epi-08</b>	2,259	-1,301	0,284
<b>Epi-09</b>	11,800	-3,020	1,358
<b>Epi-10</b>	5,067	-2,471	1,034

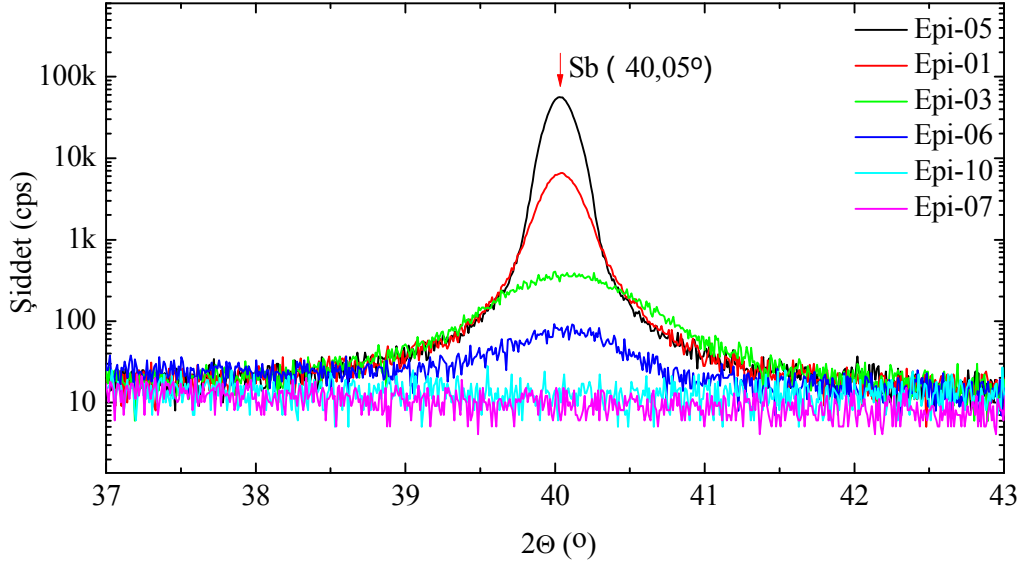
Bu değerlendirmelerin sonucunda, V/III oranının sıcaklıkla ilişkili olarak yüzeyde Sb yoğunlaşmasına sebep olduğu açıktır. Büyütmede, V/III oranının yüksek olması büyütme haznesindeki Sb miktarının fazla olduğu anlamını taşır. Dolayısıyla, yoğunlaşmanın meydana geldiği alttaş sıcaklık değerinde hazne içindeki Sb miktarı daha fazladır. Belli bir kritik değerden sonra yüzeyde oluşan terasların artan Sb akı miktarıyla birlikte hacimce büyüdüğü de görülmüştür. Hacimce büyüyen teraslar yüzeydeki teras yoğunluğunun azalmasına da neden olmuştur.

Yüzeyleri incelenen örneklerin epikatman kristal kalitesi hakkında bilgi sahibi olmak için XRD ölçümleri yapılmıştır. Kristal kalitesinin bir göstergesi olan GaSb (0 0 4) düzleminde alınan sinyalin FWHM değerleri ~11-16 açısaneye arasında değişmektedir. Bu değerler literatürle kıyaslandığında örnekler kristal kalitesi açısından iyi bir konumdadır [34,35]. Geniş açı taramalarında tüm örneklerde 29,29° ve 60,76°de gözlenen sinyaller GaSb epikatman yapısının (0 0 2) ve (0 0 4) düzlemlerinden gelmektedir (Şekil 5.7). Ayrıca, yüzeyinde Sb yoğunlaşması gözlenen örneklerin geniş açı taramalarında 40,05°, 62,76° ve 64,79° değerlerinde hegzagonal Sb kristal yapısını ait sinyaller de gözlenmektedir (Şekil 5.7a). Örnek olarak, yoğunlaşma miktarının en fazla olduğu örneklerden biri olan Epi-05 ile, yüzeyi temiz olan Epi-10 örneklerinin geniş açı XRD taramaları Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7. (a) Epi-05 ve (b) Epi-10 örneklerine ait geniş açı XRD ölçüm grafikleri.

XRD geniş açı taramalarında  $40,05^\circ$ 'de gözlenen Sb'ye ait sinyallerin şiddetleri karşılaştırıldığında, yüzeyde yoğunlaşan Sb miktarıyla sinyal şiddetinin doğru orantılı olduğu görülmüştür. Yoğunlaşmanın fazla olduğu Epi-05 örneğinde Sb sinyal şiddeti en yüksek olup, yoğunlaşma miktarı azaldıkça sinyal şiddeti de azalmıştır (Şekil 5.8). Epi-07 örneğinde yüzeydeki yoğunlaşmanın henüz başlangıç aşamasında olup katman oluşturacak durumda olmadığı AFM görüntüsüyle belirlenmiştir. Bu örneğin yüzeyi küçük Sb çizgileri dışında genel görüntüsü yoğunlaşma olmayan örneklerle benzerdir. Bu durumda, yüzeydeki Sb miktarı XRD kırınım deseninde sinyal oluşturamamış ve yoğunlaşma olmayan örneklerin XRD deseniyle benzer sonuç vermiştir (Şekil 5.8).

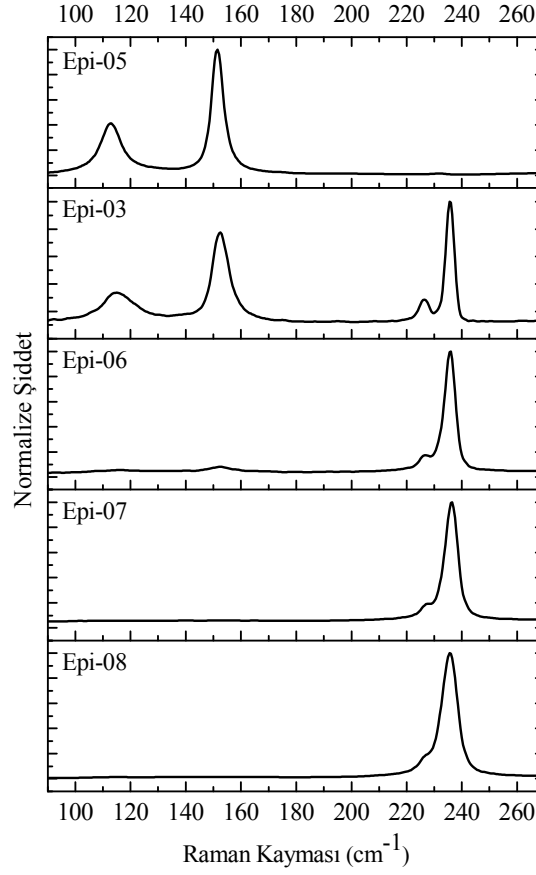


Şekil 5.8. Hegzagonal Sb kristal sinyalinin yüzeyde yoğuşan Sb miktarına bağlı olarak değişimini gösteren XRD ölçümü.

XRD ölçümlerinde olduğu gibi yüzeydeki yoğuşmalar, Raman ölçümlerinde de yoğuşma miktarlarına göre Sb'ye ait sinyal şiddetlerinde kendilerini belli etmişlerdir (Şekil 5.9). Raman ölçümünde Bölüm 5.1.1'de bahsedilen GaSb yarıiletken yapısına ait TO ve LO fonon modları ve Sb katmanına ait modlar benzer şekilde bu örnekler için de görülmüştür. Epi-05 örneğinde yoğuşma miktarı en fazla olduğu için Sb sinyal şiddeti en fazladır. Örneklerden Epi-03'de Sb yoğuşma miktarı Raman ölçümlerinde Sb tabakasından sinyal alınabilecek kadar kalın, alttaki GaSb epitabakadan sinyal alınabilecek kadar da incedir. Bu durum yoğuşan Sb katman kalınlığı ile ilişkilendirilmiş ve bir önceki bölümde incelenmiştir. Epi-06 örneğinde, Sb'ye ait sinyaller çok düşükken Epi-07 örneğinde Raman ölçüm düzeneğinin hassasiyeti dışında kaldığı için tamamen kaybolmuştur.

Sonuç olarak, yüzeydeki Sb yoğuşmasının nedeninin soğutma sürecindeki Sb akı kesme sıcaklığı, Sb akı miktarı ve büyütmede kullanılan V/III oranı ile ilişkili olduğu ortaya konmuştur. Böylece, bu parametrelerin etkisi göz önünde tutulup değerlendirildiğinde, GaSb epikatman yapılarında, soğutma sonunda düzgün yüzeyler elde edilebilmesi için güvenilir değerlerin soğutma aşamasında Sb

akısının kesildiği alttaş sıcaklığının 400 °C ve akı değerinin  $5 \times 10^{-7}$  Torr komşuluğunda olduğu söylenebilir.



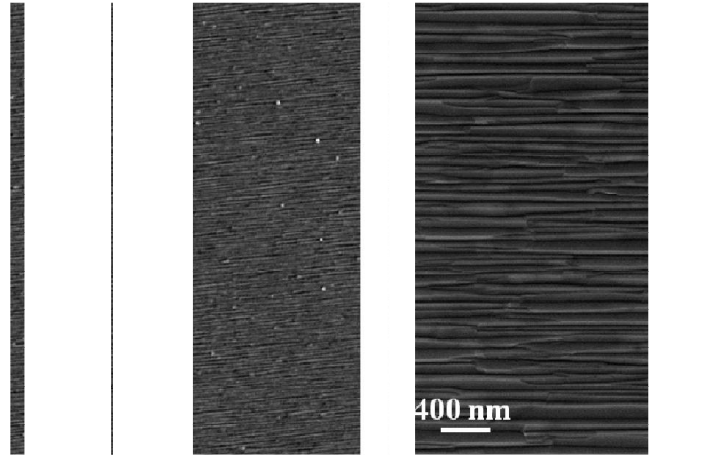
Şekil 5.9. GaSb epikatman örneklerinin oda sıcaklığında alınan Raman ölçümleri.

### 5.3. Fotolitografik Süreçlerinin Epikatman Yüzeylerine Etkileri

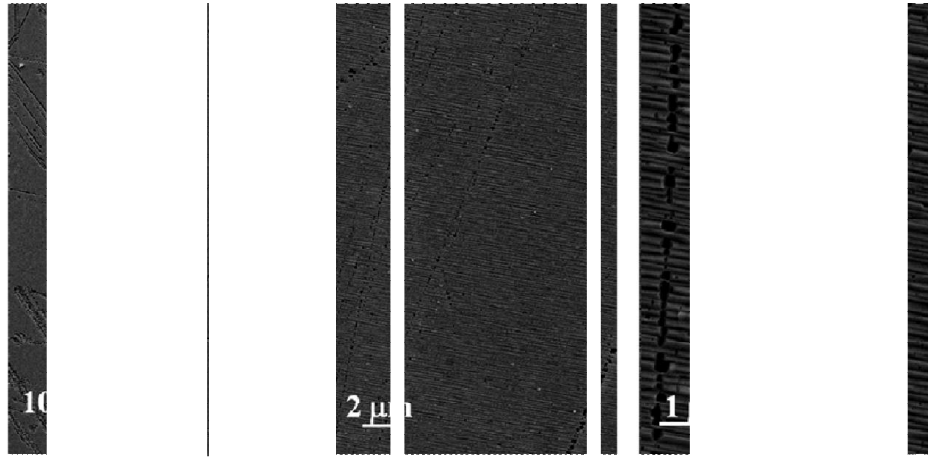
Bir önceki bölümde büyütülen örnek yüzeylerinin AFM görüntülerinden faydalanarak örnek yüzeyleri, temiz GaSb yüzeyi ve Sb yoğunlaşmış yüzey şeklinde iki ayrı yüzey olarak nitelendirilmiştir. GaSb epikatman yüzeylerinde belli koşullarda yoğunlaşmış Sb katmanının gözlenmesi, altındaki GaSb epikatman yüzeylerini nasıl etkileyeceği sorusunu ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle, bu başlık altında, fotolitografi sürecinde epikatman yüzeylerinin maruz kaldığı aseton, alkol, saf su ve fotorezistin yüzey etkisi incelenmiştir.

*Aseton, alkol ve saf suyun büyütülen örnek yüzeylerine etkisi; örnek yüzeylerinin aseton, alkol ve saf suyla teması sonrasında alınan SEM görüntüleri,*

herhangi bir işleme maruz kalmamış örneklerden alınan görüntülerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. GaSb yüzeyi işlem uygulanmış ve uygulanmamış durumda yüzeyinde değişimler, bozulmalar veya kusurlar meydana gelmemiştir. Ancak, GaSb epikatman üzerinde yoğunlaşan teraslı Sb yapıları için bu durum geçerli değildir. Yüzeyinde Sb yoğunlaşması gözlenen örneklerden birine (Epi-1) ait işlem uygulanmamış ve alkol, aseton veya saf sudan herhangi birine maruz kalan yüzeyin farklı büyütmelelerdeki SEM görüntüleri Şekil 5.10'da verilmiştir. Teraslı örnek yüzeyleri aseton, alkol veya saf su gibi etkenlerden herhangi birine temas ettiğinde yüzeyde yuvarlak çukurların yanı sıra yer yer çubuk şeklinde Sb yoğunlaşmasının yüzeyden uzaklaştığı görülmüştür (Şekil 5.10b). Ancak bu durum, teraslı yapının bozulmasına neden olmamış, teraslı örnek yüzeyi genel görüntüsünü korumuştur. Teraslı Sb yapısında meydana gelen uzaklaşmalar ise uzaklaşan bölgelerdeki Sb'nin yüzeye tutunmasının daha zayıf olmasıyla ilişkilendirilmiştir.



(a)



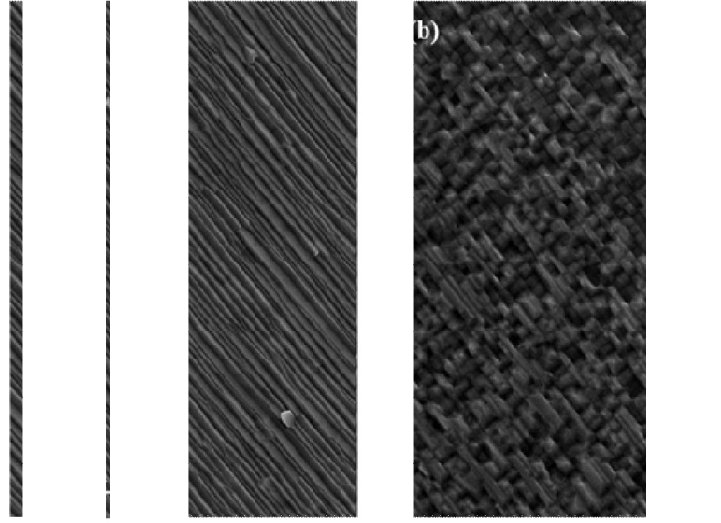
(b)

**Şekil 5.10.** (a)Yüzeydeki Sb yoğuşmasının işlem uygulanmadan önceki ve (b) aynı örneğin alkole maruz kaldıktan sonraki farklı büyütmelerde alınan yüzey SEM görüntüleri.

*Fotorezistin büyütülen örnek yüzeylerine etkisi;* Yüzeyde Sb yoğuşan GaSb epikatman yapılarında aseton, alkol ve saf suyun örnek yüzeylerine etkisi dışında fotolitografi işleminde kullanılan fotorezistin de örnek yüzeylerine etkisi incelenmiştir. Bunun için fotolitografi işlemlerine sadık kalınarak örnek yüzeyleri fotorezistle homojen olarak kaplanmış ve kaplama sonrasında belli sürelerde tavlama yapılmıştır. Tavlama, fotolitografi sürecinde uygulanan standart ısıtma değerleri olan 110 °C yumuşak tavlama ve 120 °C sert tavlama sıcaklıkları denenmiştir. Bu değerlere ek olarak 150 ve 200 °C sıcaklıklar da dâhil edilmiştir. Örneklerin farklı sıcaklıklardaki tavlamalarından sonra yüzeylerindeki fotorezist asetonla uzaklaştırılmış ve sonra yüzey SEM görüntüsü alınmıştır.



İlk aşamada, yüzeyi fotorezist kaplanan örnek 30 dk bekletilmiş ve herhangi bir tavlama işlemi yapılmadan asetonla temizlenmiştir. Alınan SEM görüntülerinde temiz GaSb yüzeyinde bir değişme olmazken, Sb yoğunlaşmış yüzeyde oluşan kusurların aseton, alkol veya saf suya teması sonrasında oluşan kusurlarla aynı olduğu görülmüştür. Bu durumun esas etkeni fotorezist mi, yoksa fotorezisti çözmede kullanılan aseton mu olduğu netlik kazanmamıştır. Bu işlemin ardından, Epi-1 ve GaSb alttaş örneklerinden alınan farklı parçaların yüzeyleri fotorezistle kaplanmış ve yukarıda bahsedildiği gibi 110, 120, 150 ve 200 °C’de 5 dk boyunca ısıtılmıştır. Tavlama sonrasında örneklerin yüzeyindeki fotorezist aseton ile uzaklaştırılmıştır. En düşük ilk üç sıcaklık değerinde temiz GaSb epikatman yüzeyi aynı kalırken, Sb yoğunlaşmış teraslı yüzeylerde yukarıda bahsedilen aseton, alkol ve saf su teması sonrasında oluşan yuvarlak çukur benzeri oluşumlar görülmüştür (bkz. Şekil 5.10). Ancak, 200 °C’de tavlanan yüzeyi teraslı Sb yapılarda bozulmalar meydana gelmiştir: Bazı yerlerde yüzeyden uzaklaşmış küçük Sb teras boşlukları oluşmuş ve teraslarda yapısal değişiklik yaşanmıştır. Bu sıcaklıkta yapılan işlem sonrasında, yüzeydeki teraslı yapı kaybolurken yerine yükseklik farkları daha az olan gözenekli yapılar meydana gelmiştir. Şekil 5.11b’de 200 °C’de 5 dk boyunca ısıtma işlemi sonrasında alınan SEM görüntüsü örnek olarak verilmiştir. Yüzeyi temiz GaSb epikatman yüzeyinde ise 200 °C’de tavlama yine bir değişime neden olmamıştır.

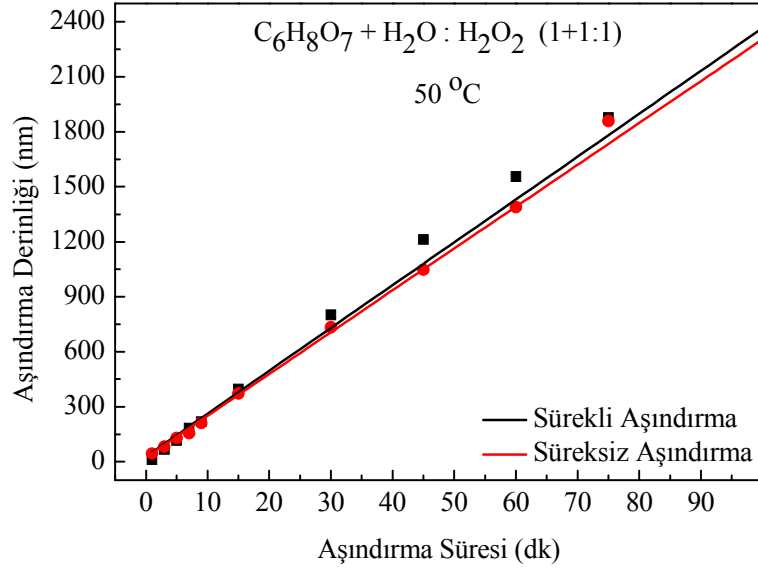


**Şekil 5.11.** GaSb epikatman yapısının (a) yüzeyinde yoğunlaşan teraslı Sb yapısının, (b) teraslı Sb yoğunlaşmasının fotorezistin 200 °C’de ısıtmaya maruz kaldıktan sonra fotorezisten arındırılmış yüzey SEM görüntüsü.

#### 5.4. GaSb Epikatman Yapılarında Aşındırma

Epikatman yapılarının aşındırılmasında Bölüm 4.2’de anlatılan CA çözeltisi kullanılmıştır. Bu bölümde sunulan çalışmalardaki temel amaç, CA çözeltisinin GaSb epikatman yapılarını aşındırma davranışının belirlenmesidir. Yapılan ön çalışmalarda, oda sıcaklığındaki CA çözeltisinin aşındırma hızı ~0,9 nm/dk, çözelti sıcaklığı 50 °C’ye yükseltildiğinde ise aşındırma hızı ~20 nm/dk olarak bulunmuştur. Böylece çözeltinin tepkime hızı sıcaklıkla artırılarak kalın GaSb epikatman yapıların aşındırılması için daha uygun olan aşınma hızına ulaşılmıştır. Kullanılan çözeltinin GaSb’yi aşındırma davranışının belirlenmesindeki bir diğer etken ise difüzyon hızıdır. Aşındırıcının difüzyon hızı, yüzeye ulaşan reaktanların hızı ve yüzeyden uzaklaşan ürünlerin hızıyla ilişkilidir. Bu ilişkinin görülebilmesi için GaSb epikatman örnekleri farklı sürelerde aşındırılarak aşındırma işleminin doğrusallığı kontrol edilmeye çalışılmıştır. Bu aşındırmalar iki ayrı aşamada ve aynı çözelti içerisinde gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, belirlenen her aşındırma süresi için bir örnek kullanılmıştır. İkinci aşamada ise tek örnek üzerinden tüm aşındırma süreleri uygulanmıştır. Örnek, belirlenen sürelerde aşındırıcı içinden çıkarılarak, aşınma miktarı ölçülmüş ve aşındırmaya sonraki belirlenen süre için

devam edilmiştir. Böylece *sürekli* ve *süreksiz* aşındırma durumlarında difüzyon hızının aşınma miktarındaki etkisi gözlenmiştir (Şekil 5.12). Bu iki durumda elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, çözeltinin difüzyon hızının, örneğin asit içinde bekleme süresinden bağımsız olduğu görülmüştür.

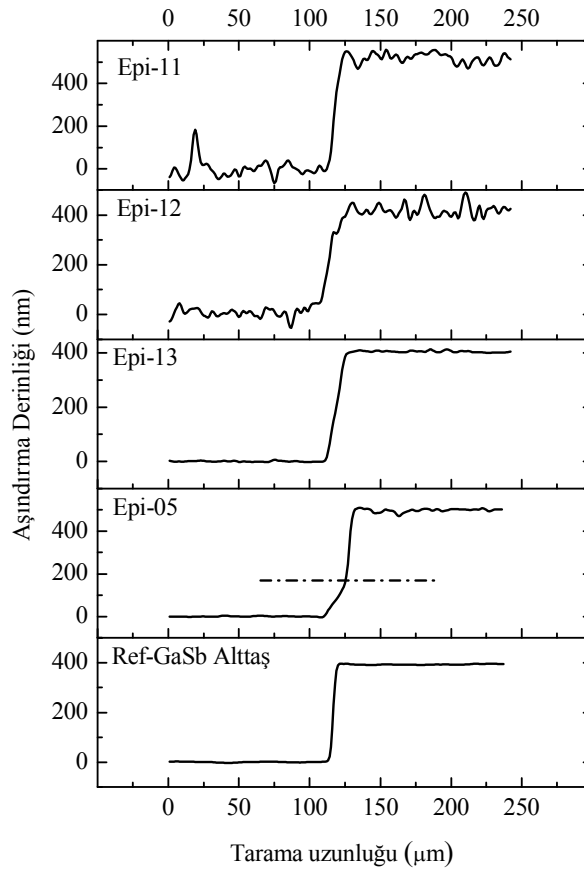


Şekil.5.12. GaSb alttaşın  $C_6H_8O_7$  çözeltisi içerisinde zaman bağılı aşınma miktarını gösteren grafik.

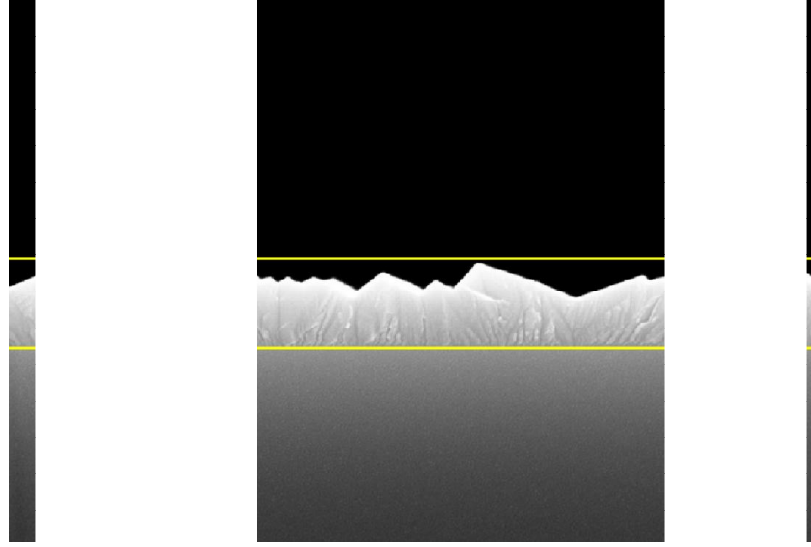
CA çözeltisinin sürekli ve süreksiz aşınma derinlikleri arasındaki aşındırma farkının çok büyük olmadığı görülmüştür. Bunun sonucunda, büyütülen bütün örnekler belirlenen 7, 15, 30 ve 60 dk sürelerinde aşındırılmıştır. Zamana bağılı yapılan aşındırma derinlikleri incelendiğinde sürekli ve süreksiz iki durum arasındaki aşındırma farkı 30 dk'ya kadar olan sürelerde ~50 nm seviyelerindedir (aşınma derinliği ~750 nm). Bu sebepten dolayı aşındırma sonrasında örnekler arasındaki derinlik farkı bu değere kadar göz ardı edilmiştir.

Aşındırma sonrasında örneklerin aşınma profillerinin (derinlik, şekil ve yüzey pürüzlülüğü) tespiti dokunmalı yüzey profil belirleyici yardımıyla yapılmıştır. Her birinin yüzeyi ~500 nm aşındırılan örneklere ait basamak ölçümleri Şekil 5.13'de verilmiştir. Örneklerin yüzey yapılarının durumuna göre yan yüzey aşınma profillerinde farklılıklar söz konusudur. Yüzeylerinde belirli miktarda Sb yoğunlaşması olan örneklerin basamak ölçümlerinde iki farklı aşınma profiliyle karşılaşılmıştır. Yüzeydeki Sb katmanının aşınma eğimi ile altındaki GaSb epikatmanın aşınma eğimleri farklılık göstermektedir. Bu durum, Sb

katman kalınlığı en fazla olan Epi-05 örneğinde (~300 nm) belirgin şekilde görülmektedir (Şekil 5.13). Yüzeyindeki yoğunlaşma miktarı daha az (~100 ve ~20 nm) olan Epi-01 ve Epi-03 örneklerinin aşınma profilindeki bu ayırım, Epi-05 örneğindeki kadar belirgin değildir. Şekil 5.13’de iki farklı aşınma eğimine sahip davranışlı epikatman yapılarına örnek olarak sunulan Epi-05 örneğine ait yanal yüzey SEM görüntüsünde (Şekil 5.14), aşınma profilinin üst kısmındaki birinci eğimin olduğu bölgenin derinliğiyle uyumlu katman net bir şekilde görülmektedir. Aşınma profili Sb yoğunlaşmasının başladığı yere kadar dik bir eğime sahipken, GaSb epikatman bölgesinde göreceli olarak daha az eğimlidir. Şekil 5.13’de verilen diğer örneklerin aşınma profilleri, referans GaSb alttaş örneğiyle benzer davranış göstermektedir. Ancak Epi-11 ve Epi-12 örneklerinin örnek yüzeyi ve aşınan yüzeydeki pürüzlülükler dikkat çekmektedir.

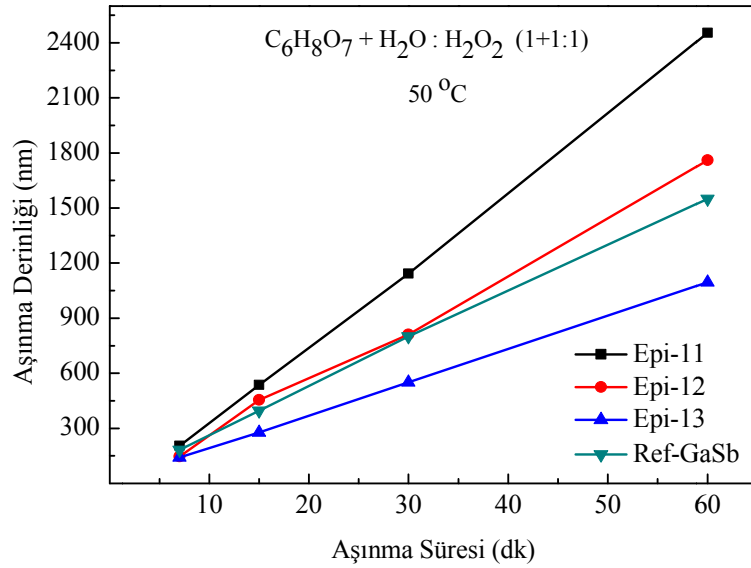


Şekil 5.13. GaSb epikatman örneklerine ait basamak yüksekliği aşınma profilleri.



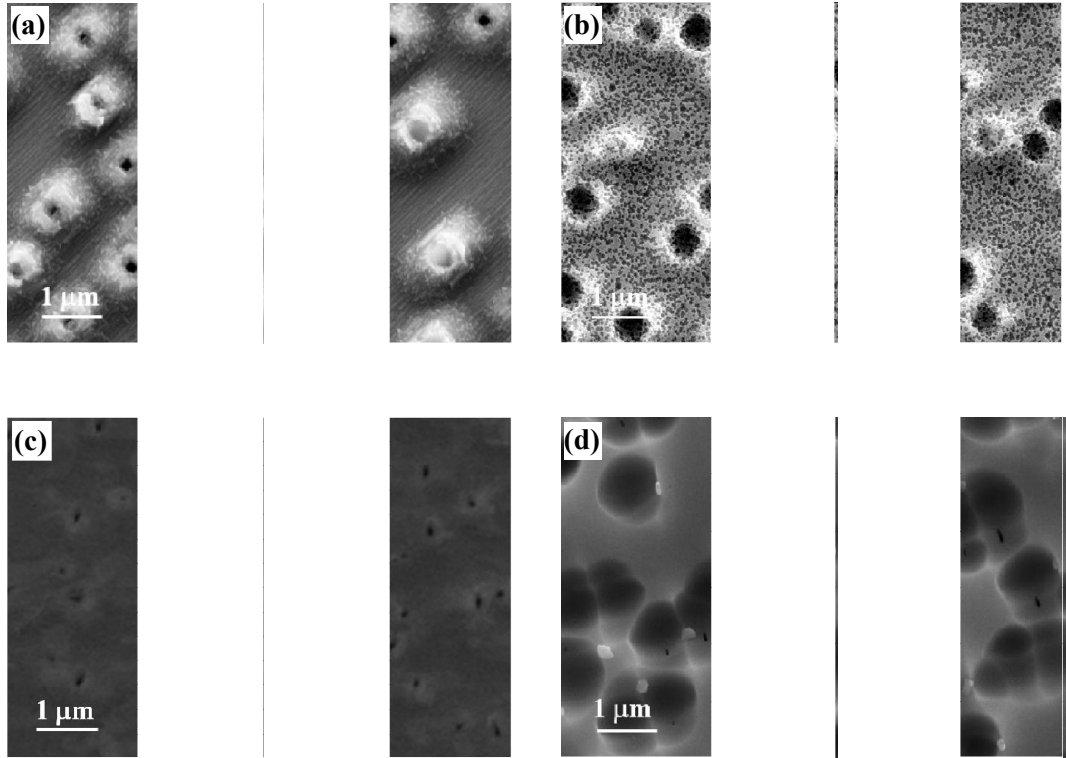
Şekil 5.14. Epi-05 örneğinin yanal yüzey SEM görüntüsü.

Örneklerin aynı süre içindeki aşınma derinlikleri dikkate alındığında, aşınma profilleri benzerlik gösteren örneklerin aşınma derinlikleri de benzerlik göstermektedir. Ancak, yüzeyleri pürüzlü olan Epi-11 ve Epi-12 örneklerinin, aşındırma sürelerinden bağımsız olarak diğer örneklerden daha fazla aşındığı görülmüştür. Şekil 5.15’de verilen örneklerin zamana bağlı aşınma grafiklerinde Epi-13 örneği, grafikte yer verilmeyen ve benzer aşınma derinliğine sahip diğer örnekleri temsil etmektedir.



Şekil 5.15. GaSb epikatman örneklerinin zamana bağlı aşınma derinlik grafiği.

Yüzey pürüzlüğü ve aşınma derinliklerindeki farkların anlaşılabilmesi için zamana bağlı yapılan aşındırmalardan sonra tüm örneklerin yüzeyleri SEM görüntüleri alınarak incelenmiştir. Aşınması ve pürüzlülüğü fazla olan Epi-11 ve Epi-12 örneklerinin yüzeyleri temiz GaSb epikatman ve Sb yoğuşan teraslı yüzeyler dışında bir görüntü vermiştir. Epi-11 örneğinde, teraslı yapının yanında tepe şeklinde yükselteler (Şekil 5.16a), Epi-12 örneğinde ise yer yer şekilsiz çukurluklar (Şekil 5.16c) görülmüştür. Bahsi geçen örneklerin Şekil 5.15'deki grafikte belirtilen zamanlarda yapılan her aşındırma sonrasında SEM yüzey görüntüleri alınmış ve kusurların epikatman yapıların başlangıç aşamasından beri var olduğu anlaşılmıştır. Bu örneklerin zamana bağlı aşınma derinliğinin fazla olması, örnek yüzeyinin çukurlar halinde kusurlar barındırmasıyla ve bu kusurların katmanların derininden gelmesiyle ilişkilendirilmiştir. Şekil 5.16'de Epi-11 ve Epi-12 örneklerine ait aşındırılmamış ve ~500 nm aşındırılmış örnek yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir.



**Şekil 5.16.** GaSb epikatman yapılarından Epi-12 örneğinin (a) aşınmamış, (b) aşınmış (500 nm) yüzey SEM görüntüleri ile Epi-11 numaralı örneğin (c) aşınmamış, (d) aşınmış (500 nm) yüzey SEM görüntüleri.

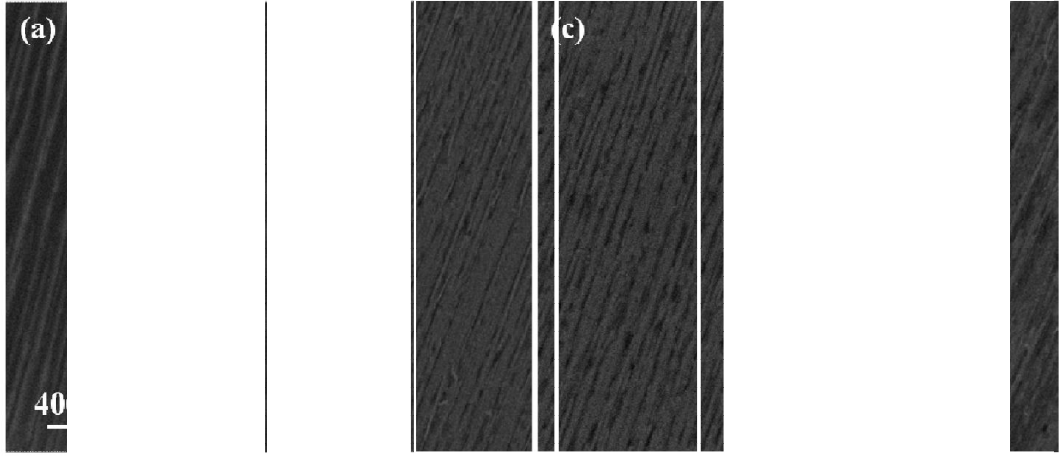
## 5.5. Yoğuşan Sb Katmanının Yüzeyden Uzaklaştırılması

GaSb epikatman yapılarının büyütme sonrasında yüzeyinde meydana gelen yoğuşmadan kaynaklı olan Sb katmanı, yarıiletken aygıtlarda şapka katmanı olarak kullanılmaktadır [11,12]. Kontrollü olarak yaratılan bu koruyucu şapka katmanlarının, aygıt üretiminden önce işlem uygulanacak örnek yüzeyine zarar vermeden temizlenmesi gerekir. Literatürde bu katmanların ya yüksek vakum altında tavlama yoluyla ya da kimyasal aşındırma yöntemleriyle temizlendiğine dair çalışmalar rapor edilmiştir. Bu bölümde, örneklerin yüzeyindeki Sb katmanının kaldırılması için yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

### 5.5.1. Çabuk ısı tavlama yöntemi

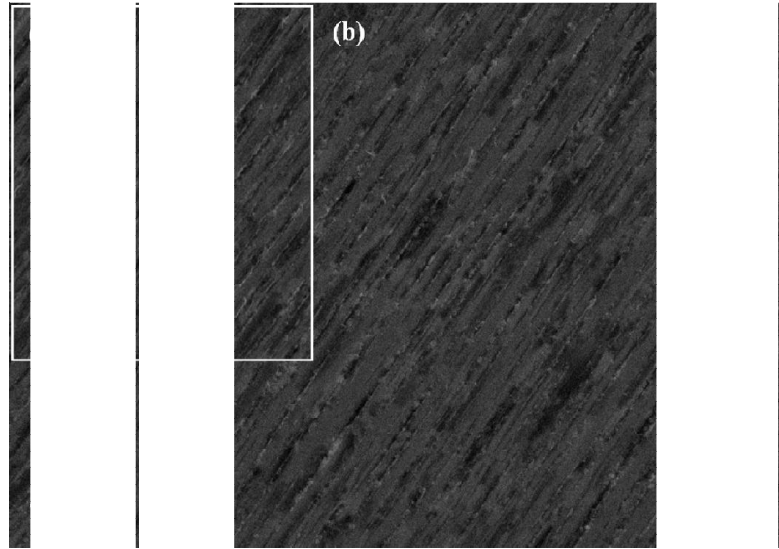
Yapı yüzeyinde meydana gelen oksitlenme veya dış etkenler için koruma katmanı olarak kullanılan Sb katmanı ve zamanla yüzeyde oluşan doğal oksit katmanı, yüksek vakum altında tavlama yapılarak yüzeyden uzaklaştırılır [12,36]. Çalışmanın bu aşamasında, yüzeyde ~50 nm Sb katmanı olan Epi-14 örneği kullanılmıştır. Tavlama sıcaklıkları literatürden faydalanılarak 350 ve 400 °C olarak seçilmiştir [12]. Tavlama işlemlerinden sonra Sb katmandaki değişimin gözlemlenmesi için örneklerin yüzeyleri SEM görüntüleri alınarak incelenmiştir.

Tavlama işlemleri çabuk ısı tavlama cihazında (rapid thermal processor, RTP) vakum ortamında ( $9 \times 10^{-2}$  Torr) ve azot gazı altında, zamana bağlı olarak yapılmıştır. Vakum altında veya azot altında yapılan tavlamalarda örneklerin yüzeylerinde farklılıklar görülmediğinden süreçler azot altında yapılarak devam edilmiştir. 350 °C sıcaklıkta 5, 10 ve 30 dk sürelerinde yapılan tavlamalarda teras yapılarında değişimler meydana gelmiş ancak yüzey tam olarak temizlenememiştir. Örneklerden alınan yüzey görüntüleri Şekil 5.17'de sunulmuştur. 350 °C'de 5 dk ve 10 dk süreyle yapılan tavlamalarda, Sb'nin teras yapılarının aralarından uzaklaştığı görülmektedir (Şekil 5.17b,c). Şekil 5.17d'de gösterilen 350 °C'de 30 dk tavlanan örnek yüzeyinde, 5 ve 10 dk tavlanan örnek yüzeylerinde kalan ince Sb'nin aksine daha geniş oluşumlar görülmüştür.



Şekil 5.17. Epi-14 örneğine ait tavlama sonrasında yüzey SEM görüntüleri; (a) tavlınmamış yüzey ve 350°C (b) 5 dk, (c) 10 dk ve (d) 30 dk tavlınmış.

350 °C’de yüzeyden uzaklaşmayan Sb için 400 °C sıcaklıkta 30 ve 60 dk olmak üzere iki ayrı tavlama işlemi daha yapılmıştır. SEM yüzey görüntüleri Şekil 5.18’de verilen iki yüzey, benzer özellikler göstermektedir. Tavlama sonucunda, yoğunlaşmış Sb yüzeyden tamamen uzaklaşmamıştır. Bunun sebebi olarak tavlamanın yüksek vakum altında ( $>10^{-8}$  Torr) yapılmamış olması, Sb’nin yüzeyden uzaklaşması için gerekli koşulların sağlanamadığının bir göstergesi olarak kabul edilmiştir [12].

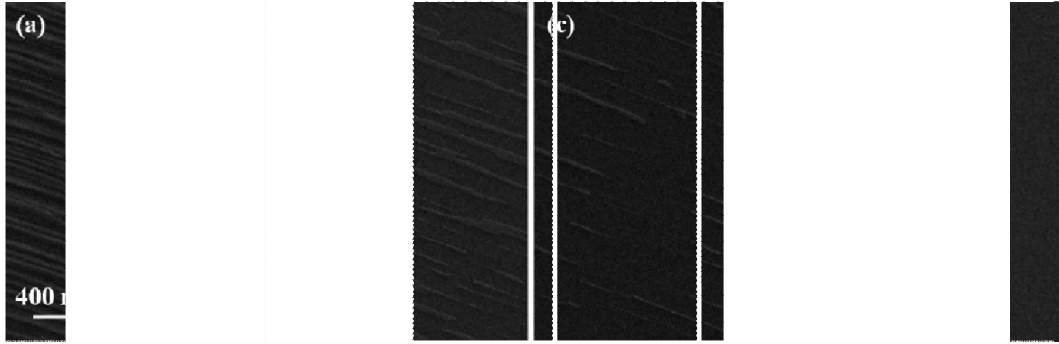


Şekil 5.18. Epi-14 örneğine ait 400 °C sıcaklığında (a) 30 dk, (b) 60 dk sürelerinde tavlanan yüzey SEM görüntüleri.



### 5.5.2. Kimyasal aşındırma yöntemi

Yarıiletken teknolojisinde şapka katmanı olarak kullanılan Sb ve oksit tabakaları kimyasal aşındırma yöntemiyle de yüzeyden temizlenebilir. Pek çok durumda yüzeydeki oksidi temizlemek amacıyla kullanılan hidroklorik asit (HCl), aynı zamanda Sb katmanını yüzeyden temizlemek için de kullanılmaktadır [36]. Ancak, yapılan ön çalışmalarımızda daha iyi sonuç veren ve GaSb epikatman yapılarının aşındırılmasında da kullanılan  $C_6H_8O_7+H_2O:H_2O_2$  (1+1:1) oranında hazırlanan CA çözeltisi tercih edilmiştir. Sıcaklığının 50 °C'ye sabitlendiği durumda CA çözeltisinin aşındırma hızı GaSb için  $\sim 4,3 \text{ \AA/sn}$  iken Sb katmanı için  $\sim 80 \text{ \AA/sn}$ 'dir. Bu aşındırmanın avantajı, Sb yoğunlaşmasını hızlı bir şekilde yüzeyden uzaklaştırırken, GaSb yüzeyine zarar vermeden bu işlemin gerçekleşiyor olmasıdır. Sb katmanının yüzeyden uzaklaşma aşamalarını görebilmek adına aşındırmalar kısa sürelerle aralıklı olarak yapılmıştır. CA çözeltisi içinde 20, 30 ve 60 sn sürelerde aşındırılan Epi-14 örneğine ait yüzey SEM görüntüleri Şekil 5.19'da verilmiştir. Artan aşındırma zamanıyla birlikte örnek yüzeylerinde teras yapılarının giderek incelendiği ve 60 sn sonundaki SEM görüntüsünde temiz GaSb epikatman yüzeyine ulaşıldığı görülmüştür.



Şekil 5.19. Epi-14 örneğine ait yüzey SEM görüntüleri; (a) aşındırılmamış ve CA asitinde (b) 20 sn, (c) 30 sn, (d) 60 sn aşınma sonrası.

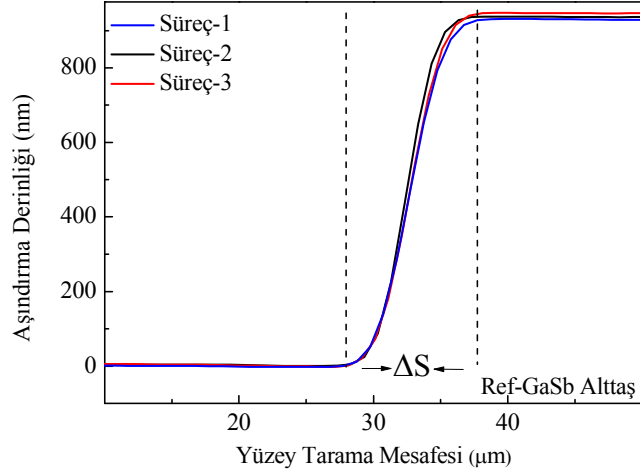
### 5.5.3. Aşınma profillerinin değerlendirilmesi

Tavlama ve aşındırma yöntemleriyle Sb yoğunlaşmasının yüzeyden uzaklaştırılması çalışmaları esnasında, yüzeydeki yoğunlaşma tabakasının aşınma

sürecine ve sonuçta elde edilen profile farklı etkileri olduğu görülmüştür. Çalışmanın bu aşamasında, örnekler aşındırılmadan önce (i) tavlama, (ii) kimyasal aşındırma ile temizleme ve (iii) örnek aygıt tanımlaması olarak nitelendirilen mesa desen tanımlaması işlemlerinden geçirilmiştir. Aşındırma öncesinde örneklerin bu işlemlerin birinden veya bir kaçından farklı sıralarla geçirildiği süreçler Çizelge 5.4’de gösterilmiştir. Bu süreçler sonrasında yapılan mesa aşındırmalarının basamak profillerinin incelendiği bir çalışmaya literatürde karşılaşılmamıştır. İncelenen örnekler gruplar halinde *üzeyinde yoğunlaşma olanlar* ve *üzeyinde yoğunlaşma olmayanlar* şeklinde ele alınmıştır. Bu örneklere ek referans olarak kabul edilen GaSb alttaş da dikkate alınarak işlemler ve değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada, referans GaSb alttaş örneği diğer örneklerle uygulanması planlanan işlemlerden (Çizelge 5.4) geçirilerek aşınma profilindeki değişim incelenmiştir. Süreç-1, Süreç-2 ve Süreç-3’ün uygulandığı referans GaSb alttaşta ait aşınma profili Şekil 5.20’de verilmiştir: örnek profilleri her üç durum için de benzer özellik göstermiştir. Aşınma eğiminin bir göstergesi olarak mesa tabanı ile mesa üstünün kenarları arasındaki yanal mesafe,  $\Delta S$ ,  $\sim 1 \mu\text{m}$  aşınma derinliği için yaklaşık olarak  $10 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür.

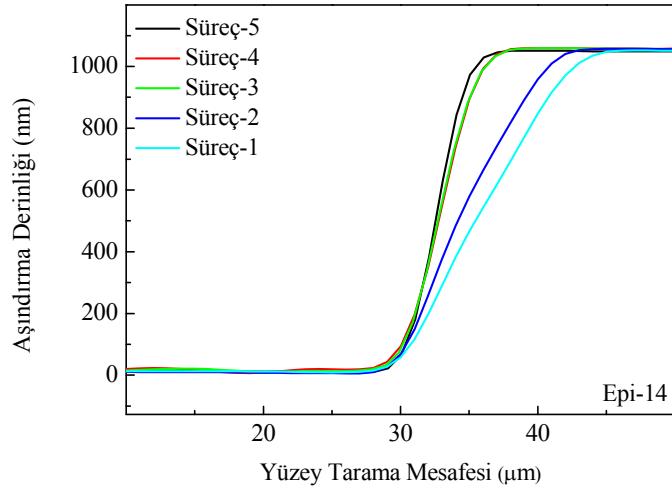
**Çizelge 5.4.** Epi-14 örneği üzerinde yapılan işlemler ve bu işlemlerin gerçekleşme sıraları.

	<b>Temizleme (1 dk CA)</b>	<b>Tavlama (350°C 30 dk)</b>	<b>Mesa tanımı</b>
<b>Süreç-1</b>	----	----	1
<b>Süreç-2</b>	1	----	2
<b>Süreç-3</b>	----	1	2
<b>Süreç-4</b>	1	2	3
<b>Süreç-5</b>	2	1	3



Şekil 5.20. Referans GaSb alttaşa ait aşınma profilleri.

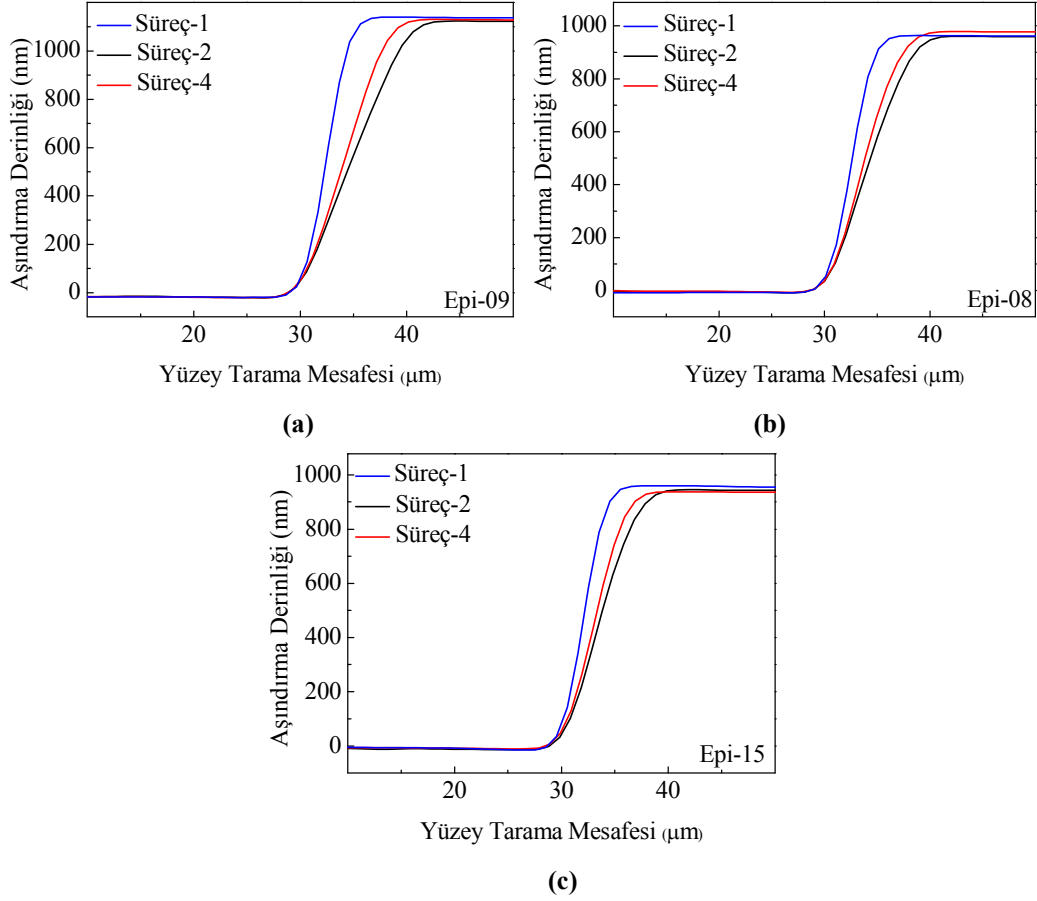
Yüzeyinde ~50 nm Sb katmanı olan Epi-14 Çizelge 5.4'deki süreçler uygulanmış ve her süreç sonrasında elde edilen aşınma profilleri Şekil 5.21'de sunulmuştur. Örneğin aşınma profilleri, işlem sırasından bağımsız olarak tavlama maruz kaldığı her süreçte benzer davranış göstermiştir. Bu nedenle, çalışmanın devamında kullanılan örneklere Çizelge 5.4'de gösterilen Süreç-1, Süreç-2 ve tavlama işlemi içeren süreçlerden biri olarak Süreç-4 işlemleri uygulanmıştır.



Şekil 5.21. Epi-14 örneğine ait aşınma profilleri.

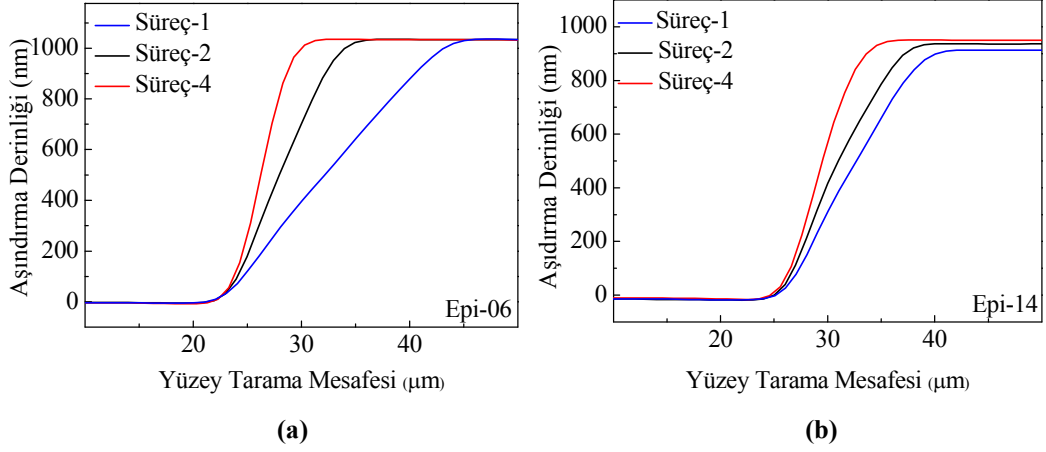
Belirlenen Süreç-1, Süreç-2 ve Süreç-4 aşamaları yüzeylerinde Sb yoğunlaşması olmayan GaSb epikatman örneklerinden Epi-08, Epi-09 ve Epi-15 numaralı örnekleri uygulanmış ve aşınma profilleri değerlendirilmiştir. Ele alınan

her bir örneğin incelenen aşınma profilleri Şekil 5.22’de sunulmuştur. Görüldüğü gibi yüzeylerinde Sb yoğunlaşması olmayan örneklerde (Epi-08, Epi-09 ve Epi-15) Süreç-1’in  $\Delta S$  değeri Süreç-2 ve Süreç-4’ün  $\Delta S$  değerine daha küçük olduğu görülmüştür.



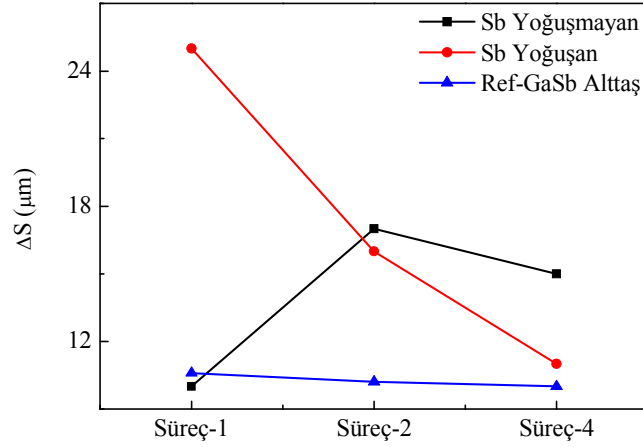
Şekil 5.22. (a) Epi-09, (b) Epi-08 ve (c) Epi-15 örneklerine ait aşınma profilleri.

Yüzeylerinde yoğunlaşma olan Epi-06 ve Epi-14 örnekleri profil açısından Sb yoğunlaşması olmayan önceki örnek setine göre farklı bir durum sergilemişlerdir. Direk örnek yüzeyine tanımlanan mesa deseni profilinin en yüksek  $\Delta S$  değerine sahip olduğu görülmüştür (Şekil 5.23). 1 dk CA çözeltisi içinde yüzey yoğunlaşması temizlendikten sonra elde edilen  $\Delta S$  değeri hiçbir işlem yapılmayana göre daha az ve temizleme tavlama sonrasında elde edilen  $\Delta S$  değeri en az değere ulaşmıştır. Bu setteki her iki örnek için de benzer davranış gözlemlenmiştir.



Şekil 5.23. (a) Epi-06 ve (b) Epi-14 örneklerine ait aşınma profilleri.

Tüm bu işlemlerden sonra iki örnek grubunun uygulanan süreçlere göre elde edilen  $\Delta S$  değerlerine ait grafik Şekil 5.24’de verilmiştir. Yüzey yoğuşması olmayan örneklerin  $\Delta S$  değeri büyürken, yüzey yoğuşması olan örneklerde bu değer küçülmüştür.

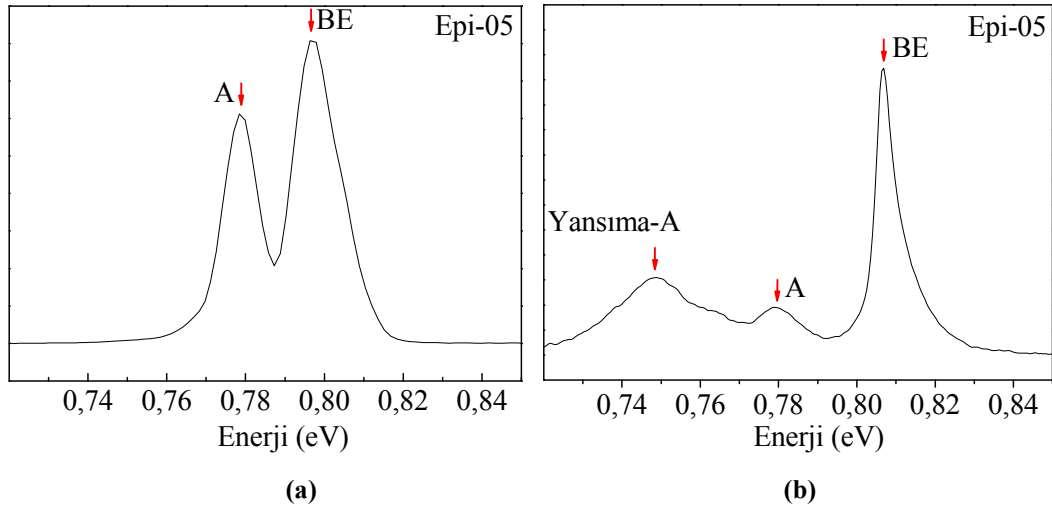


Şekil 5.24. Uygulanan işleme bağlı  $\Delta S$  değişim grafiği.

## 5.6. Sıcaklığa Bağlı Fotoluminesans Ölçümleri

Tezin buraya kadar olan kısmında bahsedilen ayrıntılı çalışmalara ek olarak bütünleyici olması bakımından çalışma kapsamında büyütülen bütün örneklerin PL ölçümleri de yapılmıştır. Yapılan ilk ölçümlerde, yüzeyinde Sb yoğuşması olan örneklerden sinyal alınamazken, yüzeyinde Sb yoğuşması olmayan

örneklerden ise sinyal alınabilmiş ancak şiddetlerinin oldukça düşük olduğu gözlenmiştir. PL şiddetinin düşük olmasının sebebi, GaSb epikatmanların katkısız olarak büyütülmesidir. Daha ayrıntılı karakterizasyonlarının yapılabilmesi için düşük sıcaklık PL ölçümleri yapılan örneklerin hepsinin yüzeyleri CA çözeltisinde 15 dk bekletilerek aşındırılmıştır. Sıcaklığa bağlı alınan PL ölçümlerinde, bantlar arası geçişlerin sıcaklık düştükçe belirginleştiği görülmüştür. Ölçümleri alınan bütün örneklerde, bant eksiton geçişi  $\sim 0,796$  eV ve akseptör geçişi ise  $\sim 0,777$  eV değerlerinde görülmüştür. Bu yüzden tüm örneklerin PL ölçümleri verilmemiş, örnek olması amacıyla Epi-05 numaralı örneğin PL ölçümlerine yer verilmiştir (Şekil 5.25). PL ölçümlerinde farklı durumlar için geçerli bant geçişlerinin tanımlandığı literatür değerleri de Çizelge 5.5'te sunulmuştur. Bölüm 4.3.5'de anlatılan PL deney düzeniği ile alınan ölçümler sinyallerin daha çok belirginleşmesi ve ekstra sinyallerin görülebilme ihtimaline dayanarak Epi-05 numaralı örneğin ölçümleri FTIR cihazında da tekrar edilmiştir. Burada alınan ölçümlerde sinyaller belirginlik kazanırken akseptör geçişlerine ait yansımalar olarak adlandırılan (LO-phonon replica-A) ve  $0,748$  eV noktasında görülen geçişler de belirginleşmiştir.



Şekil 5.25. Epi-05 örneğinin (a) optik deney düzeneğinde, (b) FTIR deney düzeneğinde alınan fotoluminesans ölçüm grafikleri (8K).

**Çizelge 5.5.** GaSb kristali için düşük sıcaklık PL ölçümlerinde görünen sinyaller [22,38].

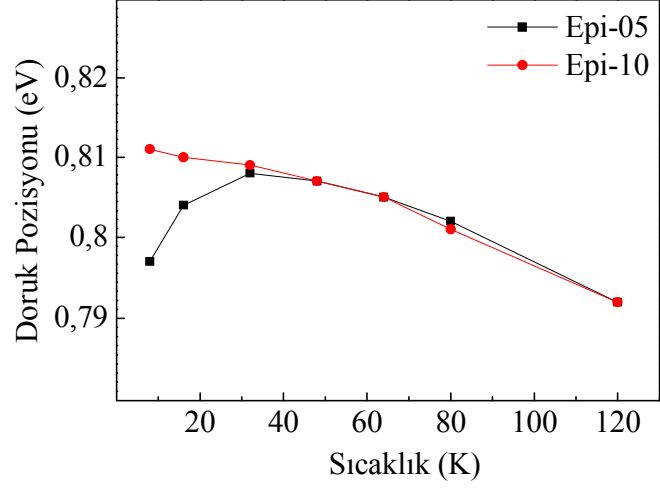
<b>Enerji (meV)</b>	<b>Bant Geçişi</b>
810	Serbest eksiton (FE)
808	Eksitonik geçiş
807	Eksitonik geçiş
805	Bant eksiton geçişi (BE <sub>1</sub> )
803	Bant eksiton geçişi (BE <sub>2</sub> )
800	Bant eksiton geçişi (BE <sub>3</sub> )
796	Bant eksiton geçişi (BE <sub>4</sub> )
795	Eksitonik geçiş
777	Residual akseptör (A)
765	LO fonon replica BE <sub>4</sub>
758	Akseptör
748	LO fonon replica A

Buradan yola çıkarak örneklerin PL ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması yapılmaya çalışılmıştır. Ancak bazı örneklerin kusurlu olması PL sinyali ve şiddeti hakkında kesin karşılaştırmalar yapmayı oldukça güç hale getirmiştir.

8-120 K aralığında belirlenen sıcaklıklarda alınan ölçümlerin bazı ara değerlerinde serbest eksiton (Free Exciton-FE) geçişlerinin kaydığı görülmüştür. Aslında 16 K sıcaklığında GaSb yapısına ait FE geçişi 0,810 eV değerinde görülmelidir [38]. Ancak yapıdaki kirlilik atomları ve ara yüzey kusurları gibi etkenler yüzünden FE geçişleri bant eksitonları (Band Exciton-BE) olarak geçiş yapmıştır [39].

Farklı sıcaklıklarda alınan PL ölçümlerinde bant yapısındaki değişim bantlar arasındaki geçişleri de etkileyerek sinyal pozisyonlarında kaymalara neden olmuştur. Sıcaklığa bağlı bant geçişlerindeki kaymalar için, Şekil 5.26'de yüzeyde yoğunlaşma olan örnekleri temsilen Epi-05 örneği, yüzeyde yoğunlaşma olmayan örnekleri temsilen Epi-10 örneği seçilmiştir. Epi-05 örneğinde BE, Epi-10 örneğinde FE doruk pozisyonlarının sıcaklığa bağlı değişim grafiği verilmiştir. Yüzeyde yoğunlaşma olan Epi-05 örneği 30 K'e kadar küçük dalga boyuna kayma

eğilimindeyken, 30 K'den sonra büyük dalga boyuna kaymaktadır. Yoğuşma olmayan Epi-10 örneği ise sıcaklık arttıkça büyük dalga boyuna kayma eğilimi göstermiştir.



Şekil 5.26. Epi-05 ve Epi-10 örneklerinin sıcaklığa bağlı doruk pozisyon değişme grafiği.



## 6. SONUÇ

Bu tez kapsamında, 6,1 Å grubu pek çok yarıiletken aygıtta destek ve kontak katmanı olarak kullanılan GaSb epikatman yapılarının iyileştirilmesi yönünde, büyütme ve karakterizasyon çalışmalarını yapılmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda, GaSb alttaş üzerine büyütülen GaSb epikatman yapıların soğutma sürecinde kullanılan Sb akısının ve Sb akısının kesildiği alttaş sıcaklığının yüzeyde ayrı bir katmanın oluşmasına sebebiyet verdiği görüldü. Soğuturken kullanılan Sb akı miktarı ve akı kesme anındaki alttaş sıcaklığının yoğuşma miktarına etkisi SEM yanal yüzey görüntüleriyle tespit edildi. Yoğuşma kalınlığıyla orantılı teras yapısının kalınlığının da arttığı yanal yüzey SEM görüntülerinde görüldü. Örnek yüzeylerinde yoğuşan Sb katmanının aşındırma yöntemiyle uzaklaştırılabildiği ve yüzey pürüzlülüklerinin iyileştiği AFM görüntüleriyle kanıtlandı. Yoğuşma miktarına bağlı olarak Raman ve XRD ölçümlerinde Sb'ye ait sinyal şiddetleri Sb katman kalınlığıyla orantılı olarak değiştiği görüldü. Alınan XRD ölçümleri sonucunda ise yüzeyde yoğuşan Sb katmanın hegzagonal bir yapıda olduğu anlaşıldı. Buna ek olarak, yüzeyde yoğuşan teraslı yapının oluşumunun büyütme ve soğutma parametreleriyle olan ilişkisi kuruldu. Farklı parametrelerle büyütülen ve farklı soğutma süreçleri uygulanan örneklerin yüzeylerinde oluşan teraslı yapılar AFM görüntüleriyle gözlemlendi. GaSb epi katman yapıları için uygun soğutma parametreleri, Sb akı miktarının  $5 \times 10^{-7}$  Torr, akı kesme alttaş sıcaklığının ise 400 °C olduğu belirlenmiş oldu.

Örneklere fotolitografik işlemde uygulanan aseton, alkol, saf su ve fotorezistin yüzey etkisi incelendi. GaSb epikatman yüzeylerinde değişme olmazken Sb yoğuşan yüzeyde uzaklaşan ve teras yapı özelliğinin kaybolduğu değişimler SEM yöntemiyle görüntülendi.

Kimyasal aşındırma işlemi için kullanılan CA çözeltisinin GaSb yapılar için difüzyon hızının zamandan bağımsız olarak her koşulda aynı aşınmayla sonuçlandığı belirlendi. Yapıların belirli sürelerde aşınmaya maruz kalmasının ardından ortaya kusurlu yapıların çıktığı tespit edildi. Ara yüzeyi kusurlu olan

örneklerin yüzeylerinin, diğer örnekler nazaran, yüzey pürüzlülüklerinin ve aşınma hızlarının daha fazla olduğu gösterildi.

Yüzeyde yoğunlaşan Sb katmanının yüzeyden uzaklaşması için tavlama ve CA ile aşındırma yöntemleri denendi. Hem ( $9 \times 10^{-2}$  Torr) vakum altında hem de azot altında yapılan tavlamalarda Sb yoğunlaşmasının kaldırılmasında yeterince iyileşme sağlanamadığı görüldü. İkinci yöntem olarak kullanılan aşındırma çözeltisinde ise başarılı sonuçlar alındı ve SEM görüntüleriyle Sb'nin yüzeyden uzaklaştığı ispatlandı.

Yüzey temizleme süreçlerine ek olarak, epikatmanların, aygıt teknolojisinde kullanılan mesa yapılarının oluşturulma sürecine etkisi incelendi. Yüzeyde yoğunlaşma olmayan örneklerin mesa tanımlamasında dik aşınma profili elde edildi. Sb yoğunlaşan yüzeylerde ise Sb yoğunlaşma miktarına göre mesa profilin de yan duvarların dikliğinde azalma olduğu gözlemlendi. Fakat, uygulanan ön tavlama süreci sonrasında eğimde dikleşme yani tanımlanan mesa profilinde iyileşme sağlandığı görüldü. Örneklerin azot altında, 350 °C 30 dk tavlama sonrası takiben mesa profillerinin Sb yoğunlaşma olmayan örneklerle yaklaştığı anlaşıldı.

Son olarak, numunelerin oda sıcaklığında ve sıcaklığa bağlı olarak PL ölçümleri yapıldı ve GaSb'ye özgü optik geçişler belirlendi. Büyütme ve soğutma sürecinde kullanılan parametrelerin bu geçişlerde kaymalara neden olduğu ortaya konuldu.

## KAYNAKLAR

- [1] Neamen, D., A., *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles*, McGraw-Hill International Editions, New York, 2003.
- [2] Razeghi, M., *Technology of Quantum Devices*, Springer, New York, 2010.
- [3] Rogalski, A., *Infrared Detectors*, CRC press, A.B.D., 2011.
- [4] Arikan, B., Korkmaz, G., Suyolcu, Y.E., Aslan, B., 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.
- [5] Yang, M.J., Moore, W.J., Bennett, B.R., Shanabrook, B.V., “Growth and characterization of InAs/InGaSb/InAs/AlSb infrared laser structures”, *Electronics Letters*, **34**, 270-271, 1998.
- [6] Hill, C.J., Yang, R.Q., “MBE growth optimization of Sb-based interband cascade lasers” *Journal of Crystal Growth*, **278**, 167-172, 2005.
- [7] Wang, S., Ding, D., Liu, X., Zhang, X.B., Smith, D.J., Furdyna, J.K., Zhang, Y.H., “MBE growth of II–VI materials on GaSb substrates for photovoltaic applications” *Journal of Crystal Growth*, **311**, 2116-2119, 2009.
- [8] Robinson, J.A., Mohny, S.E., “A low-resistance, thermally stable Ohmic contact to n-GaSb”, *Journal Applied. Physics*, **98**, 033703, 2005.
- [9] Sigmund, J., Saglam, M., Vogt, A., Hartnagel, H.L., Buschmann, V., Wieder, T., Fuess, H., “Microstructure analysis of ohmic contacts on MBE grown n-GaSb and investigation of sub-micron contacts”, *Journal of Crystal Growth*, **227-228**, 625-629, 2001.
- [10] Robinson, J.A., Mohny, S.E., “An improved In-based ohmic contact to n-GaSb”, *Solid-State Electronics*, **48**, 1667-1672, 2004.
- [11] Alcock, S.G., Everard M.J., Nicklin, C.L., Taylor, J.S.G., Norris, C.A., Bennett, S.L., “An investigation of the growth and removal of protective antimony caps for antimonide epilayers”, *Thin Solid Films*, **514**, 198-203, 2006.

- [12] Zhernokletov, D.M., Dong, H., Brennan, B., Kim, J., Wallace, R.M., “Investigation of arsenic and antimony capping layers and half cycle reactions during atomic layer deposition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on GaSb (100)”, *Journal of Vacuum Science and Technology A*, **31**, 060602, 2013.
- [13] Kasap, S., Capper, P., *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*, Springer, New York, A.B.D., 2006.
- [14] Yu, P.Y., Cardona, M., *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties*, Springer, 4. ed., 2010.
- [15] Brochuere, E.L., *How MOCVD Works: Deposition Technology for Beginners*, Aixtron Se, Almanya, 2011.
- [16] Seshan, K., *Handbook of Thin Film Deposition Processes and Techniques (Second Edition)*, Noyes Publications, New York, A.B.D., 2002.
- [17] Shang, X.J., *Study of quantum dots on solar energy applications*, Doktora Tezi, Royal Institute of Technology, Stockholm, İsveç, 2012.
- [18] Singh, J., *Semiconductor Optoelectronics Physics and Technology*, McGraw-Hill International Editions, Singapore, 1995.
- [19] Williams, R., *Modern GaAs Processing Methods*, Artech House, Boston, London, 1990.
- [20] Kroemer, H., “The 6.1 Å family (InAs, GaSb, AlSb) and its heterostructures a selective review”, *Physica E*, **20**, 196-203, 2004.
- [21] Milnes, A.G., Polyakov, A.Y., “Review gallium antimonide device related properties”, *Solid-State Electronics*, **36**, 803-818, 1993.
- [22] Dutta, P.S., Bhat, H.L., Kumar, V. “The physics and technology of gallium antimonide: An emerging optoelectronic material”, *Journal Applied Physics*, **81**, 5821-5870, 1997.
- [23] Polakowska, E.P., “Surface treatments of GaSb and Related materials for the processing of mid-infrared semiconductor devices”, *Electron Technology*, **32/46**, 02-668, 2006.

- [24] Van Der Meulen, Y.J., “Growth properties of GaSb: The structure of the residual acceptor centres”, *Journal Physics Chemistry Solids*, **28**, 25-32, 1967.
- [25] Liu, Z., *Modifications of electronic and chemical properties of GaSb surface for device applications*, Doktora Tezi, Wisconsin-Madison Üniversitesi, Madison, Wisconsin, 2004.
- [26] Vugaftman, I., Meyer, J.R., Ram-Mohan, L.R., “Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys” *Applied Physics Review*, **89**, 5815-5875, 2001.
- [27] Madelung, O., *Semiconductors: Data Handbook*, Springer, New York, 2004.
- [28] Aspnes, D.E., Studna, A.A., “Dielectric functions and optical parameters of Si, Ge, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAsn and InSb from 1.5 to 6.0 eV”, *Physical Review B*, **27**, 985-1006, 1983.
- [29] Dier, O., Lin, C., Grau, M., Amann, “M.C., Selective an non-selective wet-chemical etchants for GaSb-based materials”, *Institute of Physics Publishing*, **19**, 1250-1253, 2004.
- [30] Özdemir, S., *Kızılötesi algılamada kullanılan kendiliğinden oluşan InAs/GaAs kuantum noktayapıların MBE tekniğiyle büyütülmesi ve karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2014.
- [31] Cullity, B.D., *Elements of X-ray diffraction*, Addison-Wesley Publishing Company, A.B.D., 1956.
- [32] Dean, P.J., “Photoluminescence as a diagnostic of semiconductors”, *Progress Crystal Growth Characterization*, **5**, 89-174, 1982.
- [33] Arpapay, B., Şahin, S., Arıkan, B., Serincan, U., “Redundant Sb condensation on GaSb epilayers grown by molecular beam epitaxy during culling procedure”, *Thin Solid Films*, **564**, 110-114, 2014.
- [34] Garcia-Cruz, M.L., Martinez-Juarez, J., Lopez-Salazar, P., Juarez Diaz, G., “GaSb film growth by liquid phase epitaxy”, *Physica Status Solidi C*, **3-4**, 1203-1206, 2010.

- [35] Li, Y., Zhang, Y., Zhang, Y., Wang, B., Zhu, Z., Zeng, Y., “Molecular beam epitaxial growth and characterization of GaSb layers on GaAs (001) substrates”, *Applied Surface Science*, **258**, 6571-6575, 2012.
- [36] Liu, Z.Y., Hawkins, B., Kuech, T.F., “Chemical and structural characterization of GaSb(100) surfaces treated by HCl-based solutions and annealed in vacuum”, *Journal of Vacuum Science and Technology B*, **21**, 71-77, 2003.
- [38] Lee, M., Nicholas, D.J., Singer, K.E., Hamilton, B., “A photoluminescence and Hall-effect study of GaSb grown by molecular beam epitaxy”, *Journal Applied Physics*, **59**, 2895-2900, 1986.
- [39] Perkowitz, S., *Optical Characterization of Semiconductors: Infrared, Raman, and Photoluminescence Spectroscopy*, Academic Press, San Diego, 1993.