

**GaAs/AlGaAs TABANLI KUANTUM KUYULARININ  
TEM (GEÇİRİMLİ ELEKTRON MİKROSKOBU)  
İLE ANALİZİ**

Tuğçe KARAKULAK  
Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı – Katıhal Fiziği Bilim Dalı  
Eylül-2010

Bu tez çalışması TBAG-107T012 numaralı proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

**Tuğçe KARAKULAK**'ın “**GaAs/AlGaAs Tabanlı Kuantum Kuyularının TEM (Geçirimli Elektron Mikroskobu) ile Analizi**” başlıklı **Fizik** Anabilim Dalı **Katıhal Fiziği** Bilim Dalındaki, Yüksek Lisans tezi 24 Ağustos 2010 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	<b>Adı-Soyadı</b>	<b>İmza</b>
Üye (Tez Danışmanı )	: <b>Doç. Dr. UĞUR SERİNCAN</b>	.....
Üye	: <b>Prof. Dr. SERVET TURAN</b>	.....
Üye	: <b>Doç. Dr. BÜLENT ASLAN</b>	.....

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

**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **GaAs/AlGaAs TABANLI KUANTUM KUYULARININ GEÇİRİMLİ ELEKTRON MİKROSKOBU İLE ANALİZİ**

**Tuğçe KARAKULAK**

**Anadolu Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Uğur SERİNCAN**

**2010, 81 sayfa**

GaAs ve AlGaAs bileşikleri yüksek bağlanma gücü, ısı kararlılık ve kolay katkılanabilme gibi özelliklere sahip olması nedeniyle kuantum kuyu yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. GaAs/AlGaAs kuantum kuyulu yapılarda, AlGaAs bileşiğindeki Al oranına bağlı olarak bariyer yüksekliği, kuyunun katkılama miktarı ve kuyu genişliği değiştirilerek kuantum kuyusunun algılama bölgesi ayarlanabilir. Bu özellikleriyle adı geçen yapılar, kızılötesi algılayıcılar için verimli ve elverişli malzemelerdir. Bu çalışmada, GaAs/AlGaAs yapılarının yapısal olarak incelenmesi ve Al-Ga-As konsantrasyonlarının belirlenerek yapıya etkisinin gözlenmesi amaçlanmıştır. Moleküler demet epitaksi tekniği ile büyütülmüş çoklu GaAs/AlGaAs kuantum kuyu yapıların, odaklanmış iyon demeti tekniği ile inceltirilerek, taramalı geçirimli elektron mikroskobu, enerji dağılım x-ışını spektroskopisi, enerji filtreli geçirimli elektron mikroskobu ve elektron enerji kaybı tayfi teknikleri kullanılarak analizi yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** GaAs/AlGaAs, Kuantum Kuyu, TEM, STEM, EELS, EDX

## **ABSTRACT**

**Master of Science Thesis**

### **CHARACTERIZATION OF GaAs/AlGaAs QUANTUM WELLS WITH TEM (TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPY) TECHNIQUES**

**Tuğçe KARAKULAK**

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

**Supervisor: Ass.Prof. Dr. Uğur SERİNCAN**

**2010, 81 pages**

GaAs and AlGaAs materials are of great interest for using in quantum well structures due to their high binding strength, thermal stability and relatively easy doping properties. In GaAs/AlGaAs quantum well structures, the spectral range can be modified by changing the Al content in AlGaAs (therefore the barrier height), quantum well doping level and the well thickness. With these properties, the abovementioned structures are suitable and efficient materials for infrared detectors. In this study, it was aimed to characterize the structural properties of GaAs/AlGaAs structures and to monitor the effect of Al-Ga-As concentrations on the structure. Multi layer GaAs/AlGaAs quantum well structures grown by molecular beam epitaxy were thinned by using focused ion beam technique and then analyzed by means of scanning transmission electron microscopy, energy dispersive x-ray spectroscopy, energy filtering transmission electron microscopy and electron energy loss spectroscopy techniques.

**Keywords:** GaAs/AlGaAs, Quantum Well, TEM, STEM, EELS, EDX

## TEŞEKKÜR

Yapıcı fikirleri ve değerli birikimleri ile beni yönlendiren, gerek bilimsel açıdan gerekse kişisel olarak gelişimime olanak sağlayan çok değerli danışman hocam Doç.Dr.Uğur SERİNCAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımın gerçekleştirilmesinde fikir ve önerileriyle bana yol gösteren ikinci danışmanım saygıdeğer hocam Prof. Dr. Servet TURAN' a,

Hem deneysel çalışmalarımındaki hem de hayata dair aldığım kararlarda değerli fikirleri ve manevi desteğinden dolayı değerli hocam Doç. Dr. Bülent ASLAN' a,

TBAG-105T492 numaralı TÜBİTAK projesi kapsamında bütütülen örnekle çalışma imkanı sağladığı için Prof. Dr. Yüksel ERGÜN'e,

TEM eğitimim süresindeki çok özverili desteğinden dolayı Araş. Gör. Hilmi YURDAKUL' a ve numune hazırlama eğitim süreci için Öğr. Gör. Orkun TUNÇKAN' a,

İyon Dilimleme cihazı kullanımında yardımını esirgemeyen Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Elektron Mikroskopları Laboratuar sorumlusu Uzman Sinem KAYHAN'a; Odaklanmış İyon Demeti (FIB) cihazı ile numune hazırlama süreci için Bilkent Üniversitesi UNAM çalışanı Uzman Koray MIZRAK'a; deneysel çalışmalarım süresince ihtiyaç duyduğumda desteğini benden esirgemeyen teknisyenimiz Sayın Seyfi YAMAK'a

Çalışmalarım boyunca bana hep destek olan ve varlıklarını hiç esirgemeyen canım arkadaşlarım Burcu ARPAPAY ve Hülya KURU'ya,

Çalışmaktan her zaman çok büyük zevk duyduğum arkadaşlarım Bülent ARIKAN ve Güven KORKMAZ'a,

Bu yola beraber başladık ve hiç kopmadık. Tüm zorlukları birlikte aştık. PÇT üyelerinden canım arkadaşlarım Pınar KAYA ve Çiğdem ÖZSOY'a,

Yardımlarını esirgemeyen ve maddi-manevi olarak her zaman yanımda olan, hayatım boyunca karşılaştığım tüm sıkıntılarında beni hiç yalnız bırakmayan babam, annem ve canım kardeşime yürek dolusu teşekkürlerimi sunarım.

Tuğçe KARAKULAK

Eylül-2010

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>x</b>
<b>KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	<b>xi</b>
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2. ÇALIŞMANIN AMACI VE ÖNEMİ</b>	<b>2</b>
<b>3. III-V GRUBU KIZİLÖTESİ ALGILAYICILAR</b>	<b>4</b>
3.1. Yarıiletken Kavramı .....	4
3.2. Yarıiletken Malzemelerin Sınıflandırılması .....	5
3.3. III-V Grubu Yarıiletkenler .....	6
3.4. GaAs Yarıiletkeni ve Kristallografik Yapısı .....	6
3.5. AlGaAs Alaşımı ve Özellikleri .....	9
3.6. GaAs/AlGaAs Çoklu Kuantum Kuyulu Yapıların Oluşumu .....	11
3.7. GaAs/AlGaAs Çoklu Kuantum Kuyulu Yapıların Moleküler Demet Epitaksi Yöntemi ile Büyütülmesi .....	14
3.8. GaAs/AlGaAs Çoklu Kuantum Kuyulu Kızılötesi Algılayıcılar .....	16

<b>4. ELEKTRON MİKROSKOPİ</b>	<b>18</b>
4.1. Elektron Madde Etkileşimi .....	18
4.2. Geçirimli Elektron Mikroskobu Teknikleri .....	21
4.2.1. Aydınlık Alan ve Karanlık Alan Görüntüleme Tekniği.....	22
4.2.2. Seçilmiş Alan Kırınımı Tekniği .....	23
4.2.3. Yüksek Çözünürlüklü Geçirimli Elektron Mikroskobu .....	23
4.2.4. Taramalı Geçirimli Elektron Mikroskobu .....	24
4.2.5. Elektron Enerji Kaybı Tayfı Tekniği .....	28
4.2.6. Enerji Filtreli Geçirimli Elektron Mikroskobu Tekniği .....	30
4.2.7. Enerji Dağılım X-ışınları Tayfı Tekniği .....	31
4.3. TEM Analizleri için Numune Hazırlama Teknikleri .....	31
4.3.1. Standart TEM Numunesi Hazırlama Tekniği .....	32
4.3.2. İyon Demeti ile İnceltme .....	36
4.3.3. Yan Kesit Numune Hazırlama .....	37
4.3.4. İyon Dilimleme Tekniği ile Numune Hazırlama .....	37
4.3.5. Odaklanmış İyon Demeti ile Numune Hazırlama .....	39
<b>5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>	<b>43</b>
5.1. GaAs/AlGaAs Tabanlı Kuantum Kuyulu Yapılar .....	43
5.2. TEM Numunesi Hazırlama .....	44

5.3. GaAs/AlGaAs Tabanlı Kuantum Kuyulu Yapıların TEM Teknikleri ile İncelenmesi .....	46
5.3.1.Yapı 1 Analiz Sonuçları .....	46
5.3.2.Yapı 2 Analiz Sonuçları .....	57
<b>6. SONUÇ</b>	<b>65</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>67</b>



## ŞEKİLLER DİZİNİ

3.1. III-V grubu yarıiletken bileşimler.....	6
3.2. GaAs'ın bant yapısı. Oda sıcaklığında $k=0$ 'da bant aralığı yaklaşık 1,42 eV'tur.....	7
3.3. GaAs'ın kristallografik yapısı.....	8
3.4. Çeşitli yarıiletkenlerin bant aralığına göre örgü sabitleri.....	9
3.5. Örgüdeki gerilmenin etkisi ve yarıiletkenlerin bant yapıları. a) Gerilme durumu b) Gerilmenin veya sıkışmanın olmadığı durum c) Sıkışma durumu Burada AB:Ağır Boşluk, HB: Hafif boşluk bantdını göstermektedir.....	11
3.6. Kuantum nanoyapılar ve bu yapılara göre durum yoğunluğu değişimi.....	12
3.7. Kuantum kuyu yapısının bant diyagramı.....	13
3.8. a) Çoklu kuantum kuyusu sistemi b) Süperörgü.....	14
3.9. Anadolu Üniversitesi, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu MBE sisteminin genel görünüşü.....	15
3.10. Alt bantlar arası absorpsiyonun şematik diyagramı.....	17
4.1. SEM'de kullanılan sinyaller.....	18
4.2. TEM'de kullanılan sinyaller.....	19
4.3. (a) SEM ve (b) TEM'deki elektron-atom etkileşimi.....	20
4.4. Elektron-madde etkileşimi sonucu oluşan sinyaller ve kullanıldıkları teknikler.....	21
4.5. (a) BF ve (b) DF görüntüleme tekniklerinin çalışma prensipleri.....	22
4.6. SAD açıklığı ile numunenin farklı yerlerinden alınan kırınım ağları.....	23
4.7. (a-c) GaAs/AlGaAs kuantum kuyulu yapıların TEM görüntüsü. (b-d) HRTEM.....	24
4.8. (a) TEM kipinde BF-DF görüntü elde edilişi ve (b) STEM kipinde BF-DF görüntüsü.....	25

4.9. SiO <sub>2</sub> ve Cl kabarcıklarının (a) TEM görüntüsü ve (b) STEM görüntüsü.....	26
4.10. STEM ve TEM’de yakınsak ve toplama açısı.....	27
4.11. EELS ile EDX’in şematik karşılaştırılması.....	29
4.12. Kırınım örgüleri görüntüsü (a) Enerji filtresi kullanarak (b) Enerji filtresi kullanmadan .....	30
4.13. EFTEM ile yapılmış elementel haritalama .....	31
4.14. Kesme cihazının görünüşü .....	33
4.15. Ultrasonik disk kesme cihazı .....	34
4.16. Üç ayaklı aşındırma aparatı .....	34
4.17. Çukur oluşturma cihazı .....	35
4.18. Çukur oluşturma cihazında numunenin bulunduğu ve inceltmenin olduğu bölüm .....	35
4.19. İyon inceltme cihazı .....	36
4.20. Yan kesit numune hazırlama aşamaları .....	37
4.21. İyon dilimleme cihazı (a) numune tutucusu ve numune, (b) çalışma mekanizması, (c) 26 dk sonra numunenin görüntüsü, (d) 42 dk sonra numunenin görüntüsü, (e) 1 saat 8 dk sonra numunenin görüntüsü, (f) 2 saat sonra hazırlanma işlemi bitmiş numune görüntüsü ve (g) hazırlanmış numunenin numune tutucusundan çıkarıldıktan sonra grit üzerindeki görüntüsü .....	38
4.22. H-bar FIB tekniği .....	39
4.23. H-bar tekniğine örnek .....	40
4.24. Lift-out FIB tekniği .....	41
4.25. GaAs yarıiletkeninin FIB’de hazırlanma aşamaları (a-f) .....	42
5.1. a) Yapı 1 ve b) Yapı 2’nin şematik gösterimi .....	44
5.2. Yapı 1’in TEM-BF görüntüsü .....	47
5.3. Yapı 1’in TEM-BF görüntüsü .....	47
5.4 FIB ile hazırlanmış Yapı 1’in HAADF görüntüsü.....	48
5.5. Yapı 1’in STEM HAADF görüntüsünün a) 1. bölge ve b) 2. bölgeden alınan EDX nokta analizi tayfları .....	48

5.6. Yapı 1'e ait STEM-EDX çizgi analizi tayfı .....	50
5.7. Yapı 1'e ait STEM-EDX çizgi analizi tayfı .....	50
5.8. Yapı 1'e ait STEM-SI-EELS çizgi analizi tayfı .....	51
5.9. Yapı 1'e ait EFTEM sıfır enerji kayıp görüntüsü .....	52
5.10.(a) Ga 1115 eV enerji kayıplı $L_{3,2}$ kenarının haritası ve (b) Al'un 73 eV enerji kayıplı $L_{3,2}$ kenarının haritası .....	53
5.11. Ga ile Al elementlerinin ortak EFTEM haritası .....	54
5.12. EELS tayfinin alındığı bölgeleri .....	55
5.13. Yapı 1'e ait STEM HAADF görüntüsünde gösterilen bölgelerden alınan EELS tayfları .....	56
5.14. Yapı 2'nin TEM-BF görüntüsü .....	57
5.15. Yapı 2'nin STEM HAADF görüntüsü .....	58
5.16. STEM-EDX nokta analizi sonucunda elde edilen tayflar .....	59
5.17. STEM EDX nokta analizi ile elde edilen tayfların alındığı noktalar .....	60
5.18. STEM EDX nokta analizlerinin miktarsal analiz sonuçları .....	60
5.19. Yapı 2'nin STEM EDX analizi sonrasında alınan görüntüsü .....	61
5.20. Yapı 2'nin STEM EDX çizgi analizi .....	62
5.21. Yapı 2'nin 10 eV'luk aralık kullanılarak kaydedilen sıfır enerji kayıp görüntüsü .....	63
5.22.(a) Ga 1115 eV enerji kayıplı $L_{3,2}$ kenarının haritası ve (b) Al'un 73 eV enerji kayıplı $L_{3,2}$ kenarının haritası .....	63
5.23. (Devam) (a) Ga 1115 eV enerji kayıplı $L_{3,2}$ kenarının haritası ve (b) Al'un eV enerji kayıplı $L_{3,2}$ kenarının haritası .....	64
5.24. Ga ile Al elementlerinin ortak EFTEM haritası .....	64

## ÇİZELGELER DİZİNİ

3.1. Yapay yarıiletkenlerin elde edildiği elementler .....	5
4.1. EELS ve EDX'in karşılaştırılması .....	28
4.2. EELS spektrumunda kullanılan sinyaller ve elde edilen bilgiler .....	29
5.1. EELS tayflarından elde edilen miktarsal analiz sonuçları .....	55

## KISALTMALAR DİZİNİ

AB	: Ağır boşluk (heavy hole)
ADF	: Açısal karanlık alan (annular dark field)
As	: Arsenik (arsenic)
AlGaAs	: Alüminyum galyum arsenik (aluminium gallium arsenic)
BF	: Aydınlık alan (bright field)
BSE	: Geri yansıyan elektronlar (back scattered electrons)
DF	: Karanlık alan (dark field)
EDXS	: Enerji dağılım x-ışını tayfi (energy dispersive x-rays spectroscopy)
EELS	: Elektron energy kaybı tayfi (electron energy loss spectroscopy)
EFTEM	: Enerji filtreli geçirimli elektron mikroskobu (energy filtering transmission electron microscope)
FEG	: Alan yayınlı tabanca (field emission gun)
FIB	: Odaklanmış iyon demeti (focused ion beam)
FPA	: Odak düzlem dizin (focal plane array)
Ga	: Galyum (gallium)
GaAs	: Galyum arsenik (gallium arsenic)
HAADF	: Yüksek halkasal açısal karanlık alan (high angle annular dark field)
HB	: Hafif boşluk (light hole)
HRTEM	: Yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobu (high resolution transmission electron microscope)
MBE	: Moleküler demet epitaksi (molecular beam epitaxy)
MCT	: Cıva kadmiyum telür (mercury cadmium telluride)
MWIR	: Orta dalgaboylu kızılötesi ışınım (medium wavelength infrared radiation)
QWIP	: Kuantum kuyulu kızılötesi foto algılayıcı (quantum

well infrared photodetector)

SAD	: Seçilmiş alan kırınımı (selected area diffraction)
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope)
STEM	: Taramalı geçirimli elektron mikroskobu (scanning transmission electron microscope)
SWIR	: Kısa dalgaboylu kızılötesi ışınım (short wavelength infrared radiation)
UHV	: Ultra yüksek vakum (ultra high vacuum)
XRD	: X ışını kırınımı ( x-rays diffraction)

## 1.GİRİŞ

Kızılötesi algılama, kızılötesi teknolojisinin gelişmesi sürecinde kilit rol oynamıştır. Malzeme büyütme teknolojisindeki hızlı ilerlemeler, son yıllarda kızılötesi algılayıcı geliştirmek üzere süperörgü ve kuantum kuyulu aygıtlar üzerindeki çalışmaları arttırmıştır. Kuantum kuyulu kızılötesi foto algılayıcılar (quantum well infrared photodetector, QWIP), kızılötesi teknolojisindeki en önemli aygıtlardan birisidir. QWIP algılayıcılarda kullanılan malzemelerin bant aralığı, kuyu ve bariyer genişliği ve katkılama konsantrasyonu yüksek hassasiyette kontrol edilebilmektedir. Kızılötesi algılayıcılar çok renkli hale getirilebilir ve diğer hızlı aygıtlarla bütünleşmesi sağlanabilir [1]. QWIP algılayıcılardaki bu ilerlemelerden dolayı yüksek çözünürlüklü, yüksek performanslı, geniş alanlı odak düzlem dizin (focal plane array, FPA) algılayıcıların yapılabilmesi mümkün hale gelmiştir [2]. Çok renkli kızılötesi algılayıcıların geliştirilmesi hassas algılama ve görüntüleme sistemleri için de önemlidir. Bu sistemler, sıcaklık farklarının gösteriminde, kimyasal analizlerde ve hedef tanımlama uygulamaları için oldukça ilgi çekicidir. GaAs ve AlGaAs bileşikleri yüksek bağlanma gücü, sağlam ısıl kararlılık ve kolay katkılanabilme gibi özelliklere sahip olması nedeniyle QWIP'lerde yaygın olarak kullanılmaktadır [3]. AlAs ve GaAs yarıiletkenlerinin bant aralığının birbirinden farklı olmasının yanısıra örgü parametrelerinin birbirlerine çok yakın olması; Al ve Ga oranlarını değiştirerek kuantum kuyulu yapılardaki kuyunun bant aralığının değiştirilmesine olanak sağlar. Bu özellikleriyle bu malzemeler QWIP'ler için verimli ve elverişli malzemelerdir. Bu çalışmada, moleküler demet epitaksi (MBE) tekniği ile büyütülmüş GaAs/AlGaAs tabanlı kuantum kuyularını içeren malzemedan, geçirimli elektron mikroskopunda (TEM) incelenmek üzere yan kesit, odaklanmış iyon demeti (FIB) ve iyon dilimleme yöntemleri kullanılarak numuneler hazırlanmıştır. Numuneler, taramalı geçirimli elektron mikroskobu (STEM), enerji dağılım x-ışını spektroskopisi (EDXS), enerji filtreli geçirimli elektron mikroskobu (EFTEM), yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobu (HRTEM) ve elektron enerji kaybı tayfi (EELS) teknikleri kullanılarak karakterize edilmiştir. Al-Ga-As konsantrasyonlarının belirlenerek sisteme etkisinin

gözlenmesi amaçlanmıştır. Giriş bölümünden sonra ikinci bölümde çalışmanın amacı ve önemi ortaya konmuş, üçüncü bölümde III-V grubu yarıiletkenlerin temel özellikleri özetlendikten sonra, GaAs yarıiletkeninin genel özellikleri ve kristallografik yapısı ile AlGaAs alaşımının özellikleri üzerinde durulmuş, GaAs/AlGaAs çoklu kuantum kuyulu yapıların oluşum mekanizmaları açıklanmış ve bu yapıların MBE tekniği ile büyütülmesinden kısaca bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde, bu çalışmada yararlanılan TEM teknikleri açıklanmış ve bu analizler için gerekli olan numune hazırlama yöntemleri özetlenmiştir. Beşinci bölümde, bu çalışmalardan elde edilmiş bulgular verilmiş ve son bölümde de elde edilen bulgular tartışılmıştır.

## 2. ÇALIŞMANIN AMACI VE ÖNEMİ

GaAs/AlGaAs kuantum kuyulu yapılar daha büyük bant aralıklı iki malzeme (AlGaAs) arasına daha küçük bant aralıklı malzemenin (GaAs) büyütülmesiyle oluşturulur. Kuyu görevi gören malzeme 10 nm kalınlığın altında tutulurken, engel görevi gören daha büyük bant aralıklı malzeme 300-500 nm arasında büyütülür. Bu çalışmada, kuyu görevi gören 4-5 nm incelikte büyütülen katmanın incelenmesi özel teknikler gerektirmektedir. Özellikle iki farklı malzeme geçişindeki düzgünlük, malzeme kalitesini ve dolayısıyla üretilecek aygıtın verimini etkilemektedir. Tasarlanan yapının doğru büyütülüp büyütülmediğinin anlaşılabilmesi için kullanılan en önemli yöntemlerden bir tanesi TEM yöntemidir. Bu yöntemin 1 nm'lik çözünürlüğünün yanısıra, geliştirilmiş HRTEM kipinin olması malzeme arayüzünün incelenebilmesini olanaklı kılar.

MBE tekniği ile büyütülen GaAs/AlGaAs tabanlı kuantum kuyulu yapılar, temel olarak kızılötesi algılayıcıların üretiminde kullanılmakta olup özellikle savunma sanayisinde geniş uygulama alanına sahiptir. Bu yapıların çalışacağı bölge kuyu genişliğine, engel yüksekliğine (AlGaAs malzemesindeki Al konsantrasyonu engel yüksekliğine karar vermektedir) ve kuyunun katkı miktarına göre değişkenlik göstermektedir. Katkı miktarlarının değişik yöntemlerle ölçülebilmesine/hesaplanabilmesine karşın katman kalınlıkları ve engeli oluşturan



AlGaAs malzemesindeki Al konsantrasyonunun belirlenmesi ancak özel yöntemler kullanılarak X-ışını kırınımı (XRD) yöntemiyle hesaplanabilmektedir. Bu hesaplamalar sonuçların farklı değişkenler kullanılarak ölçüm verilerine uydurulması temeline dayanmaktadır ve birçok değişkenin olması nedeniyle çeşitli zorlukları vardır. Buna karşın TEM yöntemi doğrudan bir yöntemdir ve tabaka kalınlıklarının ve arayüzeylerin tespit edilmesi için kritik öneme sahiptir. Sonuç olarak, bu yapıların TEM ile incelenmesi, büyütme süreç koşullarının açıklanması ve malzemelerin iç yapılarının belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, GaAs/AlGaAs kuantum kuyularının katman kalınlıklarının ve arayüz geçişlerinin TEM yöntemiyle belirlenmesi önemlidir. Bu tezin amacı, GaAs/AlGaAs kuantum kuyulu yapıların katman kalınlıklarının ve çoklu katmanlar arasındaki arayüz davranışının TEM teknikleri ile belirlenerek açıklanmasıdır.

### 3. III-V GRUBU KIZILÖTESİ ALGILAYICILAR

#### 3.1. Yarıiletken Kavramı

Yarıiletkenler, hem iletkenlik hem de yalıtkanlık özelliği gösterebilen ve çok çeşit uygulama alanlarına sahip malzemelerdir. Yarıiletkenler, 1920’li yıllardan beri çalışılmakla birlikte, 1947’de ilk germanyum (Ge) transistörün icat edilmesiyle hayatımızdaki vazgeçilmez yerini almıştır.

Yarıiletkenler, katıların en ilginç ve en önemli sınıfını oluştururlar. Yarıiletkenler, yalıtkanlardan elektrik ve optik özellikleri bakımından farklıdır. Yarıiletkenlerde iletkenlerdekinin tersine, sıcaklık ve yabancı madde yoğunluğu arttıkça elektriksel özdirenç azalmaktadır. Bu durum, yarıiletkenleri iletkenlerden ayıran en belirgin özelliğdir. Oda sıcaklığında yarıiletkenlerin özdirençleri  $10^{-2}$ - $10^9$   $\Omega$ .cm arasında değişebilmektedir [4].

Bağlı elektronlarla işgal edilmiş en yüksek enerjili bant *değerlilik bandı*, onu takip eden ve yapı içerisinde serbest halde elektronların bulunduğu banda ise *iletkenlik bandı* denir. Bu bantlar arasında kalan bölge ise *yasak enerji aralığı*, diğer bir deyişle *yasak bant aralığı* olarak tanımlanır. Yasak bant aralığı yarıiletkenlerin birçok özelliğini tanımlamakta kullanılan önemli bir değişkendir [2]. Yarıiletkenlerin yasak bant aralığı ~4 eV değerinden küçüktür.

Yarıiletkenlerin belirgin özelliklerinden biri de mutlak sıfır sıcaklığında (0 K) iyi bir yalıtkan olmalarıdır. Bu durumda iletim bandı tamamen boş olup, dolu değerlilik bandından yasak enerji aralığı kadar ayrılmıştır.

Yarıiletkenlerin iletkenliği genellikle sıcaklığa, aydınlatmaya, manyetik alana, basınca ve safsızlık atomlarının konsantrasyonuna bağlıdır. İletkenliklerinin kontrol edilebilir olması, yarıiletkenleri elektronik uygulamalar için en önemli malzemelerden biri haline getirmiştir [4,5].

### 3.2. Yarıiletkenlerin Sınıflandırılması

Günümüze kadar, farklı optoelektronik cihaz uygulamalarında kullanılabilen çok sayıda yarıiletken malzeme geliştirilmiştir. Bu malzemeler periyodik tablonun Çizelge 3.1’de verilen elementlerinin uygun şartlarda bir araya getirilmesi ile elde edilmektedir.

Çizelge 3.1 Yapay yarıiletkenlerin elde edildiği elementler

Periyot	II. Sütun	III. Sütun	IV. Sütun	V. Sütun	VI. Sütun
• 2	• -	• B	• C	• N	• O
• 3	• Mg	• Al	• Si	• P	• S
• 4	• Zn	• Ga	• Ge	• As	• Se
• 5	• Cd	• In	• Sn	• Sb	• Te
• 6	• Hg	• -	• Pb	• -	• -

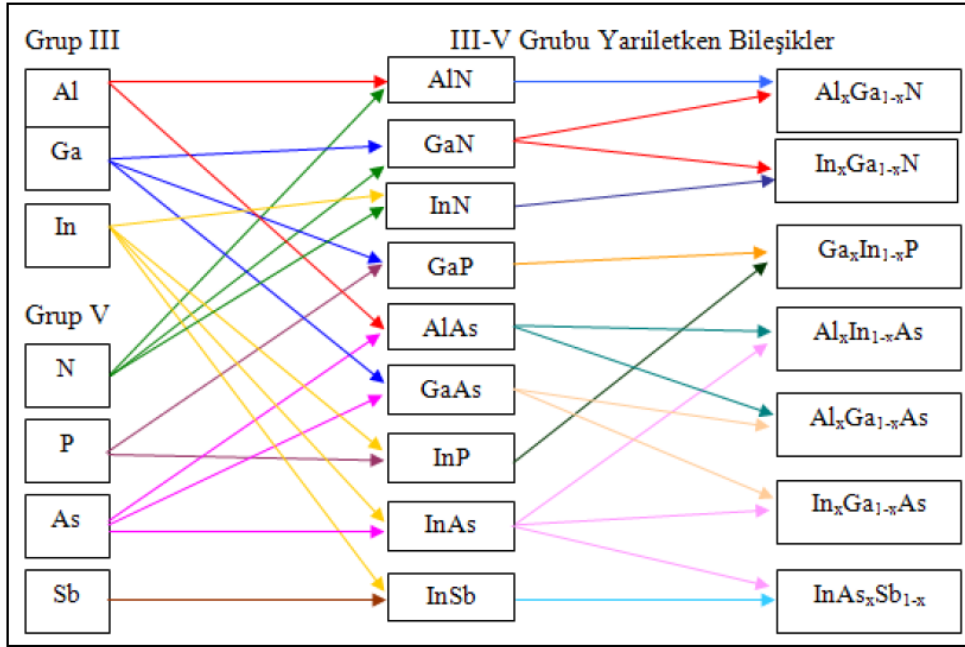
Yarıiletkenleri üç ana başlık altında gruplandırabiliriz;

- Elementsel Yarıiletkenler:* Ge ve Si gibi aynı atomlardan oluşan yarıiletkenlerdir. Bu atomlar kovalent bağlarla birbirine bağlanmışlardır ve doğada saf halde bulunmaktadır.
- Bileşik Yarıiletkenler:* Doğada bulunmayan ancak yapay büyüme teknikleri ile elde edilebilen GaAs, InP ve GaN gibi iki elementten meydana gelen yarıiletkenlerdir. Bileşik yarıiletkenlerde elektronegatiflikteki farklılıktan dolayı kristal bağlanma, iyonik ve kovalent bağlanmanın bir birleşimidir.
- Alaşım Yarıiletkenler:* Bileşiğe üçüncü bir elementin katılmasıyla meydana gelen yarıiletkenlerdir. Örneğin  $In_xGa_{1-x}As$ ,  $Al_xGa_{1-x}As$  ve  $In_xGa_{1-x}N$ . Burada x ilgili elementin alaşımdaki oranını temsil eder. Bununla birlikte  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$  ve  $Ga_xAl_{1-x}As_yP_{1-y}$  gibi dördü alaşım yarıiletkenleri elde etmek de mümkündür. Burada x ve y alaşımı meydana getiren elementlerin oranlarını gösterir [6].

### 3.3. III-V Grubu Yarıiletkenler ve Bileşimleri

III-V grubu yarıiletkenleri oluşturan grup III elementleri indiyum (In), galyum (Ga) ve alüminyum (Al), Grup V elementleri ise azot (N), arsenik (As), fosfor (P) ve antimon (Sb)'dur.

GaAs, InP, AlGaAs, InGaAs ve AlGaN tipik yarıiletken bileşimlerdir. Bunlar III ve V gruplarına ait olan elementlerin uygun biçimde birleşmesi ile oluşmaktadır [7]. III ve V gruplarına ait olan elementlerin yarıiletken bileşikleri Şekil 3.1'de verilmiştir.

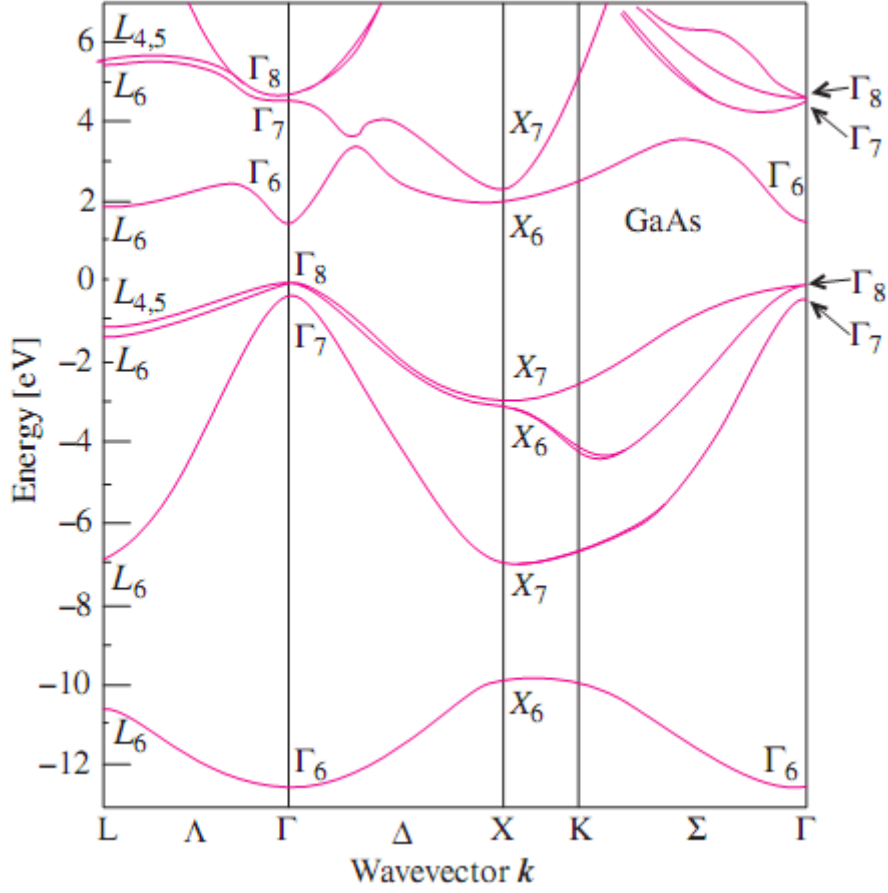


Şekil 3.1. III-V grubu yarıiletken bileşimler [8]

### 3.4. GaAs Yarıiletkeni ve Kristallografik Yapısı

Günümüzde GaAs yarıiletkeninin optoelektronik uygulamalarda yaygın kullanımı vardır. GaAs'in doğrudan bant aralığına sahip olmasının yanısıra bu yarıiletkenin optik ve elektriksel özellikleri iyi anlaşıldığından, pek çok aygıt bu malzeme kullanılarak geliştirilmiştir.

GaAs kristalinin değerlilik bandının  $k=0$  noktasına karşılık gelen  $\Gamma$  (0,0,0) tepe noktasında dejenerasyondan dolayı iki bant çakışmış durumdadır (Şekil 3.2). Bu iki banttan birisinin bant eğriliği diğerine göre daha azdır. Üstteki banda (eğriliği az olan bant) karşılık gelen etkin kütle, alttaki banda (eğriliği çok olan bant) göre daha büyüktür. Bunun sebebi etkin kütlelerin bant eğriliğiyle ters orantılı olmasıdır. Etkin kütlesi daha büyük olan banda *ağır boşluk bandı*, diğer banda ise *hafif boşluk bandı* denir.

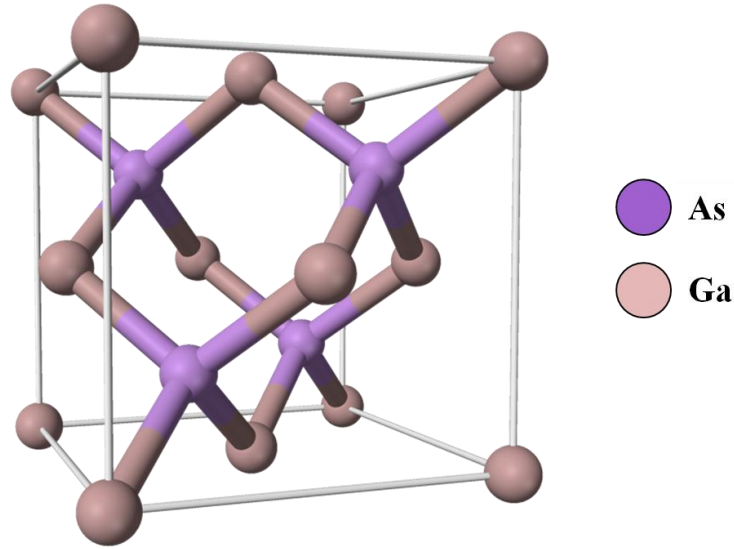


Şekil 3.2. GaAs'in bant yapısı. Oda sıcaklığında  $k=0$ 'da bant aralığı yaklaşık 1,42 eV'tur. [9]

Ga atomu üç, As atomu beş değerlik elektronuna sahiptir. Ga atomu üç elektronunu, As atomu da beş elektronunu dört yüzlü (tetrahedral) kovalent bağa katar. Bu gruptaki bağlanma tam olarak kovalent değildir. Bileşikteki iki element farklı olduğundan, bağ boyunca elektronların dağılımı simetrik değildir. Bundan dolayı yük yoğunluğu atomlardan daha büyük olana doğru kaymış durumdadır. Bunun sonucu olarak atomlardan biri net bir elektrik yükü fazlalığı taşır. Böyle bir

bağ *heteropolar* olarak adlandırılır. Bağdaki elektronların dağılımı, eksiliği fazla olan atoma doğru kayar. GaAs'te As atomu Ga'dan daha büyük bir eksiliğe sahiptir ve atom başına eksi bir yük fazlalığı vardır. Ga ise artı yük fazlalığına sahip olur. Atom başına aktarılan yük etkin yük olarak bilinir. Bu yük aktarması, GaAs yarıiletkenindeki bağlanmaya iyonik bir görünüm kazandırır. Bu yüzden III-V grubundaki yarıiletkenlerin bağlanmaları kovalent ve iyonik bileşenlerin karışımıdır [10].

GaAs, *Çinko Sülfür* yapısındadır. Çinko Sülfür yapı (0,0,0) ve (1/4,1/4,1/4) noktalarına yerleşmiş iki atomlu baza sahip, yüzey merkezli kübik yapıdır. Çinko Sülfür yapısının Elmas yapısından farkı, Çinko Sülfür yapısında baz atomlarından birinin farklı olmasıdır. Şekil 3.3'de GaAs yarıiletkeninin kristallografik yapısı gösterilmektedir.

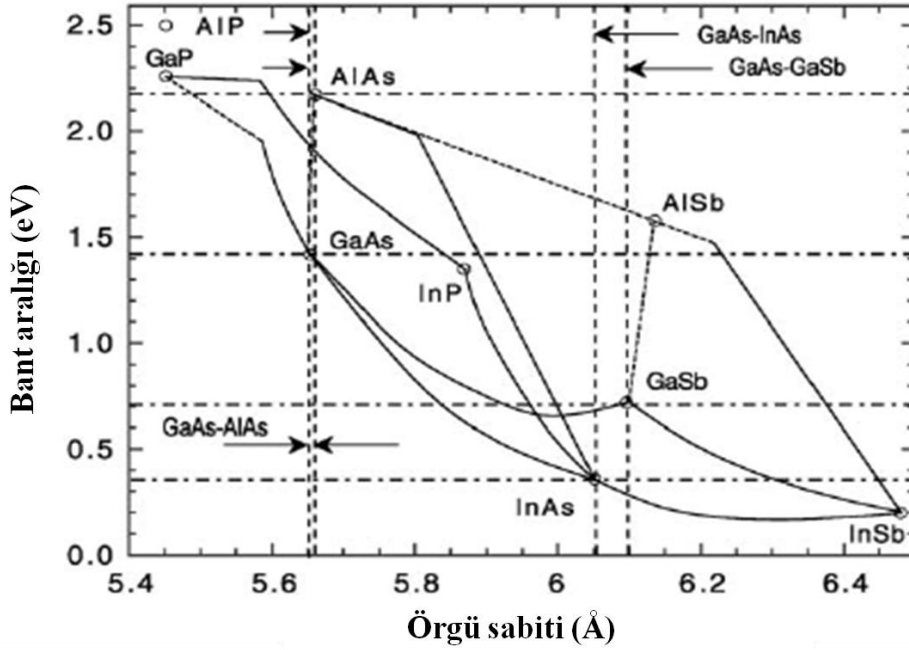


**Şekil 3.3.** GaAs'ın kristallografik yapısı [11]

Her Ga dört tane komşu As ve her As atomu dört tane komşu Ga atomuna sahiptir. GaAs örgü sabitini  $a$  ile ifade edersek, bu komşular arasındaki bağ uzunluğu  $r_o=3a/4$  kadardır ve bu bağlar  $109.47^\circ$  kadar açılı dört yüzlü bağ ile birbirinden ayrılır [12].

### 3.5. AlGaAs Alaşımı ve Özellikleri

İki veya daha fazla bileşiğin biraraya getirilmesi ile üçlü (ternary) veya dördü (quaternary) alaşımlar elde etmek mümkündür. Üçlü ve dördü alaşımların örgü sabitleri Vegard Yasası ile bulunur. Bu yasaya göre, elde edilecek alaşımın örgü sabiti; ana malzemelerin örgü sabitlerinin birbirlerine doğrusal olarak eklenmesiyle bulunur. Örneğin,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 'nin örgü sabiti ( $a_{\text{AlGaAs}}$ ), verilen bir x oranı için GaAs ( $a_{\text{GaAs}}$ ) ve AlAs ( $a_{\text{AlAs}}$ ) örgü sabitlerinden bulunur:  $a_{\text{AlGaAs}} = xa_{\text{AlAs}} + (1-x)a_{\text{GaAs}}$ . Burada (1-x) Ga atomunun, x ise ev sahibine katılan Al atomunun yapı içerisindeki oranıdır. Her iki atom da üçüncü grup atomu olduğundan, bunlar birbirleri ile yer değiştirir. Şekil 3.4'de III-V grubu yarıiletken alaşımlarının örgü sabitlerine bağlı olarak bant aralığı enerjileri verilmektedir.



Şekil 3.4. Çeşitli yarıiletkenlerin bant aralığına göre örgü sabitleri. İçerisinde boş noktalar külçe (bulk) halde ikili bileşikler, eğriler ise üçlü alaşımları göstermektedir [13]

Düzgün bir alaşım oluşturabilmek için elektronegatifliği ve atomik çapı birbirine benzer yarıiletkenlerin kullanılması gereklidir. İstenen bu durumun olmaması halinde, örgü uyumsuzluğu sorunu ortaya çıkar. Böyle malzemeler, homojen yapı tabakaları oluşturmak yerine, adacıklı yapıların oluşmasına neden olurlar [13]. Öte yandan, birim hücre yapısı farklı olan yarıiletkenler kullanıldığı

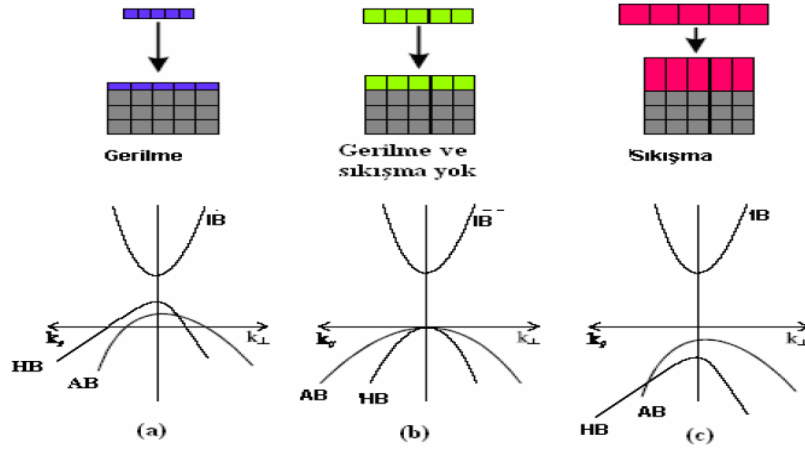
zaman ise ortaya faz ayrımına sahip tabakalar çıkmaktadır [13]. GaAs ve AlAs'ın birim hücresi Çinko Sülfür yapıda ve örgü sabitleri de birbiriyle çok uyumlu olduğu için AlGaAs alaşımı sorunsuz olarak büyütülebilmektedir.

Alaşım oluştururken, alaşımı oluşturan yarıiletkenlerin örgü sabitlerinin birbirine yakın olması kristal büyütme işlemi için çok önemlidir. Farklı örgü sabitlerine sahip tabakalar büyütüldüğünde, gerilmeler ya da yanlış yerleşmeler (dislokasyonlar) meydana gelir. Eğer yapı içerisinde gerilmeler meydana gelirse, örgü sabiti Poisson yasasına göre değişmeye başlar. Bu durumda, (3.1)'de verilen bir gerilme değişkeni tanımlanır. Burada  $d$  kritik kalınlık,  $a_w$  tabakanın örgü sabiti ve  $a_s$  alttaşın örgü sabitidir. Kritik kalınlık, yanlış yerleşmeler başlamadan önce gerilmiş tabakanın maksimum kalınlığı olarak tanımlanır. Bu kalınlık; yanlış yerleşmenin kinetiğine, büyütme şartlarına ve yüzey koşullarına bağlıdır.

$$d = \left( \frac{a_s - a_w}{a_w} \right) \quad (3.1)$$

Gerilmenin etkisi büyük oranda tabakanın kristal yapısına bağlıdır. Eğer büyütülen tabakanın örgü sabiti alt tabakanın örgü sabitinden küçük ise, tabakada aşağıya doğru daralma meydana gelir. Bu durumda kristalde gerilme olduğu söylenir. Bu durum Şekil 3.5a'da gösterilmektedir. Örneğin; GaAs üzerine GaN büyütüldüğü zaman GaAs'ın örgü sabiti GaN'ın örgü sabitinden büyük olduğu için GaN kendini alt tabakaya uydurmak isteyeceğinden yapıda gerilmeler başlar. Gerilmeye sebep olan neden As ile yer değiştiren N atomunun elektronegatifliğinin büyük ve atomik çapının küçük olmasıdır. Tersine, GaAs üzerine InAs büyütüldüğü zaman GaAs'ın örgü sabiti InAs'dan daha küçük olduğu için tabakada yukarıya doğru genişleme başlar. Bu durumda kristalde sıkışma olduğu söylenir. Bu durum Şekil 3.5c'de gösterilmektedir. Şekil 3.5'de bu durumlara karşılık gelen bant yapıları da verilmiştir. Görüldüğü gibi, gerilme durumunda bant aralığı küçülür. Sıkışma durumunda ise, bant aralığı artar. Gerilme ve sıkışma durumlarından, ağır ve hafif boşluk arasındaki dejenereliğin ortadan kaldırılmasında yararlanılabilir [14].





**Şekil 3.5.** Örgüdeki gerilmenin etkisi ve yarıiletkenlerin bant yapıları. a) Gerilme durumu, b) gerilmenin veya sıkışmanın olmadığı durum ve c) sıkışma durumu. Burada AB: Ağır Boşluk, HB: Hafif boşluk bandını göstermektedir [14].

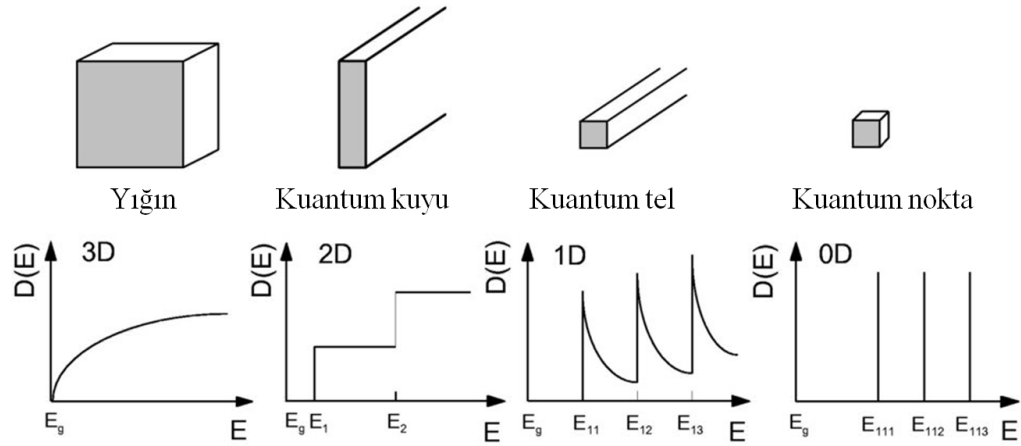
### 3.6. GaAs/AlGaAs Çoklu Kuantum Kuyulu Yapıların Oluşumu

İnce bir yarıiletken tabakada elektronların/boşlukların sınırlandırılması onların davranışlarında değişikliğe yol açacaktır. Bu değişiklikler enerji ve durum yoğunluğu ifadelerinde gözlenir. Elektronları, içinde buldukları ortamı farklı şekillerde küçülterek, iki boyutlu kuantum kuyuları, bir boyutlu kuantum çubukları (telleri) ve boyutsuz kuantum noktaları içerisinde sınırlandırmak mümkündür. Elektronun serbestlik derecesini  $D_f$  ve sınırlama yönlerini  $D_c$  ile gösterirsek bütün katı sistemler için  $D_f + D_c = 3$  şeklindedir. Dört boyutsal sistem için bu durum aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- (i) Külçe yapıda, elektron hareketi genellikle serbest ve enerji tayfı da sürekli. Bunun sonucu olarak birim enerji aralığındaki izinli durumların sayısını veren durum yoğunluğu da sürekli olur.
- (ii) İki boyutlu kuantum kuyularında, toplam enerji, sınırlandırılmış doğrultudaki kuantumlanmış seviyeler ile, sınırlandırılmış doğrultuya dik olan düzlemdeki kinetik enerjinin toplamına eşittir. Durum yoğunluğu, her bir basamağı  $n$ 'inci alt banda karşılık gelen bir merdiven gibidir.

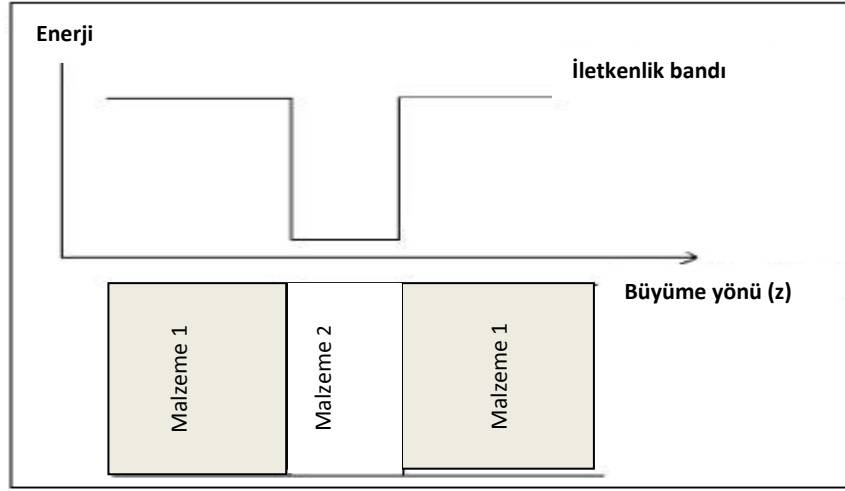
- (iii) Bir boyutlu kuantum telinde enerji, iki boyutta sınırlandırılmış seviyeler ile; tel uzunluğu boyunca sürekli olan enerjinin toplamına eşittir. Durum yoğunluğu farklıdır çünkü durum yoğunluğu her bir alt bandın tabanında birbirinden ayrılır daha sonra enerjinin artmasıyla birlikte azalır.
- (iv) Sıfır boyutlu kuantum noktalarında, elektron enerjisi tamamen kuantumlanmış ve durum yoğunluğu delta fonksiyonunun sınırlı bir serisi olmuştur.

Şekil 3.6'de sistemin boyutu tanımlanan dört farklı şekilde şematik olarak gösterilmektedir [15,19].



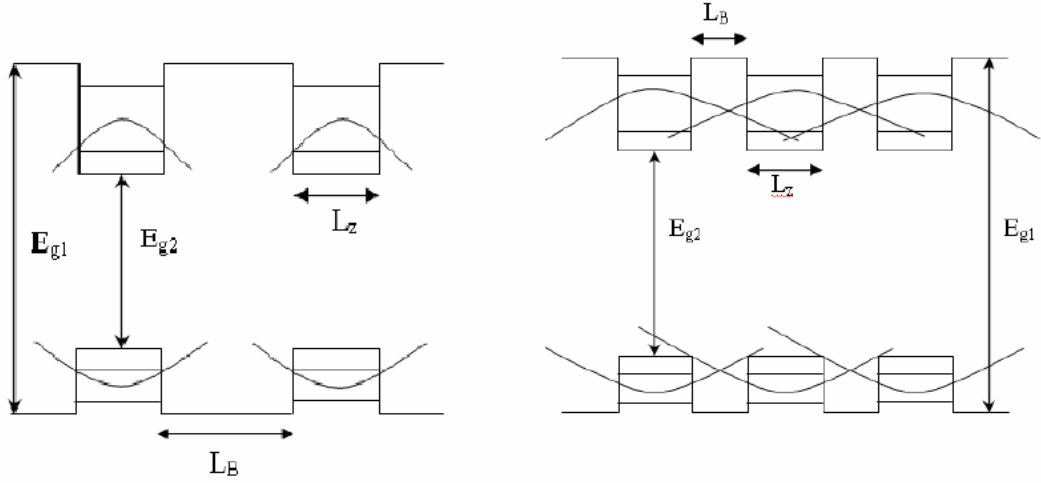
**Şekil 3.6.** Kuantum yapılar ve bu yapılar için durum yoğunluğu  $D(E)$ 'nin enerjiye göre değişimi [17]

Daha büyük bant aralıklı iki malzeme arasında daha düşük bant aralıklı yarıiletken malzeme yerleştirildiği zaman kuantum kuyusu oluşturulur. Dar bant aralıklı yarıiletken tabaka *kuyu*, geniş bant aralıklı yarıiletken tabaka ise *engel* adını alır. Elektronlar x ve y doğrultusunda serbest hareket ederken, kuyu oluşumu, z doğrultusunda elektronların hareketini sınırlar. Kuyunun genişliği ( $L_z$ ) yeterince küçük olduğu zaman ( $L_z < 100 \text{ \AA}$ ) kuyuda bulunan elektronların hareketi z yönünde kuantumlanmıştır ve enerji seviyeleri büyüme doğrultusunda kesiklidir [14, 15, 18]. Şekil 3.7'de kuantum kuyu yapısının bant diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Kuantum kuyu yapısının bant diyagramı [18]

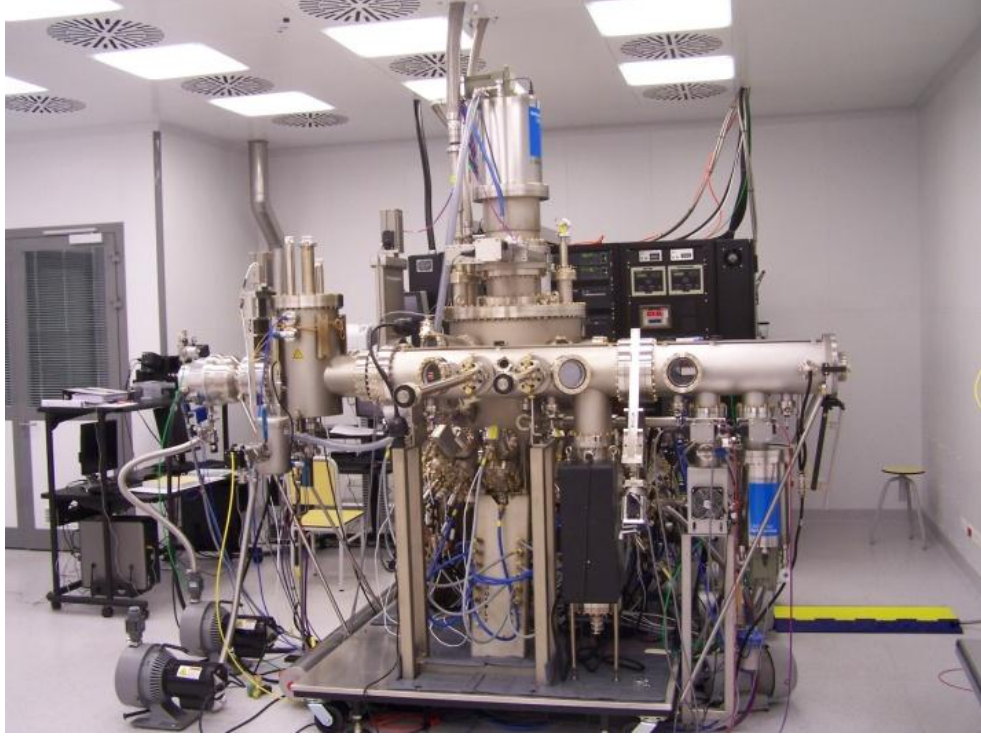
Tekli kuantum kuyulu yapılar bir araya gelerek çoklu kuantum kuyulu yapıları oluşturur. Kuantum kuyulu yapılarda engeli oluşturan yarıiletken tabakalar yeterince geniş ise, kuantum kuyusunda bulunan taşıyıcıların dalga fonksiyonları, engelin içinde fazla ilerleyemeden sönmeye uğrarlar. Yani, her kuyu sanki birbirinden ayrışık gibi davranır. İnce engel tabakası, taşıyıcıların dalga fonksiyonlarının ardışık kuyularda örtüşmesine olanak tanır yani taşıyıcılar bir kuyudan diğer kuyuya geçebilirler. Bu olay sonucunda her bir kuyudaki kesikli enerji seviyeleri “mini bant” adı verilen bantlara ayrılır. Bu tip bant yapısına sahip olan kuantum kuyusu sistemleri *süperörgü* olarak adlandırılır. Şekil 3.8’de çoklu kuantum kuyusu ve süperörgü sistemlerinin bant diyagramları verilmiştir. Burada  $L_B$  engel genişliği,  $L_z$  ise kuyu genişliğidir.



Şekil 3.8. a) Çoklu kuantum kuyusu sistemi ve b) Süperörgü [19]

### 3.7. GaAs/AlGaAs Çoklu Kuantum Kuyulu Yapılarının Moleküler Demet Epitaksi Tekniği ile Büyütülmesi

Yarıiletken üretme tekniklerinin en önemlilerinden biri olan Moleküler Demet Epitaksi (Molecular Beam Epitaxy, MBE) tekniği, çok yüksek vakum (ultra high vacuum, UHV) şartları altında, bir kristal yüzey ile atom veya ısı enerjili moleküler demetlerin reaksiyonunu içeren bir epitaksiyel büyütme sürecidir. Moleküler demet, kaynak elementin buharlaşacak düzeye kadar ısıtılması ile elde edilir. İstenilen koşullarda ince film üretebilmek için kaynak element mümkün olduğunca saf olmalı ve büyütme işlemi çok yüksek vakum ortamında gerçekleştirilmelidir. UHV şartlarından dolayı MBE büyütmesi termodinamik dengeden bağımsız sayılabilir. Şekil 3.9'da MBE sistemi görülmektedir.



**Şekil 3.9.** Anadolu Üniversitesi, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu MBE sisteminin genel görünüşü

MBE yöntemiyle yarıiletken filmlerin büyütülmesi, UHV koşulları altında uygun sıcaklıkta tutulan kristal alttaş yüzeyi ile büyütülmek istenen malzemeye ait elementlerin moleküler demetleri arasındaki tepkime ile oluşur. Kaynak hücreleri alttaş yüzeyine doğru hedeflenmiştir ve moleküler demet akısı, hücrelerin sıcaklığı ve çıkış vanalarıyla kontrol edilir. Hücrelerden çıkan moleküler demetler kontrollü olarak, ısıtılmış yarıiletken alttaşa doğru doğrusal bir yolda hareket ederler. Moleküler demetlerin çıkışına izin vermek ya da engel olmak için, her bir kaynağın kendine ait dışarıdan kontrol edilen bir kesicisi (shutter) vardır. Kesiciler saniyenin onda biri kadar bir zamanda açılır ve kapanır. Bu süre, bir atomik tabaka kalınlığındaki keskin arayüzeyler ile sonuçlanan tipik 1-2 monotabaka/s'lik MBE büyüme hızından oldukça kısadır [21].

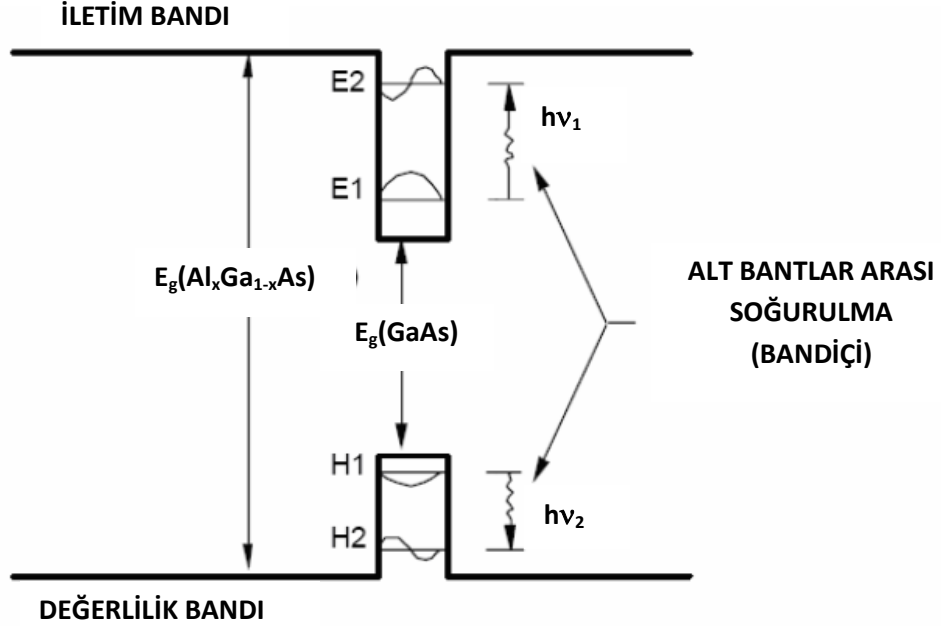
GaAs gibi III-V grubu yarıiletken bileşiklerinde, ısıtılmış yüzeye çarpan bileşen elementlerinden biri diğerine göre yüzeyden daha hızlı uzaklaşabilir. Bu nedenle MBE ile teknolojik kalitede III-V bileşiklerini meydana getirmek için

grup III ve V elementlerine ait olan moleküllerin demet akıları birbirinden farklı olmalıdır.

Kinetiksel olarak kontrol edilen MBE büyütmesi, yüzeyden salınma, yüzeyde göç etme, yüzeye tutunma ve bileşen atomlarının alttaş kristal örgüsüne dahil olması gibi bir dizi olay içerir. Örneğin GaAs büyütmesini; alttaşa çarpan  $As_2$  molekülleri önce alttaş yüzeyine zayıfça tutunurlar. Serbest yüzey  $500\text{ }^{\circ}C$ 'nin üzerinde iken (Ga atomlarının yokluğunda),  $As_2$  çok küçük yapışma katsayısına sahiptir ve kolaylıkla yüzeyden buharlaşabilir. Yüzeye tutunan  $As_2$  atomlarının bölünmesi ve daha sonra GaAs örgüsüne dahil olması sadece, yüzeyde göç ederken çiftlenmiş Ga örgü kenarlarıyla karşı karşıya geldiğinde meydana gelir. Bu şartlar altında büyüyen ince film, alttaşın kristal yapısıyla benzer bir yapıya sahip olur. Böylece büyütülen GaAs tabakası epitaksiyeldir ve GaAs tabakasının büyütülmesi sadece As türlerinin fazla akısına ihtiyaç duyar [22].

### 3.8 GaAs/AlGaAs Çoklu Kuantum Kuyulu Kızılötesi Foto Algılayıcılar

QWIP'ler, iletim bandı veya değerlilik bandı içerisindeki soğurmaya bağlı olarak kızılötesi ışınları algılayabilen yarıiletken aygıtlardır. Kızılötesi ışınların algılanması için bir kuantum kuyusundan yararlanma fikri ilk olarak 1977 yılında Esaki ve Sakaka tarafından ortaya atıldı [20, 21]. QWIP'lerde elektron, iletim bandı içerisindeki temel enerji düzeyinden birinci uyarılmış düzeye uyarılarak, çok uzun dalgaboylu kızılötesi (VLWIR), orta dalgaboylu kızılötesi (MWIR) ve kısa dalgaboylu kızılötesi (SWIR) bölgelerindeki ışınlar soğurur. Elektronun iletim bandı veya değerlilik bandı içerisinde enerji düzeyleri arasında uyarılması *bant içi geçiş* olarak tanımlanır. Şekil 3.10, bu geçişin nasıl olduğunu göstermektedir. Kuantum kuyulu yapının tasarlanmasında, ışıkla uyarılmış taşıyıcıların kuantum kuyusundan kaçması ve ışık akımı olarak toplanması önemli rol oynamaktadır. QWIP algılayıcılar büyük esnekliğe sahiptir. Çünkü tepe ve kesim dalgaboyu, kristal katmanların kalınlığı (kuantum kuyusu genişliği) ve elementlerin birleşme oranı (engel yüksekliği) değiştirilerek ayarlanabilir. Uygun kuyu genişliği ve engel yüksekliği seçilerek bir QWIP'in algılama dalga boyu MWIR bölgesinden VLWIR bölgesine kadar ayarlanabilir.



Şekil 3.10. Alt bantlar arası soğurulma şeması [21]

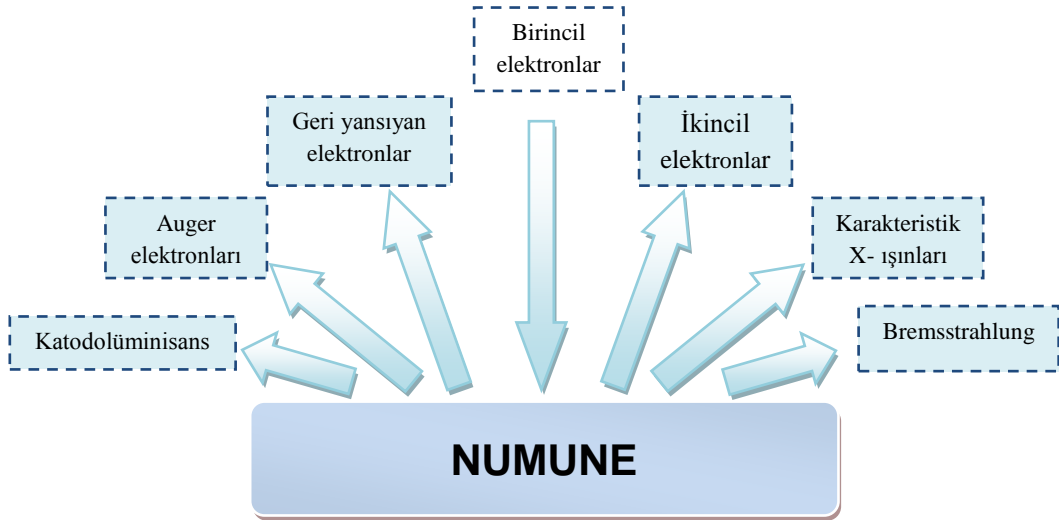
Yakın zamana kadar kızılötesi algılayıcıların en önemlisi Cıva Kadmiyum Telür (Mercury Cadmium Telluride, MCT) katkısız foto algılayıcıydı. MCT, kızılötesi algılayıcılar içinde en fazla çalışma yapılan yarıiletken malzemedir ve diğer bütün kızılötesi foto algılayıcılarla karşılaştırılan tek yarıiletken sistemdir [22]. MCT foto algılayıcı çok yüksek kuantum verimliliğine ve algılayıcılığa sahiptir. Bütün bu üstünlüklere rağmen bu malzemenin geleceği belirsizdir çünkü bu malzemenin büyütülmesi, işlenmesi ve kararlılığı ile ilgili zorluklar söz konusudur.

GaAs/AlGaAs yapısı, üzerinde en fazla çalışılan III-V yarıiletken malzeme olduğundan, QWIP algılayıcılar için en fazla kullanılan malzemedir. İlk n-tipi QWIP 1987 yılında Levine ve ekibi tarafından iletim bandı içerisinde alt bantlar arası soğurmaya dayandırılarak, GaAs/AlGaAs yapı üzerinde geliştirilmiştir [22]. Bu aygıtın tayfsal tepesi 10,8  $\mu\text{m}$  olarak kaydedilmiştir. Ayrıca ilk p-tipi QWIP 1991 yılında yine Levine ve ekibi tarafından geliştirilmiş [23] ve yine aynı yıl Bethea ve ekibi ilk kızılötesi görüntüyü elde etmeyi başarmışlardır [20].

## 4. ELEKTRON MİKROSKOPİSİ

### 4.1. Elektron-Madde Etkileşimi

Malzemelerin iç yapılarını incelerken atomik seviyede malzeme karakteristiklerini belirleyebilmemiz için atomdan daha küçük parçacıklara ihtiyaç duyarız. Bu parçacıklardan en sık kullanılanı elektronlardır. Elektron mikroskopları, kaynak olarak elektronların kullanıldığı, bu tür analizlerin yapılabilmesi için sıkça kullanılan cihazlardır. Elektronların madde ile etkileşimi sonucu oluşan sinyaller ve bunların kullanımı farklı elektron mikroskoplarının ortaya çıkmasına neden olmuştur. Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM) ile TEM bunlar içinde en önemlileri ve en çok kullanılanlarıdır. Elektronların kalın ve ince bir numune ile etkileşime girmesi sonucunda farklı sinyaller oluşur. Oluşan bu sinyallerden SEM’de kullanılanları Şekil 4.1’de gösterilmektedir.

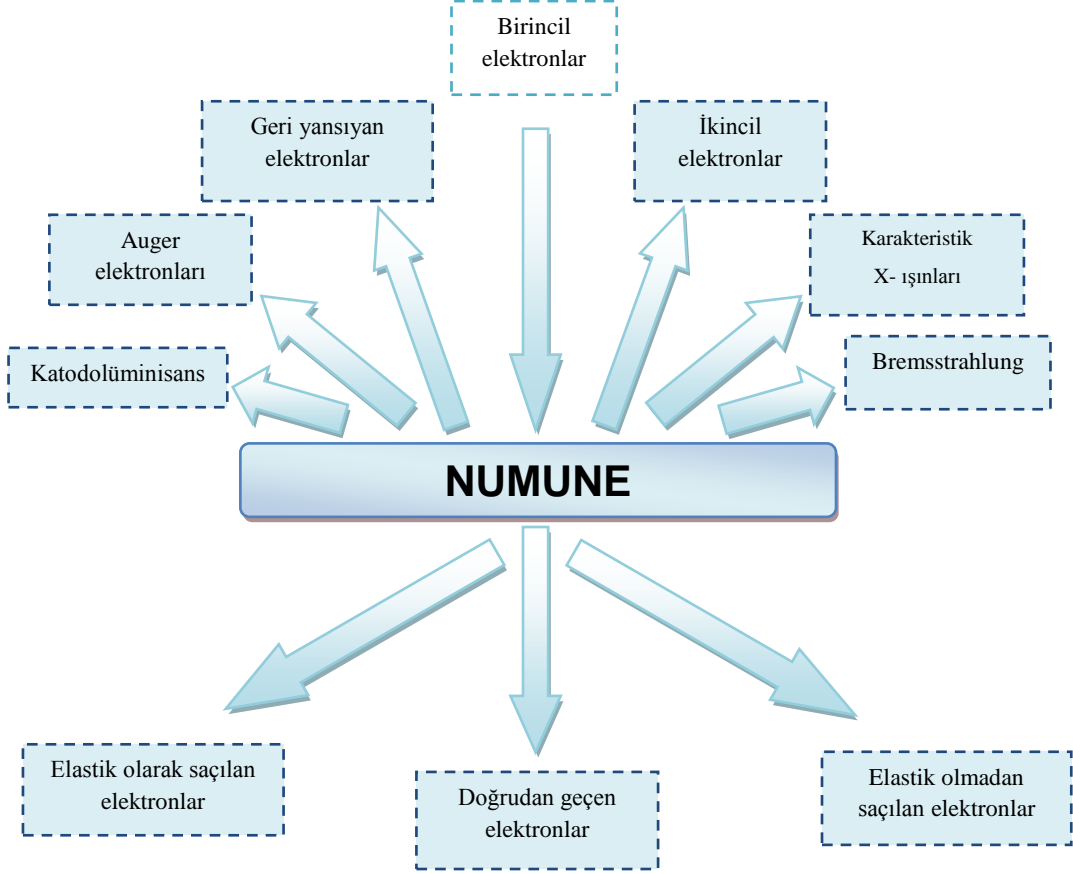


Şekil 4.1. SEM’de kullanılan sinyaller [23]

SEM için ikincil elektronlar (secondary electrons, SE) ile geri yansıyan elektronlar (backscattered electrons, BSE) diğerlerine göre daha önemlidir. SEM’de bu sinyallerden faydalanarak malzemenin yüzeyi hakkında bilgi edinilir. TEM’de ise elastik olarak saçılan (elastically scattered electrons) ve doğrudan (saçılmaya uğramadan) geçen elektronlar önemlidir. Bu elektronlardan



yararlanılarak malzemenin iç yapısı hakkında bilgi edinilir. Şekil 4.2’de TEM’de kullanılan sinyaller gösterilmektedir.



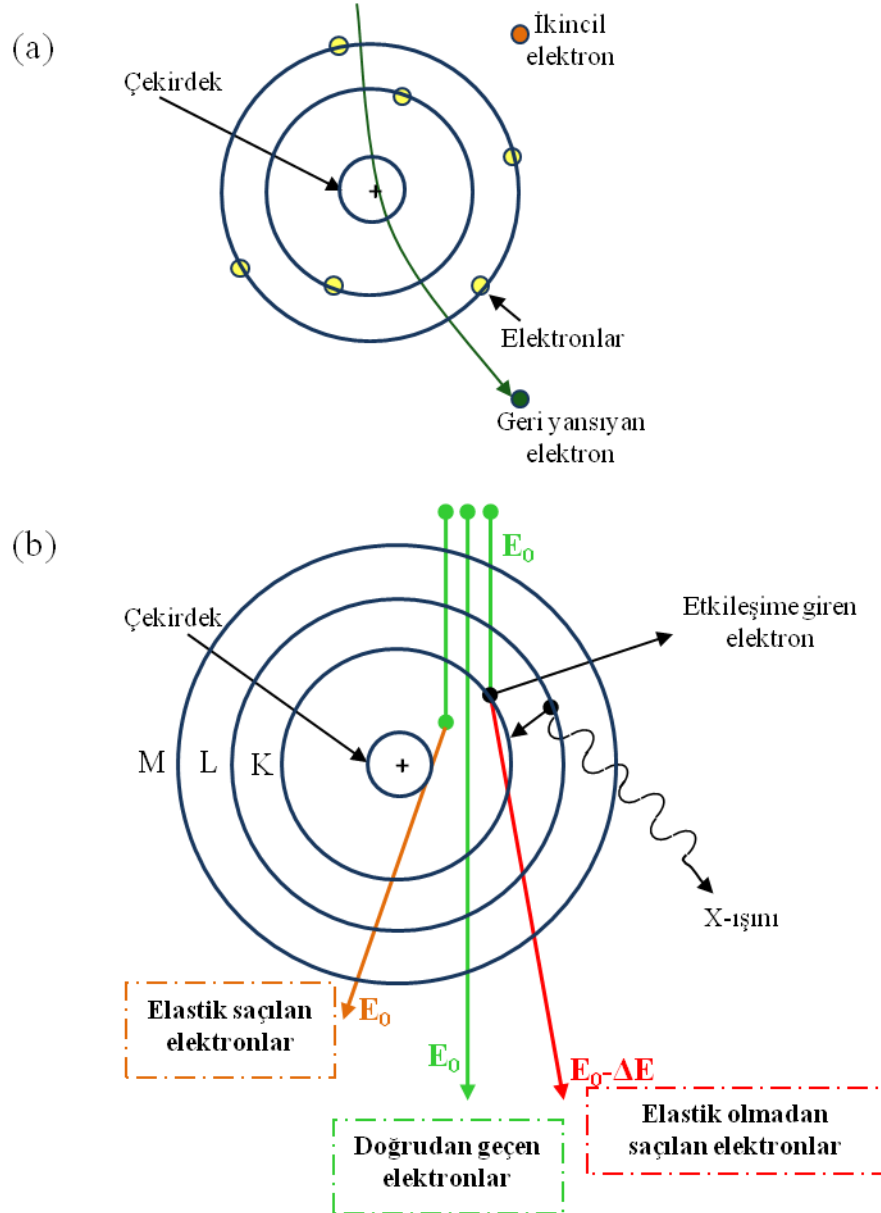
Şekil 4.2. TEM’de kullanılan sinyaller [23]

Mikroskobun elektron tabancasından çıkarak incelenecek malzemeye ulaşan hızlandırılmış elektronlar, malzemenin atomlarına enerjilerini aktarır ve malzemenin atomlarındaki elektronların daha dış yörüngelere çıkmalarına sebep olur. Fakat çekirdeğin elektrostatik çekiminden dolayı dış yörüngedeki elektronlardan biri, yeri boşalan elektronun yerini alır ve fazla enerjisini elektromanyetik dalga olarak yayımlar. Atomların farklı kabuklarındaki elektronları, bir alt seviyedeki kabuklara geçerken kabuklar arasındaki enerji farkı kadar karakteristik ışımaya yapar. Bu durumu (4.1)’de gösterilen Moseley’s kanunu ile açıklayabiliriz:

$$E = A(Z - 1)^2 \quad (4.1)$$

Burada  $A$  kabuğa bağılı sabit,  $Z$  atom numarasıdır [6].

SEM ve TEM'deki elektron-madde etkileşimi temelde, gönderilen birincil elektronların maddenin atomuyla etkileşmesine dayanır. Şekil 4.3 (a) SEM ve (b) TEM'deki elektron-atom etkileşimini göstermektedir.



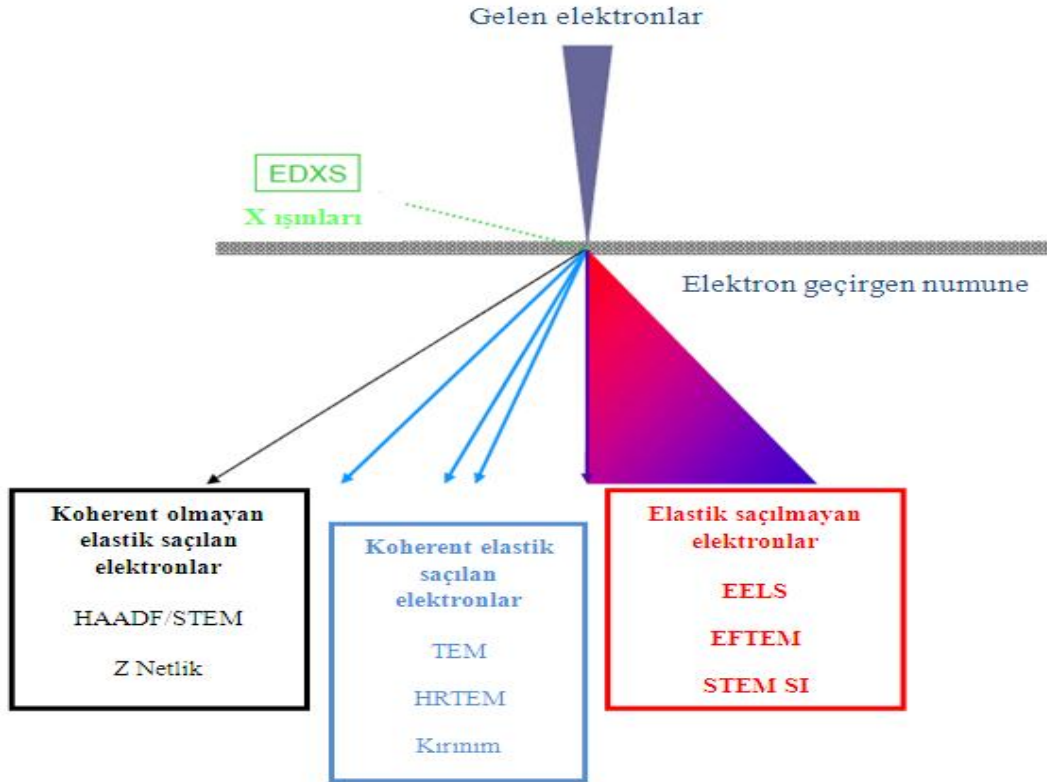
Şekil 4.3. (a) SEM ve (b) TEM'deki elektron-atom etkileşimi [23]

## 4.2. TEM Teknikleri

TEM atomik seviyede görüntü, kimyasal analiz imkanı ve kristallografik bilgi sağladığı için çok çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Bunların belli başlıları aşağıda sıralanmaktadır:

- Faz içeriğinin ve fazların tane boyutunun belirlenmesi
- Mekanik deformasyonun meydana gelip gelmediğinin belirlenmesi
- Bir iç yapıda mikron-altı boyutlar için bir fazın amorf mu kristal yapıda mı olduğunun belirlenmesi
- Farklı kristaller arasında meydana gelen hataların şeklinin belirlenmesi.

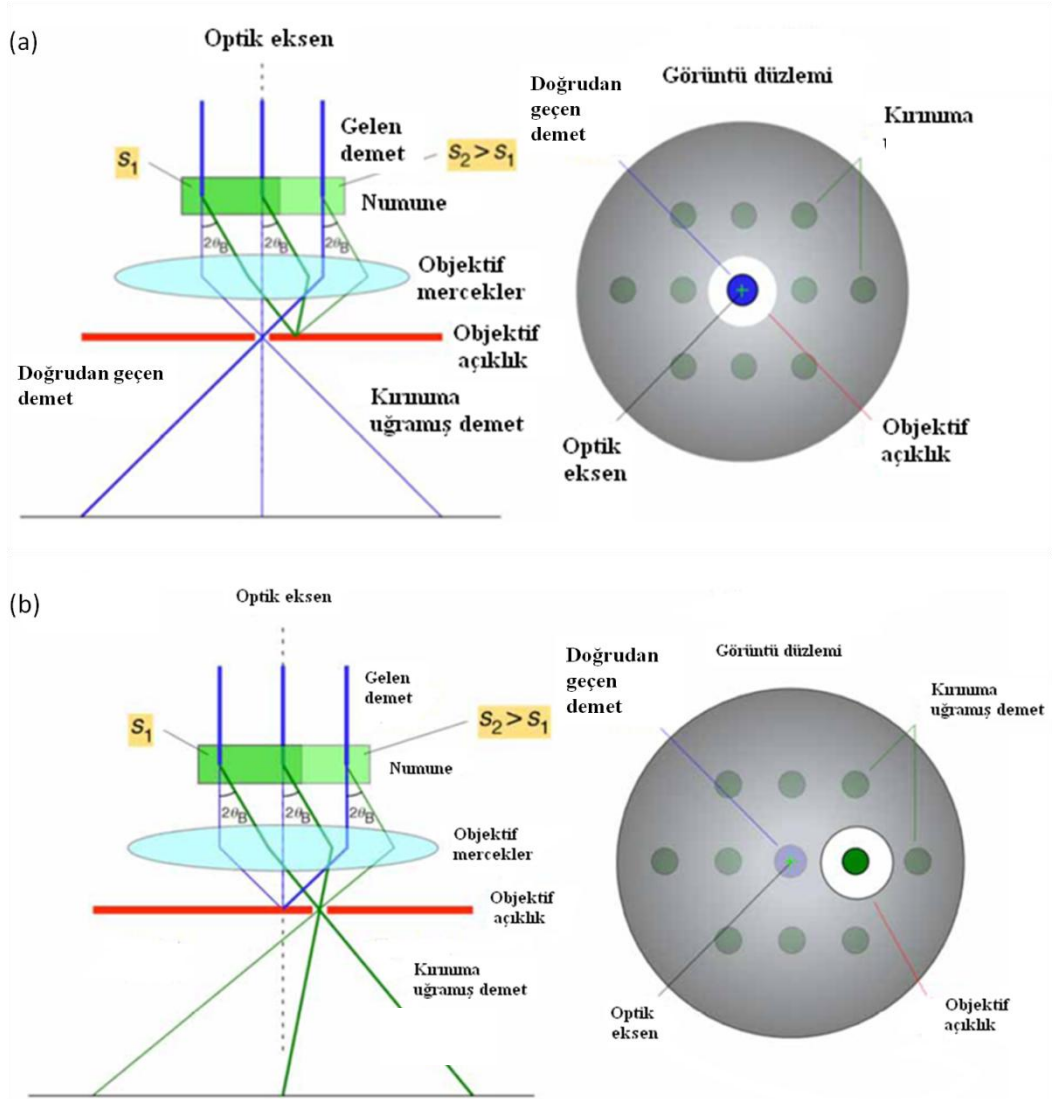
TEM’de elektron-madde etkileşimi sonucunda farklı sinyaller toplanmaktadır. Bunlar; elastik olarak saçılan elektronların, doğrudan geçen elektronların, elastik olmadan saçılan elektronların ve karakteristik X-ışınlarının oluşturduğu sinyallerdir. Her bir sinyal farklı tekniklerde kullanılmaktadır [8]. Şekil 4.4’de TEM’de toplanan bu sinyaller ve hangi tekniklerde kullanıldıkları gösterilir.



Şekil 4.4. Elektron-madde etkileşimi sonucu oluşan sinyaller ve kullanıldıkları teknikler [23]

### 4.2.1. Aydınlık Alan ve Karanlık Alan Görüntüleme Tekniği

Doğrudan geçen elektronların kullanıldığı aydınlık alan (bright field, BF) görüntüleme tekniği ile elastik olarak saçılan elektronların kullanıldığı karanlık alan (dark field, DF) görüntüleme tekniği TEM’de temel netlik mekanizmalarına karşılık gelir. Şekil 4.5’de BF ve DF görüntüleme tekniklerinin çalışma prensipleri şematik olarak gösterilmiştir.

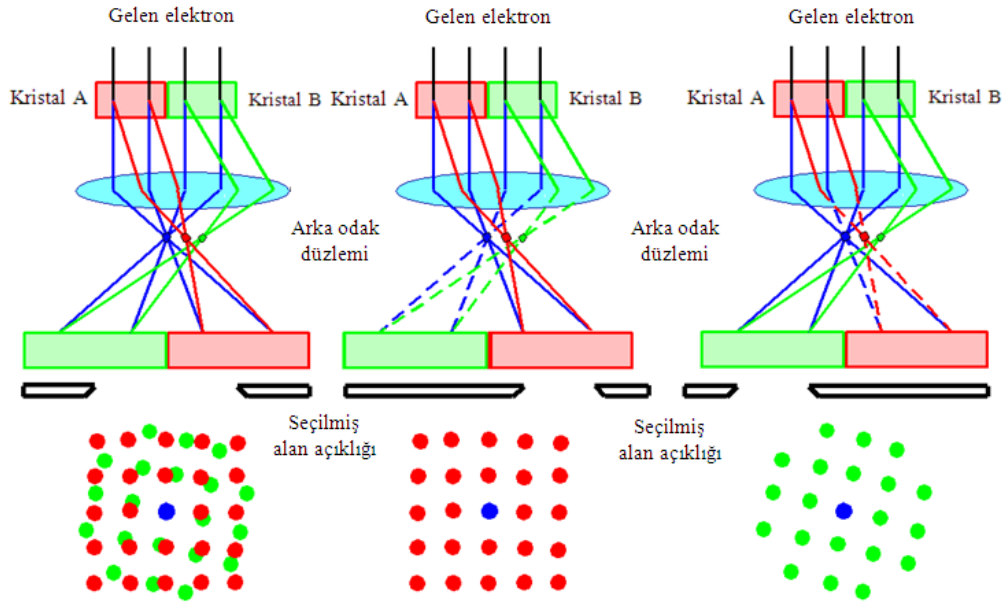


Şekil 4.5. (a) BF ve (b) DF görüntüleme tekniklerinin çalışma prensipleri [24]. S: açıklık (slit width)

#### 4.2.2. Seçilmiş Alan Kırınımı Tekniği

Elektronların dalgaboyları bilindiği sürece, düzlemler arası mesafe kırınım açısından hesaplanabilir. Ayrıca kristal simetri hakkında bilgi edinilebilir. Diğer kırınım teknikleriyle çok geniş alanlar taranırken TEM'deki kırınım tekniği ile nanometre boyutlarında inceleme yapılabilir.

Seçilmiş alan kırınımı (selected area diffraction, SAD) tekniğinde genel olarak kırınım örgüleri belirlenmiş bir yapıda, istenilen bölgenin kırınım örgüsü farklı açıklıklar yardımı ile elde edilir. Bu yöntem kristal yapıyı ve hataları belirlemede kullanılır. Şekil 4.6'da seçilmiş alan açıklığı ile numunenin farklı bölgelerinden alınmış kırınım ağlarının şekli gösterilmektedir.

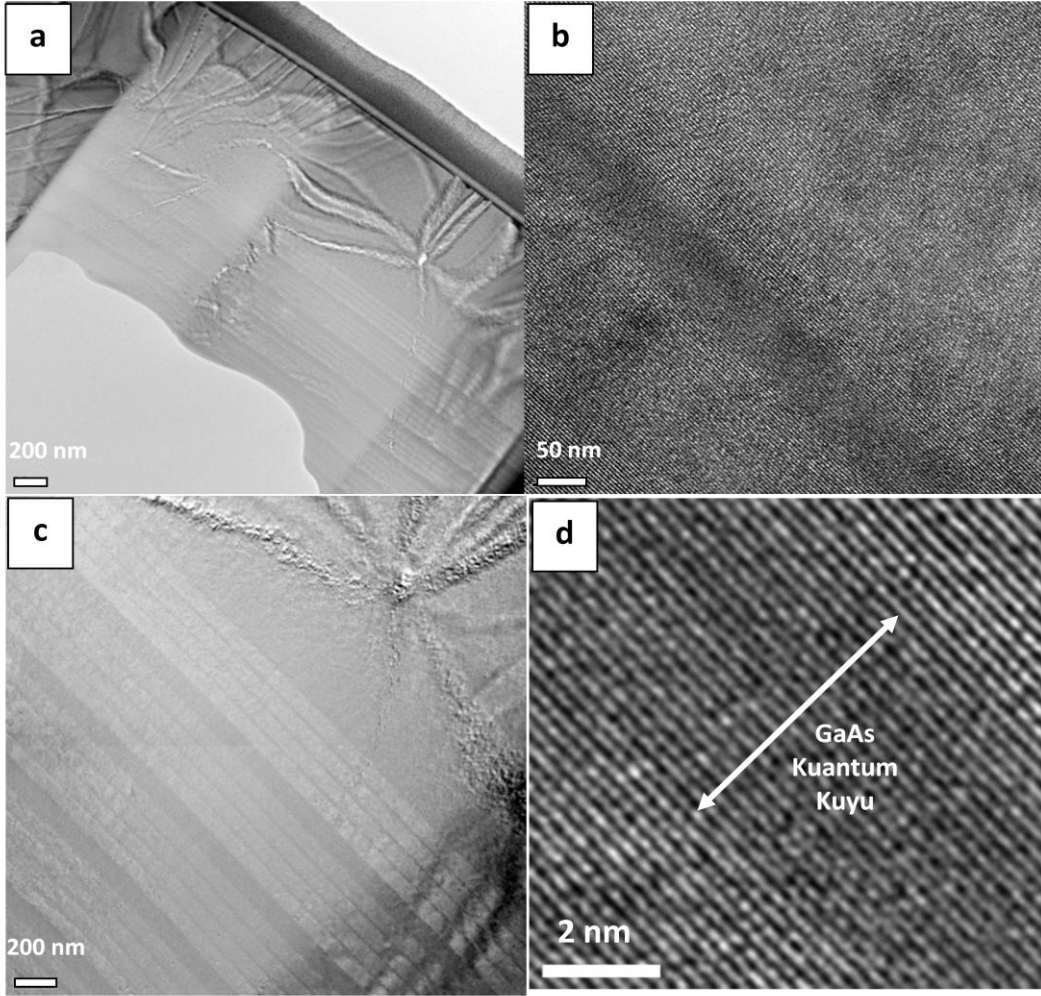


Şekil 4.6. SAD açıklığı ile numunenin farklı yerlerinden alınan kırınım ağları [24]

#### 4.2.3. Yüksek Çözünürlüklü Geçirimli Elektron Mikroskobu

Yüksek çözünürlüklü geçirimsiz elektron mikroskobu (high resolution transmission electron microscopy, HRTEM) yapısal hataların, ara yüzeylerin ve tane sınırlarının görüntülenmesinde kullanılmaktadır. Atom dizimleri doğrudan

görüntülenebilir. Şekil 4.7’de TEM ve HRTEM ile alınmış örnek görüntü gösterilmektedir.

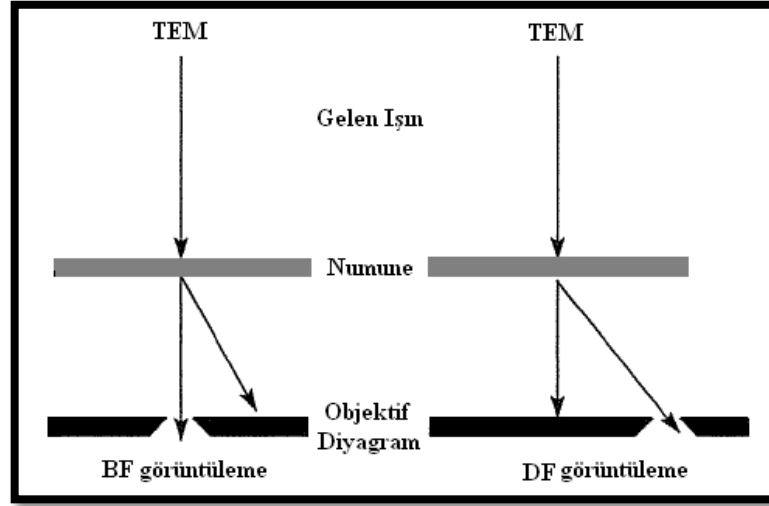


Şekil 4.7. (a-c) GaAs/AlGaAs kuantum kuyulu yapıların TEM görüntüsü. (b-d) HRTEM

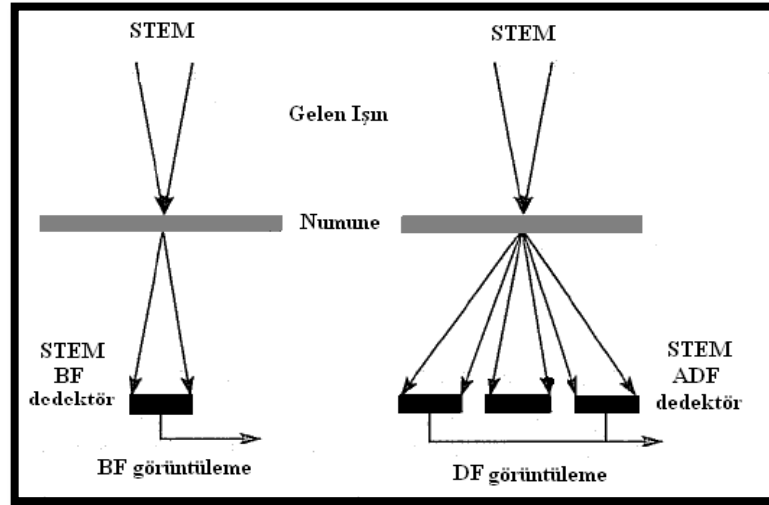
#### 4.2.4. Taramalı Geçirimli Elektron Mikroskobu

Taramalı geçirimli elektron mikroskobu (scanning transmission electron microscope, STEM), SEM ile benzer bir işlevi üstlenir ancak STEM kipinde numuneden geçen elektronların kullanılması, ayırma gücünün daha yüksek olmasını sağlar. STEM kipinde doğrudan geçen veya saçılmış demet, açıklıklar yerine algılayıcılar kullanılarak seçilir. Şekil 4.8a’da TEM kipinde BF-DF görüntü elde edilişi ve Şekil 4.8b’de STEM kipinde BF-DF görüntü elde edilişi şematik olarak gösterilmektedir. STEM kipi karanlık alan görüntüsünden farklı

olarak belirli açıda saçılan tüm elektronları toplama şansı verir ki bu sayede tek bir STEM HAADF veya ADF görüntüsü TEM’de oluşan birkaç karanlık alan görüntüsünün birleşimi gibidir.



(a)

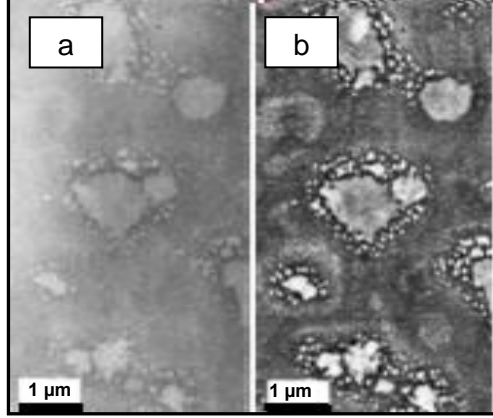


(b)

**Şekil 4.8.** (a) TEM kipinde BF-DF görüntü elde edilişi ve (b) STEM kipinde BF-DF görüntüsü [14]

STEM görüntüleme tekniğinde elektron demeti numune üzerine odaklanarak düşürüldüğü için geleneksel TEM görüntüleme tekniğine göre görüntü çözünürlüğü daha yüksektir. Ayrıca STEM tekniği ile birlikte atom

ağırlığına bağlı olarak elde edilen yüksek açılı halkasal karanlık alan görüntüleme tekniğinden elde edilen görüntülerde netlik mekanizmaları daha gelişmiştir. Şekil 4.9'da SiO<sub>2</sub> ve Cl kabarcıklarının TEM ve STEM kiplerindeki görüntüleri karşılaştırılmaktadır.



Şekil 4.9. SiO<sub>2</sub> ve Cl kabarcıklarının (a) TEM görüntüsü ve (b) STEM görüntüsü [18]

TEM kipinde kullanılan elektron enerji kaybı tayfı (electron energy loss spectroscopy, EELS) ile ancak enerji kayıp değerleri birbirine yakın olan elementlerin haritalaması yapılabilmektedir. STEM kipinde ise, tarama fonksiyonu olduğundan elementel haritalama yapılabilmektedir. Bununla birlikte kırınım-netlik görüntülerinde, netlik (contrast) TEM kipinde daha iyidir. Ayrıca TEM'de kütle-kalınlık karşıtlık görüntüleri STEM'dekine göre daha kalitelidir. Alan yayılım tabancası (field emission gun, FEG) olmadan, STEM görüntüleri TEM görüntülerinden daha gürültülü olur. STEM görüntülerinde çözünürlük daha zayıftır çünkü demet boyutu çözünürlüğü engeller. Bununla birlikte netlik daha fazladır. STEM'de TEM'e göre daha çok esneklik vardır çünkü algılayıcının toplama açısı değiştirilebilir ve değişken objektif açıklık yaratılabilir.

STEM'de saçılan elektronlar, halkalı karanlık alan (annular dark field, ADF) algılayıcı üzerine düşmekte ve bu, TEM ve STEM DF kiplerinin farklı olmasını sağlamaktadır. TEM DF görüntüleri genellikle sadece belli oranda saçılmış elektronların objektif açıklığından geçişine izin verilmesiyle oluşur.



Netlik STEM görüntülerinde önemli bir değişkendir. Netlik 3 şekilde değerlendirilebilir.

- 1) Kütle-kalınlık netliği
- 2) Z-netliği
- 3) Kırınım netliği

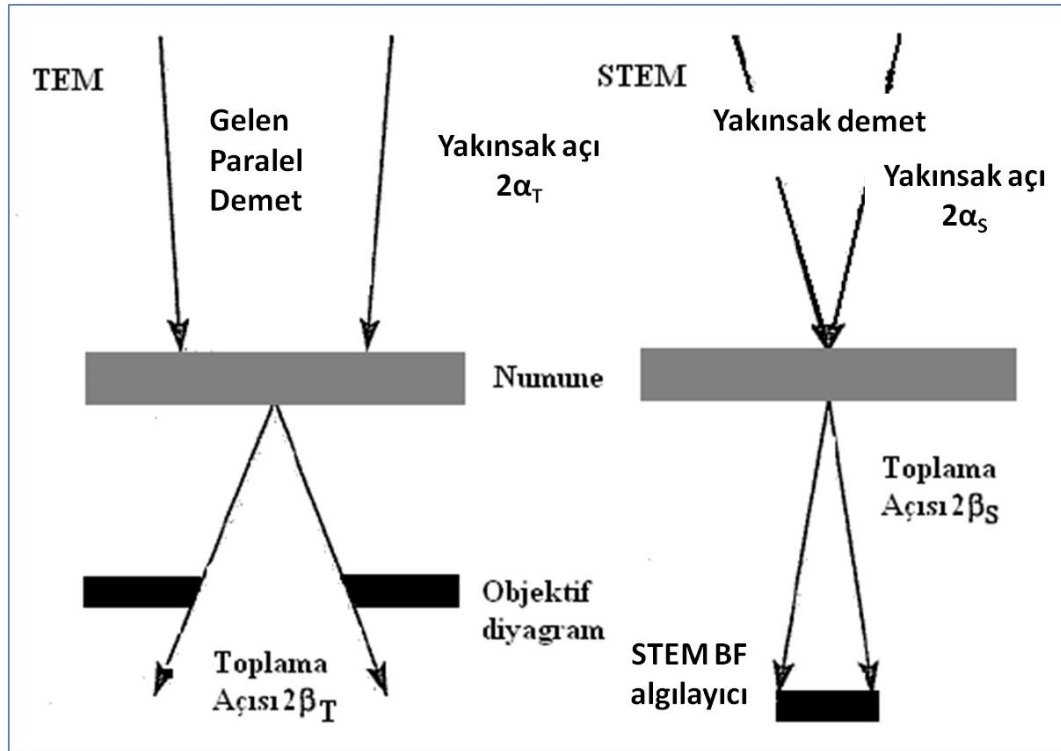
Güçlü netliğe sahip görüntü elde edebilmek için;

1) Gelen elektron demeti paralel olmalı ve yakınsak açı (convergence angle) çok küçük olmalıdır.

2) Numune iki demet durumuna eğimlendirilmelidir.

3) Sadece doğrudan gelen demet objektif açıklık tarafından toplanmalıdır.

Bu durumlar Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4.10. STEM ve TEM'de yakınsak ve toplama açısı [25]

STEM'in en önemli özelliği çok yönlü olmasıdır. Atomik çözünürlük görüntüleri ve kırınım desenleri nanometre seviyesinde numunenin aynı bölgesinden eş zamanlı olarak elde edilir.

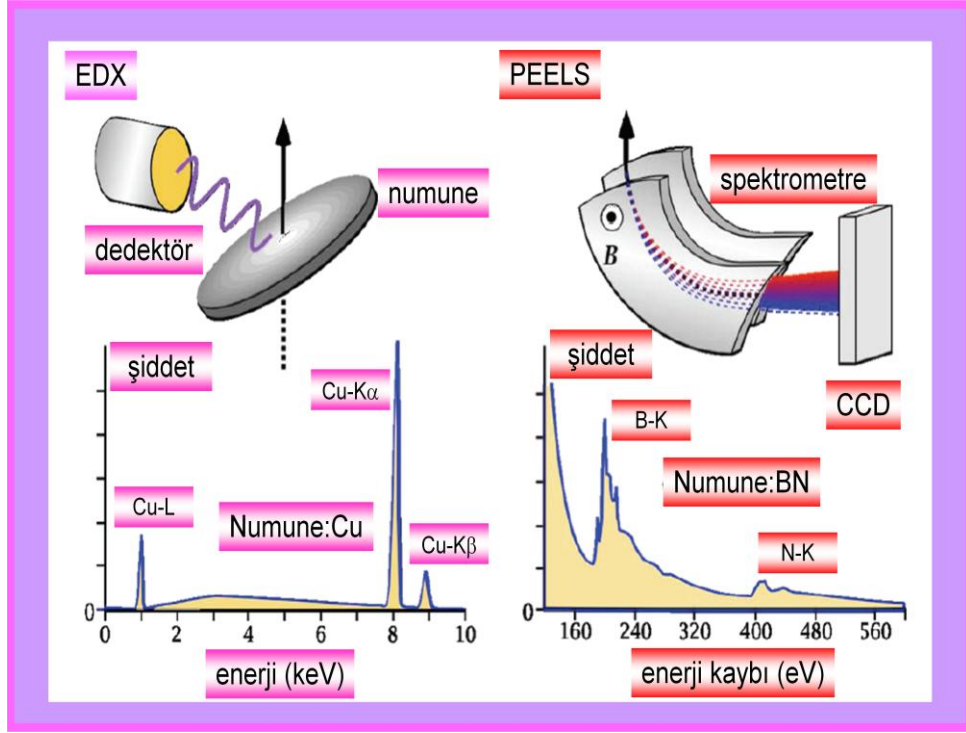
#### 4.2.5. Elektron Enerji Kaybı Tayfı Tekniği

TEM’de görüntüleme tekniklerinin yanı sıra kimyasal analizlerde kullanılan teknikler de vardır. Bu tekniklerden biri elastik olmadan saçılan elektronların kullanıldığı elektron enerji kayıp tayfı (electron energy loss spectroscopy, EELS) tekniğidir. EELS tekniğinde, enerji dağılım X-ışınları tayfındaki (EDXS) X-ışınları yerine elektronların kaybettiği enerji esas alınır. EELS tekniğiyle EDX tekniğinde olduğu gibi numunenin kimyasal özellikleri hakkında bilgi ederiz. EELS’in EDX’e göre avantajları olduğu kadar dezavantajları da vardır. Çizelge 4.1, EELS ve EDX’in karşılaştırılmasını özetlemektedir. Şekil 4.11 ise EDX ve EELS analizleri sonucu elde edilen tayfları ve bilgi elde etme prensiplerini karşılaştırmalı olarak göstermektedir.

EELS analizleri sonucu elde edilen tayftaki farklı sinyaller kullanılarak numune hakkında çeşitli bilgiler elde edilir. Bu tayfta kullanılan sinyaller ve elde edilen bilgiler Çizelge 4.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. EELS ve EDX’in karşılaştırılması

	EDS	EELS
<b>Miktar belirlemesi</b>	☺	☹
<b>Hafif element belirlemesi</b>	☹	☺
<b>Ağır element belirlemesi</b>	☺	☹
<b>Elektronik yapı</b>	☹	☺
<b>Kalın numunelerde başarı</b>	☺	☹
<b>Kimyasal çözünürlük</b>	☹	☺
<b>Hassaslık</b>	☹	☺
<b>Haritalandırma</b>	☺	☺



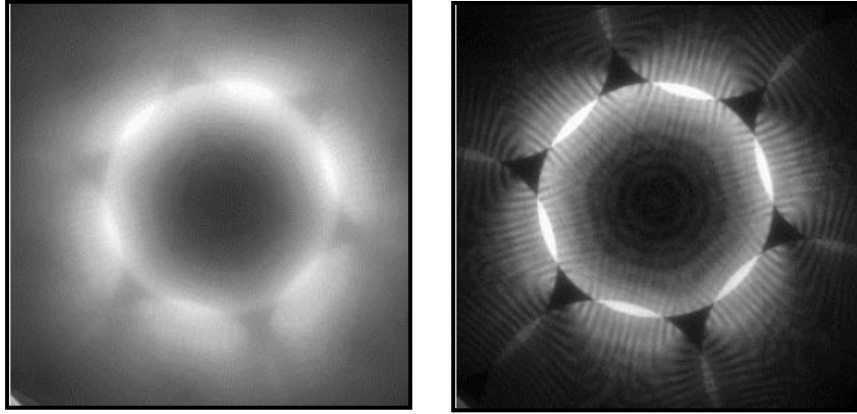
Şekil 4.11. EELS ile EDX'in şematik karşılaştırılması [26]

Çizelge 4.2. EELS spektrumunda kullanılan sinyaller ve elde edilen bilgiler

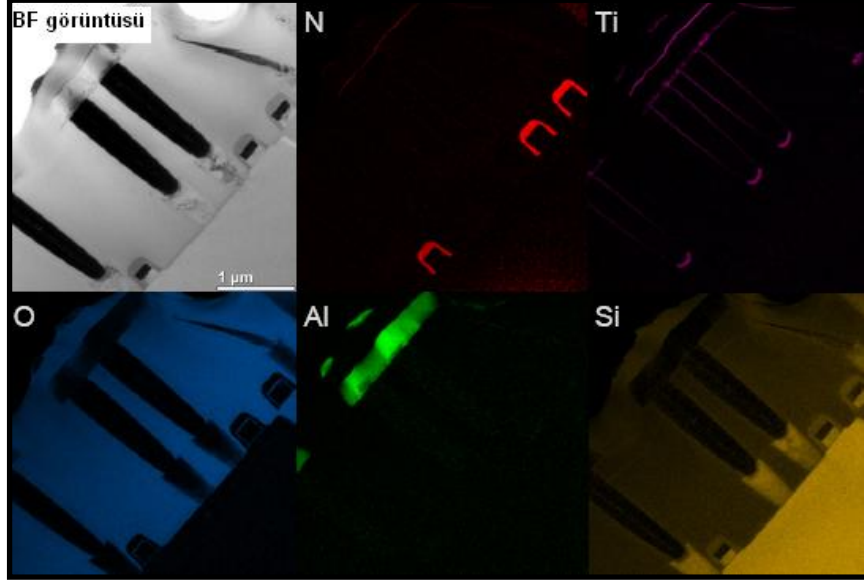
Kullanılan Sinyaller	Elde Edilen Bilgiler
Sıfır enerji kayıp tepesi	Kalınlık
Plazmon tepesi	Değerlik/iletim elektron yoğunluğu
Düşük enerji katkısı	Polarizasyon tepkileri (Dielektrik fonksiyonları)
Sıfır enerji kaybına yakın davranış	Bant yapısı (Ara bant geçişleri)
Çekirdek kaybı kenarı	Elementel kompozisyon
ELNES	Bant yapısı (Paylaşılmamış durumların yoğunluğu)
EXELFS	Komşu atomların atom-özel dairesel dağılımları

#### 4.2.6. Enerji Filtreli Geçirimli Elektron Mikroskobu Tekniği

Enerji Filtreli Geçirimli Elektron Mikroskobu (energy filter transmission electron microscopy, EFTEM) kipinde gürültüyü (background) oluşturan elastik olmadan saçılan elektronların uzaklaştırılması ile görüntü ve kırınım örgülerindeki netlik artırılmaktadır [27]. Bu kip, TEM ile aynı ayırma gücünde kimyasal elementlerin haritalanmasına izin vermektedir. EFTEM’de EELS ile kimyasal elementlerin analizi ve özellikle Li, B, C, O ve N gibi düşük atom numarasına sahip elementlerin belirlenmesi ve bu elementlerin birbirlerinden yüksek doğrulukta ayırımı miktarsal olarak saptanabilmektedir [28]. Şekil 4.12 enerji filtresi kullanılarak ve kullanılmadan elde edilmiş kırınım örgülerini, Şekil 4.13 ise EFTEM ile yapılmış bir elementel haritalamayı göstermektedir.



**Şekil 4.12.** Kırınım örgüleri görüntüsü (a) enerji filtresi kullanarak ve (b) enerji filtresi kullanmadan [20]



Şekil 4.13. EFTEM ile yapılmış elementel haritalama [21]

#### 4.2.7. Enerji Dağılım X-ışınları Tayfı Tekniği

Enerji dağılım X-ışını tayfı elektron madde etkileşimine bağlı, analitik bir kimyasal (elementel) analiz yöntemidir [28]. 1950’li yıllardan itibaren elektron mikroskoplarında mikroanaliz amacı ile kullanılmaya başlanmıştır. Bunun yanı sıra çok küçük bir alanda analiz imkanı sunar [29].

Elektronlar madde içerisinde geçerken atomlar ile etkileşime girer. Bunun sonuçlarından bir tanesi de X-ışını yayımlamasıdır. Yayımladığı bu X-ışınının enerjisinin elementlere özgü olmasından yola çıkılarak nitel (kalitatif), X-ışınının saniyede yayımlanan miktarına dayanarak da nicel (kantitatif) analizler yapılabilir. EDS analizi SEM, TEM ve STEM mikroskoplarında kullanılabilir.

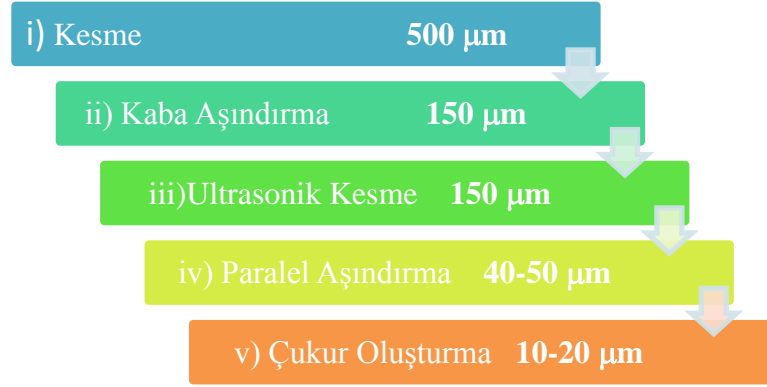
#### 4.3. TEM Analizleri için Numune Hazırlama Teknikleri

Geçirimli elektron mikroskopunda yapılan analizin güvenilirliği numune hazırlama süreciyle yakından ilgilidir. Ancak dikkatli ve titiz bir çalışma gerektiren numune hazırlama süreciyle TEM’de istenilen sonuçlara ulaşmak mümkündür.

Numune hazırlamaya başlamadan önce malzemenin özellikleri ve kristalografik yapısı hakkında bilgi edinilmeli, TEM ile çözülmesi istenen sorunlar ortaya konulmalı ve bu sorunların çözümü için hangi TEM tekniklerinin kullanılması gerektiği belirlenmelidir. İyi bir TEM çalışması için yapılacak analize ve hazırlanacak numunenin özelliklerine uygun bir numune hazırlama yöntemi seçilmelidir.

#### 4.3.1. Standart TEM Numunesi Hazırlama Tekniği

TEM numune hazırlama basamakları ve ilgili kalınlıklar aşağıda görülmektedir.



##### i) Kesme

TEM’de kullanılacak tekniğe göre numunenin olması gereken son kalınlığı değişir. Ancak en genel haliyle TEM’de iyi bir çalışma yapılabilmesi için numunenin kalınlığının 100 nm’den daha ince olması gerekmektedir. Bunun için numune öncelikle mümkün olduğu kadar ince kesilerek kaba aşındırma için hazırlanır. Numune yapısında hata ve kusurların oluşmaması için numunenin hassas olarak kesilmesi çok önemlidir. Aksi takdirde numunenin mikro yapısında değişimler olabilmektedir. Bu nedenle düşük devir hızında kesim yapabilen bir kesme cihazında elmas kesici diskler kullanılarak kesim işlemi yapılır (Şekil 4.14).



**Şekil 4.14.** Kesme cihazının görünüşü [33]

### **ii) Kaba Aşındırma**

Hassas olarak kesilen numuneler sırasıyla 120-180-240'lık parçaçık büyüklüğüne sahip SiC zımpara kağıtlarıyla aşındırılarak 100  $\mu\text{m}$  kalınlığına getirilir. Kaba aşındırma aşamasında numunenin kolay tutulabilmesi için numune Al plaka üzerine yapıştırıcı (wax) ile yapıştırılır. Kaba aşındırma el ile yapıldığı için uygulanan yük olabildiğince eşit dağıtılmalıdır. Bu aşamadan sonra ultrasonik kesici (Şekil 4.15) için numuneler hazırdır.

### **iii) Ultrasonik Kesme**

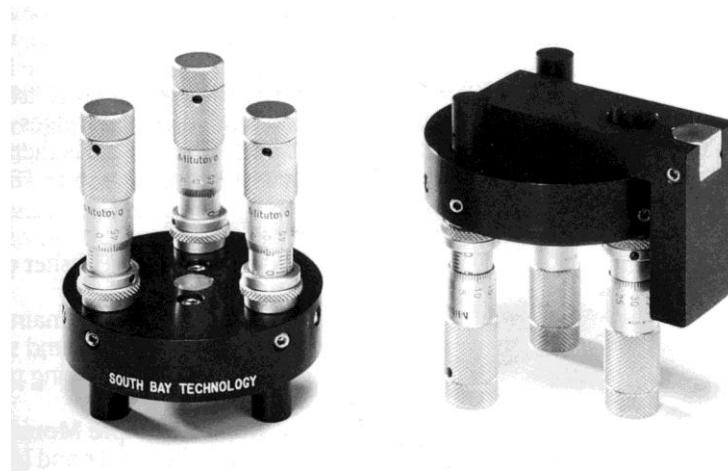
Ultrasonik disk kesicinin çalışma koşulu numune kalınlığına bağlı olduğu için numunenin her bölgesinin eşit kalınlıkta olması gerekmektedir. Numunenin kesilebilmesi için en fazla 200  $\mu\text{m}$  kalınlığında olması gerekmektedir. Kesme işlemi sırasında kullanılan aşındırıcı malzemenin cinsi ve miktarı da son derece önemlidir. Kullanılan aşındırıcı elmas veya bor karbür tozu olabilir. Aşındırıcı toz ne çok fazla ne de çok az konulmalıdır. Etkili olması açısından toz su ile karıştırılarak numune üstüne iki veya üç damla damlatılır. Ultrasonik disk kesici seramik ve kompozit malzemeler için kullanılırken mekanik ve ısıl olarak numuneye en az zarar veren yöntemdir. Metal numuneler sünek olduğundan kesme işlemi için delgi (punch) kullanılır.



Şekil 4.15. Ultrasonik disk kesme cihazı [33]

#### iv) Paralel Parlatma

Ultrasonik disk kesme cihazında 3 mm çapında kesilen numuneler Şekil 4.16'da görülen üç ayaklı (tripod) aşındırma aleti ile paralel olacak şekilde aşındırılır. Bu aşındırma sırasında aşındırma filmleri (lapping film) kullanılır. Numunenin kalınlığı 40  $\mu\text{m}$ 'e inene kadar sırasıyla 15-9-6-3-1-0,5  $\mu\text{m}$  parçacık büyüklüğüne sahip filmler kullanılarak paralel parlatma aşaması tamamlanır.



Şekil 4.16. Üç ayaklı aşındırma aparatı [33]



#### v) Çukur oluşturma

Yaklaşık 40 µm kalınlığına inen numune çukur oluşturma (dimpling) aşamasına hazırdır. Bunun için Şekil 4.17’de görülen çukur oluşturma cihazı kullanılır ve Şekil 4.18’de görülen silindir üstünde dönen küçük diskle çukur oluşturma işlemi yapılır. Bu aşamada kullanılan aşındırıcı malzeme çeşidi, aşındırıcı parça çeşidi, uygulanan kuvvet, dönüş hızı ve zaman önemli değişkenlerdir. Aşındırıcı malzeme olarak bor karbür, alüminyum oksit veya elmas tozu kullanılır. Aşındırıcı malzemenin tane boyutu da çukur oluşturma işleminde etkilidir. Uygulanan kuvvet, dönüş hızı ve zaman değişkenleri farklı numuneler için eniylenmelidir.



Şekil 4.17. Çukur oluşturma cihazı [30]



Şekil 4.18. Çukur oluşturma cihazında numunenin konduğu ve inceltmenin olduğu bölüm [30]

### 4.3.2. İyon Demeti ile İnceltme

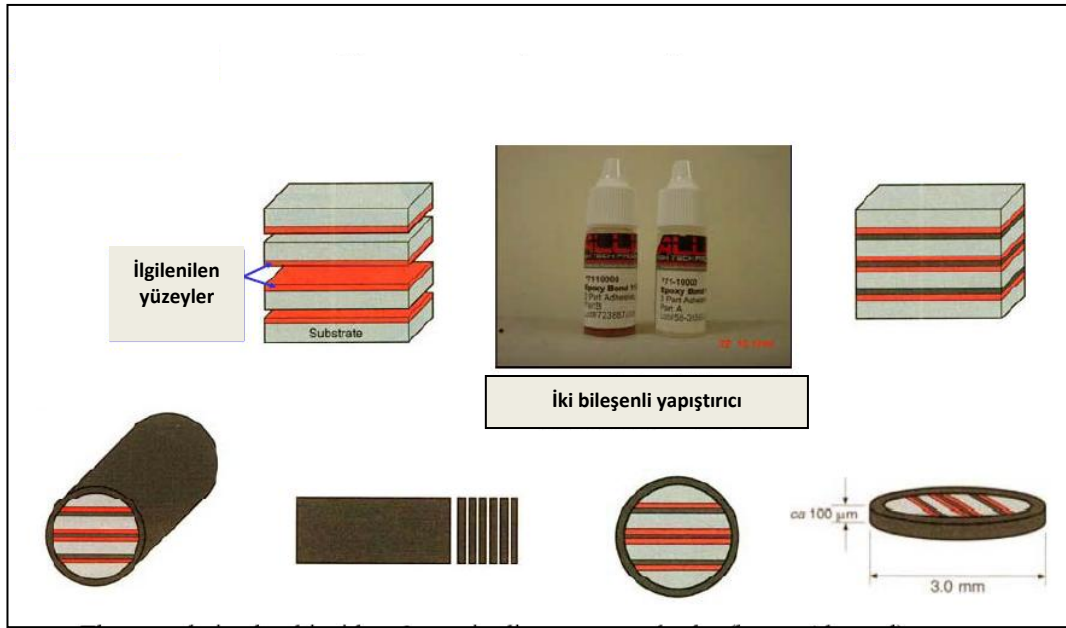
İyon demeti ile inceltme (ion beam thinner) aşamasında önceden inceltmiş numune (3 mm çapında ve 50 µm kalınlığında), cihazın (Şekil 4.19) numune tutucusuna konur. Tek iyon demetinin kullanıldığı durumlarda demet istenilen yüzeye odaklanır ve numunenin parlatılmak istenen yüzeyi tek başına veya her iki yüzey aynı zamanda parlatılabilir. Hızlandırılmış iyon demetinin numune ile etkileşimi sonucu numune yüzeyinden atomlar süpürülür. Böylece, numune hazırlama süreci boyunca oluşan mekanik hasarlar giderilir ve parlatmaya yardımcı olur. İyon demeti ile aşındırma, düzlem boyuna ve yatay kesite uygulanabilir. Alttan ve üstten aynı anda gönderilen iyon demeti ile oluşan oyuklar tabakanın ortasında karşılaşır ve delik oluşmaya başlar. Delik saptandıktan sonra numune TEM analizi için hazırdır. İyon demetinin geliş açısı, akımı, voltajı ve işlemin süresi bu aşamadaki değişkenlerdir. Düşük açılı ve düşük akımlı inceltme, daha ince ve yüksek kalitede bir bölge oluşmasını sağlar. İyon demeti; numunede yayılım ve Ar<sup>+</sup> iyonu bombardımanı, tercihli aşındırma, bombardımana maruz kalan bölgedeki maddenin bir yerden bir yere aktarımı ve kimyasal difüzyon gibi ısı hasarlarına neden olabilir. Bu etkileri en aza indirmek için numuneyi soğutmak veya iyon demeti enerjisini ve geliş açısını düşürmek gerekir.



Şekil 4.19. İyon inceltme cihazı [26]

### 4.3.3. Yan Kesit Numune Hazırlama

Yan kesit numune hazırlama tekniği genellikle yarıiletken malzemelerde kullanılmaktadır. Bu teknikte çalışılan malzeme şeritler halinde kesilerek ilgilenilen yüzeyleri içte kalacak şekilde birbirlerine yapıştırılır. Daha sonra bu tabakalar başka bir malzemeyle (desteklemek amaçlı) önden ve arkadan sandviç şeklinde sıkıştırılır. Tabakaların dış mukavemetini arttırmak amacıyla sandviç şekline getirilen numune, 3 mm çapındaki pirinç ya da başka bir metal tübün içerisine sokulur. Bir sonraki aşama metal tübün dilimlenmesidir. Böylece elimizde 3 mm çapında hazırlanmış numuneler bulunur. Daha sonra numune önden ve arkadan son kalınlığı 100 µm olacak şekilde aşındırılır. Aşındırılan numune iyon inceltme aşamasından sonra TEM analizleri için hazır hale gelmiş olur. Tüm bu aşamalar Şekil 4.20’de gösterilmektedir.

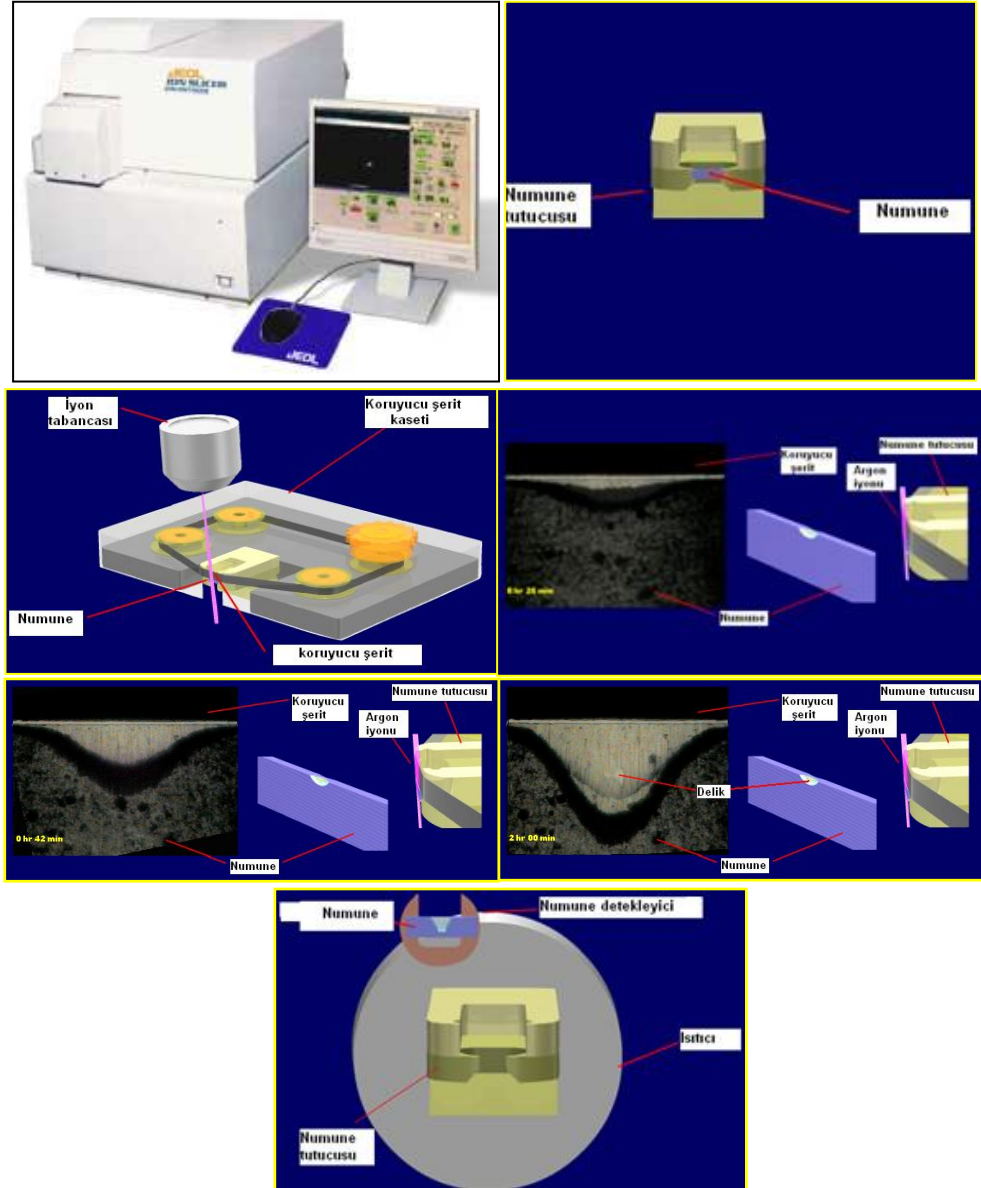


Şekil 4.20. Yan kesit numune hazırlama aşamaları [31]

### 4.3.4. İyon Dilimleme Tekniği ile Numune Hazırlama

İyon dilimleme tekniği için numune boyutları çok önemlidir. Bu sebeple cihazın öngördüğü boyutların dışına çıkılması tavsiye edilmez. Aksi halde

numunede istenilen sonuç alınamadığı gibi cihaza zarar verme olasılığı da vardır. İyon dilimleme cihazı ve bu cihazla numune hazırlama aşamaları Şekil 4.21’de gösterilmektedir.



Şekil 4.21. İyon dilimleme cihazı (a) numune tutucusu ve numune, (b) çalışma mekanizması, (c) 26 dk sonra numunenin görüntüsü, (d) 42 dk sonra numunenin görüntüsü, (e) 1 saat 8 dk sonra numunenin görüntüsü, (f) 2 saat sonra hazırlanma işlemi bitmiş numune görüntüsü ve (g) hazırlanmış numunenin numune tutucusundan çıkarıldıktan sonra grit üzerindeki görüntüsü [31]

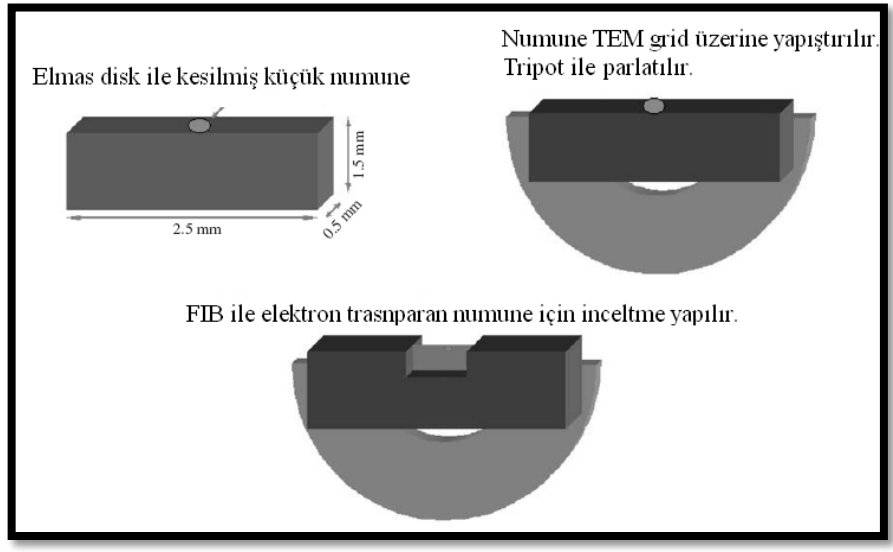
### 4.3.5. Odaklanmış İyon Demeti ile Numune Hazırlama

Odaklanmış iyon demeti (focused ion beam, FIB) sistemi bir çeşit SEM gibidir. İkisinin de yüksek vakum ortamında yüklü parçacıklar yayan bir kaynağı vardır. Bu parçacıklar mercekle numuneye odaklanır. Demet, görüntüleme için numune yüzeyini tarar. Bu yöntemin SEM'den ayrılan en önemli farkı; elektromanyetik merceklerin ağır iyon demetini odaklayacak kadar güçlü olmamasından dolayı elektrostatik merceklerin kullanılmasıdır [29].

Literatürde 2 çeşit FIB numune hazırlama tekniği bulunmaktadır. Bunlar;

- H-bar yöntemi
- Lift-Out yöntemi

**H-bar yöntemi:** H-bar tekniği FIB-TEM numuneleri için geleneksel bir yöntemdir. Şekil 4.22'te teknik şematik olarak gösterilmiştir.

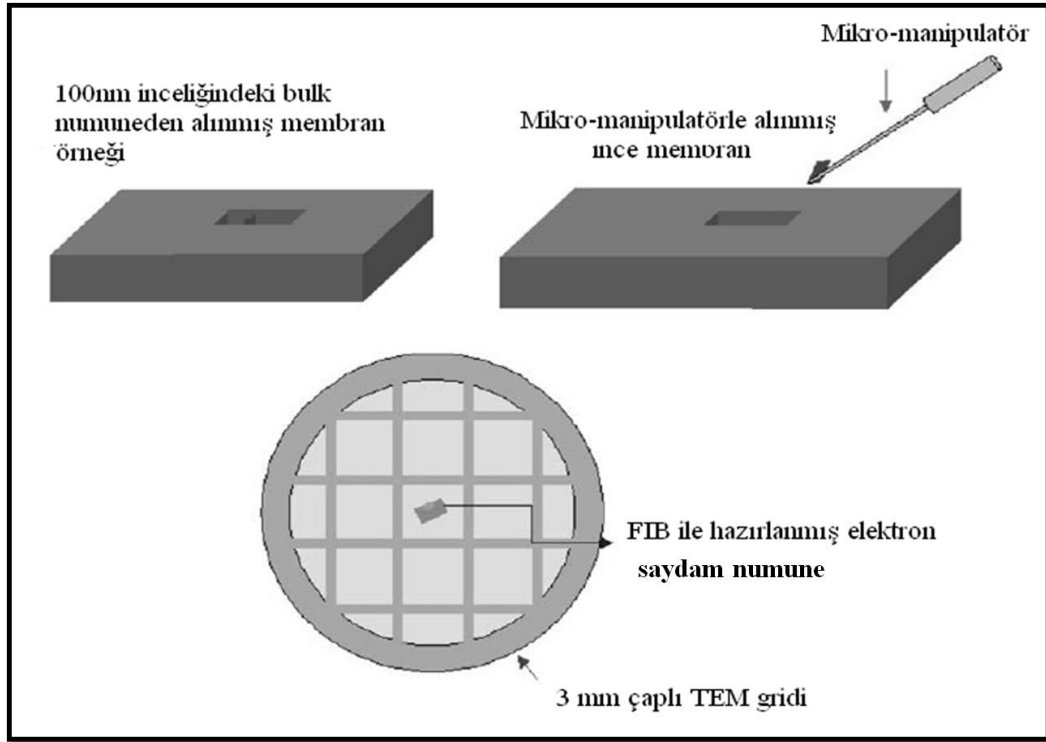


Şekil 4.22. H-bar FIB tekniği [29]

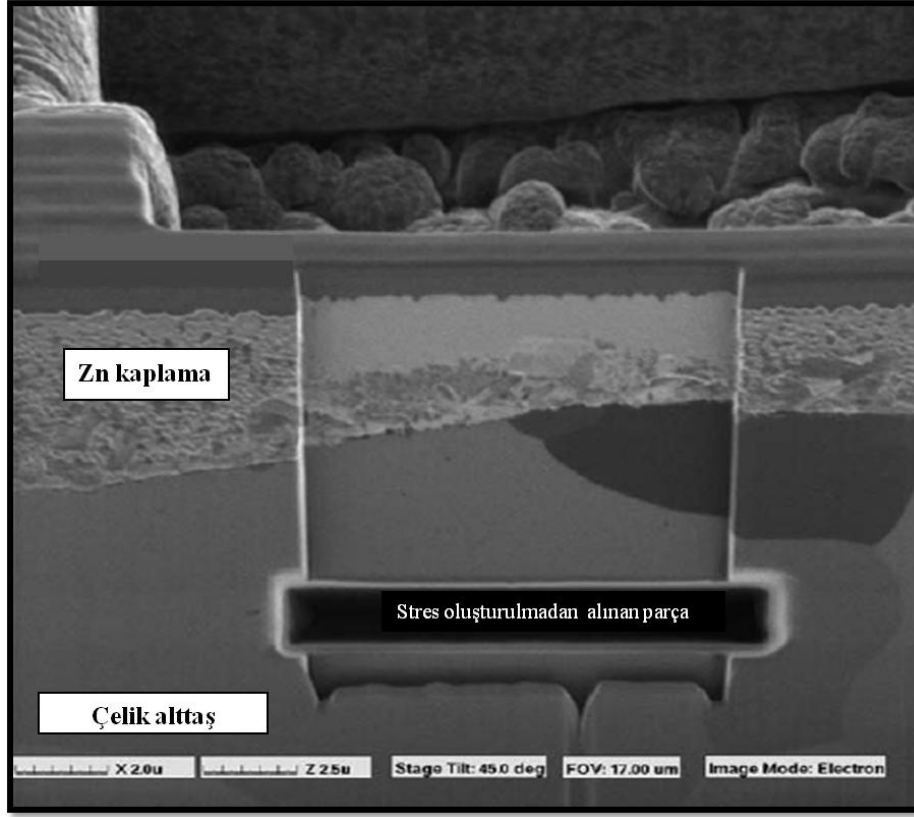
$2,5 \times 1,0 \times 0,5 \text{ mm}^3$  boyutlarındaki numune, elmas kesici ile külçe halindeki numunedan kesilir. Numunenin her iki tarafı da üç ayaklı aşındırma aletiyle aşındırılır. Özel tutkal (epoksi) kullanılarak numune TEM ızgarası (grid) üzerine yapıştırılır. Numunenin kalınlığı, FIB işlem süresini etkilediğinden numune olabildiğince ince olmalı bununla birlikte belli bir dirence ve

mukavemete sahip olmalıdır. Daha sonra numune FIB cihazına yerleştirilir. Şekil 4.23’de H-bar tekniğine örnek gösterilmiştir.

**Lift-Out yöntemi:** Lift-out tekniğinin (Şekil 4.24) en önemli üstünlüğü, kesme ve aşındırma işlemine gerek duyulmadan külçe numuneden örnek hazırlanabilmesidir. Bu teknikte, FIB’de istenen alan inceltilirken 100 nm civarında kalınlığa sahip bir membran oluşturur. Bu ince membran şeklindeki TEM numunesi ana yapıdan kesilir. Daha sonra bu kesilen kısım bir tutucu (probe) ile TEM ızgarası üzerine yapıştırılır.

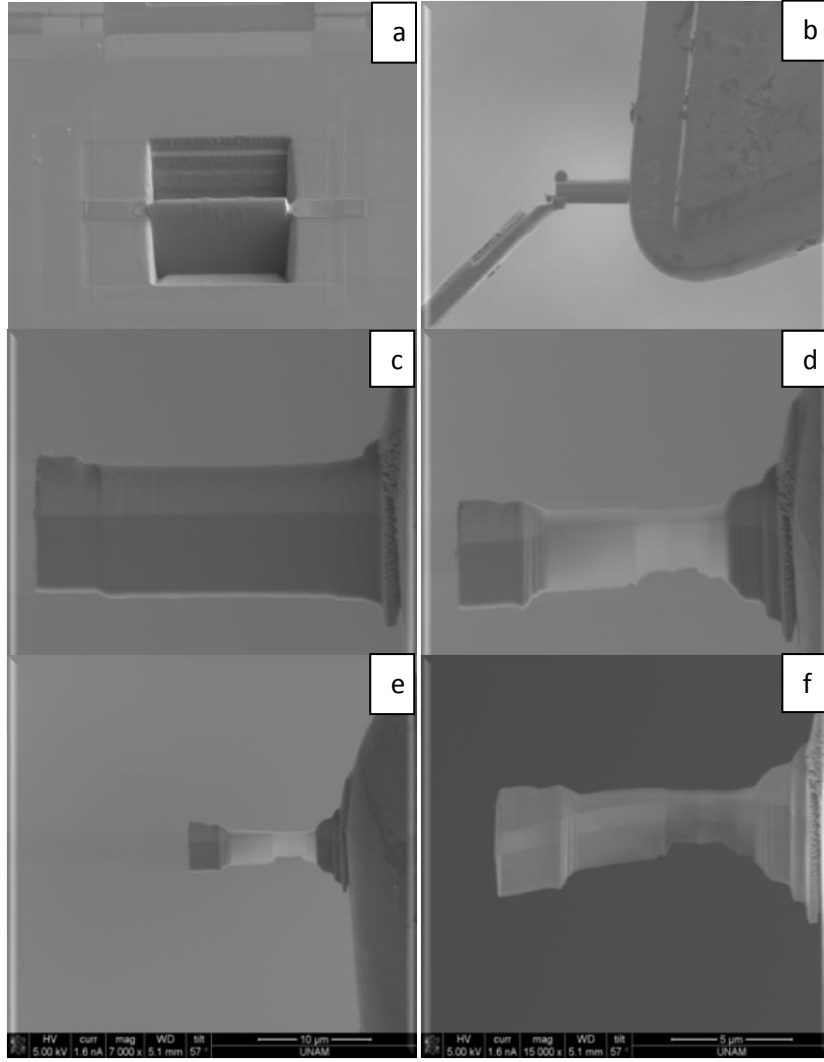


Şekil 4.23. H-bar tekniğine örnek [29]



Şekil 4.24. Lift-out FIB tekniği [29]

Kesilen numunenin hacmi  $50 \times 50 \times 50 \mu\text{m}^3$  olduğundan, teknik tahribatsız olarak nitelendirilebilir. Bu teknikte külçe numune, işlemten sonra etkilenmez. Numunede minimum zarar oluşur. Bu yöntemle yapılmış numunenin aşama aşama görüntülerinin nasıl olduğu Şekil 4.25’de gösterilmektedir.



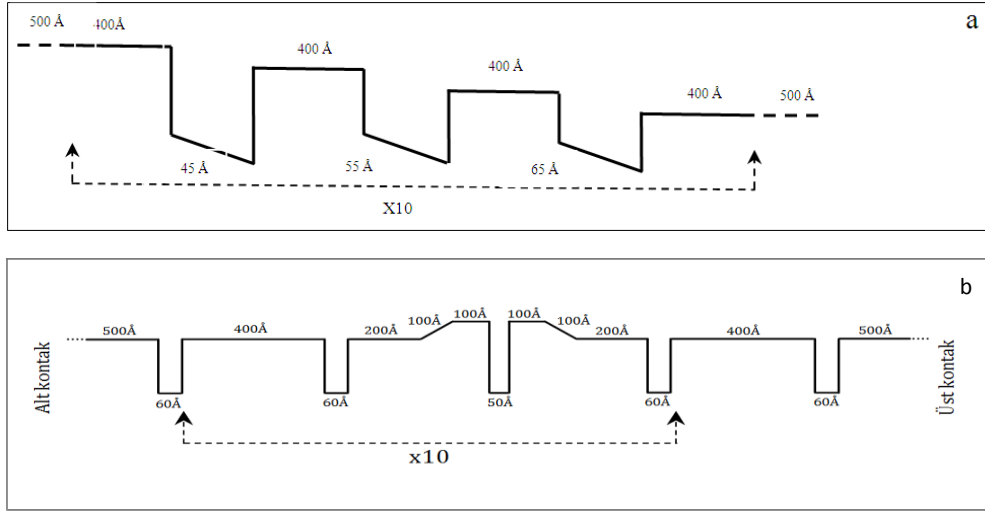
Şekil 4.25. GaAs yarıiletkeninin FIB’de hazırlanma aşamaları (a-f) [29]



## 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 5.1. GaAs/AlGaAs Tabanlı Kuantum Kuyulu Yapılar

Bu çalışmada farklı iki yapı ile çalışılmıştır. Yapıların her ikisi de (100) GaAs alttaş üzerine büyütülmüştür. Asimetrik çoklu kuantum kuyulu Yapı 1, GaAs üçlü kuantum kuyu birimlerinin on periyot tekrarından oluşmaktadır. Her birim, 45, 55 ve 65 Å kalınlığında kuantum kuyuları içermektedir. Bu kuyular 400 Å'luk  $Al_xGa_{1-x}As$  bariyerleri ile birbirinden ayrılmıştır. Bu bariyerlerin Al konsantrasyonları sırasıyla % 0,33, 0,27, 0,24 ve 0,20'dir. Her birim  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  katkılama konsantrasyonuna sahip 500 Å'luk GaAs tabakaları ile birbirinden ayrılmış olup bariyerler katkılanmamıştır. Tüm yapı 1,5 µm ve 1,0 µm kalınlığında  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  Si katkılı alt ve üst kontak tabakaları ile sıkıştırılmıştır. Yapı 2, simetrik çoklu kuantum kuyulu yapı, 400 Å % 20 Al yoğunluğuna sahip AlGaAs bariyeri, 60 Å GaAs kuantum kuyusu, 200 Å % 20 Al yoğunluğuna sahip AlGaAs bariyeri, 100 Å Al konsantrasyonu %20'den %25'e arttırılmış AlGaAs bariyeri, 100 Å % 25 Al yoğunluğuna sahip AlGaAs bariyeri ve 50 Å GaAs kuantum kuyusunun 10 periyot tekrarından oluşmuştur. Bu yapı 60 Å GaAs kuantum kuyuları ve katkılanmış 4.000 Å ve 7.000 Å GaAs alt ve üst kontak tabakaları ile sıkıştırılmıştır. Kuantum kuyularının merkez kısımları Si ile katkılanmıştır. Şekil 5.1'de bu yapıların şematik gösterimi sunulmuştur. Bu yapılar, yarıiletken (100) yönünde büyütülmüş olan GaAs alttaşın üzerine MBE GEN 20\_MC sistemi ile büyütülmüştür.



Şekil 5.1. a) Yapı 1 ve b) Yapı 2'nin şematik gösterimi

## 5.2. TEM Numunesi Hazırlama

Burada amaç standart numune hazırlama tekniği ile yan kesit (cross section) numune hazırlamaktır. Bu teknikte 600  $\mu\text{m}$  kalınlığında iki adet GaAs alttaş 3 mm uzunluğunda dikdörtgen şeritler halinde kesildi. Yapıların büyütüldüğü yüzler iç tarafa gelecek şekilde M-Bond 610 isimli özel yapıştırıcı ile yapıştırıldı. Bu yapıştırıcının özelliği yüksek sıcaklıklara ( $>100^\circ\text{C}$ ) dayanıklı olmasıdır. Bu yapıştırıcı sayesinde iki tabaka birbirine kuvvetli bir şekilde yapıştırılmış olur. Bu tabakalar, Si alttaşlarla önden ve arkadan desteklenir. Daha sonra bu şeritlerin daha küçük parçalar halinde kesilmesi gerekmektedir. Bu sebeple şeritler elmas parçacıklı tel kesme cihazı ile dilimlenmiştir. Dilimlenen parçalar sırasıyla 9-6-3-1-0,5  $\mu\text{m}$  elmas parçacıklara sahip aşındırma filmleri (lapping film) ile aşındırılmıştır. Numunemiz çabuk aşınan bir malzeme olduğu için parçacık boyutu büyük olan bir film ile aşındırma işlemini yaptığımızda numuneyi kaybetme olasılığımız çok yüksektir. Bu nedenle 9  $\mu\text{m}$  parçacık sayısına sahip elmas film ile başlamak uygun görülmüştür. Kalınlığı yaklaşık 100  $\mu\text{m}$ 'ye inen numune Araldite Rapid isimli özel yapıştırıcı ile dış çapı 3 mm, iç çapı 2 mm olan bakır halkanın üzerine yapıştırılmıştır. Bu haliyle iyon inceltme cihazına konan numune uzun saatlere rağmen delinememiştir. Numune

kalınlığının buna sebep olacağı düşünülerek numune biraz daha aşındırılmaya çalışılmıştır. Ancak 100 µm kalınlığın altına laboratuvarımızda bulunan olanaklarla inmek mümkün olmamıştır. Bu sebeple 100 µm kalınlığındaki numunede çukur oluşturma aşaması denenmiştir. Çukur oluşturma aşamasından sonra iyon inceltme cihazına konan numunenin durumu biraz daha iyileşmiş olsa da sorun tam anlamıyla çözülememiştir.

Aşındırma aşamasında yaşanan zorluklar (tabakaların birbirinden ayrılması ve numunenin kaybedilmesi) nedeniyle numunenin mukavemetini arttırmak amacıyla Si alttaşlar ile desteklenerek oluşturulan GaAs tabakalar pirinç tübün içerisine yerleştirildi. Pirinç tübün numunenin etrafını kelepçe gibi çevrelemesi sebebiyle parlatma aşamasındaki problemler ortadan kalkmıştır. Ancak numunenin kalınlığı 100 µm'nin altına indirilemediği için iyon inceltme aşamasındaki sorun çözülememiştir.

İyon inceltme cihazıyla yaşanan zorluklar sebebiyle laboratuvarımıza yeni alınan iyon dilimleme cihazıyla numune hazırlama denenmiştir. Bu cihaza konulan numunenin boyutları 2,8 mm x 1mm x 100 µm olmalıdır. Bu nedenle yaklaşık 3 mm uzunluğunda GaAs filmlerden iki şerit kesildi. Şeritlerden bir tanesi 100 µm kalınlığına kadar inceltildi ve kalınlığı 600 µm olan diğer şeritin üzerine, büyütülen yüzey içe bakacak şekilde yapıştırıldı. Burada 100 µm kalınlığında ikinci bir tabakanın kullanılma sebebi, diğer tabakayı iyon bombardımanı sonucu oluşacak amorflaşma durumundan korumaktır. Daha sonra 3 mm uzunluğundaki şeritler 1 mm genişliğinde olacak şekilde tel kesme cihazı ile dilimlendi. En son aşama olarak da telin geçtiği yüzeyler son kalınlık 100 µm olacak şekilde aşındırıldı. İstenilen boyutlarda hazırlanan numune cihazın numune tutucusuna titizlikle yapıştırıldı. Yaklaşık iki saatlik sürenin ardından numune TEM analizleri için hazır hale geldi.

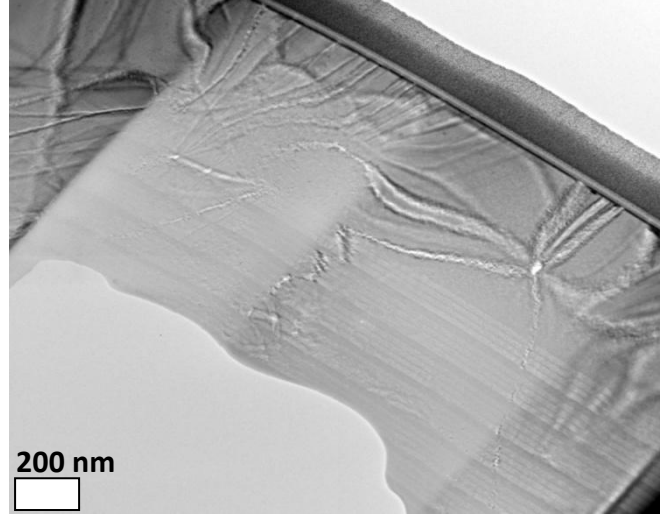
Son olarak, FIB tekniği ile numune hazırlama denenmiştir. Bu teknikte büyütülen yüzeye dik olacak şekilde bir kesit alındı. Alınan kesit Ga<sup>+</sup> iyonları ile süpürülerek inceltilmeye başlandı. 30 kV ve 93 pA değeriyle başlanan inceltme işlemi ile numune yeterli şeffaflığa ulaştığında, 5 kV ve 16 pA değerleriyle inceltme işlemi tamamlandı.

### **5.3. GaAs/AlGaAs Tabanlı Kuantum Kuyulu Yapıların TEM Teknikleri ile İncelenmesi**

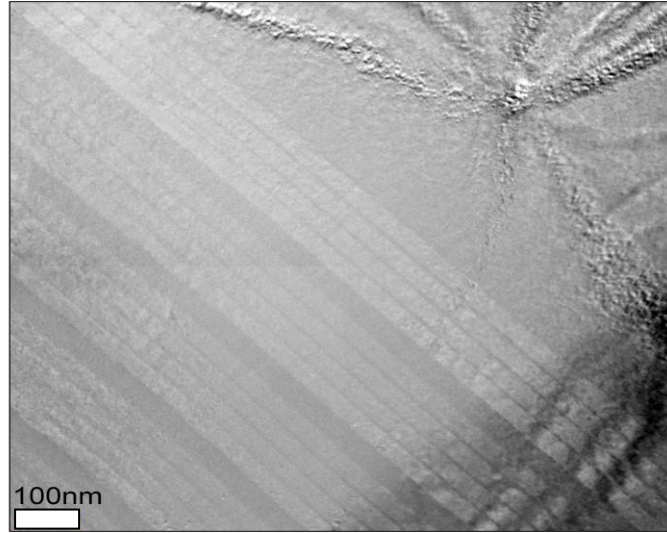
TEM çalışmaları, 200 kV hızlandırma voltajında enerji saçılımlı X-ışını spektrometresi (EDX-JED2300T), taramalı geçirimli elektron mikroskobu yüksek açılı halkasal karanlık alan (STEM/HAADF) dedektörü (Fishione), taramalı geçirimli elektron mikroskobu halkasal karanlık alan-aydınlık alan dedektörleri (STEM/ADF-BF, Gatan STEM Pack) ile paralel elektron enerji kaybı spektrometresi (PEELS) ve enerji filtresine (Gatan GIF Tridiem) sahip geçirimli elektron mikroskobu (TEM-Jeol 2100F) ile gerçekleştirilmiştir.

#### **5.3.1. Yapı 1 Analiz Sonuçları**

TEM analizleri için FIB ile hazırlanan elektron geçirgen numunenin genel mikro yapısı TEM-BF görüntüleme tekniği ile belirlenmiştir (Şekil 5.2). Bu teknik ile Yapı 1'in beklendiği gibi tabakalı yapılar halinde büyütüldüğü gözlenmiştir. Ancak bu görüntüleme tekniğinde netlik (contrast) mekanizmasının yetersiz olması sebebiyle tabakalar arasındaki konsantrasyon değişimi belirgin değildir. Bunun sebebi TEM-BF görüntüleme tekniğinde sadece doğrudan geçen elektronların malzeme ile etkileşimi söz konusu olduğundan görüntüde sadece kütle-kalınlık netliği (mass-thickness contrast) söz konusudur. Şekil 5.3'de Yapı 1'in daha ayrıntılı TEM-BF görüntüsü görülmektedir. Yakın görünümde de tabakalar arasındaki fark net bir şekilde gözlenmemiştir.

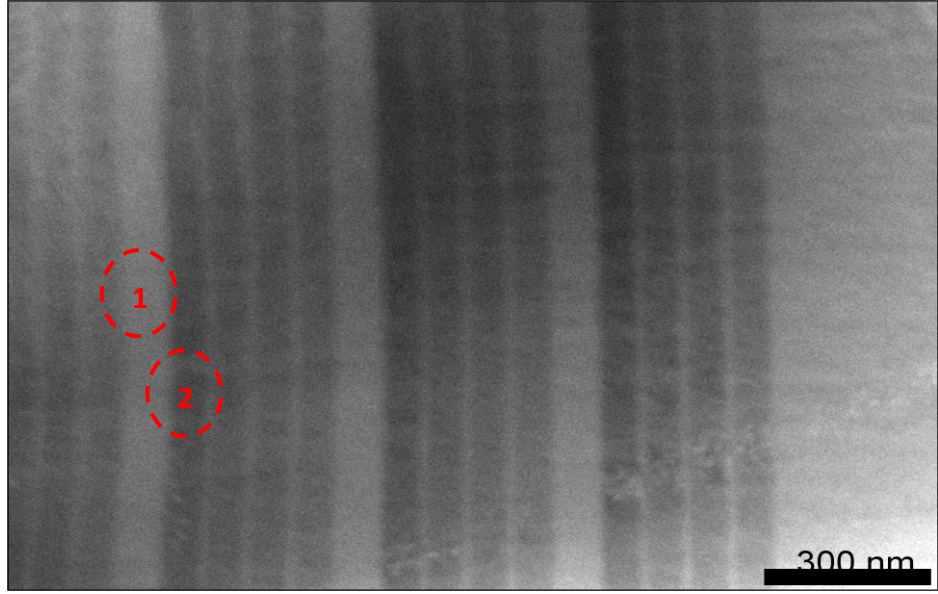


Şekil 5.2. Yapı 1'in TEM-BF görüntüsü

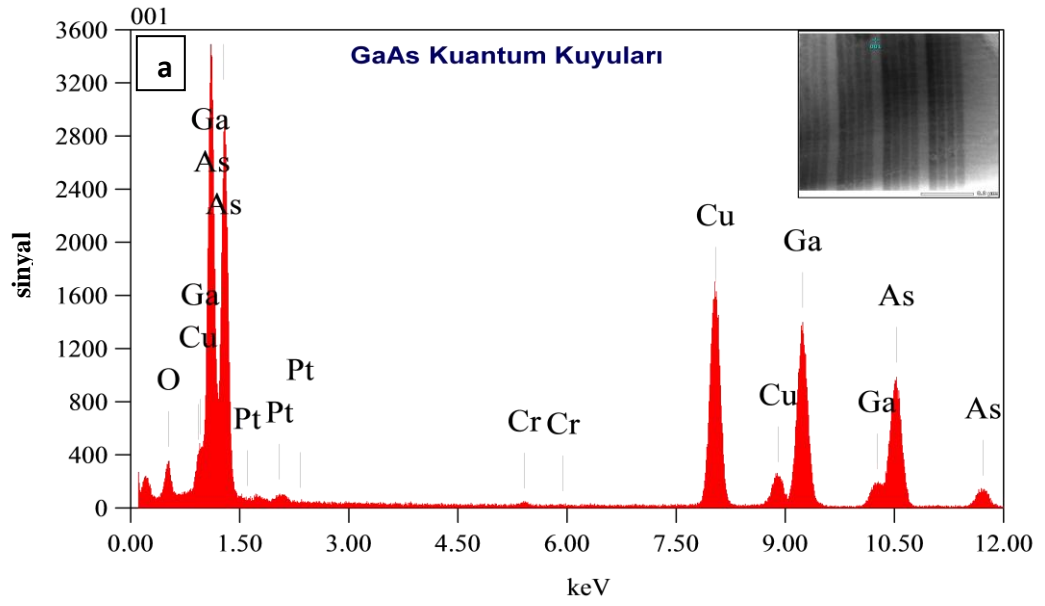


Şekil 5.3. Yapı 1'in TEM-BF görüntüsü

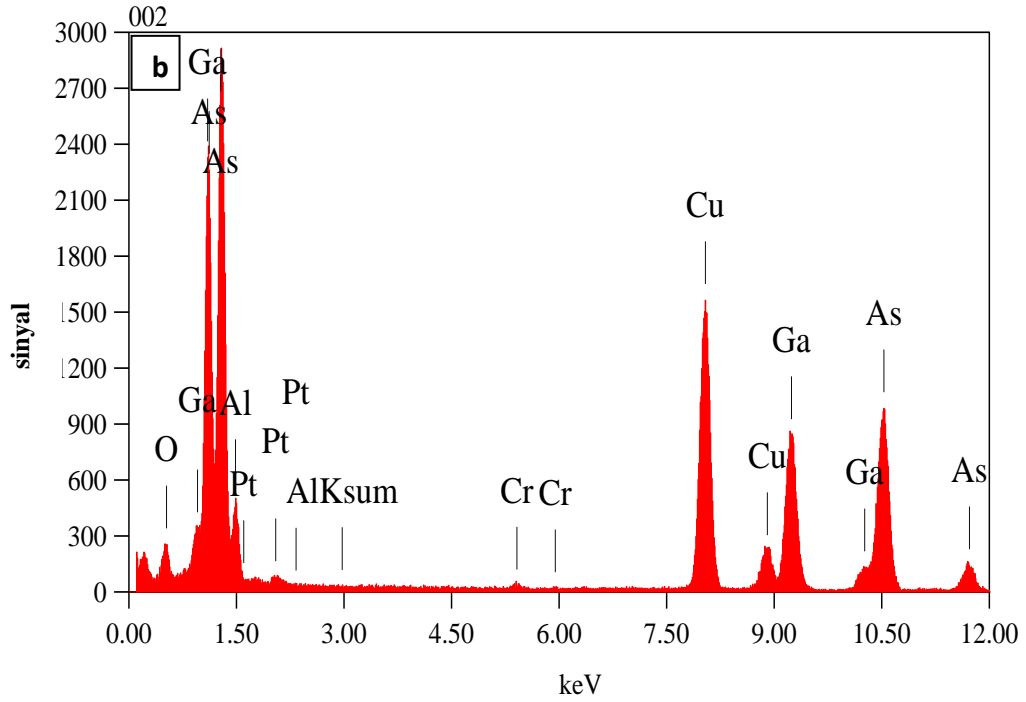
Numunenin elementsel içeriğini belirlemek için farklı bölgelerden STEM kipinde EDX yapılmıştır. Numunenin atomik netlik bilgisini veren STEM HAADF görüntüsü Şekil 5.4'de, EDX nokta analizi sonucunda elde edilen tayflar ise Şekil 5.5'de gösterilmektedir. Bu görüntüleme tekniği atom numarasına bağlı netlik bilgisi vermektedir. Atom numarası büyük olan elementleri içeren tabakalar daha parlak ve daha beyaz renkte görünmektedir. Bu teknikle TEM-BF görüntüsünde ayırt edemediğimiz tabakalar arasındaki fark, açıkça gözlenmektedir.



Şekil 5.4. FIB ile hazırlanmış Yapı 1'in STEM HAADF görüntüsü



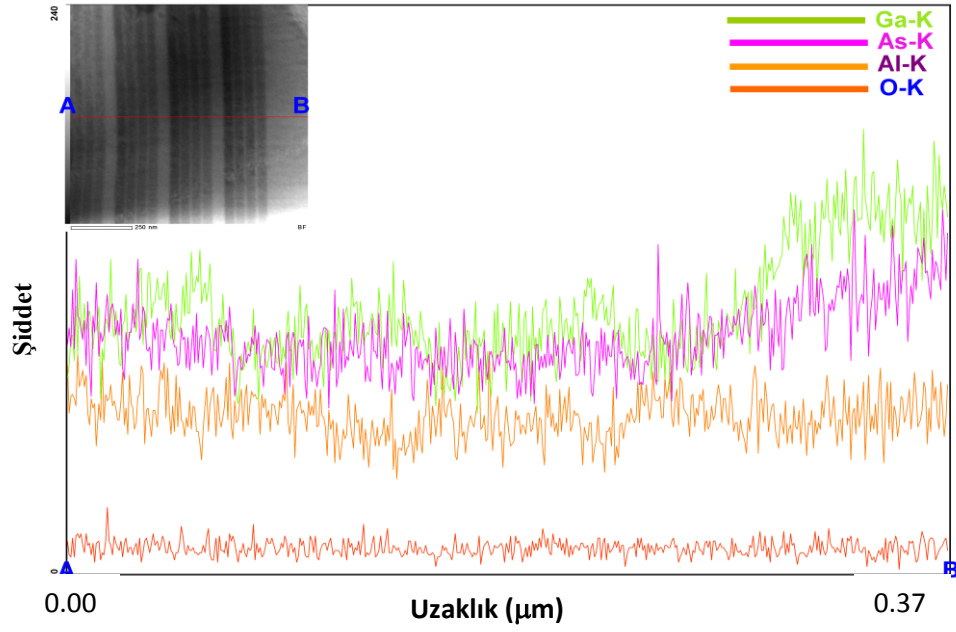
Şekil 5.5. Yapı 1'in STEM HAADF görüntüsünün a) 1. bölge ve b) 2. bölgeden alınan EDX nokta analizi tayfları



Şekil 5.5. (Devam) Yapı 1'in STEM HAADF görüntüsünün a) 1. bölge ve b) 2. bölgeden alınan EDX nokta analizi tayfları

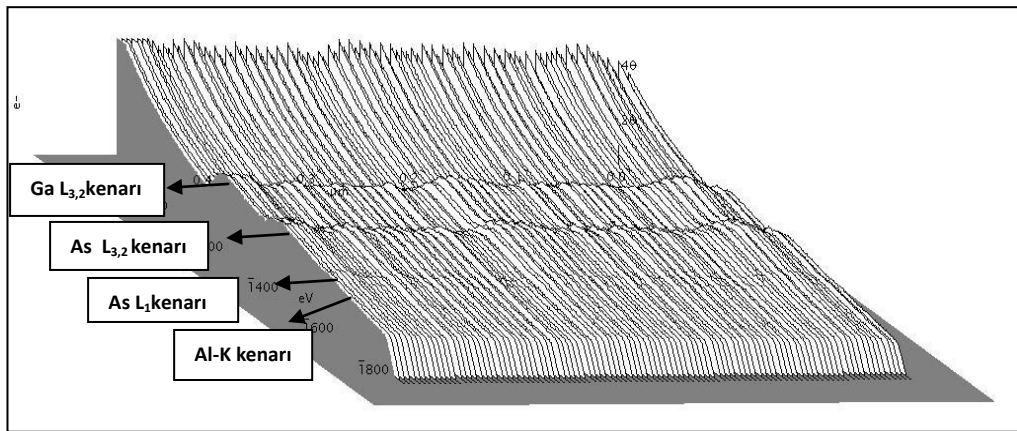
STEM-EDX nokta analizi sonuçlarına göre 1. bölgenin Ga ve As elementlerini, 2. bölgenin ise Al, Ga ve As elementlerini içerdiği ayrı ayrı belirlenmiştir. Tayfta görünen Cu ve Cr elementleri TEM analizlerinde kullanılan numune tutucusundan gelmektedir. Pt elementinin varlığı ise FIB yöntemiyle numune hazırlanması sırasında numunenin iyon bombardımanı sonucu hasar görmemesi için yüzeyinin Pt ile kaplanmasından kaynaklanmaktadır. Algılayıcının ayırma gücünün 143 eV olması ve uzaysal (spatial) çözünürlüğün yeterli olmaması nedeniyle miktarsal analiz sonuçları tatmin edici olmamıştır.

Şekil 5.6'da Yapı 1'e ait STEM-EDX çizgi analizi tayfı gösterilmektedir. Analiz sonuçlarından; miktarca Ga elementinin azaldığı bölgede Al elementinin görece olarak arttığı gözlenmekle birlikte kesin sonuçlara varmakta zorlanılmıştır. Bu, STEM-EDX yönteminin çözünürlüğünün miktarsal analizde (quantification) ince katmanları (<10nm) ayırtmakta yetersiz kaldığının bir göstergesidir.



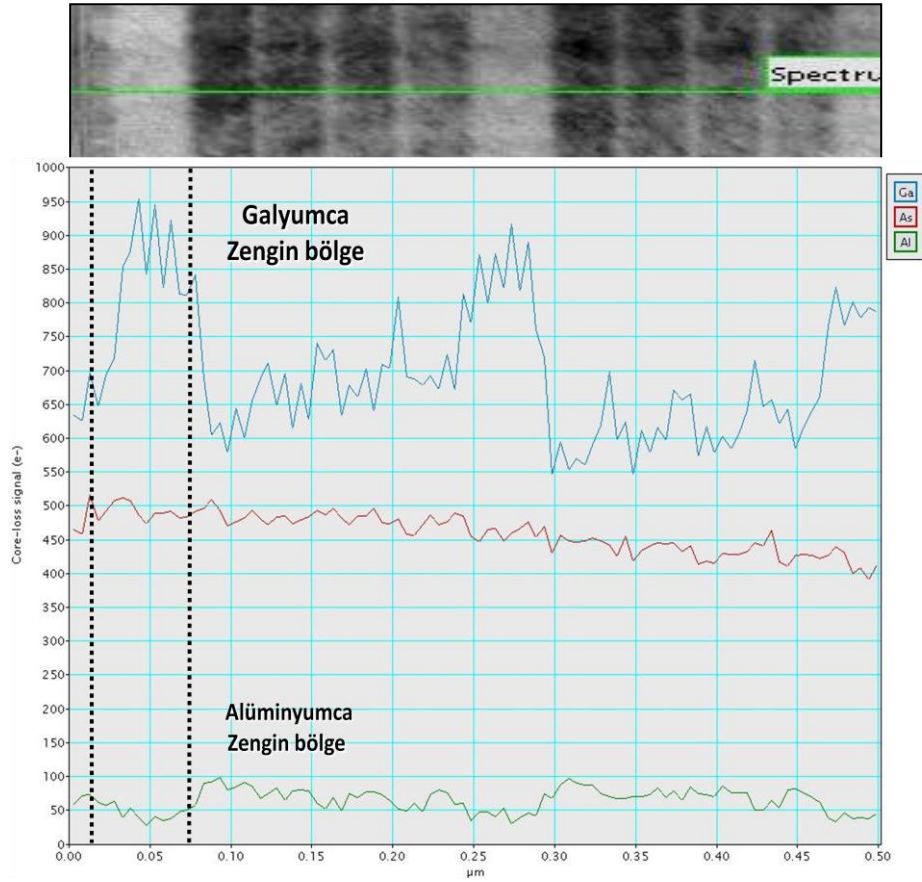
Şekil 5.6. Yapı 1'e ait STEM-EDX çizgi analizi tayfı

Yapı 1 için elde edilen EDX sonuçlarını doğrulamak ve bu bölgelerin kimyasal içeriklerini detaylı bir şekilde belirleyebilmek için STEM-SI-EELS tekniği kullanılmıştır. Şekil 5.7'de Yapı 1'e ait STEM-SI-EELS profili gösterilmektedir. STEM-SI-EELS profilinde enerji kayıplarına bağlı olarak elementlerin varlığı belirlenir. Bu profilde Ga ile Al'un birbirleriyle olan ilişkisi net bir şekilde gözlenmektedir. Aynı sonuca STEM-SI-EELS çizgi analizi tayfindan da ulaşılmıştır. Şekil 5.8'de STEM-SI-EELS çizgi analizinden elde edilen tayf görülmektedir.



Şekil 5.7. Yapı 1'e ait STEM-SI-EELS profili

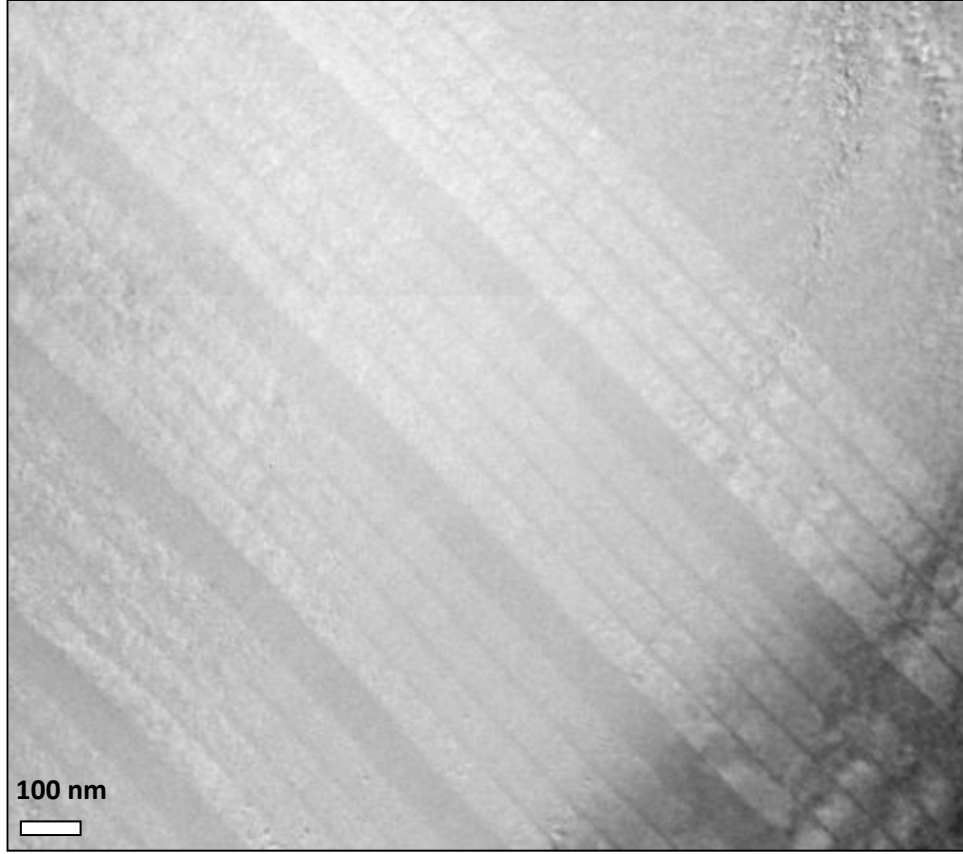




Şekil 5.8. Yapı 1'e ait STEM-SI-EELS çizgi analizi tayfı

Bu tayfdan elde edilen bilgiler ışığında Ga elementinin miktarca fazla olduğu bölgelerde Al elementinin miktarca daha az olduğu, As elementinin miktarının ise çizgi boyunca değişmediği söylenir. Tüm bunlar beklenen sonuçlardır. Çünkü kuantum kuyularında Al bulunmazken, bariyerlere geçildiğinde Ga miktarındaki düşüş kadar Al miktarında artış söz konusudur. Bu analiz sonuçları daha önce STEM-EDX nokta analizi ile elde ettiğimiz verilerle uyumludur.

EELS tekniği ile elde edilen verilerle, EFTEM üç pencereli elementel haritalama tekniğinde elde edilen veriler aynı olmakta birlikte verinin sunuş biçiminde farklılık vardır. Veriler EELS tekniğinde tayf olarak elde edilirken EFTEM üç pencereli elementel haritalama tekniğinde görüntü olarak alınmaktadır. Şekil 5.9 Yapı 1'in EFTEM sıfır enerji kayıp görüntüsünü göstermektedir.

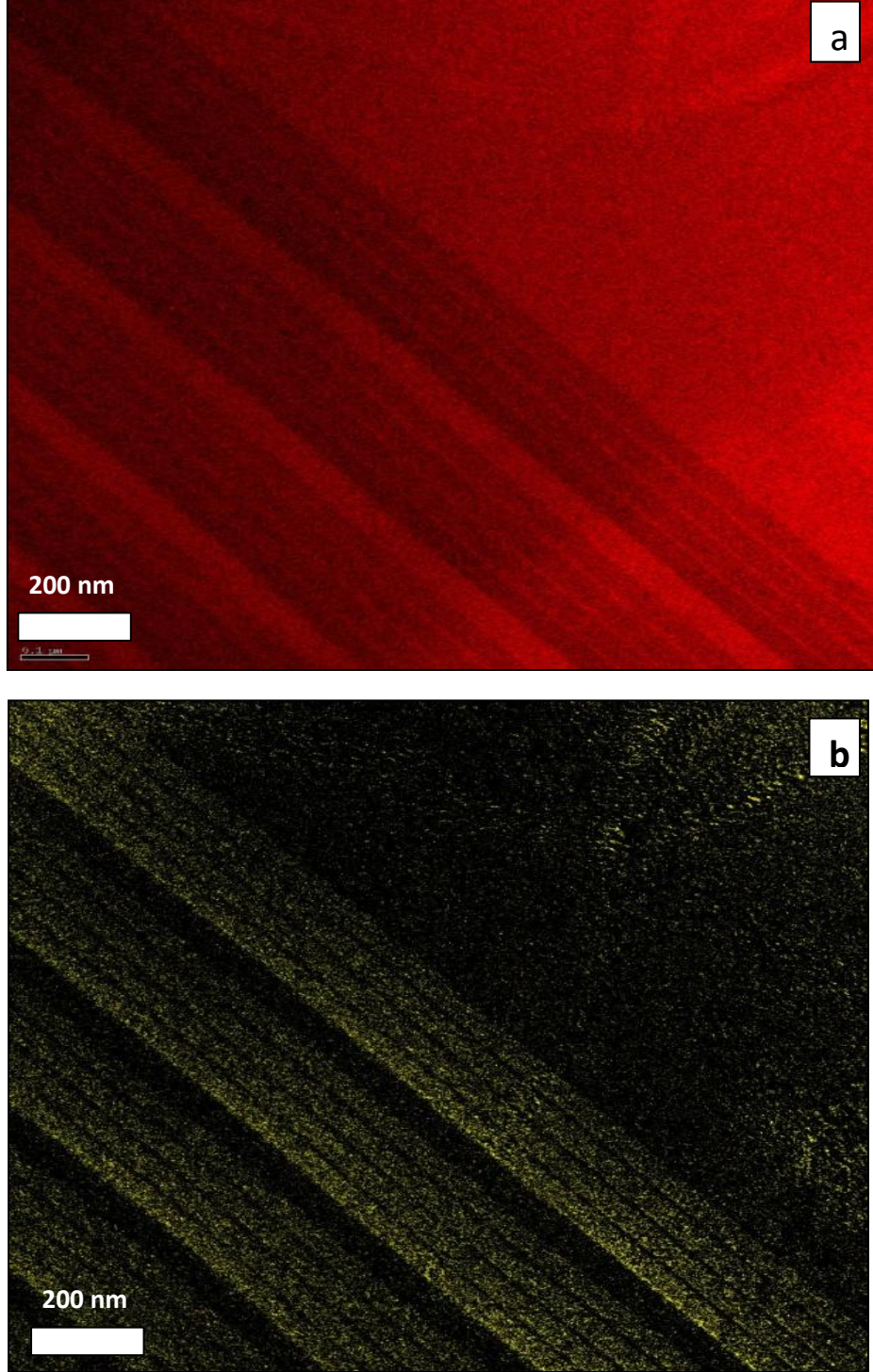


**Şekil 5.9.** Yapı 1'e ait EFTEM sıfır enerji kayıp görüntüsü

Şekil 5.9'daki bu görüntü son derece önemlidir. Bu görüntü 10 eV'luk aralık (slit width) kullanılarak kaydedilmiştir. Sıfır enerji kayıp görüntüsünde amaç, doğrudan geçen elektronları içeren görüntüyü elde edebilmektir. Bu sebeple seçilen aralık hem doğrudan geçen bütün elektronları içerecek kadar geniş olmalı hem de doğrudan geçen elektronların dışındakileri kapsamayacak şekilde dar olmalıdır. Kaydedilen sıfır enerji kayıp görüntüsü, kalınlık haritalamasının çıkarılmasında ve numunenin kalınlığının yapılan EELS-EFTEM analizleri için ne kadar uygun olduğunun belirlenmesinde kullanılır. Şekil 5.10a'da 1115 eV enerji kaybına sahip Ga  $L_{3,2}$  kenarının haritası, Şekil 5.10b'de ise 73 eV enerji kaybı değerine sahip Al  $L_{3,2}$  kenarının haritası gösterilmektedir.

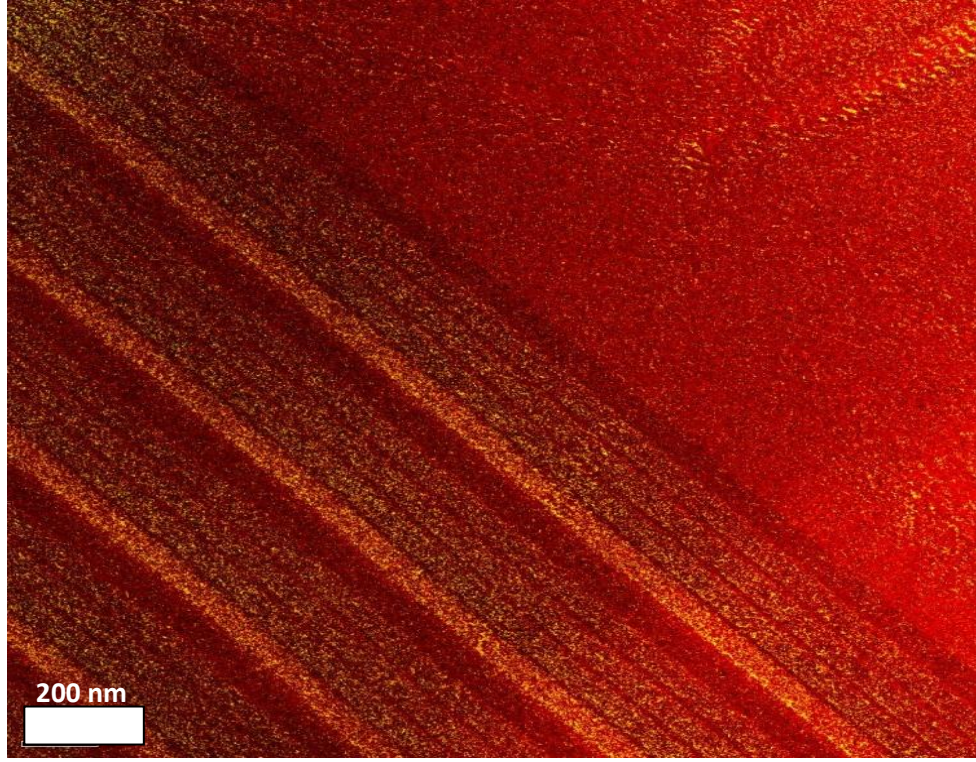
EFTEM üç pencere haritalama tekniğinde kimyasal analiz yapılırken yapı içerisinde bulunan tüm elementlerin ortak haritasını da elde ederiz. Şekil 5.11'de

Ga ile Al'un ortak haritası görülmektedir. Bu haritada iki elementi de içeren bölgeler parlak yeşil renkte görülmektedir.



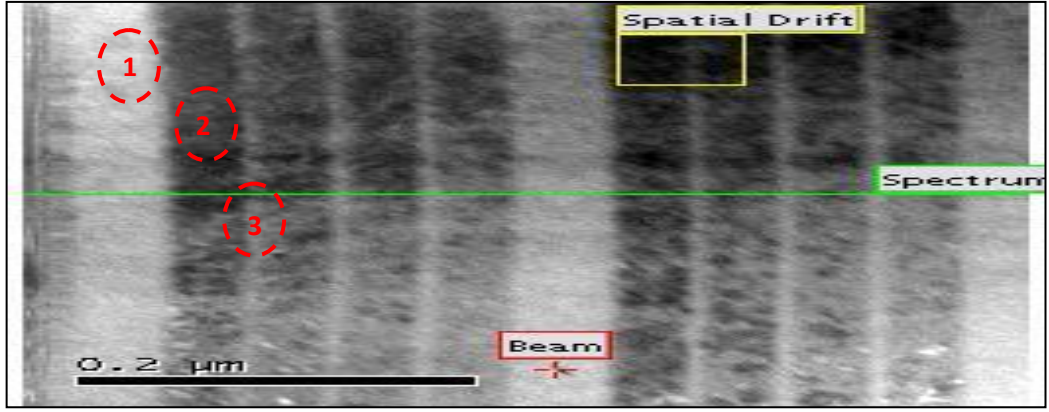
**Şekil 5.10.** (a) Ga 1115 eV enerji kayıplı L<sub>3,2</sub> kenarının haritası ve (b) Al'un 73 eV enerji kayıplı L<sub>3,2</sub> kenarının haritası





**Şekil 5.11.** Ga ile Al elementlerinin ortak EFTEM haritası

EELS tekniği ile belirlenen bölgelerden alınan tayflar ile miktarsal analiz yapılarak yapının kompozisyonunu belirlenmiştir. Şekil 5.12 EELS tayfının alındığı bölgeleri numune üzerinde göstermektedir. Yapı 1'e ait STEM HAADF görüntüsünde belirlenen bölgelerden EELS tayfları alınarak bu tayflardan elde edilen kenarların şekillerinin Gatan EELS Atlas'da referans olarak verilen kenarların şekilleriyle birebir uyduğu gözlenmiştir. Bu da yapımızın EELS tekniği için oldukça elverişli olduğunu açıklamaktadır. Şekil 5.13'de STEM HAADF görüntüsünde belirlenen bölgelerden alınan EELS tayfları verilmektedir. Bu tayflardan yararlanılarak elde edilen miktarsal analiz sonuçları ise Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

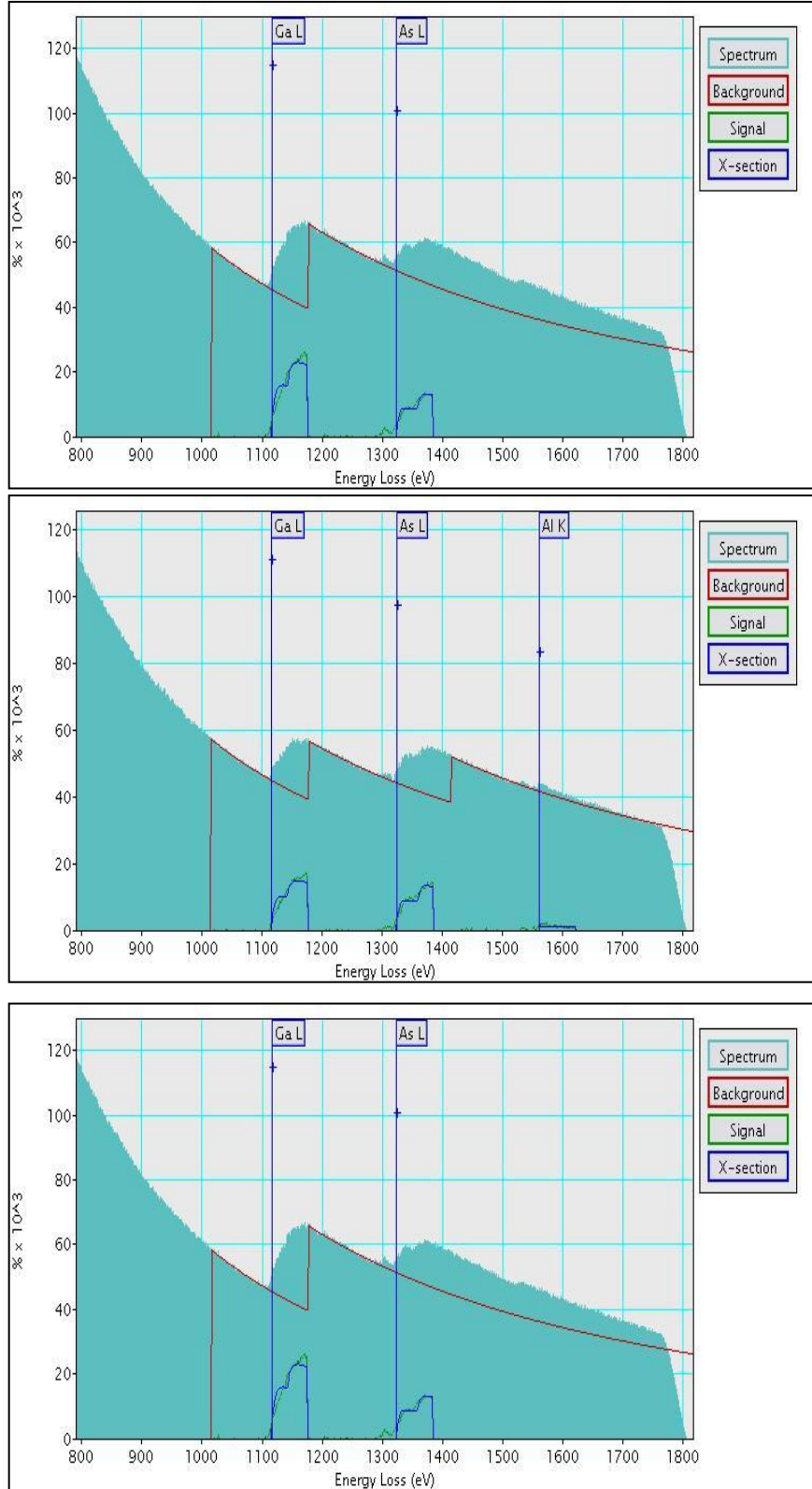


Şekil 5.12. EELS tayfının alındığı bölgeler

Çizelge 5.1. EELS tayflarından elde edilen miktarsal analiz sonuçları

**ATOMCA %**

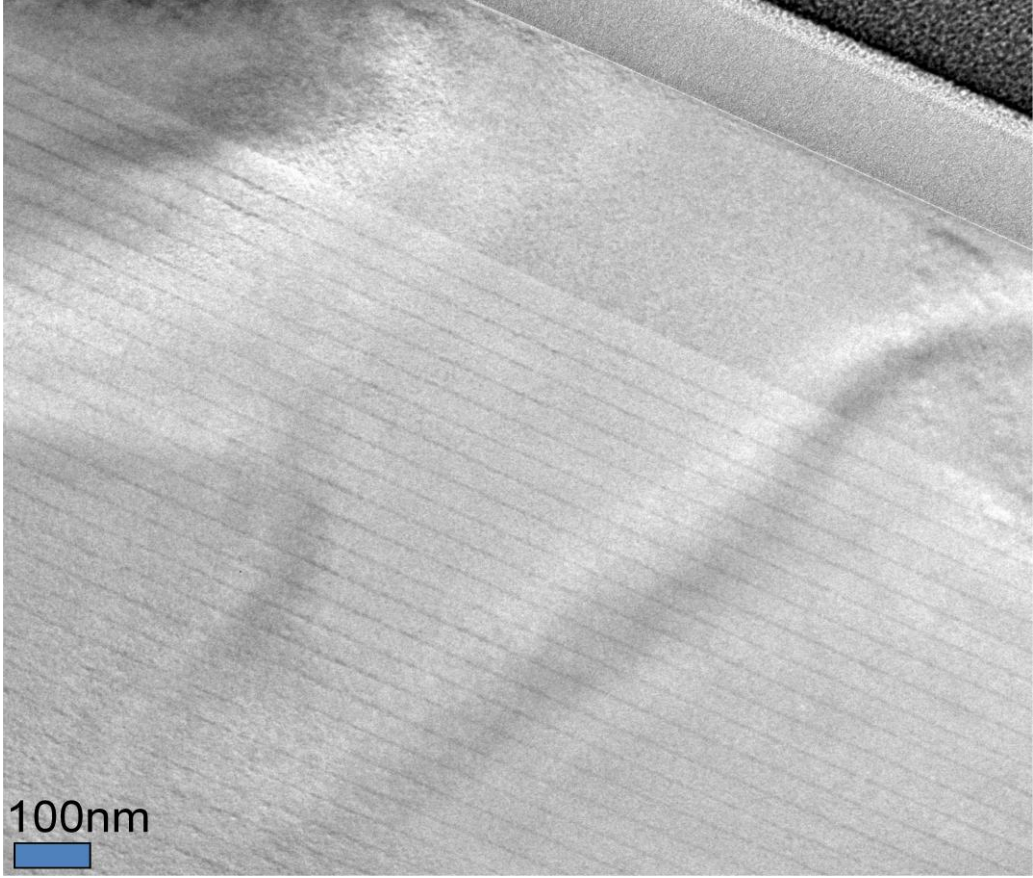
	Ga	As	Al	Toplam
GaAs	51.00	49.00	-	100.00
AlGaAs	29.73	44.09	26.18	100.00
GaAs	51.00	49.00	-	100.00



Şekil 5.13. Yapı 1'e ait STEM HAADF görüntüsünde gösterilen bölgelerden alınan EELS tayfları

### 5.3.2 Yapı 2 Analiz Sonuçları

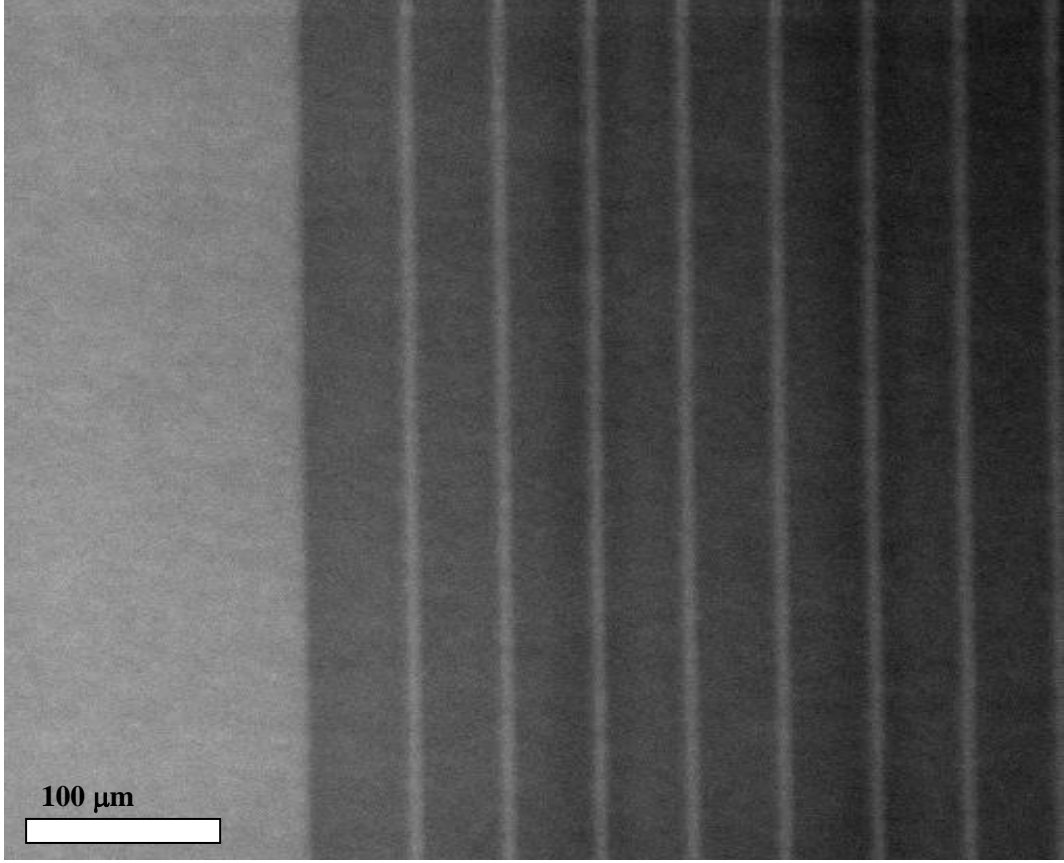
Yapı 2, yapı 1'den farklı olarak simetrik çoklu kuantum kuyularından oluşmaktadır. TEM-BF görüntüleme tekniği ile yapının mikroyapısı belirlenmeye çalışılmıştır. Şekil 5.14 yapı 2'nin TEM-BF görüntüsünü göstermektedir. GaAs alttaş üzerine periyodik olarak büyütülen kuantum kuyuları TEM-BF görüntüsünde açıkça gözlenmektedir.



Şekil 5.14. Yapı 2'nin TEM-BF görüntüsü

Numunenin elementel içeriğini belirlemek için farklı bölgelerden STEM kipinde EDX yapılmıştır. Numunenin atomik netlik bilgisini veren STEM HAADF görüntüsü Şekil 5.15'de, EDX nokta analizi sonucunda elde edilen tayflar ise Şekil 5.16'da gösterilmektedir.

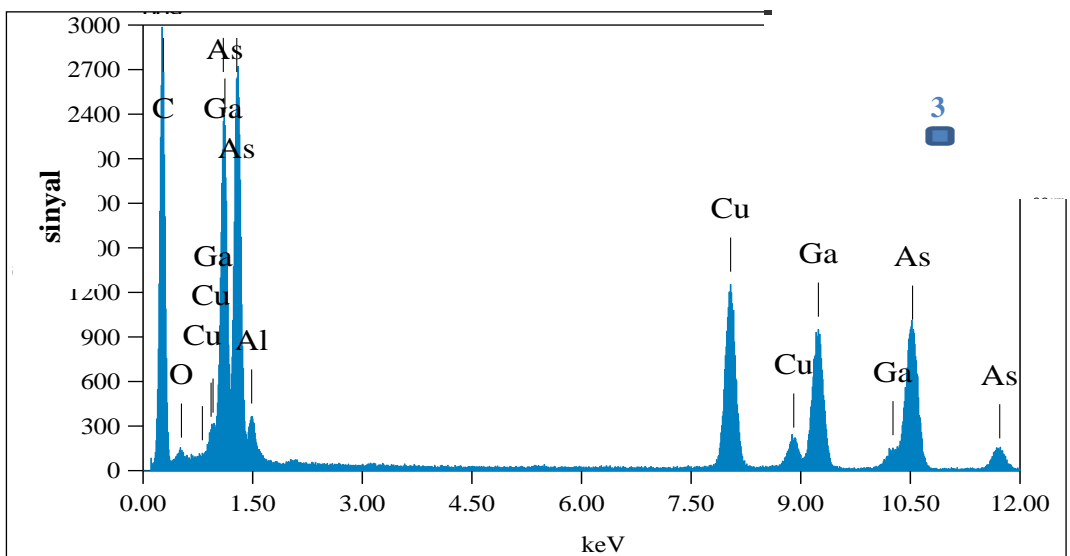
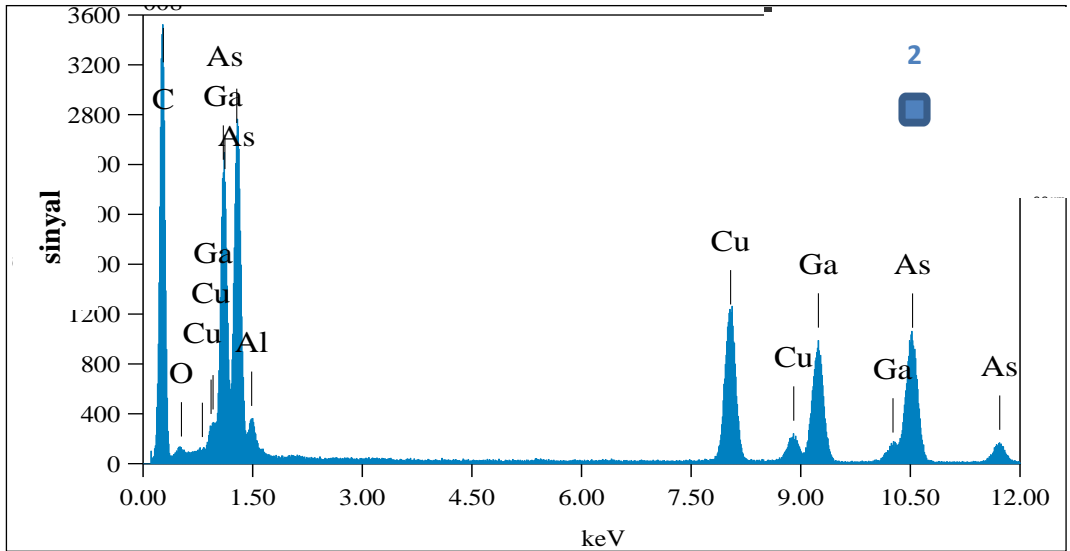
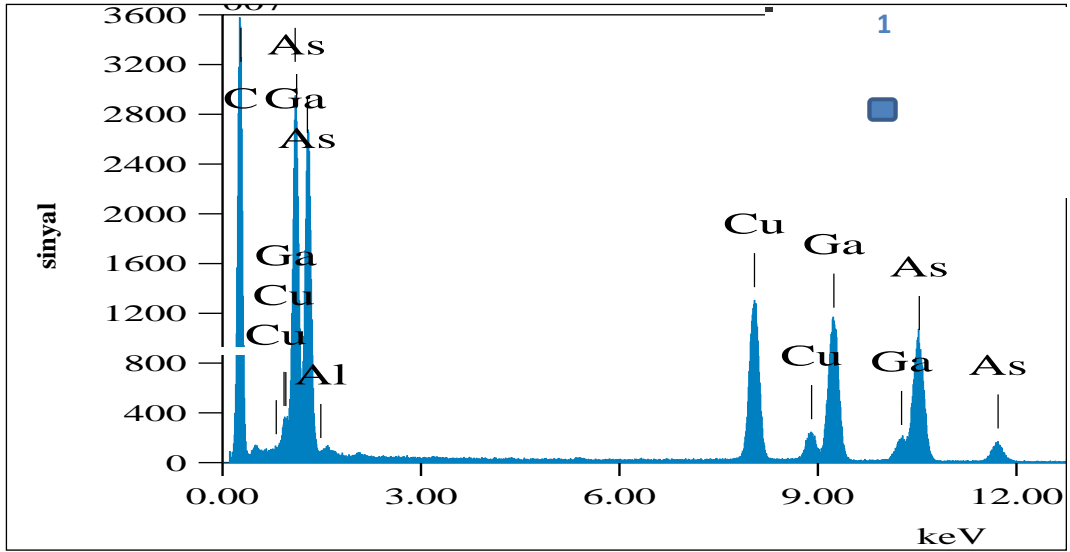




**Şekil 5.15.** Yapı 2'nin STEM HAADF görüntüsü

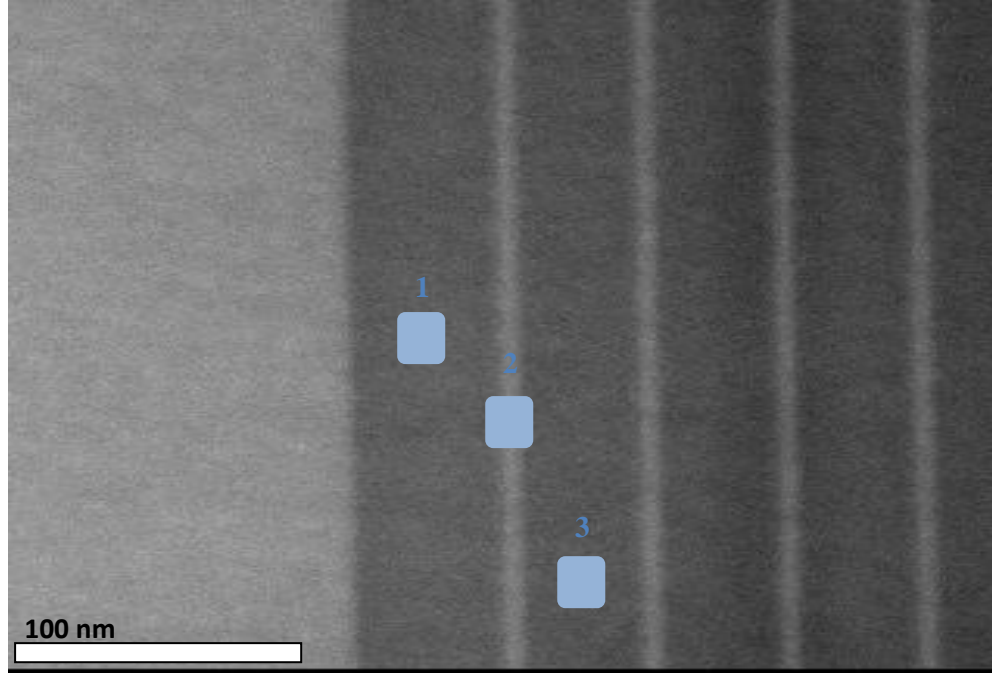
STEM HAADF görüntüsünden anlaşıldığı gibi bariyerlerdeki Al konsantrasyonu değiştikçe yapının netliği (contrast) de değişmektedir. STEM HAADF görüntüleme tekniği ile Al'un miktarca yoğun olduğu tabakalar daha parlak ve açık renkte, miktarca az olduğu tabakalar ise daha koyu renkte görülmektedir (Şekil 5.15). Ayrıca bu görüntüleme tekniği ile kuantum kuyularının kolaylıkla ayırtedilebileceği büyütmede alınan görüntü ile tabaka kalınlıkları belirlenebilir. Böylelikle istenilen yapının en iyi koşullarda büyütülüp büyütülmediği anlaşılır.



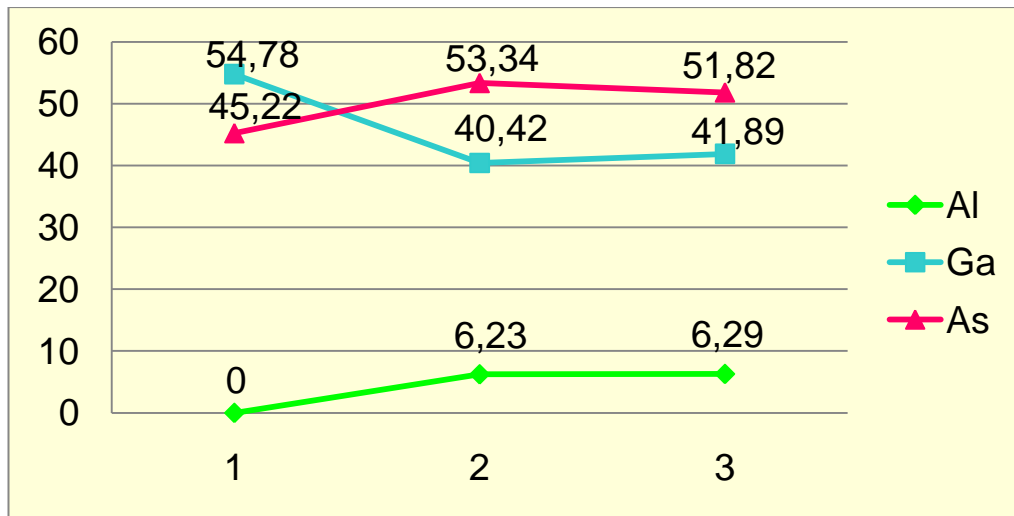


Şekil 5.16. STEM-EDX nokta analizi sonucunda elde edilen tayflar

STEM EDX nokta analizi sonucunda elde edilen tayfların alındığı noktalar Şekil 5.17’de daha ayrıntılı olarak gösterilmektedir. Al konsantrasyonu değişen üç farklı noktadan alınan STEM EDX nokta analizlerinin miktarsal analiz sonuçları ise Şekil 5.18’de verilmektedir. Üç ayrı bariyerden alınan nokta analizlerinde Al olması beklenirken 1 nolu bölgede Al’un hiç olmaması beklenmeyen bir sonuçtur.

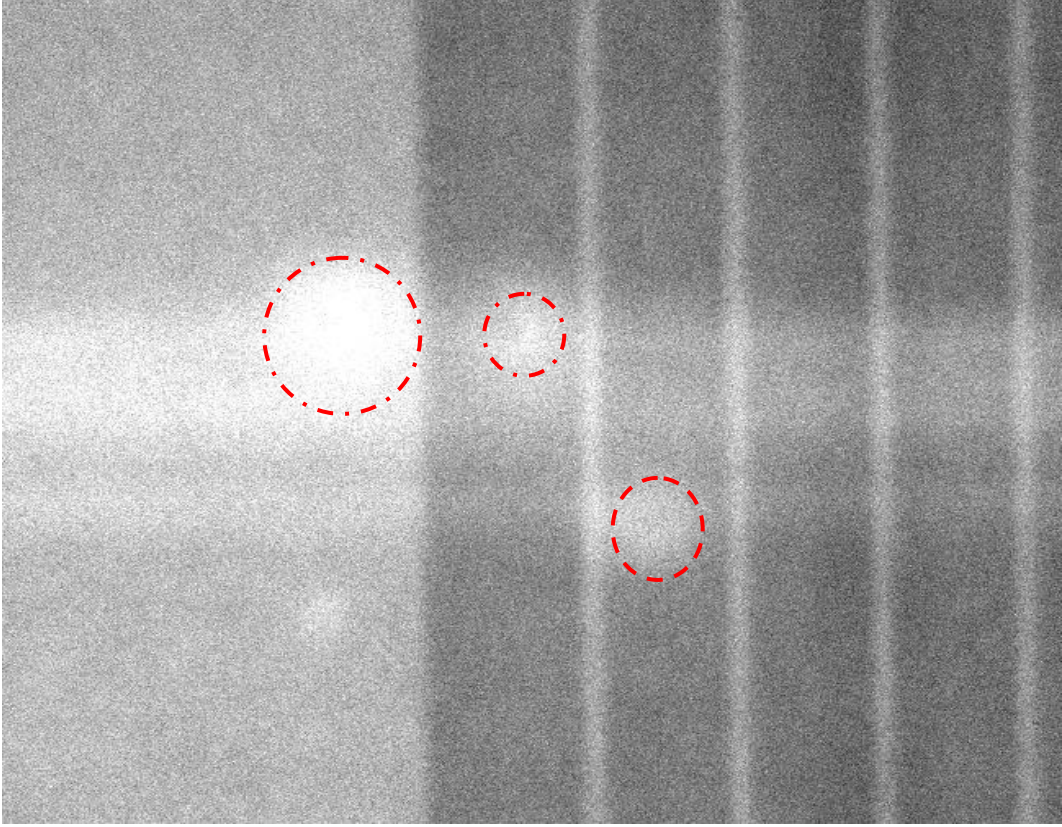


Şekil 5.17.STEM EDX nokta analizi ile elde edilen tayfların alındığı noktalar



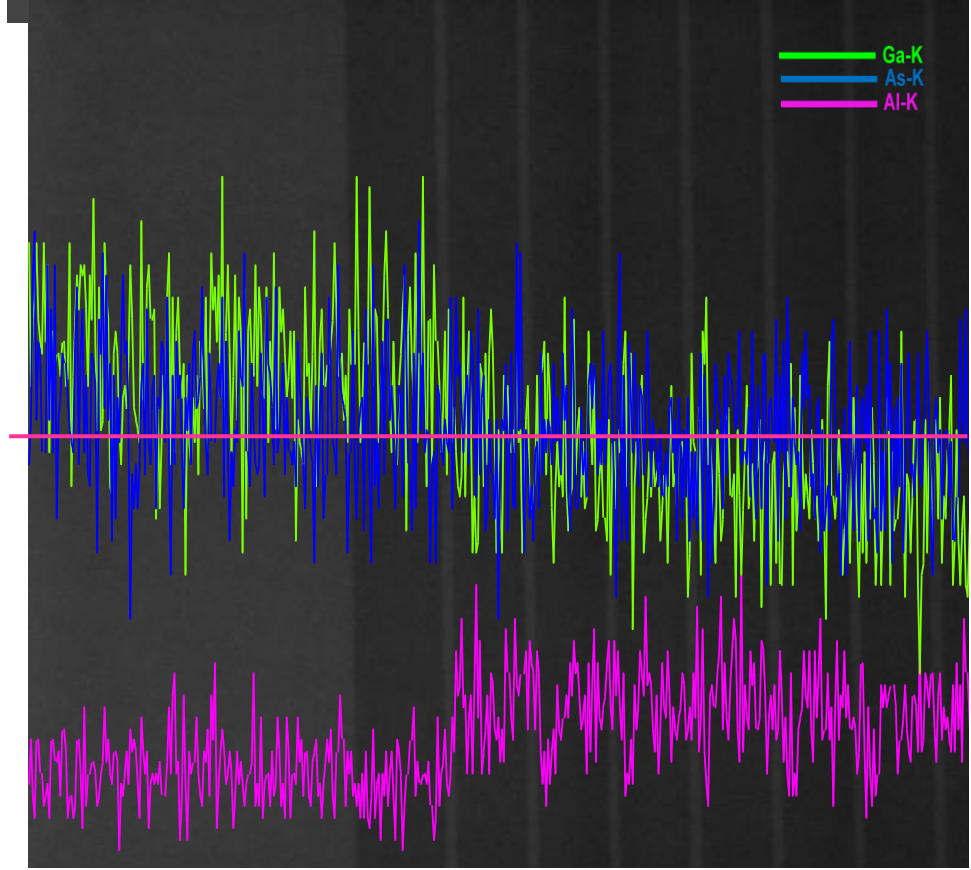
Şekil 5.18.STEM EDX nokta analizlerinin miktarsal analiz sonuçları

Bunun sebebi araştırılırken analiz sonrasında alınan görüntü ortadaki problemi açıklamaktadır. Şekil 5.19'daki STEM HAADF görüntüsü problemin ne olduğunu ortaya koymaktadır.



**Şekil 5.19.**Yapı 2'nin STEM EDX analizi sonrasında alınan görüntüsü

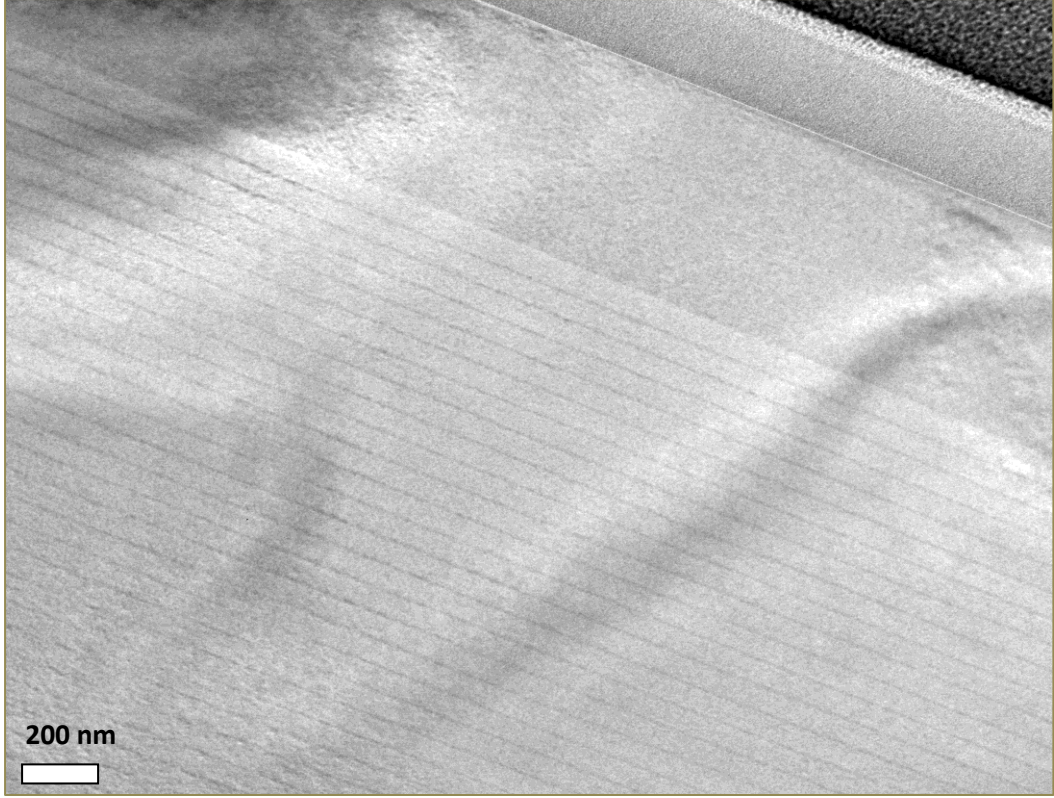
STEM kipinde yapılan EDX analizinde elektron demeti yakınsak hale getirilip numune üzerine düşürüldüğünden ve analiz boyunca numuneyi taradığından elektron geçirgenliğine karşı duyarlı olan malzemelerde hasar (electron damage) oluşmaktadır. Şekil 5.19'da hasarların olduğu noktalardan analizin alındığı, sonuçların istenilen noktalardan (Şekil 5.17) alınan analizlere ait olmadığı görülmektedir. Bu noktada güvenilir bir analiz için yapılan ayarların ne kadar iyi olması gerektiği de anlaşılmaktadır. STEM EDX çizgi analizi de STEM ayarlarının düzgün olmadığını doğrulamaktadır. Şekil 5.20 yapı 2'nin STEM EDX çizgi analizini göstermektedir.



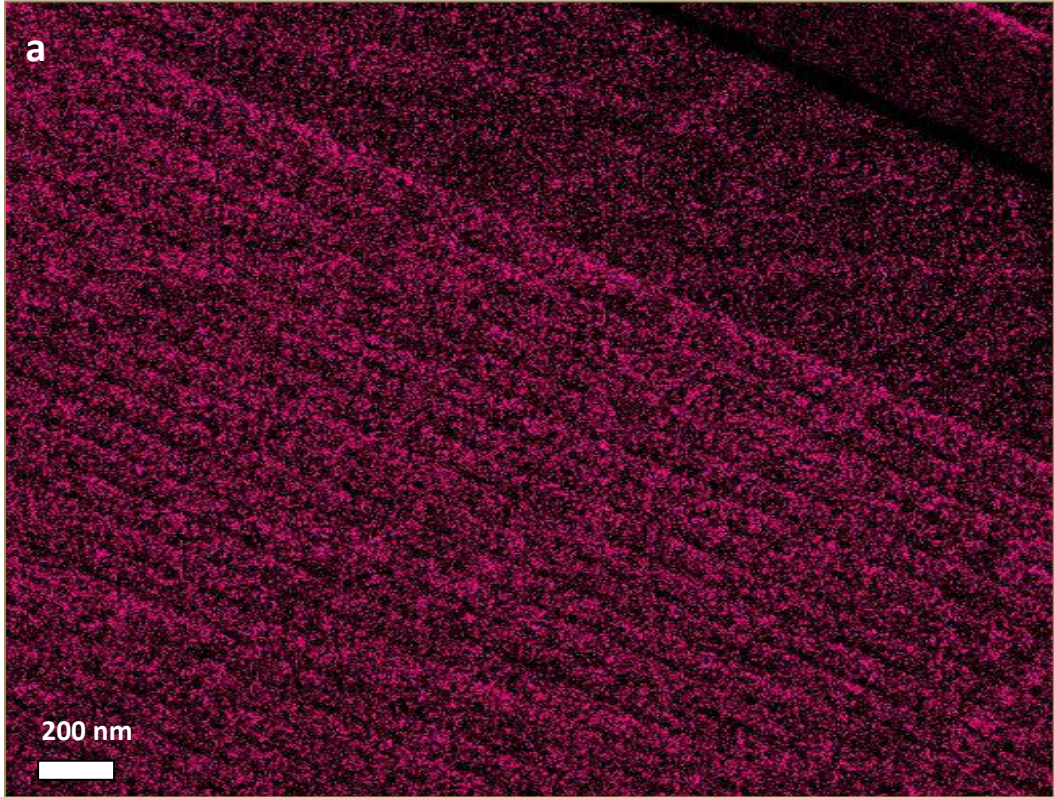
Şekil 5.20. Yapı 2'nin STEM EDX çizgi analizi

Yapı 2'nin kimyasal kompozisyonu STEM kipinde ayarların düzgün olmaması sebebiyle EFTEM üç pencere elementel haritalama tekniğiyle belirlenmiştir. Şekil 5.21'de 10 eV'luk aralık kullanılarak kaydedilen sıfır enerji kayıp görüntüsü görülmektedir. Numune düzgün olarak inceltilemediği için numunede kalınlık etkisi oluşmaktadır. Bu durum da analizin sonucunu oldukça etkilemektedir. Şekil 5.22 (a)'da 1115 eV enerji kaybına sahip Ga  $L_{3,2}$  kenarının haritası, Şekil 5.22 (b)'de ise 73 eV enerji kaybı değerine sahip Al  $L_{3,2}$  kenarının haritası gösterilmektedir. Hangi elementin nerede daha çok yoğunlaştığı, her elementin kendine özgü renginin daha parlak görüldüğü bölgelerle ilişkilidir. Şekil 5.23'de Ga ile Al'un ortak haritası görülmektedir. Bu haritada iki elementi de içeren bölgeler parlak mor renkte görülmektedir. Böylece kaydedilen her iki elementin ortak haritasında parlak olan bölgeler bariyerleri temsil etmektedir.



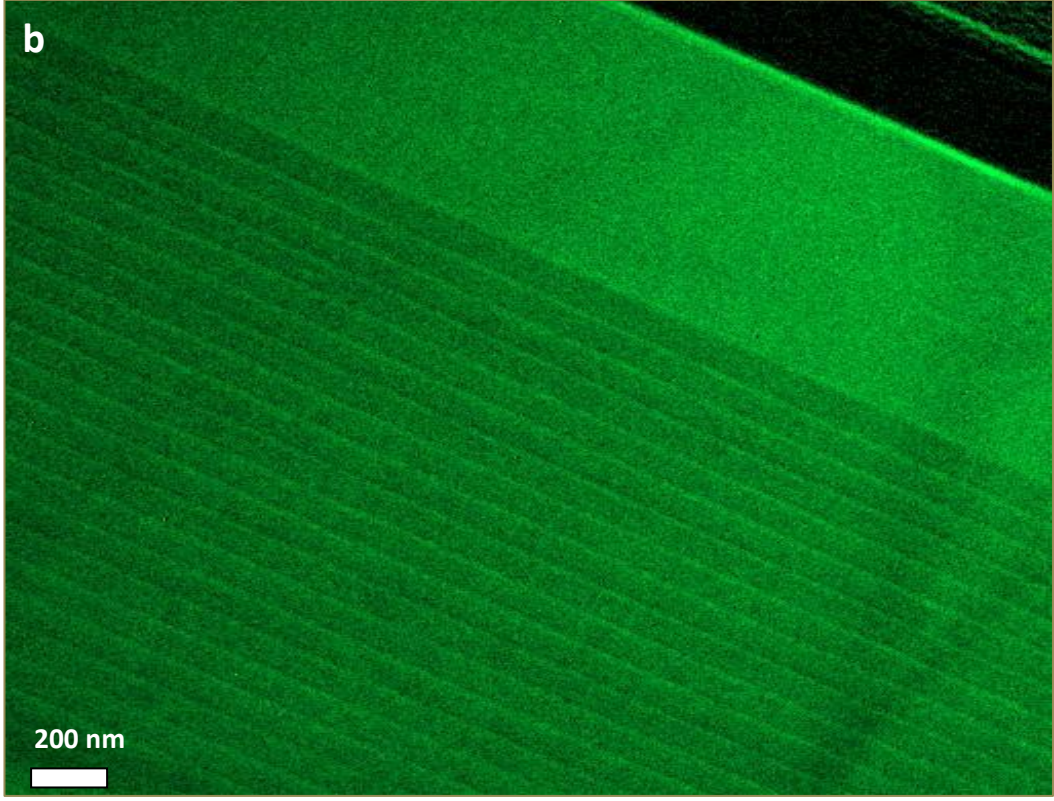


Şekil 5.21. Yapı 2'nin 10 eV'luk aralık kullanılarak kaydedilen sıfır enerji kayıp görüntüsü

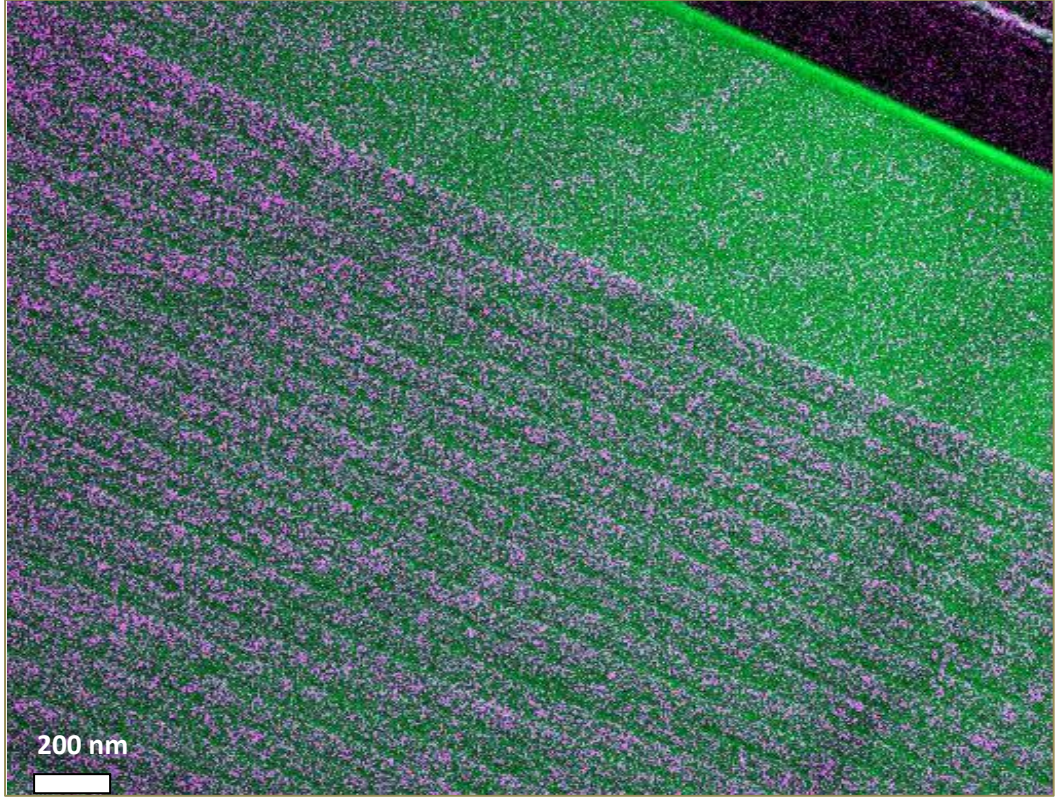


Şekil 5.22. (a) Ga 1115 eV enerji kayıplı  $L_{3,2}$  kenarının haritası ve (b) Al'un 73 eV enerji kayıplı  $L_{3,2}$  kenarının haritası





Şekil 5.22. (Devam) (a) Ga 1115 eV enerji kayıplı L<sub>3,2</sub> kenarının haritası ve (b) Al'un 73 eV enerji kayıplı L<sub>3,2</sub> kenarının haritası



Şekil 5.23. Ga ile Al elementlerinin ortak EFTEM haritası

## 6. SONUÇ

GaAs ve AlGaAs bileşikleri yüksek bağlanma gücü, sağlam termal kararlılık ve kolay katkılanabilme gibi özelliklere sahip olması nedeniyle kuantum kuyu yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. AlAs ve GaAs yarıiletkenlerinin bant aralığının birbirinden farklı olması; Al ve Ga oranlarını değiştirerek kuantum kuyulu yapılardaki kuyunun bant aralığının arttırılıp azaltılabilmesine olanak sağlar. Bu özellikleriyle bu sistemler kuantum kuyulu kızıl ötesi algılayıcılar için verimli ve elverişli malzemelerdir.

Bu çalışmada GaAs/AlGaAs tabanlı kuantum kuyularının geçirimli elektron mikroskobu ile analizi yapılmıştır. Çalışmada iki farklı yapı incelenmiştir. Bunlardan yapı 1 asimetrik çoklu kuantum kuyulu yapıya, yapı 2 ise simetrik çoklu kuantum kuyulu yapıya sahiptir.

Geçirimli elektron mikroskobunda incelenmesi için yapılardan numuneler hazırlanmıştır. Bu aşamada farklı numune hazırlama teknikleri kullanılarak numune hazırlama tekniği eniyileştirilmeye çalışılmıştır. Öncelikle yan kesit numune hazırlama tekniği denenmiştir. Laboratuvarımızda sahip olduğumuz olanaklar çerçevesinde numunenin kalınlığı 100  $\mu\text{m}$ 'nin altına indirilememiştir. Bu sebeple bu tekniğin son aşaması olan iyon inceltmede istenilen sonuç alınamamıştır. Daha sonra iyon dilimleme cihazı ile bir önceki tekniğin son aşamasında yaşanan problemin çözülmesi amaçlanmıştır. İyon dilimleme cihazı ile numune başarıyla hazırlanmıştır. Ancak geçirimli elektron mikroskobunda istenilen analizlerin gerçekleşebilmesi için cihazın değişkenlerinin (akım ve açı değerleri) değiştirilerek en uygun sonucu veren yöntem geliştirilmelidir. Son olarak odaklanmış iyon demeti tekniği ile numune hazırlanmış ve bu teknik geçirimli elektron mikroskobunda istenilen analizlerin gerçekleşmesini mümkün kılmıştır.

Geçirimli elektron mikroskobu ile ilk önce sistemin genel yapısı belirlenmeye çalışılmıştır. Kullanılan aydınlık alan görüntüleme tekniği ile yapıların mikro yapıları ayrı ayrı belirlenmiştir. Beklenildiği gibi yapı 1'in asimetrik, yapı 2'nin ise simetrik çoklu kuantum kuyularından oluştuğu gözlenmiştir. STEM-HAADF görüntüleme tekniğinin atom numarasına bağlı

olarak verdiği netlik mekanizması ile farklı Al konsantrasyonuna sahip tabakalar kolaylıkla belirlenmiştir. Ayrıca bu görüntüleme tekniği ile tabaka kalınlıkları da ölçülmüştür. Sistemin kompozisyonunu belirlemek amacıyla STEM-EDX nokta ve çizgi analizleri yapılmıştır. Miktersal analiz için çözünürlüğü EDX dedektörünün çözünürlüğünden çok daha iyi olan ve EDX tekniğine kıyasla çok daha hızlı analiz yapma olanağı sunan EELS tekniği kullanılmıştır. Bu teknikle kuantum kuyularının ve bariyerlerin atomca % hangi elementi içerdiği saptanmıştır. Daha önce EDX tekniği ile belirlenen sistemlerin kompozisyonları EFTEM üç pencere haritalama tekniği ile doğrulanmıştır. Bu teknikle yapıların içerisindeki her elementin ayrı ayrı ve tüm elementlerin ortak haritalaları elde edilmiştir. Bu teknik ile hangi elementin nerede daha yoğun olduğunu belirlenmiştir.



## KAYNAKLAR

- [1] Liu, H.C. ve Schneider, H., *Quantum Well Infrared Photodetectors*, Springer, Berlin, Almanya, 2007.
- [2] Liu, H.C. ve Capasso, F., *Intersubband Transition in Quantum Wells: Physics and Devices Applications I*, Academic Press, Londra, İngiltere, 2000.
- [3] Tidrow, M.Z., Beck, W.A., Clark, W.W., Pollehn, H.K., Little, J.W., Dhar, N.K., Leavitt, R.P., Kennerly, S.W., Beekman, D.W., Goldberg, A.C. ve Dyer, W.R., “ Device Physics and focal plane array applications of QWIP and MCT”, *Opto-electronics*, **7(4)**, 283-296, 1999.
- [4] Madelung, O., *Physics of III-V Compounds*, J.Wiley, New York, A.B.D. 1964.
- [5] Grahn, H.T., *Introduction to Semiconductor Physics*, World Scientific, Singapur, 1999.
- [6] Schroder, D.K., *Semiconductor Material and Device Characterization*, , John Willey&Sons Inc., New York, A.B.D., 2006.
- [7] Blakemore, J.S., *Solid State Physics*, W.B. Saunders Company, Philadelphia, A.B.D., 1969.
- [8] Ashcroft, N.W. ve Mermin, N.M., *Solid State Physics*, Int.Ed., Saunders College Publishing, Philadelphia, A.B.D., 1976.
- [9] Singh, J., *Semiconductor Optoelectronics Physics and Technology*, McGraw-Hill International Editions, New York, A.B.D., 1995.
- [10] Seeger, K., “*Semiconductor Physics: An Introduction 8<sup>th</sup> Edition*”, Springer-Verlag, Berlin, Almanya, 2002.
- [11] Yu, P.Y., *Fundamentals of Semiconductors*, Springer-Verlag, Berlin, Almanya, 1996.
- [12] Korçak, S.,  *$Al_xGa_{1-x}As$  ve  $In_xGa_{1-x}N$  Tabakalı Yarıiletken İnce Filmlerin Optik ve Yapısal Özelliklerinin Tayini*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
- [13] Kınacı, B.,  *$In_xGa_{1-x}As/GaAs$  Çoklu Kuantum Kuyu Yapısının MBE Tekniği ile Büyütülmesi: Yapısal, Optik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi*,

- Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [14] Başak, H., *Akım Transiyent Spektroskopisi Yöntemi ile Yarıiletken Yapıların İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
- [15] Levine, B.F., “Quantum Well Infrared Photodetectors”, *J. Appl. Phys.*, **74**: R1, 1993.
- [16] Kartal, D., *Kuantum Kuyulu Kızılötesi Fotodetektörler (QWIP)*, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 2006.
- [17] Gunapala, S.D. and Liu H.C., *Intersubband Transitions in Quantum Wells*, Academic Press, San Diego, A.B.D., 2000.
- [18] Rogalski, A. and Chrzanowski, K., “Infrared Detection and Devices”, *Opto- Electronics Review*, **10** (2), 111-136, 2002.
- [19] Vincent, D., *Fundamentals of Infrared Detectors Operation and Testing*, John Wiley&Sons, New York, A.B.D., 1990.
- [20] Razeghi, M., *Long Wavelength Infrared Detectors*, Gordon and Breach Science Publishers, Londra, İngiltere, 1996.
- [21] Cho, A., “Film Deposition by Molecular Beam Epitaxy”, *Journal Science Tech*, **8** (1): 31-38, 1971.
- [22] Sorenson, C.B., *MBE-Growth and Processing and Characterization of Low Dimensional*, Doktora Tezi, Microelectronic Centre and Niels Bohr Institute AFG, Kopenhag, Danimarka, 1998.
- [23] Williams, D.B. ve Carter, B.C., *Transmission Electron Microscopy*, Plenum Press, New York and London, A.B.D. ve Londra, 1996.
- [24] Ponce, F., *High Resolution Transmission Electron Microscopy of Defects and Interfaces in Semiconducting Materials*, Doktora Tezi, Stanford Üniversitesi, A.B.D., 1997.
- [25] Rajesh, R., *Structural, Chemical and Electrical Characterization of III-V Materials Grown by Low Temperature Molecular Beam Epitaxy*, Doktora Tezi, Arizona State Üniversitesi, A.B.D, 1996.

- [26] Ping, L., *High Resolution Electron Microscopy Studies of Surface Structures and Reactions*, Doktora Tezi, Arizona State Üniversitesi, A.B.D., 1990.
- [27] Yuanyuan, L., *Atomic Scale Analysis of Semiconductor Quantum Dots by Scanning Transmission Electron Microscopy*, Doktora Tezi, Illinois, Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Japonya, 2003.
- [28] Zhou, W., *III-V Compound Semiconductor Material Characterization of Microstructures and Nanostructures on Various Optoelectronic Devices with Analytical Transmission Electron Microscopy and High Resolution Electron Microscopy*, Doktora Tezi, Southern California Üniversitesi, Kaliforniya, A.B.D., 2004.
- [29] Yabuuchi, Y. ve Tametou S., “A Study of The Damage on FIB-prepared TEM samples of  $Al_xGa_{1-x}As$ ”, *Journal of Electron Microscopy*, **53** (5):471-477,2004.
- [30] Kimoto, K., “Spatially-Resolved EELS Analysis of Multilayer using EFTEM and STEM”, *Journal of Electron Microscopy*, **50** (6): 523-528, 2001.doğru
- [31] Anonim, *Tem Sample Preparation*, 2010  
[www.gatan.com/tutorials/](http://www.gatan.com/tutorials/)
- [32] Anonim, *Tem Sample Preparation*, 2010.  
<http://140.113.29.148/announcement/tem-training%20course.pdf>
- [33] Kuru, H., *GaAs/AlGaAs Tabanlı Kuantum Kuyularının Optiksel ve Elektriksel Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2010.
- [34] Arpapay, B., *GaAs/AlGaAs Tabanlı Yarıiletken Yapılardan Aygıt Üretimi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2010.