

**Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs NANOYAPILARININ  
KİMYASAL AŞINDIRMA YÖNTEMİ İLE  
İNCELENMESİ**

**Yusuf Alper ULU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İLERİ TEKNOLOJİLER**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EKİM 2007  
ANKARA**

Yusuf Alper ULU tarafından hazırlanan  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  NANOYAPILARININ KİMYASAL AŞINDIRMA YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Tofiq MAMMADOV  
Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İleri Teknolojiler Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Müjgan ÇULFAZ  
İleri Teknolojiler Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Tofiq MAMMADOV  
Fizik Anabilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Necati YALÇIN  
Fizik Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Tarih : 17 / 10 / 2007

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nermin ERTAN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Yusuf Alper ULU

**Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs NANOYAPILARININ KİMYASAL AŞINDIRMA  
YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Yusuf Alper ULU**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Ekim 2007**

**ÖZET**

Bu tez çalışmasında tek kristaller ve MBE tekniği ile büyütülen Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs nanoyapılarının ıslak kimyasal aşındırma yöntemi kullanılarak ortaya çıkan yüzey morfolojisi ve numunenin kalitesi incelendi. Numune kalınlığındaki değişimi profilometre ile yüzeyindeki pürüzlülüğü Spektroskopik Elipsometre ile ve yüzeydeki kusurların görüntülerini optik mikroskop ile analiz edildi. Bizim burada ıslak kimyasal aşındırma yönteminde kullandığımız aşındırıcı solüsyon sitrik asit/hidrojen peroksit (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)'dir. Literatürde hem sitrik asit/hidrojen peroksit hemde farklı solüsyonlarla yapılan aşındırmalar, bizim yaptığımız çalışmalarla karşılaştırıldı. Bir materyali diğerinden daha hızlı ortadan kaldıran, seçici aşınım yapan aşındırıcı solüsyon değeri belirlendi.

**Bilim Kodu : 202.1.147**  
**Anahtar Kelimeler : AlGaAs, GaAs, Aşındırma, MBE, Profilometre**  
**Sayfa Adedi : 83**  
**Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Tofiq MAMMADOV**

**EXAMINATION OF  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  NANOSTRUCTURES WITH  
CHEMICAL ETCHING METHOD**

**(M.Sc. Thesis)**

**Yusuf Alper ULU**

**GAZİ UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**October 2007**

**ABSTRACT**

**In this study, the surface morphology and sample quality of wet chemical etched  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  nanostructures which were growth by MBE techniques and single crystals has been examined. The change in thickness of sample with profilometry, the roughness on the surface with spectroscopic ellipsometry and the displays of defect on surface with optic microscop are analyzed. The etching solution used in this study was citric acid/hydrogen peroxide ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7/\text{H}_2\text{O}_2$ ). Herewith, we present the comparison between our studies and previously carried studies for citric acid/hydrogen peroxide etching in the literature. The etching solution value, which removes a material faster than other one and makes selective etching, is determined.**

**Science Code : 202.1.147**

**Key Words : AlGaAs, GaAs, Etching, MBE, Profilometry**

**Page Number : 83**

**Adviser : Prof. Dr. Tofig MAMMADOV**

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Prof.Dr. Tofig MAMMADOV'a yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım hocam Öğr.Gör.Dr. Barıő AKAOĞLU'na, ayrıca Gazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Yarıiletken İleri Araştırma Laboratuvarını (STARLAB) kurarak, yüksek lisans çalıőmamın gerçekleşmesine imkan veren değerli hocam Prof.Dr.Süleyman ÖZÇELİK'e teşekkür ederim.

Yüksek lisans çalıőmamda, maddi ve manevi desteklerinden dolayı, çok sevdiğim anneme, babama, eşime ve oğluma teşekkür ediyorum. Bu çalışmayı aileme ithaf ediyorum.

Bu çalışma Türkiye Devlet Planlama Teőkilatı tarafından desteklenmiştir. Proje no: 2001K120590 ve Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP), FEF. 05/2006-05 ve 05/2006-12.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1. Metallerde, Yalıtkanlarda ve Yarıiletkenlerde İletkenlik.....	4
2.1.1. Metaller ( $10^4$ S/cm $<$ $\sigma$ $<$ $10^6$ S/cm).....	4
2.1.2. Yalıtkanlar ( $10^{-18}$ S/cm $<$ $\sigma$ $<$ $10^{-8}$ S/cm).....	5
2.1.3. Yarıiletkenler ( $10^{-8}$ S/cm $<$ $\sigma$ $<$ $10^4$ S/cm).....	5
2.2. Yarıiletken Malzemeler.....	6
2.2.1. Elementsel yarıiletkenler.....	6
2.2.2. Bileşik yarıiletkenler.....	6
2.3. Bant Aralığı.....	11
2.3.1. Direkt bant yarıiletkenler (Doğrudan soğurma).....	12
2.3.2. İndirekt bant yarıiletkenler (Dolaylı soğurma).....	13
2.4. Yarıiletken Tipleri.....	14

**Sayfa**

2.4.1. Saf (intrinsic) yarıiletkenler.....	14
2.4.2. Katkılı yarıiletkenler.....	15
2.5. GaAs ve $Al_xGa_{1-x}As$ Yarıiletkenlerinin Oda Sıcaklığındaki ( $T= 300\text{ K}$ ) Bazı Fiziksel Parametreleri.....	16
2.5.1. $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ bant yapısı.....	16
2.5.2. GaAs.....	18
2.5.3. $Al_xGa_{1-x}As$ .....	19
2.6. Kuantum Kuyu Yapıları.....	20
2.6.1. Tekli kuantum kuyusu.....	20
2.6.2. İkili kuantum kuyusu.....	20
2.6.3. Çoklu kuantum kuyusu.....	21
2.6.4. Süper örgü.....	21
2.7. Kristal Yapı Kusurları.....	22
2.7.1. Noktasal kusurlar.....	22
2.7.2. Çizgisel kusurlar.....	23
2.7.3. Yüzeysel kusurlar.....	24
2.7.4. Hacimsel kusurlar.....	24
2.8. Birim Örgü Hücresi.....	25
2.9. Örgü Çeşitleri.....	26
2.10. Aşındırma (etching).....	27
2.10.1. Aşındırma yöntemleri ve mekanizması.....	28
2.10.2. GaAs ve AlGaAs kimyasal aşındırması için oda sıcaklığında kullanılan solüsyonlar.....	35



**Sayfa**

3. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	36
4. KULLANILAN DENEYSEL SİSTEMLER .....	40
4.1. Elipsometre.....	40
4.1.1. Elipsometre bileşenleri.....	41
4.2. Profilometre .....	43
4.3. Optik Mikroskop .....	44
5. DENEYSEL BİLGİLER.....	46
5.1. Deney.....	46
5.2. Deneysel Ölçüm ve Bulgular.....	46
6. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	59
KAYNAKLAR.....	63
EKLER .....	64
EK-1. Deneyin Yapılışı .....	65
EK-2. Zn katkılı GaAs $C_6H_8O_7:H_2O_2 =2:1$ .....	77
EK-3. Zn katkılı GaAs sitrik asit: hidrojen peroksit =2:1 step2 .....	79
EK-4. Si katkılı GaAs $C_6H_8O_7:H_2O_2 =3:1$ step1 .....	81
ÖZGEÇMİŞ.....	83

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Periyodik cetvelin, yarıiletkenlerle ilgili olan bölümü.....	6
Çizelge 2.2. Önemli elementsel ve bileşik yarıiletkenler.....	11
Çizelge 2.3. Tipik yarıiletkenlerin yasak bant aralığı.....	13
Çizelge 2.4. Oda sıcaklığında GaAs'a ait bazı fiziksel parametreler.....	18
Çizelge 2.5. Oda sıcaklığında $Al_xGa_{1-x}As$ 'a ait bazı fiziksel parametreler.....	19
Çizelge 2.6. GaAs ve AlGaAs ıslak aşındırması için kullanılan aşındırıcılar .....	35
Çizelge 3.1. $C_6H_8O_7:H_2O_2$ 'in farklı oranlarında aşınan malzemelerin aşınma oranları.....	39
Çizelge 5.1. Aşınma sonrası profilometre ölçümlerindeki aşınma oranları.....	47
Çizelge 5.2. n-GaAs aşınma oranı.....	48
Çizelge 5.3. p-GaAs aşınma oranı.....	50
Çizelge 5.4. Katkısız yarı yalıtkan GaAs aşınma oranı.....	52

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.1. Yalıtkanlar, yarıiletkenler ve metaller için tipik iletkenlik aralığı.....	4
Şekil 2.2. Şematik enerji bandı gösterimi.....	5
Şekil 2.3. Tipik III-V bileşikleri için faz diyagramı.....	7
Şekil 2.4. GaAs için faz diyagramı .....	8
Şekil 2.5. GaAs-AlAs için T-X faz diyagramı .....	9
Şekil 2.6. GaAs-AlAs için örgü parametresinin konsantrasyonla değişimi.....	9
Şekil 2.7. GaAs-AlAs için yasak bant aralığının konsantrasyonla değişimi .....	10
Şekil 2.8. Optik soğurma diyagramı.....	12
Şekil 2.9. Saf ve katkılı yarıiletkenler için termal dengede enerji-bant diyagramı .....	15
Şekil 2.10. III-V tipi alaşım yarıiletkenlerinin kompozisyona bağlı olarak bant aralığı- örgü parametresi değişimi.....	16
Şekil 2.11. $Al_xGa_{1-x}As$ 'in oda sıcaklığında GaAs ve AlAs alaşım kompozisyonuna bağlı olarak bant aralığı değişimi.....	17
Şekil 2.12. GaAs kristal yapısı (çinko sülfür kristal yapısında) .....	18
Şekil 2.13. Tekli kuantum yapının şematik gösterimi.....	20
Şekil 2.14. İkili kuantum yapının şematik gösterimi.....	21
Şekil 2.15. Çoklu kuantum yapının şematik gösterimi.....	21
Şekil 2.16. Süper örgü yapının şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.17. Kenar çizgisel kusuru.....	24
Şekil 2.18. Kayma kusuru.....	24
Şekil 2.19. İkizleme kusuru.....	25

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.20. Çeşitli kristal düzlemler.....	26
Şekil 2.21. Si kristalinin örgü yapısı.....	27
Şekil 2.22. Aşındırma profili: (a) izotropik ve (b) anizotropik aşındırma.....	29
Şekil 2.23. Islak aşındırmanın ana mekanizması.....	30
Şekil 2.24. Paralel elektrotlu tepkime odasında plazmayla aşındırma.....	31
Şekil 2.25. İzotropik aşındırma bias durumu.....	31
Şekil 3.1. AlGaAs ve GaAs yapılarının çözelti oranına göre aşınma oranı.....	36
Şekil 3.2. Aşınma hızı çeşitliliği hacim oranına bağlı ve bu da Al bileşenine duyarlı.....	38
Şekil 5.1. n-GaAs numunenin solüsyon hacim oranlarına göre aşınma oranları.....	49
Şekil 5.2. n-GaAs numunenin aşınma sonrası yüzey görüntüsü.....	50
Şekil 5.3. p-GaAs numunenin solüsyon hacim oranlarına göre aşınma oranları.....	51
Şekil 5.4. p-GaAs numunenin aşınma sonrası yüzey görüntüsü.....	52
Şekil 5.5. SI- GaAs numunenin solüsyon hacim oranlarına göre aşınma oranları.....	53
Şekil 5.6. SI-GaAs numunenin aşınma sonrası yüzey görüntüsü.....	54
Şekil 5.7. Profilometre altında numunenin aşınma kalınlıklarının ölçümü.....	56
Şekil 5.8. Elipsometre ile yüzey pürüzlülüğünün ölçümü.....	57
Şekil 5.9. Aşınma oranlarının grafiği.....	58

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 4.1. Spektroskopik elipsometre cihazı.....	38
Resim 4.2. Stylus XP-2 profilometresi.....	40
Resim 4.3. Leica DM6000 M Optik mikroskobu.....	41
Resim 5.1. $C_6H_8O_7:H_2O_2 = 2:1$ oranında 4 dakika aşındırılmış Si Katkılı GaAs'in kare kusurları optik mikroskop ile inceleme.....	55

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$\alpha$	Engelin sıcaklıkla değişim katsayısı
<b>AC</b>	Alternatif akım
$C_{ma}$	Güçlü akümülyasyon bölgesinde ölçülen kapasitans
<b>DC</b>	Doğru akım
$d_{hkl}$	Kristalografik düzlem
$\Delta\Phi_B$	Potansiyel engel alçalması
$E_c$	İletkenlik bant kısıtı enerjisi
$E_g$	Yasak bant aralığı
$E_F$	Fermi enerji seviyesi
$E_{Fm}$	Metalin Fermi seviyesi
$E_{Fs}$	Yarıiletkenin Fermi seviyesi
$E_i$	Saf yarıiletkenler için Fermi seviyesi
$E_{ss}$	Arayüzey durumlarının enerjisi
$E_v$	Valans bant kısıtı enerjisi
$\epsilon_d$	Hayali kuvvetlerin dielektrik sabiti
$\epsilon_i$	Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
$\epsilon_s$	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
$f_c$	Kritik frekans
<b>F(E)</b>	Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$\bar{\Phi}$	Engel yüksekliğinin ortalama değeri
$\Phi_B$	Elektronlar için potansiyel engel yüksekliği
$\Phi_B'$	Deşikler için potansiyel engel yüksekliği
$\Phi_{B_0}$	Sıfır beslem engel yüksekliği
$\Phi_{B_0}(I-V)$	Doğru beslem I-V ölçümlerinden elde edilen $\Phi_{B_0}$
$\Phi_B(T)$	Düzeltilmiş potansiyel engel yüksekliği
$\Phi_e$	Etkin engel yüksekliği
$\Phi_m$	Metalin iş fonksiyonu
$\Phi_s$	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
$\Gamma$	Gama noktası
$\Gamma_e$	Hücrenin ağzından çıkan moleküllerin sayısı
$G_{ma}$	Güçlü akümülyasyon bölgesinde ölçülen iletkenlik
$J$	Akı
$J_o$	Doyum akım yoğunluğu
$J_{sm}$	Yarıiletkenden metale doğru akım yoğunluğu
$k$	Boltzman sabiti
$\bar{k}$	Dalga vektörü
$\chi_s$	Yarıiletkenin elektron ilgisi
$\delta$	Oksit tabakasının kalınlığı
$l$	Altaş ile hücrenin ağzı arasındaki mesafe
$L_n$	Elektronların p-bölgesindeki difüzyon uzunluğu
$L_p$	Deşiklerin p-bölgesindeki difüzyon uzunluğu

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$m^*$	Yarıiletkenin etkin kütlesi
$m_e/m_0$	Elektron etkin kütlesi
$m_{hh}$	GaAs için ağır deşik etkin kütlesi
$m_{lh}$	GaAs için hafif deşik etkin kütlesi
$m_{p,h}$	$Al_xGa_{1-x}As$ için ağır deşik etkin kütlesi
$m_{p,l}$	$Al_xGa_{1-x}As$ için hafif deşik kütlesi
$M$	Molekül ağırlığı
$N_A$	Avagadro sayısı
$N_c$	İletkenlik bandındaki efektif durum yoğunluğu
$N_v$	Valans bandındaki efektif durum yoğunluğu
$\eta$	Diyyot idealite faktörü
$n$	İletkenlik bandında birim hacimdeki elektron sayısı
$n_i$	Saf taşıyıcı yoğunluğu
$n_n$	n- tarafında çoğunluk taşıyıcıların sayısı
$N_A$	Akseptör konsantrasyonu
$N_D$	Donor konsantrasyonu
$N(E)$	Bandlardaki durum yoğunluğu
$N_{ss}$	Arayüzey durum yoğunluğu
$w$	Foton frekansı
$W$	Tüketim bölgesi genişliği
$\Omega$	Fonon frekansı
$p$	Valans bandında birim hacimdeki deşik sayısı



<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$p_e$	Kaynaktaki elementin basıncı
$p_n$	n-tarafında azınlık taşıyıcıların sayısı
$R_s$	Seri direnç
$\sigma_s$	Standart sapma
$T$	Sıcaklık (K)
$T_s$	Büyütme sıcaklığı
$\theta$	X-ışını demetinin düzleme gelme açısı
$U_T(x)$	Toplam potansiyel enerjisi
$V_D$	Engel tabakası boyunca gerilim düşmesi
$V_i$	Eklem (kontak) potansiyel farkı
$V_F$	Doğru beslem gerilimi
$V_R$	Ters beslem gerilimi

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>AE</b>	Alan Emisyonu
<b>BEP</b>	Demet eşit basıncı
<b>C-V</b>	Kapasitans-gerilim ölçümleri
<b>CDS</b>	Bileşik dimer kaynağı
<b>DOS</b>	Durum yoğunluğu
<b>ESMBE</b>	Elementsel kaynaklı MBE
<b>FEL</b>	Hızlı giriş kilidi
<b>FET</b>	Alan etkili transistor
<b>HEMT</b>	Yüksek mobiliteli tranzistör

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>HRXRD</b>	Yüksek çözünürlüklü X-ışınları kırınımı
<b>I-V</b>	Akım-gerilim ölçümleri
<b>LED</b>	Işık yayan diyot
<b>LPE</b>	Sıvı Faz Epitaksi
<b>MBE</b>	Moleküler demet epitaksi
<b>MOSFET</b>	Metal-oksit yarıiletken alan etkili transistör
<b>PIN diyot</b>	Pozitif-saf-negatif diyot
<b>RF</b>	Radyo frekansı
<b>QMS</b>	4-kutuplu kütle spektrometresi
<b>STARLAB</b>	Yarıiletken ileri araştırma laboratuvarı
<b>TAE</b>	Termiyonik Alan Emisyonu
<b>TE</b>	Termiyonik Emisyon Teorisi
<b>TED</b>	Termiyonik Emisyon Difüzyon Teorisi
<b>UV</b>	Morötesi

## 1. GİRİŞ

Yarıiletken malzemeler 1940'lerden beri araştırılmakta ve bu araştırmalar sonucunda geliştirilen elektronik araçlar günlük hayatımızda, askeri ve uzay teknolojisinde kullanılmaktadır. Elektronik rnlerinde kullanılan transistörler, doğrultucu diyotlar gibi güneş pilleri de, yarıiletken malzemelerden yapılırlar.

Yarıiletken malzeme olarak  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  heteroyapılı sistem, yüksek-hızlı dijital, yüksek-frekanslı mikrodalga ve elektro-optik cihaz uygulamalarında kullanılabilir.

Son zamanlarda çeşitli yarıiletken materyal büyütme tekniklerinin gelişmesi ile okluyapılara ilgi artmaktadır. okluyapı terimi ilk olarak  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  tek okluyapı lazerini anlatmak için kullanılmıştır [1,2]. Çok tabakalı yapıların ve ince filmlerin doğuşu ve incelenmesi ile bu sistemlerin külçe (bulk) kristallere göre pek çok farklı ve yeni elektronik özelliklerinin olduğu ortaya çıkmıştır.

Çoklu yapılar; küçük, hızlı, verimli elektronik ve optoelektronik düzeneklerin geliştirilmesi için önemlidir.  $AlGaAs$  alaşım katmanları  $GaAs$  zerine büyütüldüğünde, bant aralığı  $Al$  içeriğinde genişler. Bu durum heteroyapıların ve mükemmel derecedeki kuantum kuyu katman yapılarının üretimine izin verir. Hızlı transistörler ve çok küçük yarıiletken lazerler bu yapılara örnek verilebilir.

Materyal büyütme tekniklerinin gelişmesi araştırmacılara ve araştırmalara motivasyon sağlayan ticari üreticiye çok büyük kolaylıklar sağladı. Doğada saf olarak bulunmayan yarıiletken ince filmler yapay tekniklerle retilabilmektedir. Bu tekniklerin günümüzde yaygın olarak kullanılanları; Buhar Faz Epitaksi (VPE), Kimyasal Buhar Birikimi (CVD) ve Moleküler Demet Epitaksi (MBE) şeklinde sıralanabilir.

Yarıiletken materyallerin kimyasal temizlenmesi (etching) nano ölçekli aletlerin entegre devrelerin yapımında önemli bir süreçtir. Seçici kimyasal temizleme bir materyale temizleyici gönderirken, bitişik diğer materyallere bundan etkilenmeden oluşturulması karmaşık aletlerin yapımında sıkça başvurulan bir yöntemdir [3]. İnce film üzerindeki temizleyici etkileri ve temizleme süresince oluşan yüzey reaksiyonların detaylı anlaşılması nano ölçekli aletlerin kontrollü bir şekilde üretiminde temel oluşturur [4,5]. Yarıiletken materyallerin kalitesini arttırmak uygun bir temizleme yönteminin seçilmesine bağlıdır.

Bilindiği gibi, genel olarak iki tip aşındırma metodu vardır. (1) Malzeme, aşındırıcı sıvı çözelti içerisine daldırılarak yapılan aşındırma (Islak aşındırma), (2) Malzeme sputtering'e ya da reaktif iyonlara ya da buharlaşmış fazdaki aşındırıcıya maruz bırakılarak yapılan aşındırma (Kuru aşındırma).

Islak aşındırmanın kuru aşındırmaya göre çeşitli avantajları vardır: Islak aşındırma malzeme üzerinde ihmal edilebilecek derecede az zarara (hasar) sebep olmaktadır; yüksek seçiciliği vardır; düşük maliyetlidir ve kolayca uygulanabilir.

Islak aşındırma metodu büyük oranla, kusur analizi, kristal polaritesinin ya da politipinin teşhisi, alet ve aygıt fabrikasyonunda büyütülen malzemeye yapılacak olan ohmik ve doğrultucu (Schottky diyot) kontakların yüksek performanslı ve deneysel ölçüm sonuçlarının güvenilir olması için, kontakların yapılacağı yüzeylerin, organik kirlere, oksit tabakasından ve mekanik pürüzlerden arınmış olması gerekir. Bu koşulların sağlanabilmesi için  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  yapısına ıslak kimyasal aşındırma (temizleme) işlemi kullanılıyor.

Yeni jenerasyon elektronik ve fotonik aygıtların üretimi için gereken önemli işleme (processing) gereksinimlerinden biri de yeni seçici aşındırma çözeltileridir [6].

Kuru aşındırma iyon-kaynaklı zararlar nedeniyle çeşitli aygıtların performanslarını kötüleştirdiği için ıslak aşındırma metodu daha umut verici bir aşındırma yöntemi olarak görülmektedir.

Sitrik asit/hidrojen peroksit solüsyonu kullanılarak  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  üzerinde seçici kaldırıcı üzerine bir dizi çalışma yayınlanmıştır [7,9]. Bildiğimiz kadarıyla, bu çalışmaların hiçbirinde çeşitli dirençlerde ve katkılandırma yoğunluklarında olan GaAs numuneleri incelenmemiştir ve karşılaştırma yapılmamıştır.

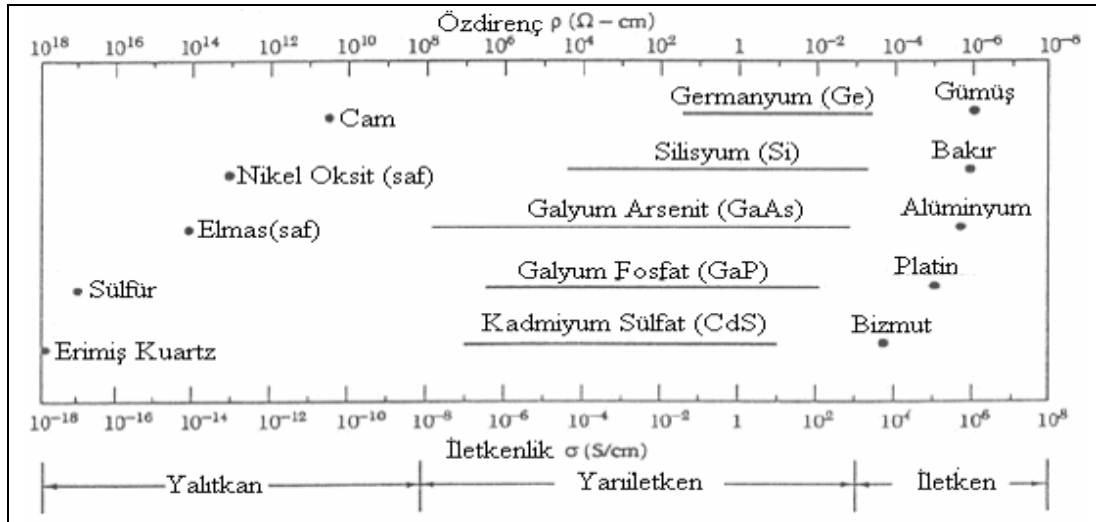
$H_2O_2$ , GaAs dilimleri yüzeyinin yükseltgeni (oksitleyicisi),  $C_6H_8O_7$  ise oksit tabakayı kaldırma işlemi gerçekleştirir. Aşındırma solüsyonundaki reaktif moleküller GaAs dilimleri yüzeyindeki bağları kırar ve yüzey oksitlenir. Bunu takip eden oksitlenmeler, aşındırıcı solüsyon içinde çözülür ve dağılır.

Solüsyondaki  $H_2O_2$ 'nin potansiyeli, GaAs dilimleri yüzeyindeki valans bandı elektronlarını tüketerek oksidasyon için gerekli olan delikleri sağlar. Bu aşındırmanın mümkün olabilmesi için redoks potansiyeli (yükseltgenme-indirgenme), solüsyondaki iyonlarıyla dengede olan GaAs'in potansiyelinden büyük olmalı. Solüsyondaki redoks çiftlerinin enerji seviyeleriyle ilgili olarak aşındırma oranı öncelikli olarak GaAs'in enerji bandının pozisyonu tarafından belirlenir [10].

## 2. GENEL BİLGİLER

### 2.1. Metallerde, Yalıtkanlarda ve Yarıiletkenlerde İletkenlik

Katı haldeki malzemeler, iletkenliklerine (özdirenç:  $\rho=1/\sigma$ ) göre yalıtkanlar, yarıiletkenler ve metaller olmak üzere gruplandırılabilirler (Şekil 2.1) [11].



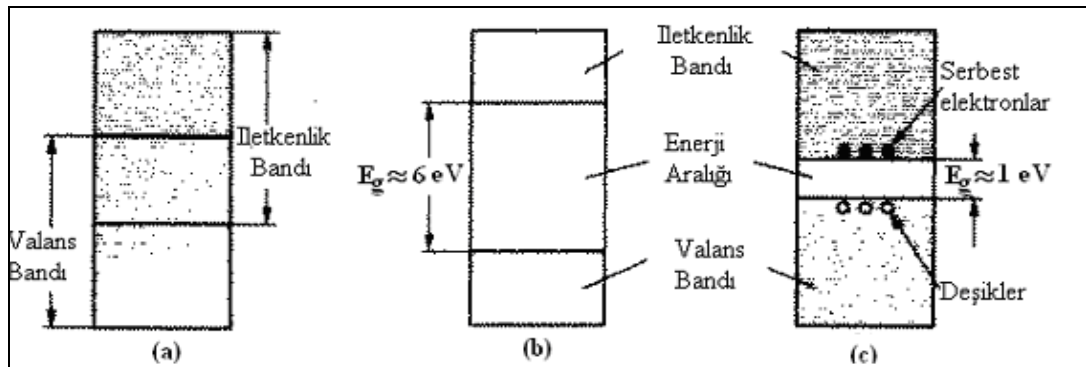
Şekil 2.1. Yalıtkanlar, yarıiletkenler ve metaller için tipik iletkenlik aralığı

#### 2.1.1. Metaller ( $10^4 \text{ S/cm} < \sigma < 10^6 \text{ S/cm}$ )

Metallerin (iletkenler), iletkenlik bandı ya kısmen boş ya da valans bandı ile çakışmış durumdadır [12], böylece yasak bant aralığı ( $E_g$ ) yoktur (Şekil 2.2(c)) [11]. Sonuç olarak, kısmen dolu olan valans bandının tepesinde bulunan elektronlar, uygulanan küçük bir elektrik alandan kinetik enerji kazanarak, yakındaki enerji seviyesine doğru hareket edebilirler.

### 2.1.2. Yalıtkanlar ( $10^{-18} \text{ S/cm} < \sigma < 10^{-8} \text{ S/cm}$ )

Yalıtkanlarda, valans elektronlarının komşu atomlarla yaptığı güçlü bağları kırmak çok zordur ve sonuç olarak oda sıcaklığında yada oda sıcaklığı civarındaki sıcaklıklarda, akım iletimine katılacak serbest elektronlar yoktur. Şekil 2.2(a)'da görüldüğü gibi, yalıtkanlar geniş bant aralığı ile karakterize edilirler ve valans bandındaki tüm enerji seviyeleri elektronlar tarafından doldurulmuş, iletkenlik bandındaki tüm enerji seviyeleri ise boştur [11]. Termal enerji yada uygulanan elektrik alan (elektrik alan şiddetinin elektron yapısını bozacak kadar büyük olmadığı varsayılır) [13] nedeniyle kazanılan enerji, valans bandının en tepesinde bulunan elektronları iletkenlik bandına göndermek için yeterli değildir. Böylece, çok az sayıdaki elektron iletkenlik bandı seviyelerini işgal eder.



Şekil 2.2. Şematik enerji bandı gösterimi (a) metal, (b) yalıtkan ve (c) yarıiletken

### 2.1.3. Yarıiletkenler ( $10^{-8} \text{ S/cm} < \sigma < 10^4 \text{ S/cm}$ )

Kristal örgünün periyodikliği nedeniyle yarıiletkenlerde, izinli ve yasaklanmış enerji bölgeleri vardır (yasak bant aralığı) ve bu yasak bant aralığı 1 eV mertebesinde olup (dar bant aralıklı malzeme), yarıiletkenlerin birçok özelliklerini tanımlamakta kullanılan önemli bir parametredir. İzinli enerji bölgeleri yasak bandın altında ve üstünde yerleşir. Yasak bandın altında kalan ve bağlı elektronların oluşturduğu enerji bölgesi valans bandı ve üstünde kalan serbest elektronların oluşturduğu enerji bölgesi iletkenlik bandı olarak adlandırılır [14]. Şekil 2.2(b)'de yarıiletkenlerin bant diyagramı gösterilmiştir.

$T=0$  K'de, tüm elektronlar valans bandındadır. İletkenlik bandında bir çok boş seviye olduğundan, uygulanan küçük bir potansiyel bu elektronları kolaylıkla hareket ettirebilir ve bir akım meydana gelir. Yarıiletkenlerin iletkenliği genellikle sıcaklığa, aydınlatmaya, manyetik alana, basınca ve safsızlık atomlarının konsantrasyonuna bağlıdır. İletkenlikteki bu tür bağımlılıklar, yarıiletkenleri elektronik uygulamalar için en önemli malzemelerden biri haline getirir.

## 2.2. Yarıiletken Malzemeler

Yarıiletken malzeme çalışmalarına 19.yüzyılın başlarında başlanmış ve bu yıllar boyunca, oldukça fazla sayıda yarıiletken malzeme bulunmuştur. Çizelge 2.1'de periyodik tablonun yarıiletkenlerle ilgili olan bölümü gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Periyodik cetvelin, yarıiletkenlerle ilgili olan bölümü

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		

### 2.2.1. Elementsel yarıiletkenler

Ge ve Si, tek tip atomlardan oluşan yarıiletkenlerdir. Her bir atom, bir elektronunu en yakın komşusuyla ortaklaşa kullanarak kuvvetli bir bağ (kovalent bağ) oluşturur. Önemli elementsel ve bileşik yarıiletkenler Çizelge 2.2'de verilmiştir.

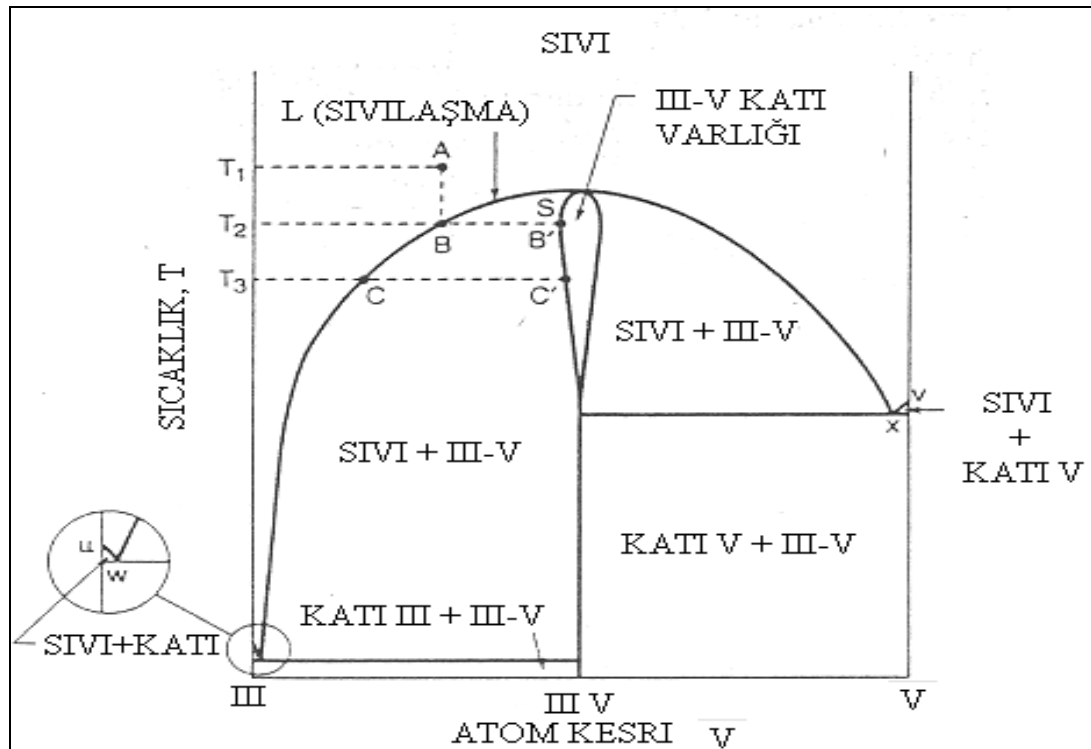


## 2.2.2. Bileşik yarıiletkenler

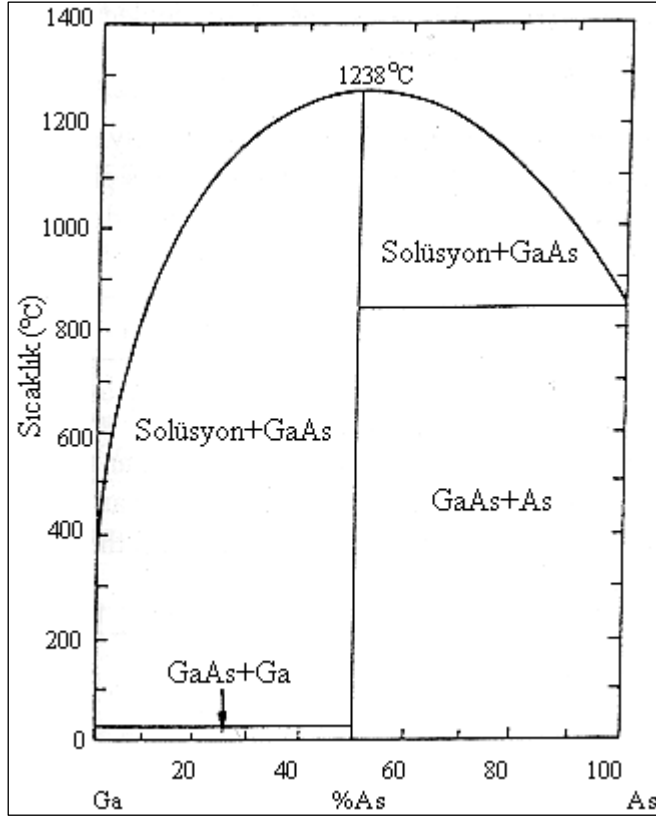
İki yada daha çok elementten meydana gelen yarıiletkenlerdir ve elementlerin elektronegatifliklerindeki farklılıktan dolayı, kristal bağlanma iyonik ve kovalent bağlanmanın bir kombinasyonudur.

### İkili bileşik yarıiletkenler

Kimyasal formülü AB olan yarıiletken bir bileşikte, A elementi üç valans elektronuna sahip ve B elementi de beş valans elektronuna sahipse, bunlara “III-V (üç-beş) bileşikleri” denir. En bilinen örneği GaAs’tir. Şekil 2.3’te tipik III-V bileşikleri için ve Şekil 2.4’te GaAs için faz diyagramları verilmiştir.



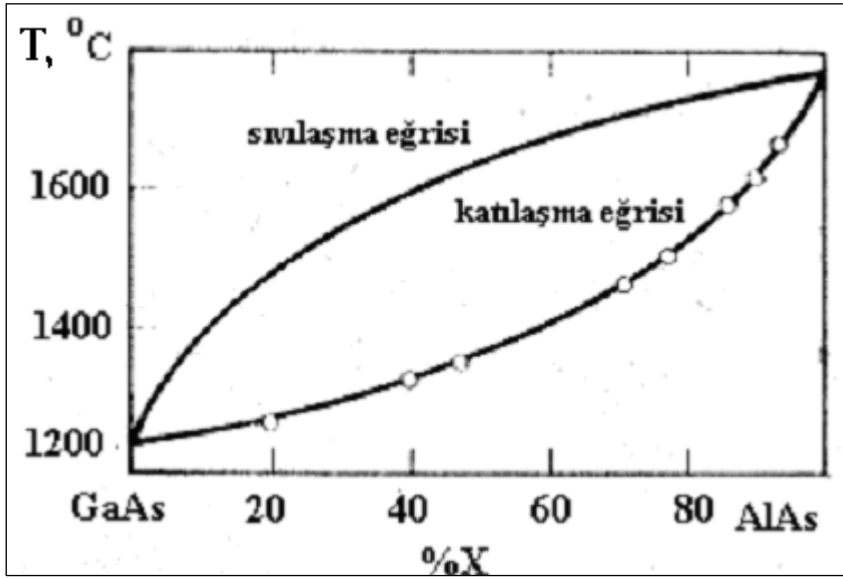
Şekil 2.3. Tipik III-V bileşikleri için faz diyagramı



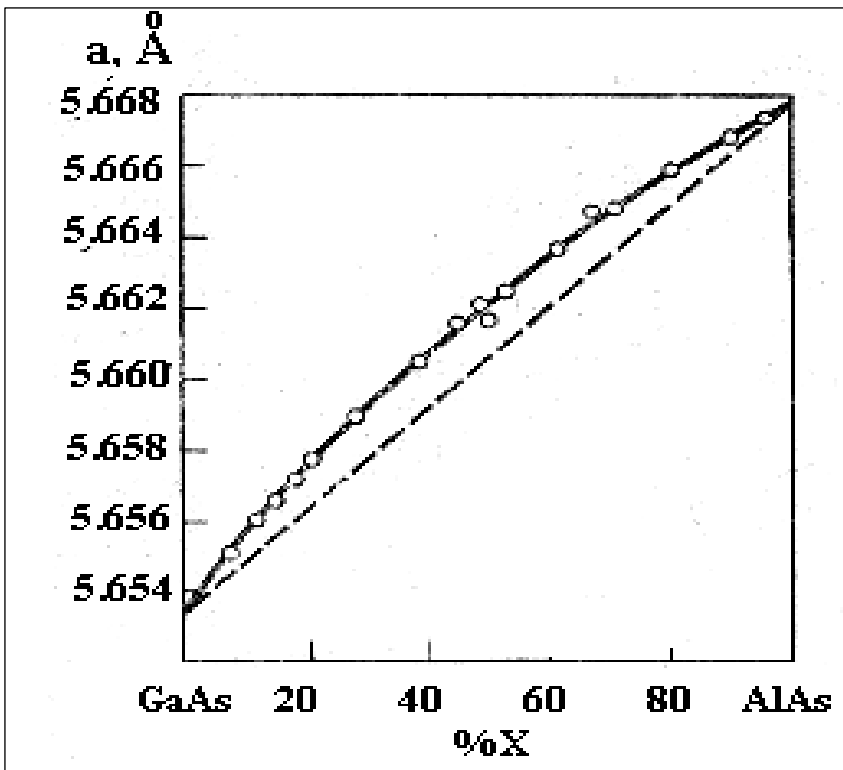
Şekil 2.4. GaAs için faz diyagramı

### Üçlü bileşik yarıiletkenler (Alaşım yarıiletkenler)

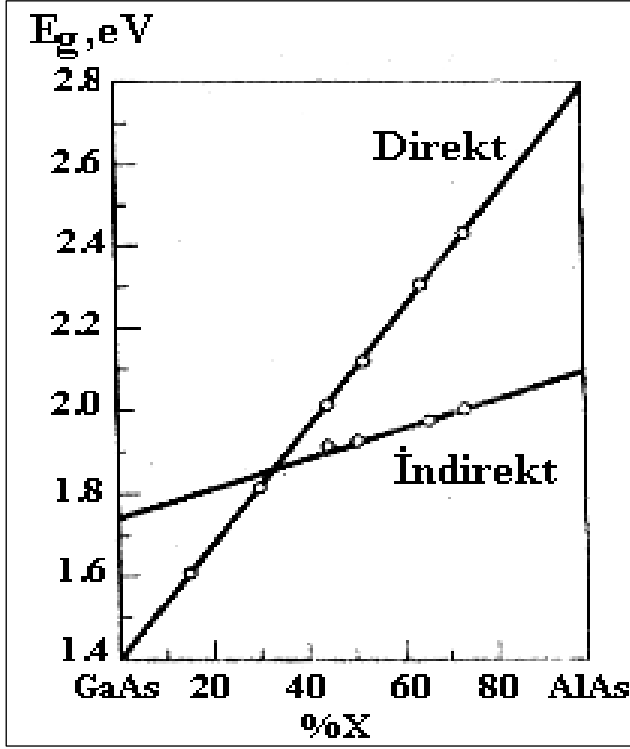
Bileşiğe az miktarda üçüncü bir elementin eklenmesiyle meydana gelirler. Alaşım yarıiletkenlerden olan  $Al_xGa_{1-x}As$  'ta Al ve Ga periyodik cetvelin III.sütundan, As ise V. sütunundandır. Kimyasal formülde yer alan x alt indisi, elementlerin alaşımdaki kompozisyonlarını göstermektedir. Şekil 2.5'te AlAs-GaAs alaşımının T-X faz diyagramı, Şekil 2.6'da GaAs-AlAs için örgü parametresinin konsantrasyonla değişimi ve Şekil 2.7'de ise GaAs-AlAs için yasak bant aralığının konsantrasyonla değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.5. GaAs-AlAs için T-X faz diyagramı



Şekil 2.6. GaAs-AlAs için örgü parametresinin konsantrasyonla değişimi



Şekil 2.7. GaAs-AlAs için yasak bant aralığının konsantrasyonla değişimi

#### Dörtlü bileşik yarıiletkenler (Alaşım yarıiletkenler)

Dörtlü bileşik yarıiletkenler  $A_xB_{1-x}C_yD_{1-y}$  formundadır. Bu tipteki yarıiletkenler, birçok ikili ve üçlü bileşik yarıiletkenlerin bileşiminden elde edilir.  $Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$  yarıiletkeni alaşım yarıiletkenlere bir örnektir. Kimyasal formülde yer alan x ve y alt indisleri, elementlerin alaşımdaki kompozisyonlarını göstermektedir.

Çizelge 2.2. Önemli elementsel ve bileşik yarıiletkenler

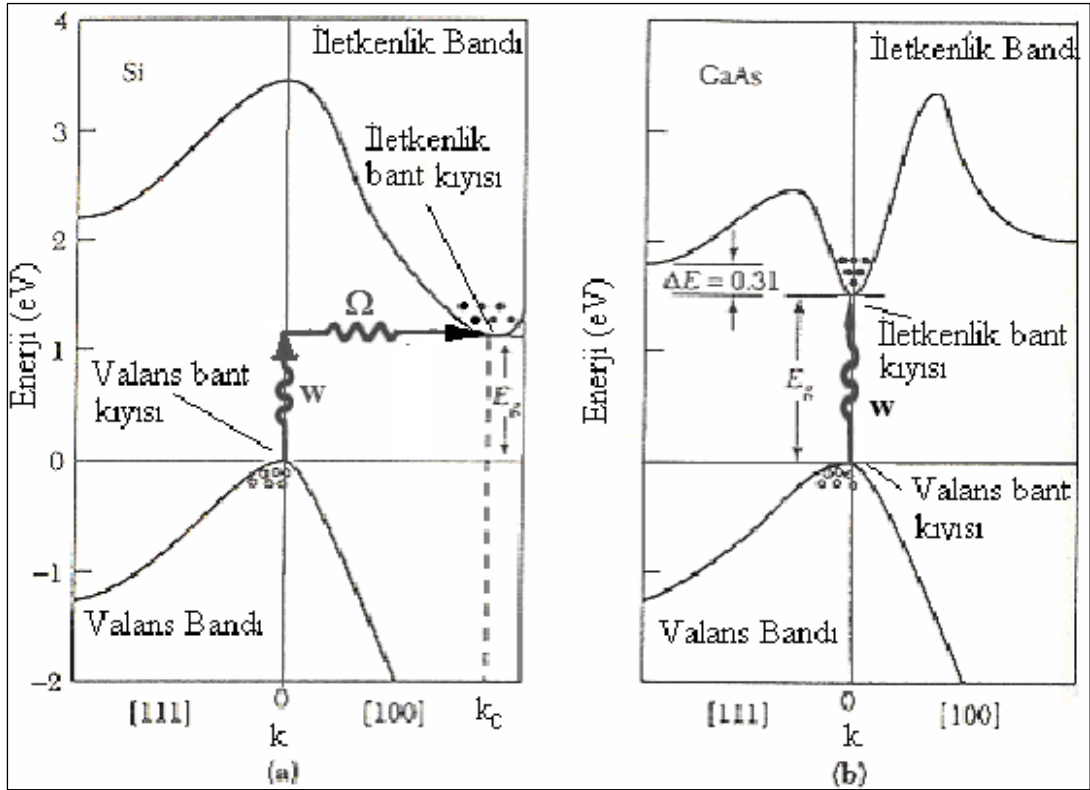
Genel Sınıflandırma	Yarıiletken	
	Sembol	İsim
Element	Ge	Germanyum
	Si	Silisyum
<b>İkili bileşik</b>		
<b>IV-IV</b>	SiC	Silisyum karbit
<b>III-V</b>	AlAs	Alüminyum arsenit
	GaAs	Galyum arsenit
	GaN	Galyum nitrat
	GaP	Galyum fosfat
	InP	İndiyum fosfat
<b>II-VI</b>	ZnO	Çinko oksit
	ZnS	Çinko sülfür
	CdSe	Kadmiyum selenit
	CdTe	Kadmiyum tellür
<b>IV-VI</b>	PbS	Kurşun sülfür
	PbTe	Kurşun tellür
<b>Üçlü bileşik</b>	$Al_xGa_{1-x}As$	Alüminyum galyum arsenit
	$Al_xIn_{1-x}As$	Alüminyum indiyum arsenit
	$GaAs_{1-x}P_x$	Galyum arsenit fosfat
	$Ga_xIn_{1-x}As$	Galyum indiyum arsenit
<b>Dörtlü bileşik</b>	$Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y}$	Alüminyum indiyum arsenik fosfat
	$Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$	Alüminyum galyum arsenik antimonit
	$Al_xGa_{1-x}As_yN_{1-y}$	Alüminyum galyum arsenik nitrat
	$In_xGa_{1-x}As_yN_{1-y}$	İndiyum galyum arsenik nitrat

### 2.3. Bant Aralığı

Bir yarıiletkenin temel tanımı, 1.Brillouin Bölgesinde bulunan elektronun enerjisinin (E), dalga vektörü ( $\vec{k}$ ) ile değişimi ile tanımlanır.

### 2.3.1. Direkt bant yarıiletkenler (Doğrudan soğurma)

Teknolojik öneme sahip yarıiletkenlerde, valans bandının maksimumu ile iletkenlik bandının minimumu 1.Brillouin Bölgesinin merkezinde bulunan gama noktası ( $\Gamma$ ) diye bilinen  $\vec{k}=0$  noktasında oluşur. Bant aralığı bu şekilde olan yarıiletkenlere “direkt bant yarıiletkenler” denir. Şekil 2.8(b)’de direkt bant yarıiletkenlerin optik soğurma diyagramı verilmiştir. Direkt geçiş  $\vec{k}$  değerinde önemli bir değişikliğe yol açmaz, çünkü soğurulan fotonun dalga vektörü küçüktür.



Şekil 2.8. Optik soğurma diyagramı,(a) İndirekt bant yarıiletken (Si) ve (b) Direkt bant yarıiletken (GaAs). Halkalar (o) valans bandındaki deşikleri ve noktalarda (•) iletkenlik bandındaki elektronları gösteriyor

Sürekli optik soğurma bölgesinin eşik frekansı  $w$  ise, bant aralığı  $E_g = \hbar w$  ile verilir. Doğrudan soğurma olayında, bir foton kristal tarafından soğurulurken, bir elektron ve bir deşik yaratılır. İletkenlik bandı minimumu ve valans bandı maksimumu aynı

momentumda ( $\vec{k}=0$  noktasında  $p=0$ ) olduğu için, elektron valans bandından iletkenlik bandına, momentumunu değiştirmeden geçebilir.

### 2.3.2. İndirekt bant yarıiletkenler (Dolaylı soğurma)

Bu tip yarıiletkenlerde iletkenlik bandı minimumu ile valans bandı maksimumu aynı doğrultuda değildir. Elektronun, valans bandının maksimumundan, iletkenlik bandının minimumuna geçiş yapması için, enerjisinin yanı sıra momentumunu da değiştirmesi gerekmektedir. Şekil 2.8(a)'da indirekt bant yarıiletkenlerin optik soğurma diyagramı verilmiştir.

İndirekt geçiş hem foton, hem de fonon içerir; foton enerji sağlar, fonon ise momentum sağlar. Minimum enerji aralığında doğrudan bir foton geçişi, dalga vektörü korunumu koşuluyla sağlanamaz, çünkü bu enerji aralığında foton momentumu çok küçüktür.

Yarıiletkenlerde yasak bant aralığı ( $E_g$ ), iletkenlik bandının ( $E_c$ ) en düşük enerjisi (iletkenlik bant kıyısı) ile valans bandının ( $E_v$ ) en yüksek enerjisi (valans bant kıyısı) arasındaki enerji farkıdır. Tipik yarıiletkenlerin bant aralıkları Çizelge 2.3'te verilmiştir [13].

Çizelge 2.3. Tipik yarıiletkenlerin yasak bant aralığı (d=direkt bant, i=indirekt bant)

Kristal	Aralık	$E_g$ (eV)		Kristal	Aralık	$E_g$ (eV)	
		0 K	300K			0 K	300 K
Elmas	i	5,47		GaAs	d	1,52	1,42
Si	i	1,17	1,11	InP	d	1,42	1,27
Ge	i	0,74	0,66	GaP	i	2,32	2,25

## 2.4. Yarıiletken Tipleri

Oda sıcaklığında yarıiletken malzemenin atomlarının termal enerjileri, ilettime katılacak çok az sayıda elektron sağlar. Yüksek sıcaklıklarda, termal titreşim kovalent bağları kırabilir. Bağ kırıldığında, serbest kalan elektron, akım iletimine katılır. Kovalent bağda bir elektron boşluğu (eksikliği) meydana gelir. Bu boşluk komşu elektronlardan birisi tarafından doldurulabilir. Sonuç olarak, boşluk pozisyonunda bir kayma meydana gelir. Böylece, boşluğu elektrona benzer bir parçacık olarak düşünebiliriz. Bu hayali parçacık “deşik” olarak adlandırılır. Pozitif yük taşır ve uygulanan elektrik alan altında elektronun yönüne ters yönde hareket eder. Böylece hem elektronlar ve hem dedeşikler iletkenliğe katkıda bulunurlar.

### 2.4.1. Saf (intrinsic) yarıiletkenler

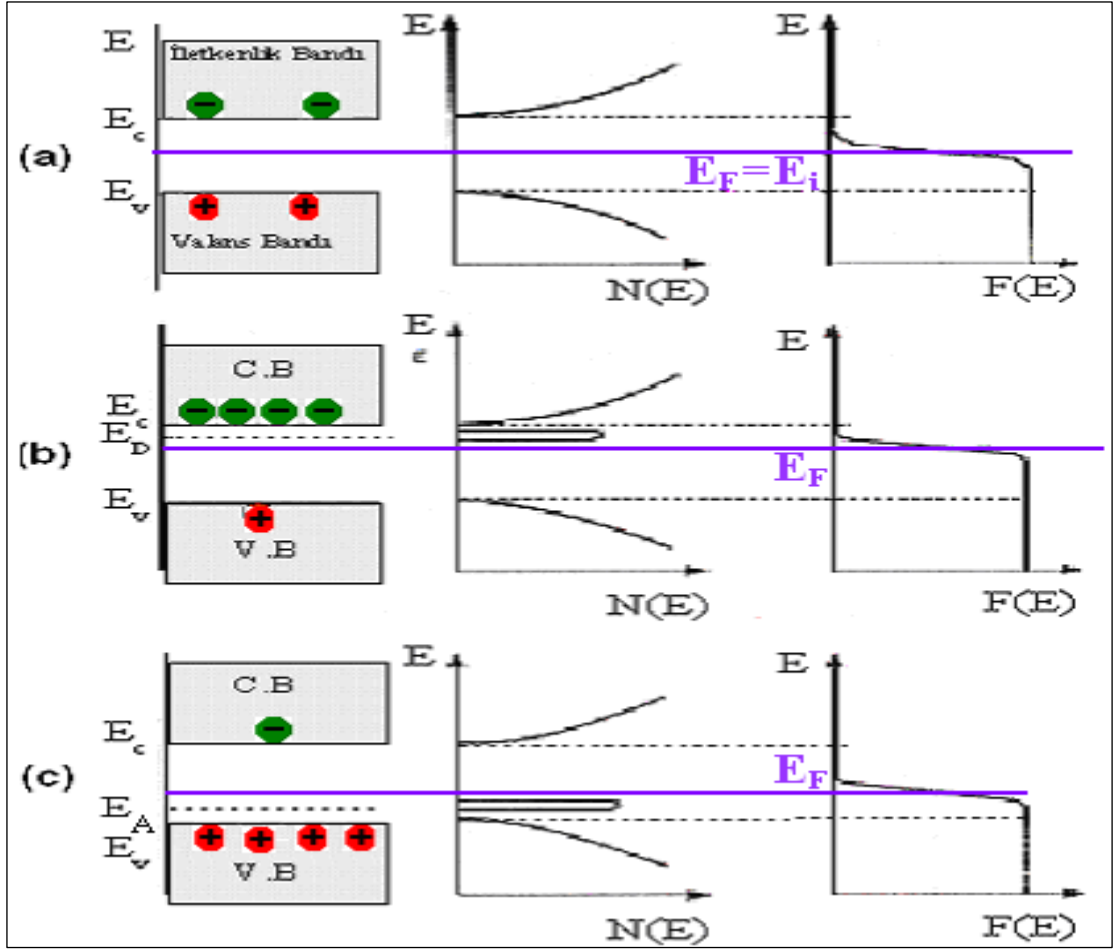
Saf yarıiletkenlerde, iletkenlik bandında birim hacimdeki elektron sayısı ( $n$ ) ile valans bandında birim hacimdekideşik sayısı ( $p$ ) eşittir. Yani  $n=p=n_i$  olur. Burada  $n_i$  saf taşıyıcı yoğunluğudur.

Fermi enerjisi ( $E_F$ ),  $N$  elektronlu sistem için, mutlak sıcaklıkta dolu olan en yüksekteki yörünge nin enerjisidir. Sıcaklık arttığında, elektronların kinetik enerjileri artar. Mutlak sıfırda boş olan bazı enerji düzeyleri dolmaya, dolu olan bazı düzeylerde boşalmaya başlar. O halde, elektronların  $E$  enerjisine sahip bir elektronik seviyeyi doldurma olasılığı Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu ile şu şekilde verilir:

$$F(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/kT}} \quad (2.1)$$

Burada  $k$  Boltzman sabiti,  $T$  mutlak sıcaklık (K), ve  $E_F$  ise Fermi seviyesinin enerjisidir. Saf yarıiletkenler için Fermi seviyesi  $E_i$ , bant aralığının hemen hemen ortasında yer alır [11]. Şekil 2.9 (a)'da saf yarıiletkenlerin termal dengedeki enerji-bant diyagramı gösterilmiştir.





Şekil 2.9. Saf ve katkılı yarıiletkenler için termal dengede enerji-bant diyagramı, (a) saf yarıiletken, (b) n-tipi yarıiletken, ve (c) p-tipi yarıiletken

#### 2.4.2. Katkılı yarıiletkenler

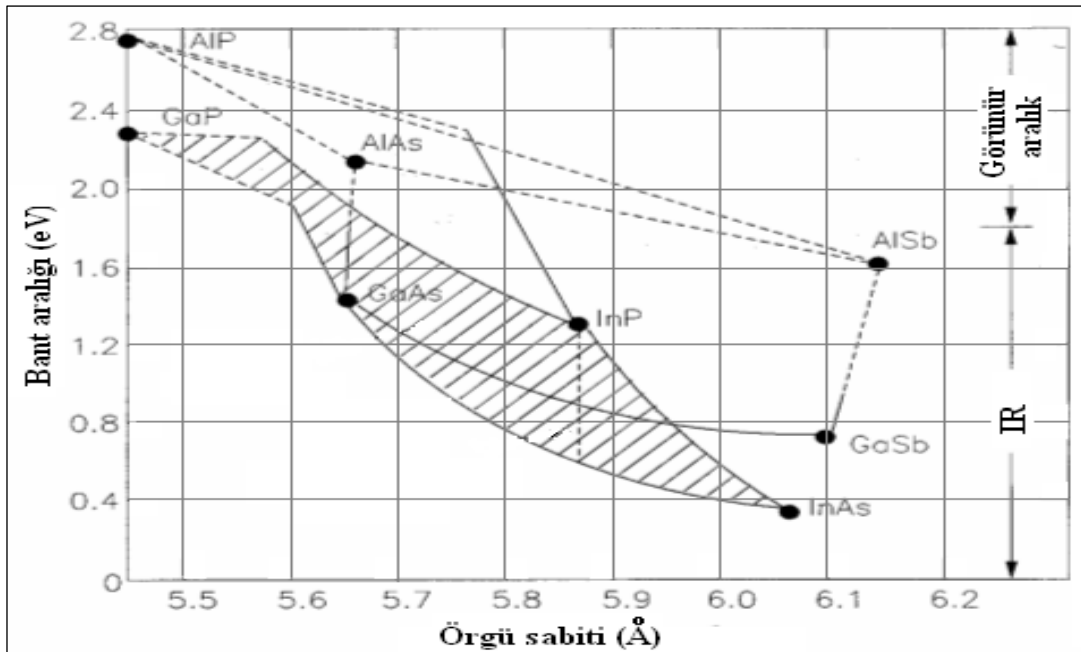
Yarıiletken safsızlık atomları (donorlar veya akseptörler) tarafından katkılandırıldığı zaman, yarıiletken katkılı yarıiletken haline gelir ve safsızlık enerji seviyeleri ortaya çıkar (Şekil 2.9 (b) ve (c)).

Yarıiletkene elektron verebilen katkı atomları “donor (verici)” olarak adlandırılır ve çoğunluk taşıyıcılar elektronlar olduğu için, yarıiletken n-tipi yarıiletken haline gelir. Yarıiletkenden elektron alan katkı atomları da “akseptör (alıcı)” olarak adlandırılır ve yarıiletkende çoğunluk taşıyıcılar deşikler olduğu için yarıiletken p-tipi yarıiletken haline gelmiştir. Katkılı yarıiletkenlerde Fermi seviyesi iletkenlik bandının tabanına doğru (n-tipi) veya valans bandının tepesine doğru (p-tipi) hareket eder (Şekil 2.9).

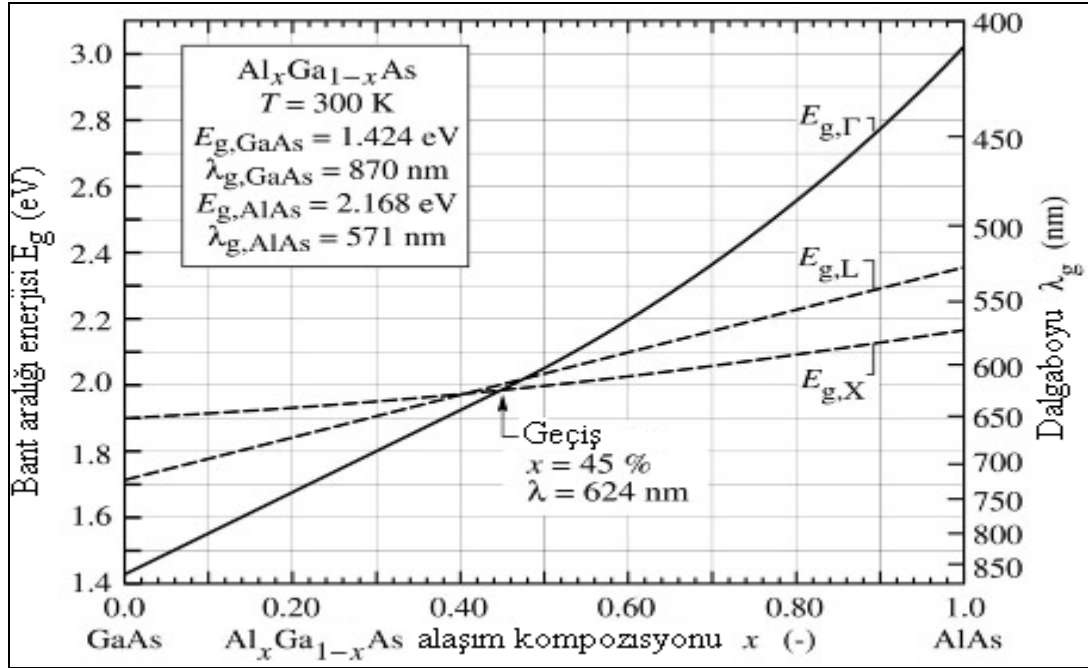
## 2.5. GaAs ve $Al_xGa_{1-x}As$ Yarıiletkenlerinin Oda Sıcaklığındaki ( $T= 300\text{ K}$ ) Bazı Fiziksel Parametreleri

### 2.5.1. $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ bant yapısı

$Al_xGa_{1-x}As$  üçlü bileşiği %x (AlAs) ve %(1-x) (GaAs)'tan oluşur. Yarıiletkendeki x kompozisyonunun  $0 \leq x \leq 1$  şeklinde değişmesiyle, bant yapısı da indirekt geçişli ve direkt geçişli olacak şekilde değişim gösterir.  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  bant yapısı  $x \leq 0,45$  değerleri için direkt bant yarıiletken ve  $x \geq 0,45$  değerleri için indirekt bant yarıiletken özelliği gösterir. Şekil 2.10'da III-V tipi alaşım yarıiletkenlerinin kompozisyona bağlı olarak bant aralığı-örgü parametresi değişimi ve Şekil 2.11'de  $Al_xGa_{1-x}As$ 'in oda sıcaklığında GaAs ve AlAs alaşım kompozisyonuna bağlı olarak bant aralığı değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.10. III-V tipi alaşım yarıiletkenlerinin kompozisyona bağlı olarak bant aralığı- örgü parametresi değişimi. Katı çizgiler direkt bant aralığını ve kesikli çizgiler ise indirekt bant aralığını göstermektedir



Şekil 2.11.  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 'in oda sıcaklığında GaAs ve AlAs alaşım kompozisyonuna bağlı olarak bant aralığı değişimi.  $E_{g,\Gamma}$   $\Gamma$  noktasındaki direkt geçişi ve  $E_L$  ve  $E_X$  sırasıyla Brillouin bölgesindeki X ve L noktalarındaki indirekt geçişi göstermektedir

$\text{Al}_{0,24}\text{Ga}_{0,76}\text{As}/\text{GaAs}$  yapısında  $x=0,24 < 0,45$  olduğu için yarıiletken direkt bant aralıklı yarıiletkendir ve yasak bant aralığı,

$$E_g = 1,424 + 1,247x \quad (2.2)$$

$$x = 0,24 \Rightarrow E_g = 1,720 \text{ eV}$$

şeklinde (Şekil 2.6) ve örgü parametresi ise

$$a = 5,65325 + 0,00809x \quad (2.3)$$

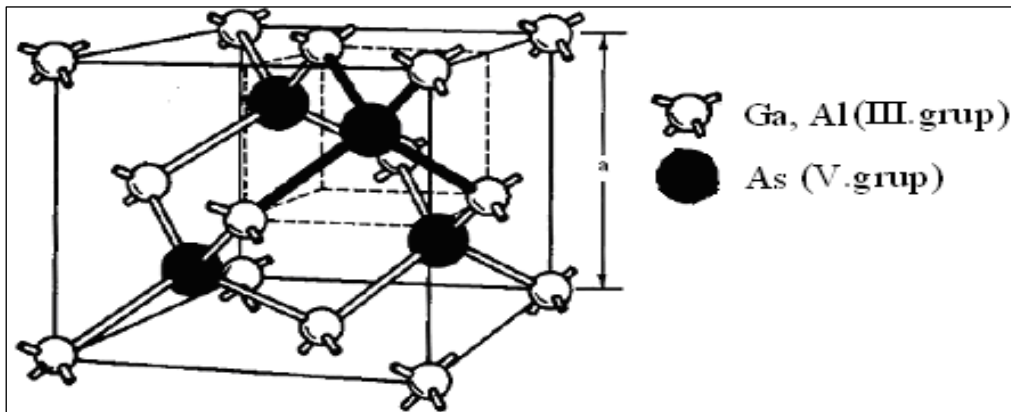
$$x = 0,24 \Rightarrow a = 5,65504 \text{ \AA}$$

şeklinde verilir.  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 'a ait diğer fiziksel parametreler (oda sıcaklığında) Çizelge 2.5'de verilmiştir.

### 2.5.2. GaAs

Çizelge 2.4. Oda sıcaklığında GaAs'a ait bazı fiziksel parametreler

GaAs (T=300K)		
Kristal yapısı (Şekil 2.12)		Çinko sülfür
Yasak bant aralığı (eV)		1,424
Örgü sabiti (Å)		5,65325
Atom/cm <sup>3</sup>		4,42x10 <sup>22</sup>
Dielektrik sabiti	statik	12,40
	Yüksek frekans	10,89
İletkenlik bandı efektif DOS (cm <sup>-3</sup> )		4,7x10 <sup>17</sup>
Valans bandı efektif DOS (cm <sup>-3</sup> )		7,0x10 <sup>18</sup>
Elektron etkin kütlesi(m <sub>e</sub> /m <sub>o</sub> )		0,063
Deşik etkin kütlesi (m <sub>h</sub> /m <sub>o</sub> )	Ağır m <sub>hh</sub>	0,51
	Hafif m <sub>lh</sub>	0,082
Erime noktası (K)		1513
Termal genişleme katsayısı(10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )		6,03
Elektron ilgisi(V)		4,07



Şekil 2.12. GaAs kristal yapısı (çinko sülfür kristal yapısında)

### 2.5.3. Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As

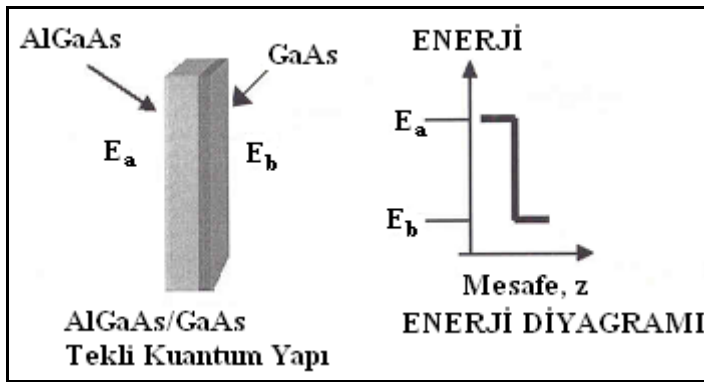
Çizelge 2.5. Oda sıcaklığında (T=300K) Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As'a ait bazı fiziksel parametreler

Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> As		Al <sub>0,24</sub> Ga <sub>0,76</sub> As
Kristal yapısı		Çinko sülfür
Yasak bant aralığı(E <sub>g</sub> ) (eV)	Direkt bant	1,424+1,247x , (0≤x≤0,45)
	İndirekt bant	1,900+0,125x+0,143x <sup>2</sup> , (0,45<x≤1,0)
Örgü sabiti(Å)		5,65325 + 0,00809x
Atom/cm <sup>3</sup>		(4,42-0,17x )*10 <sup>22</sup>
Statik dielektrik sabiti		12,40-2,84x
Yüksek frekans dielektrik sabiti		10,89 - 2,73x
İletkenlik bandı efektif DOS (cm <sup>-3</sup> )		N <sub>c</sub> =(2,510*10 <sup>19</sup> )(m <sub>e</sub> /m <sub>0</sub> ) <sup>3/2</sup>
Valans bandı efektif DOS (cm <sup>-3</sup> )		N <sub>v</sub> =(2,510*10 <sup>19</sup> )(m <sub>h</sub> /m <sub>0</sub> ) <sup>3/2</sup>
Elektron etkin kütlesi		m <sub>e</sub> = (0,063+0,083x)m <sub>0</sub>
Deşik etkin kütlesi m <sub>p,h</sub> ağır deşik kütlesi m <sub>p,l</sub> is hafif deşik kütlesi		m <sub>p,h</sub> = (0,51+0,25x) m <sub>0</sub> m <sub>p,l</sub> = (0,62 + 0,14x ) m <sub>0</sub>
Erime noktası (K)		T <sub>s</sub> =1511-58x+560x <sup>2</sup> , katılaşımiş yüzey T <sub>l</sub> =1511+1082x-580x <sup>2</sup> ,sıvılaşımiş yüzey
Termal genişleme katsayısı (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )		α <sub>x</sub> =5,97-1,76x
Elektron ilgisi (eV)		4,07-1,1x , (0≤ x≤0,45) 3,64-0,14x , ( 0,45<x≤1,0)

## 2.6. Kuantum Kuyu Yapılar

### 2.6.1. Tekli kuantum kuyusu

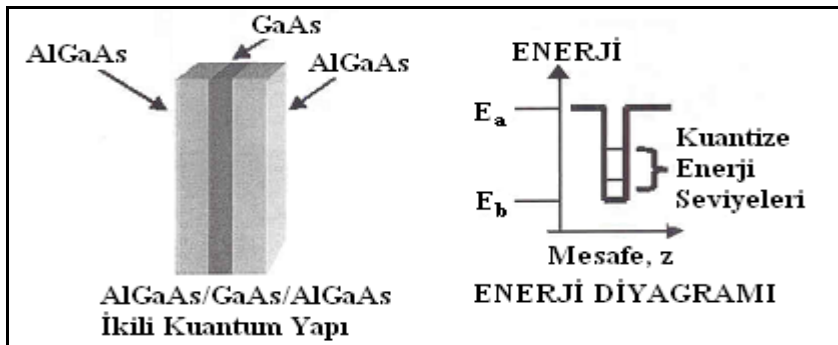
Bir tekli kuantum kuyu yapısı; bir uygun taban numune üzerine ikili, üçlü veya dörtlü yarıiletken alaşımların bir ultra ince tabaka olarak çoklu epitaksiyel olarak büyütülmesiyle elde edilir. InP/GaAs, AlGaAs/GaAs, Si/Ge örnekleri verilebilir.



Şekil 2.13. Tekli kuantum yapının şematik gösterimi

### 2.6.2. İkili kuantum kuyusu

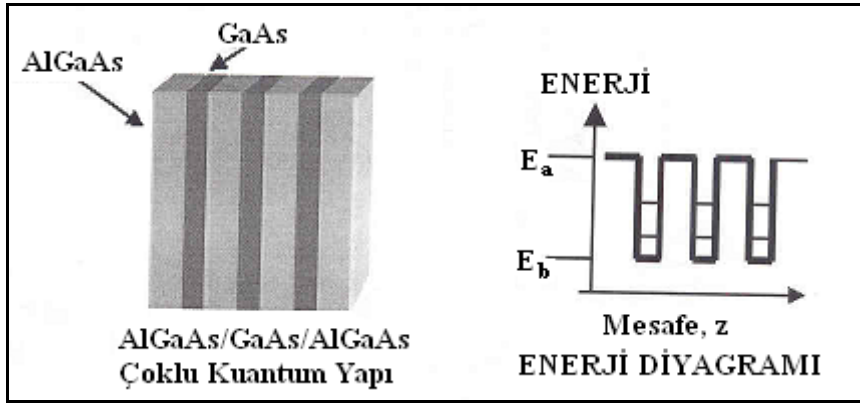
Bir ikili kuantum-kuyu yapısı; bir dar bant aralıklı ultra ince tabakanın, geniş bant aralıklı tabakalar arasına sandiviçlenerek yerleştirildiği çoklu yapılar geniş bant aralıklı yapılar genellikle aynı yarı iletkenidir. AlGaAs/GaAs/AlGaAs örnek olarak verilebilir.



Şekil 2.14. İkili kuantum yapının şematik gösterimi

### 2.6.3. Çoklu kuantum kuyusu

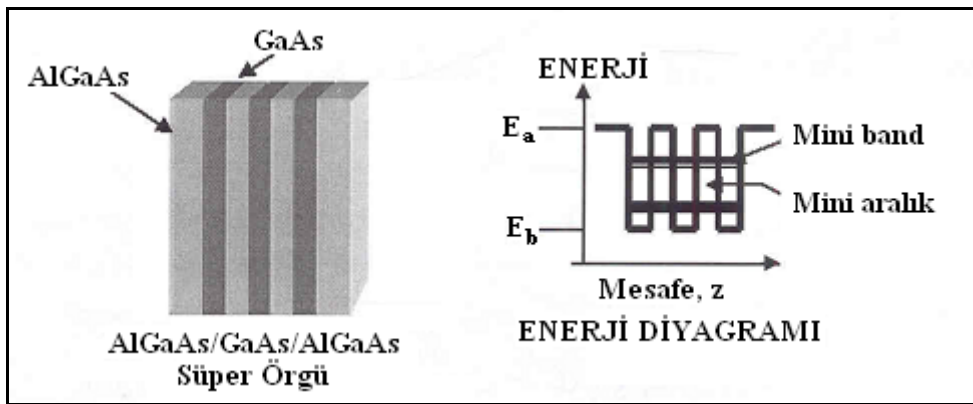
Çoklu kuantum-kuyu yapısı; dar ve geniş bant aralıklı tabakaların birini diğerinin üzerine büyüdüğü çoklu yapıdır. Genellikle geniş bant aralıklı materyaller, değişik kuantum kuyularındaki elektronlar arasında iletişimi sağlayan bir bariyer şeklindedir.



Şekil 2.15. Çoklu kuantum yapının şematik gösterimi

### 2.6.4. Süper örgü

Bir süper örgü değişik bariyerler arasında elektronların tünellenebildiği, ultra ince olan dar bant aralıklı tabakalardan oluşan bir çoklu kuantum-kuyu yapısıdır. Bu yapı minibantlar ve mini aralıkların oluşumunu sağlar.



Şekil 2.16. Süper örgü yapının şematik gösterimi

## 2.7. Kristal Yapı Kusurları

Kristallerin mükemmelliğinin bozulduğu an kusurlar ortaya çıkar. Bir kristal içerisinde atomlar veya atom grupları tümü ile düzgün bir sıralanım içinde bulunmazlar. Kristallerdeki yapı bozukluklarının; kristalin sıcaklığı, dış basıncı, saflığı...vb nedenleri vardır.

- 1- Noktasal Kusurlar
- 2- Çizgisel Kusurlar
- 3- Yüzeysel Kusurlar
- 4- Hacimsel Kusurlar

### 2.7.1. Noktasal kusurlar

Atomların bulunması gereken yerde bulunmayışı veya fazladan bulunmasıdır. Kristalde bu oran;  $n/N = S e^{-E_f / kT}$  olarak verilir. Burada; N:atom sayısı, n :atom başına boşluk sayısı, S:entropi ,  $E_f$ :boşluk oluşumu için gerekli enerjidir.

#### Yabancı atomun oluşturduğu noktasal kusurlar

Kristal yapı oluşurken olması gereken atomun yerinde olmaması gereken yabancı bir atomun bulunmasıdır. Eğer yabancı atom asıl atomdan büyükse kristal atomların arasına girme şansı azdır. Bu tip kusurlar maddeyi kristalleştirirken çalıştığımız ortamın kirli olması ile ortaya çıkar. Yabancı atom kristalin yüzeyinde ya da arada bir yerde bulunabilir. Atom, kristal yüzeyinde bir yerde ise Shottky tipi kusur denir.

#### Boşluk kusurları

Bir atomun olması gereken yer boş ise bu tür kusurlara boşluk kusurları denir. Bu atom araya bir yere ya da kristalin yüzeyine gitmiş olabilir. Atom arada bir yerde ise bu tip kusura Frenkel tipi kusur denir. Tek bir atom boşluğu olabileceği gibi 2 ya da 3 boşluk ta olabilir.



- O tek bir boşluk var ise F merkezli boşluk kusuru
- OO 2 boşluk var ise M merkezli boşluk kusuru
- OOO 3 boşluk var ise R merkezli boşluk kusuru

Bir kristalde nokta kusurları olup olmaması kristalin fiziksel özelliklerini değiştirir. Mesela katıların optik soğurma tayfları değişik olur. Elektriksel ve manyetik özellikleri değişir. Düzensiz kusurlu bir kristal yapı daha yüksek enerjidedir. Çünkü kusurun oluşması enerji gerektiren bir olaydır. Düzenli kusursuz bir kristal ise en kararlı haldedir ve enerjisi en azdır. Bir nokta kusuru oluşturmanın bedeli 1 eV'dir.

Bir kristalde  $N_0$  tane atomda kusurlu atom sayısı:

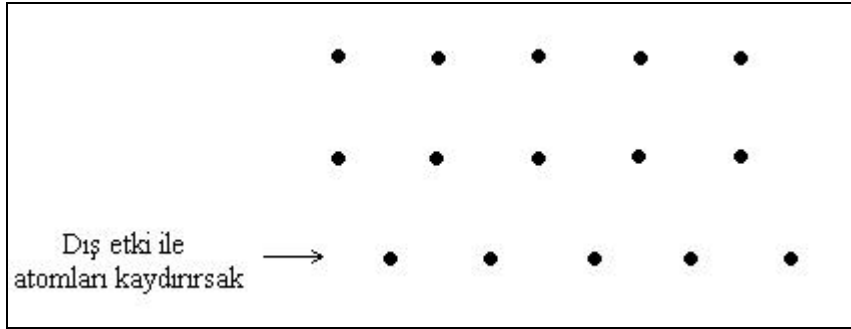
$$N = N_0 \cdot e^{-E/kT} \text{ dir.} \quad (2.4)$$

### 2.7.2. Çizgisel kusurlar

Bunlar örgü içerisinde oldukça uzun atomik boyutlarda ortaya çıkarlar. Oluşum özellikleri Burgers vektörü ile belirlenir. Burgers vektörü dislokasyon çizgisine dik ise kenar tipi, paralel ise vida tipi dislokasyon mevcuttur. Dislokasyonların ortaya çıktığı bölgeler yüksek enerji bölgeleridir. Dislokasyon enerjisi;  $E = b^2$  şeklindedir. Burada; E:dislokasyon enerjisi,  $\mu$ :kristalin kesme modülü, b:burgers vektörüdür.

#### Kenar çizgisel kusuru

Bu kusur genellikle malzemeyi işlerken ortaya çıkar. Bu tür kusurların enerji olarak değeri 13 eV civarındadır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Kenar çizgisel kusuru

### Vida kusuru

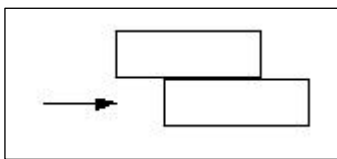
Kristali makaslama zoruna tabi tutarsak yani yüzeyine paralel kuvvet çifti uygularsak vida kusuru ortaya çıkar. Bu kusurda kristalin cephesi kayar. Bu tip kusurun bulunduğu kristallerde  $\text{cm}^3$  başına 10 kusur bulunur.

### **2.7.3. Yüzeysel kusurlar**

Bir kristal küçük kristal taneciklerinden oluşmuştur. Genellikle kristal metal malzemeler bu tip kristal taneciklerinin üst üste yığılmasıyla oluşturulmuştur. Küçük metal tanecikler düzgün olmalarına rağmen birleşme anında birbirleriyle açtıkları yüzeyde kusur oluştururlar. Bu kusurların adına “pit” denir.

### **2.7.4. Hacimsel kusurlar**

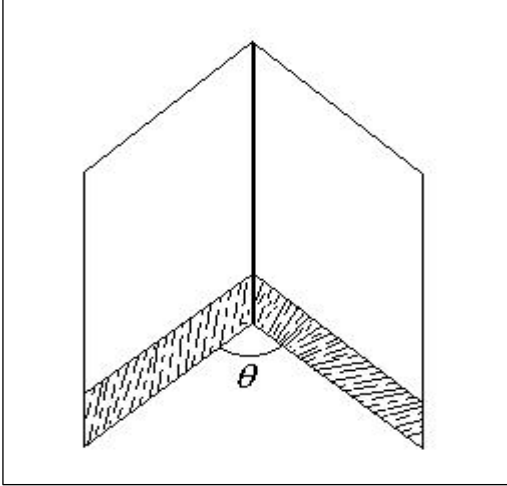
#### Kayma kusurları



Şekil 2.18. Kayma kusuru

Kristal yapı oluşurken şekildeki gibi her bir parça düzgün ancak biri diğerine göre öteleme (kayma) yapmış olabilir. Bu tip kusurlara kayma kusuru denir (Şekil 2.18).

### İkizleme kusuru



Şekil 2.19. İkizleme kusuru

Bu tip kusurda belli bir parça döndükten sonra aynı parçanın ikizi ile birleşmesi sonucu oluşur. Hacimsel kusurun oluşması için gerekli enerji çok büyüktür (Şekil 2.19).

### **2.8. Birim Örgü Hücresi**

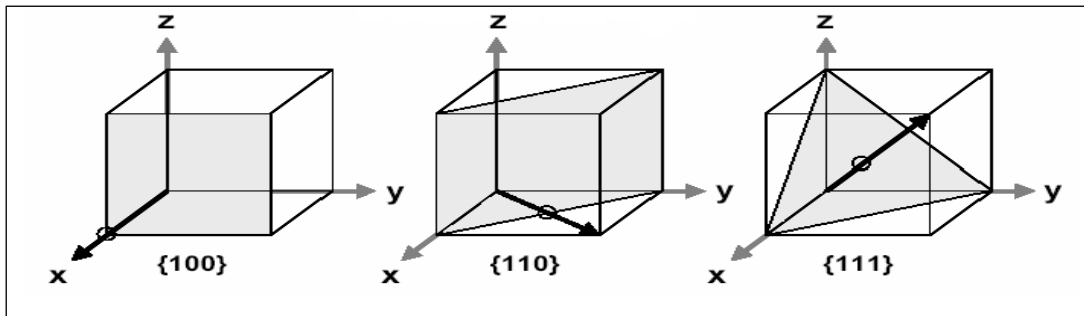
Kristal yapı belirli bir düzen içerisinde bir araya gelen atomların bu düzenlerini üç boyutta periyodik olarak devam ettirmeleri sonucu oluşur. Atomların ortaya çıkardığı düzeni bir nokta ile gösterecek olursak, üç boyutta oluşan kristal, noktalardan yapılmış bir kafes gibi düşünülebilir. İşte bu kafese örgü denir. Örgüde alınan bir noktadan çıkan üç boyutta a, b, c vektörlerinin kristal içerisinde belirlediği hacme birim örgü hücresi denir.

## 2.9. Örgü Çeşitleri

Kristal içerisinde alınan her hangi bir nokta  $r = u\mathbf{a} + v\mathbf{b} + w\mathbf{c}$  ötelemesi ile belirlenebilir. Burada  $a, b, c$  kristalin referans eksenlerini oluşturan vektörler,  $u, v, w$  ise tamsayıdır. Bu vektörlerin uzunlukları ile aralarındaki açılar belirli bir kristalin özelliklerini ortaya koyarlar. Buna göre bir birinden farklı 14 değişik şekil ortaya çıkar. Bu 14 değişik örgü çeşidine Bravais örgüleri denir.

### Miller İndisleri

Kristallerde, kolaylık için, doğrultuları ve düzlemleri göstermek üzere bazı özel gösterimler kullanılır. Başlangıçtan herhangi bir  $uvw$  noktasına uzanan doğrultu  $[uvw]$  olarak gösterilebilir. Bu gösterimde, doğrultuyu belirlemeye yettiği için en küçük tamsayıları kullanmak adet olmuştur. Örneğin;  $[2,2,0]$  doğrultusunu belirleyen çizgi  $[1,1,0]$  dan geçer ve  $2,2,0$  yerine  $1,1,0$  tamsayıları kullanılır. Eksi indisler ise sayının üzerine çizgi çekerek belirlenir. Kristaldeki simetri dolayısı ile kristal içerisindeki pek çok doğrultu birbirine özdeştir. Bu özdeş doğrultuların takımı da ile gösterilir. Örneğin kübik bir birim hücrenin kenarları  $\langle 100 \rangle$  şeklinde gösterilebilir (Şekil 2.20). Her hangi bir başlangıç noktası vermeden, kristal içerisinde yüzeyleri veya düzlemleri belirleyen gösterim şekline Miller indisleri denmektedir. Bu indisler, düzlemlerin üç kristal eksenini kesişme noktaları belirlenerek bulunur ve kesişme noktalarının yeri, birim hücrenin ele alınan eksen için belirli olan uzunluğu indisle çarpılarak ortaya çıkar.



Şekil 2.20. Çeşitli kristal düzlemler

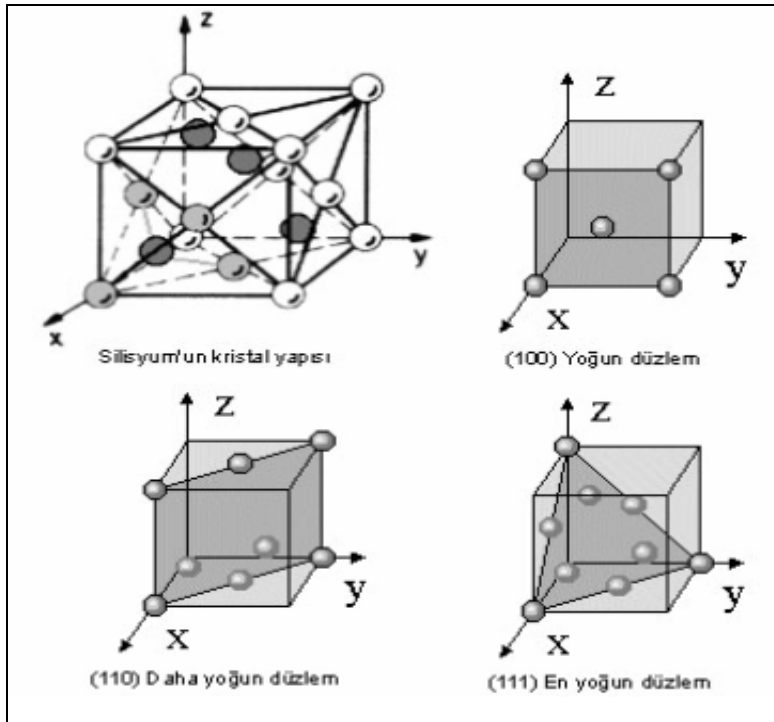
## 2.10. Aşındırma (Etching)

### Aşındırma

Yüzeiden malzeme kaldırma prosesidir.

### Aşındırma oranı

Birim zamanda aşındırılan yüzeyin kalınlığı (  $\text{Å/s}$  ). Bu aşındırma oranı aşındırıcı solüsyonun hacim oranına, ortamın sıcaklığına, numunenin yoğunluğuna, numuneyi aşındırıcı içinde çalkalama hızına, kristal yönelimine ve kristalin yüzeyinin pürüzlülüğüne bağlıdır.



Şekil 2.21. Si kristalinin örgü yapısı

### Seçicilik

Sadece istenilen tabakanın aşındırılmasıdır.

### *Aşındırma seçiciliği*

Aşındırılacak film tabakasının aşınma oranının, kullanılan maske malzemesinin aşınma oranına oranıdır.

### *Maskelme*

Aşındırma sırasında katmanın belirli bölgelerini korumak amacıyla yapılan işlem. Örnek olarak fotoresistans ve oksitleme.

### *Konsantrasyon*

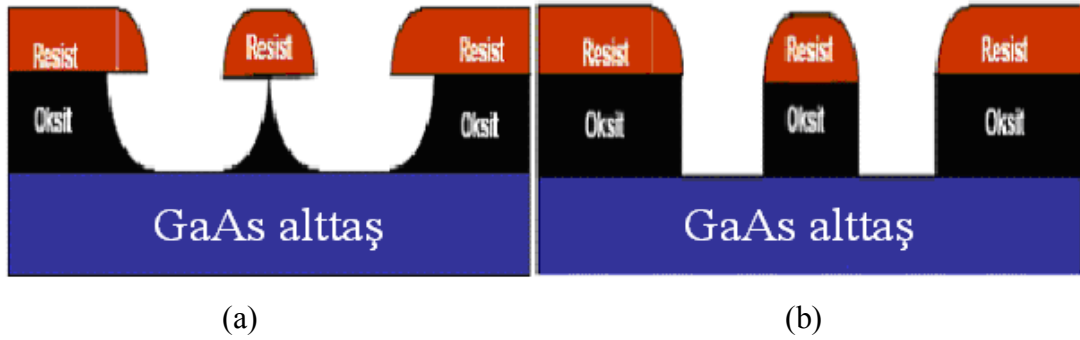
Bir litre çözelti içerisindeki çözücünün mol cinsinden oranı.

## **2.10.1. Aşındırma yöntemleri ve mekanizması**

### Aşındırmanın amacı

- Desen oluşturulması (maske (resist) kullanılır),
- Cilalama ve
- Kusurların veya malzemeye verilen zararların görünür hale getirilmesidir [38].

Aşındırma ıslak (izotropik) aşındırma ve kuru (anizotropik) aşındırma olarak ikiye ayrılır. İzotropik aşındırmada (Şekil 2.22(a)) her yönde ve aynı hızda aşındırma olur. Anizotropik aşındırmada ise (Şekil 2.22(b)) aşındırma yöne bağlıdır (her bir doğrultudaki aşındırma hızı farklıdır) ve aşındırılmış kenarlar neredeyse diktir.



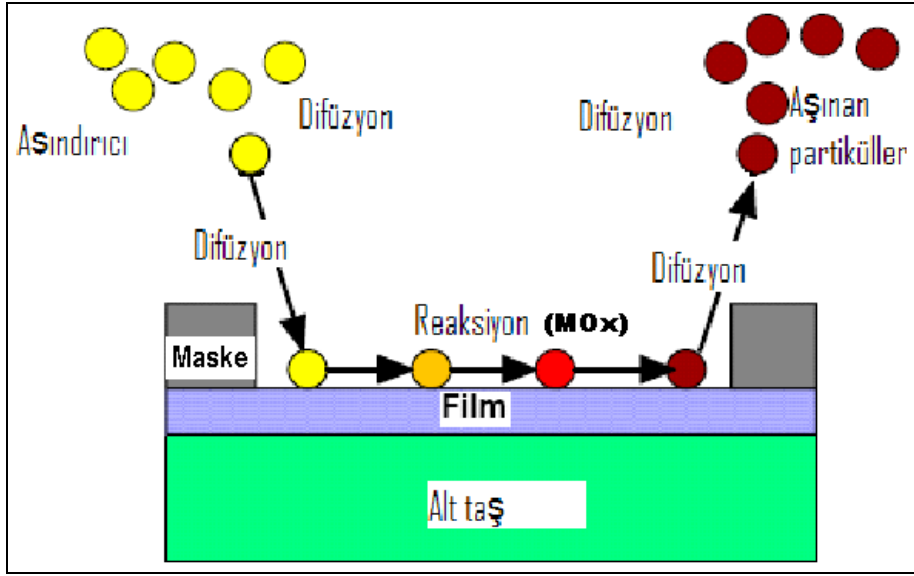
Şekil 2.22. Aşındırma profili: (a) izotropik ve (b) anizotropik aşındırma

### Anizotropik ve izotropik farklılığı

- Anizotropik
  - küçük boşluklar ve dikey kenar oluşturur.
  - maliyeti yüksektir.
- İzotropik
  - hızlı, basit ve ucuzdur.
  - büyük boşluklar ve kenar yüzey açısı önemli değilse kullanılır.
  - stres yoğunluğu önemli olduğunda keskin köşe oluşmaz.

### Islak aşındırma

Aşındırma işleminin reaktif bir solüsyon içerisinde yapılması. Burada aşındırma kimyasal reaksiyonla gerçekleştirilmektedir ve reaksiyon sonrasında aşındırıcı solüsyon içerisinde erime gerçekleşir (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. Islak aşındırmanın ana mekanizması

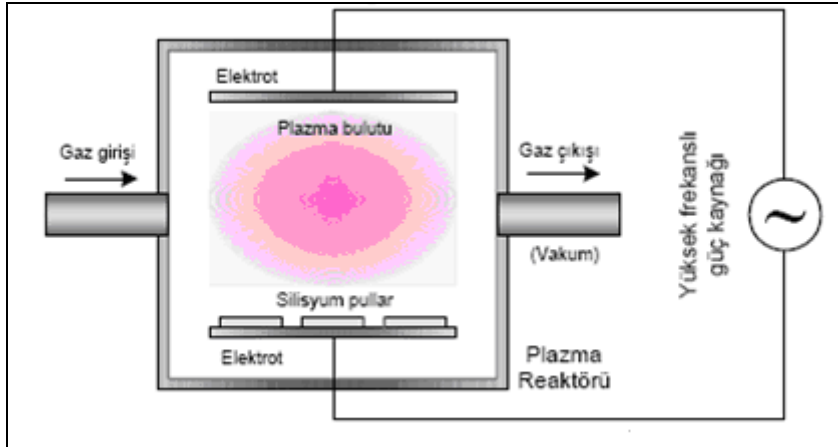
Islak aşındırma en kolay aşındırma metodudur. Malzeme, kimyasal solüsyon kullanılarak aşındırılır ve malzeme için uygun olan kimyasal solüsyonun seçiminde dört önemli nokta vardır. Bunlar: aşındırma hızı, profil (anizotropi ve morfoloji), seçicilik ve malzemeye verilen zarardır. Aşındırma hızı kristalin yapısal özelliklerine (morfoloji, yönelim, mükemmellik vb.), sıcaklığa, solüsyonun içeriğine ve aşındırma zamanına bağlıdır.

Kimyasal solüsyonun içeriğinde bulunan asitlerin bir kısmı yüzeyde bulunan kopuk bağları oksitleştirir, diğer kısmı ise yüzeyde meydana gelen oksit tabakasını götürür. Bu olay, kimyasal aşındırmanın ana mekanizmasıdır.

### Kuru aşındırma

Aşındırma işleminin reaktif bir gaz (plazma) ortamında gerçekleştirilmesi (iyon bombardımanı).

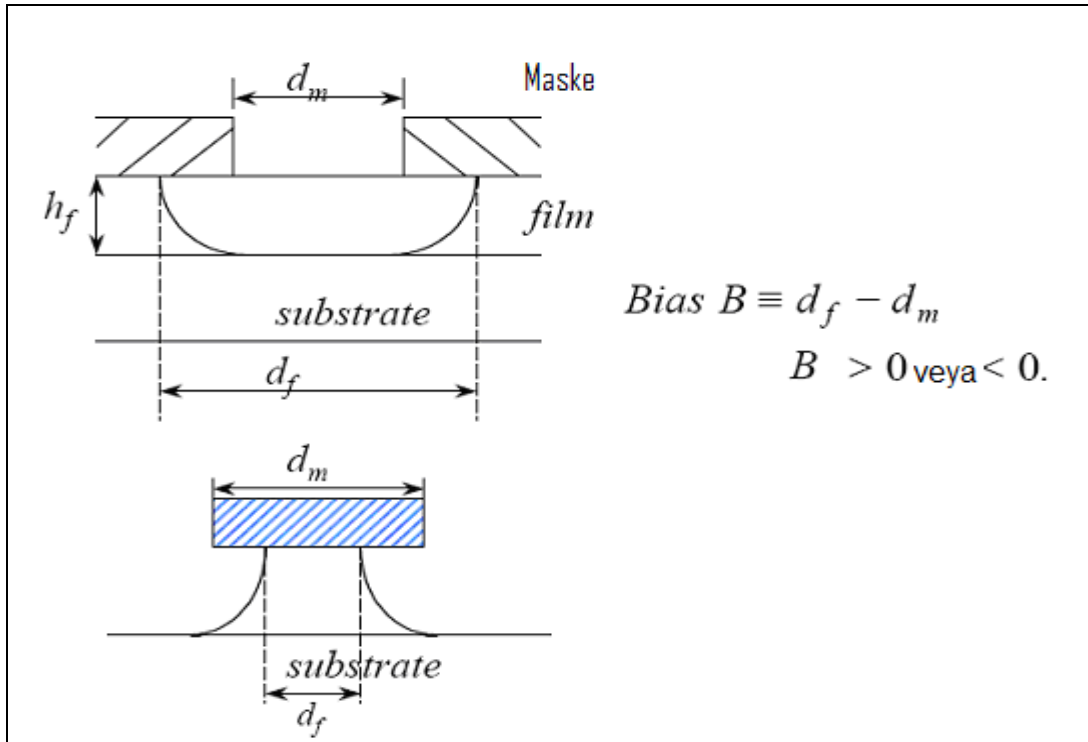




Şekil 2.24. Paralel elektrodlu tepkime odasında plazmayla aşındırma

### Bias

Aşındırılmak istenen yüzeyin, aşınan yüzeye arasındaki farkı gösterir.



Şekil 2. 25. izotropik aşındırmada bias durumu

Tam izotropik aşındırmada  $B = 2 h f$ , tam anizotropik aşındırmada  $B = 0$ , anizotropi açısı ise  $A_f \equiv 1 - 1/2 B / h f$  'dir.

### Aktivasyon enerjisi

Katalizörler, kimyasal bir tepkimeyi hızlandıran kimyasal maddelerdir. Fakat tepkime sırasında kullanılmazlar ve tepkime sona erdiğinde yapılarında bir değişiklik olmaz. (Yani aslında bir tepkimenin gerçekleşmesi için katalizörün varlığı zorunlu değildir. Ama bu durumda tepkime inanılmaz derecede yavaş gerçekleşir.)

Her tepkimenin gerçekleşmesi için aşılması gereken bir enerji engeli vardır. Biz bu enerjiye, o tepkimenin “aktivasyon enerjisi” (E) diyoruz. Aktivasyon enerjisi, her farklı türde tepkime için değişkenlik gösterir. Bir tepkimenin aktivasyon enerjisi ne kadar düşükse tepkime o kadar hızlı ilerler çünkü tepkimeye giren maddelerin kinetik enerjisi, enerji engelini aşabilecek yeterlilikte olur. Aktivasyon enerjisi yüksek olduğunda ise, ek olarak enerji sağlanmadığı sürece, tepkime yavaş ilerler.

Bildiğimiz gibi ısı bir enerji çeşididir. Eğer bir tepkimeye dışarıdan ısı enerjisi verilirse bu tepkimenin hızı artar. Bunun sebebi tepkimeye giren moleküllerin ısı ile kinetik enerjilerinin artması, bu sayede enerji engelini daha kolay aşılmasıdır.

### Entropi

Entropi, bir sistemdeki düzensizliğin ölçüsü olarak ifade edilebilir. Daha değişik bir tanımla, entropi, bir termodinamik sistemden başka sistemlere iş şeklinde aktarabilecek enerji miktarını gösteren özellik veya durum fonksiyonu olarak da tanımlanır. Sistemdeki düzensizlik arttıkça, sistemin entropisi de artar, yani sistemin faydalı iş verme kabiliyeti de azalır.

Örneğin bir akışkan ısıtıldığında, molekül hareketleri düzensizleştiği için entropisi artar. Eğer bir sistem tamamı ile düzenli ise entropisi sıfır olabilir. Entropi, enerji gibi korunan bir özellik değildir. Gerçekte tüm işlemlerde, çevre ile sistemin entropi

değişimlerinin toplamı daima pozitifdir. Kâinatta bulunan her sistem ve canlının entropisi sürekli artmaktadır.

Termodinamiğin ikinci yasasına göre entropi ile ilgili olarak şu bağıntı verilmiştir.

$$dS = dQ/T \quad (2.5)$$

Termodinamik bilimi ondokuzuncu yüzyılın başından itibaren Avrupa'da (sonraları A.B.D'de) geliştirilmiştir. Katkıda bulunanlar arasında Carnot, Clausius, Maxwell, Boltzmann ve Gibbs en önde gelenlerdendir. Tarihsel olarak bu bilimin gelişimi makinelere dayalı sanayinin ve her türlü enerji kullanımının ilerlemesine paralellik gösterir.

Termodinamiğin ikinci yasasının değişik (ama eşdeğer) ifadelerinden birinde, kapalı bir sistemin entropisinin hiç bir zaman azalamayacağı belirtilir. "Kapalı" deyimini dışarıyla madde veya enerji alışverişinde bulunmayan sistem anlamına geliyor.

Klasik termodinamikte hacim, basınç, sıcaklık, enerji, ve entropi gibi kavramlar temel alınır. Diğer yandan termodinamik aynı zamanda istatistiksel kavramlar kullanılarak da ifade edilebilir. Mekanik (klasik veya kuantum) yasalarının istatistikle birleştirilerek kullanılması sayesinde geliştirilen "istatistiksel mekanik" veya "istatistiksel termodinamik", klasik termodinamiğin tarif ettiği ancak açıklayamadığı bazı olgulara derin açıklamalar getirmiştir. Bunlardan biri de entropi yasasıdır.

Entropi istatistik bağlamında yeniden tanımlanır. Örneğin Boltzmann'ın ünlü denkleminde

$$S = k \log W \quad (2.6)$$

entropi,  $S$ , bir sistemin girebileceği mikroskopik durumların sayısı,  $W$ , yoluyla tanımlanır. Burada  $k$  Boltzmann sabitidir. Sözü edilen mikroskopik durumların

tanımı ve sayılması ise, sistemi oluşturan atomları tarif eden temel mekanik yasalar kullanılarak yapılır.

Entropi yasasının zaman açısından tek taraflı niteliği ve gelecek ve geçmiş arasında ayırım yapması, onu fizikte bilinen tüm diğer yasalardan farklı kılar. (Yüksek enerji fiziğindeki muhtemel bir istisna dışında.) Doğal fiziksel olayların, insanların ve diğer canlıların kurdukları düzenlilikleri artırmak değil azaltmak eğiliminde olması (örneğin depremde binaların yıkılması) ve benzeri bir takım olgular, entropi yasasına onun bilimsel tanımını aşan anlamlar yüklenmesine önayak olmuştur. Dawkins, özellikle "The Blind Watchmaker" adlı kitabında, bu eğilimin genelleştirilmiş bir biçimi ile biyolojik evrim arasındaki bağlantılardan söz eder. Reichenbach, Bohm, Feynman, Popper ve Grünbaum gibi bazı düşünürler entropi yasası ve zaman kavramı arasındaki ilişkiyi değişik yollardan açıklamaya çalıştılar.

### Entalpi

Isı kapsamı ya da entalpi, bir maddenin yapısında depoladığı her tür enerjinin toplamıdır.  $H$  ile simgelenir. Bir maddenin bir molünde depolanmış enerjiye o maddenin molar entalpi denir.

Maddelerin entalpileri ölçülemez. Ancak tepkimeye girenlerle ürünler arasındaki fark belirlenir. Kimyasal tepkimelerde, ürünlerin entalpileri toplamı ile girenlerin entalpileri toplamı arasındaki farka, tepkimenin entalpi değişimi ya da tepkime entalpi adı verilir ve  $\Delta H$  ile simgelenir.  $\Delta H$  değerleri - ve + olabilir bu tepkimenin ısıveren veya ısıalan olduğunu belirler. Termodinamikte ısı ve işin toplamına eşittir. Maddenin fiziksel haline, sıcaklık ve basınca, madde miktarına bağlı olarak değişebilir.

Her kimyasal tepkimede az ya da çok ısı alınır ya da verilir. Sabit basınç altında, kimyasal bir tepkimede açığa çıkan ya da alınan ısıya tepkime entalpi denir.

### 2.10.2. GaAs ve AlGaAs kimyasal aşındırması için oda sıcaklığında kullanılan solüsyonlar

Farklı malzemelerin kimyasal aşındırma işlemi için kullanılan solüsyonlar, malzeme özelliklerine göre farklılık gösterir. Solüsyon seçiminde dikkat edilmesi gereken noktalar: malzemeye zarar vermeden, arzu edilen sıcaklıkta malzemeyle tepkimeye girerek istenilen hızda aşındırma yapacak solüsyonun seçilmesidir (Çizelge 2.6).

Çizelge 2.6. GaAs ve AlGaAs ıslak aşındırması için kullanılan aşındırıcılar

Aşındırıcılar (Etchant)	Aşındırma hızı ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	Açıklama
$\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + 3\text{CH}_3\text{OH}$	2	GaAs
$\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	0,5-5	GaAs
$\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	0,04	GaAs
$\text{HCl} + 4\text{H}_2\text{O}_2 + 40\text{H}_2\text{O}$	0,22	GaAs
$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 + \text{H}_2\text{O}_2$	Al kompozisyonuna bağlı	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$
$\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2$ $\text{NH}_4\text{OH}$ pH ayarlıyor ( $1 < \text{pH} < 6$ )	Al kompozisyonuna bağlı	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ $x \geq 0,1$

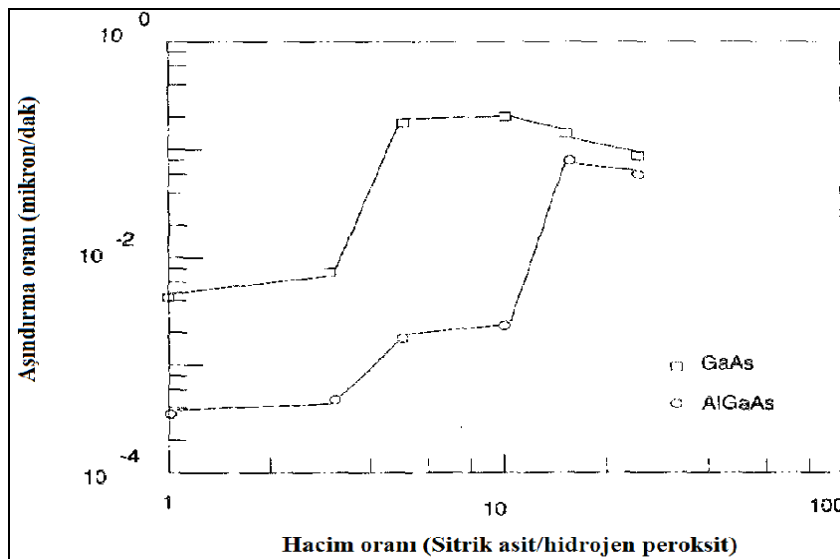
### 3. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Bizim yapacağımız çalışmanın amacı, bizden önce yapılan çalışmalardan yararlanarak bilgileri daha ileriye taşımak ve bizden sonrakilere ise ışık tutabilmektir. Bu doğrultuda yapmayı düşündüğümüz çalışmayla ilgili daha önce yapılan çalışmalar;

*Juang J., Kuhn K.J. ve Darling R.B., ' Selective Etching of GaAs and AlGaAs with citric acid/hydrogen peroxide solutions', Vac. J. Sci. Technol., B (8):1122-1124, (1990).*

Seçici aşındırma GaAs/AlGaAs yapısı sürecinde önemli bir adım (Şekil 3.1). Birçok çaba, aşınma çözeltilerini çalkalayarak ammonium-hidroksit/hidrojen peroksit çözeltilerinin seçiciliğini arttırmaya çalışıyor. Bu raporda sitrik asit/hidrojen peroksit çözeltileri ammonium-hidroksit/hidrojen peroksit çözeltileriyle karşılaştırılıyor.

Sonuç olarak sitrik asit/hidrojen peroksit birçok yönden hassas seçici aşınma için tercih edilen bir yol. Bunun sebepleri; daha iyi seçicilik, daha keskin köşeler ve daha düz aşınmış yüzeyler.

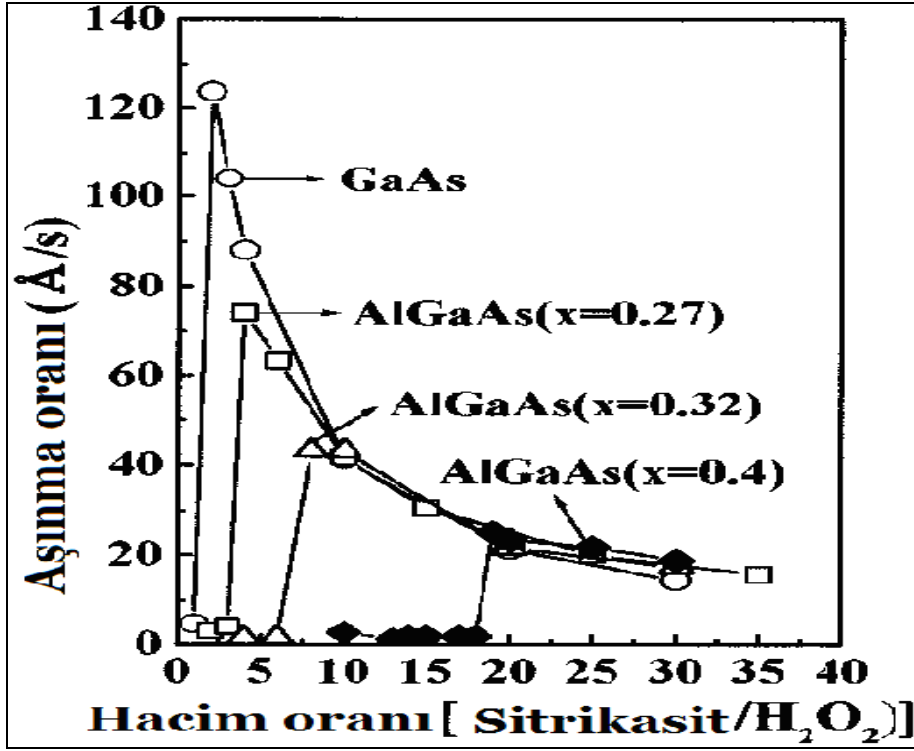


Şekil 3.1. AlGaAs ve GaAs yapılarının çözelti oranına göre aşınma oranı

*Kim J., Lim D.H., ve Yang G.M., 'Selective Etching of AlGaAs/GaAs structures using the solutions of citric acid /H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and de-ionized H<sub>2</sub>O /buffered oxide etch', Vac. J. Sci. Technol., B (16): 558-560, (1998).*

Birçok elektrikli ve optik aygıt, bir süreç aşaması gerektiriyor. Bu aşama yüzey tabakalarını, alt yapıyı görebilmek, elektrik teması oluşturabilmek ve bireysel aygıtları izole edebilmek için ortadan kaldırılıyor. Bu amaçla bir materyali diğerinden daha hızlı ortadan kaldıran seçici aşınım; daha kolay ve hızlı üretime izin veriyor.

Şu ana kadar GaAs'den AlGaAs'e kadar bir çok sonuç sitrik asit/ hidrojen peroksit, ammonium-hidroksit/hidrojen peroksit gibi çeşitli çözeltiler için de belirtildi. Diğer yandan düşük Al bileşeni içeren AlGaAs yapısına göre GaAs'in seçici aşınımı sınırlandırılabilir. Çünkü yüksek Al bileşeninde AlGaAs, HF içeren çözeltilerle iyi aşınmıyor. Bu yapıyı yüksek ve düşük Al içeren AlGaAs de kapsayan hetero yapılara uygulamak için AlGaAs' in seçici ortadan kaldırılmasını incelemek gerekir. Bu çalışmada sistematik olarak Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/Al<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>As (x<0,5, y>0,7) yapısını C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve deiyonize H<sub>2</sub>O/tamponlaştırılmış oksit çözeltisi içinde inceleniyor (Şekil 3.2). Bu sistem AlGaAs/GaAs yapısının seçici ıslak aşınımını sağlıyor. Bu seçici sonuçlarını kullanarak GaAs ve AlAs başarılı bir şekilde katman katman aşındırılıyor.



Şekil 3.2. Aşınma hızı çeşitliliği hacim oranına bağlı ve bu da Al bileşenine duyarlı

Sitrik asit solüsyonunun hazırlanması; 1 gram C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub> (anhydrous): 1ml H<sub>2</sub>O. Sitrik asit/ hidrojen peroksit'in değişik hacim oranlarında elde edilen çeşitli seçici ve seçici olmayan aşındırıcılar Çizelge 3.1' de verilmiştir.



Çizelge 3.1.  $C_6H_8O_7:H_2O_2$ 'in farklı oranlarında aşınan malzemelerin aşınma oranları

Aşınma oranı (Å/dak)										
$C_6H_8O_7 : H_2O_2$	GaAs	$Al_{0,3}Ga_{0,7}As$	$In_{0,2}Ga_{0,8}As$	$In_{0,3}Ga_{0,4}As$	$In_{0,5}Al_{0,48}As$	InP	InAs	$Al_{0,5}Ga_{0,5}Sb$	$GaAs_{0,85}Sb_{0,15}$	GaSb
1 : 2	60	27	346	1235	21	12	655	0	41	7
1 : 1	69	27	751	1116	22	11	826	0	47	6
2 : 1	85	24	1442	1438	26	9	n/a	n/a	n/a	9
3 : 1	2169	24	2318	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
4 : 1	2235	23	2777	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
5 : 1	3140	27	2588	1433	44	5	895	0	52	9
7 : 1	2882	89	2231	1421	63	3	n/a	n/a	1523	n/a
10 : 1	2513	1945	1219	1020	154	4	727	0	1284	7
15 : 1	1551	1082	882	1013	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
20 : 1	762	918	624	665	204	2	473	0	997	7
50 : 1	397	512	384	303	174	5	n/a	n/a	n/a	n/a

Sitrik asit monohidratın bize vermiş olduğu, tabloda görülen işlem sonuçları; değişik aşınma oranları ve seçiciliğin eşik noktalarıdır. AlGaAs aşınma oranı Al bileşeninin işlevine göre,  $Al_xGa_{1-x}As$  ( $x>0,7$ ) için aşınma olmuyor ve  $Al_xGa_{1-x}As/Al_yGa_{1-y}As$  ( $x<0,5$ ,  $y>0,7$ ) için seçici aşındırma  $C_6H_8O_7:H_2O_2/BHF:H_2O$ .

Deney sonucunda bu tablodaki (Çizelge 3.1), 5:1 hacim oranındaki solüsyon ile GaAs /AlGaAs' e benzer şekilde GaAs/AlAs' i seçici aşındırma uygulanabilir.

#### *Bizim yapacağımız çalışma içeriği*

Yapılan bu çalışmalar ışığında bizde Sitrik asit/ hidrojen peroksit solüsyonunu kullanarak AlGaAs/GaAs yarıiletkeni için farklı katkılardaki n-tipi, p-tipi ve katkısız yarı-yalıtkan GaAs, AlGaAs wafer ve epilayer üzerlerinde çalışmayı uygun gördük ve de şimdiye kadar farklı katkılardaki GaAs yapıları üzerine çalışma yapıldığına rastlamadık. Bu yüzden bu çalışmalarını biz yapmayı uygun gördük.

## 4. KULLANILAN DENEYSEL SİSTEMLER

### 4.1. Elipsometre

Elipsometre geçen yüzyılın ortalarında bulunan deneysel bir metottur ve tüm katı maddelerin (metaller, yarıiletkenler, yalıtkanlar olmak üzere) özelliklerini belirlemek için kullanılan ve numune yüzeyinden yansıyan ışığın polarizasyonundaki değişimin ölçülmesi üzerine temellenen yüzeye zarar vermeyen (nondestructive) bir ölçüm tekniğidir.

Çoğu elipsometre, numune üzerinden yansıyan ışığın polarizasyonunu mekanik olarak dönen polarizör birimi ile çözümlenmektedir. Bu tür elipsometrelerde, pek çok gelişmelere rağmen, bazı durumlarda düşük hassasiyet ve özellikle az yansıma veren numunelerde düşük sinyal/gürültü oranı ile karşılaşılabilir.

Bu ölçüm tekniği ile, başlıca olarak, filmin kalınlığı, kırılma indisi, sönüm katsayısı, kristallliği (crystallinity), kompozisyonu, derinlemesine ya da alansal tekbiçimliliği ve mikroyapısı gibi özellikleri analiz edebilmektedir.

Elektromagnetik dalga optik sistemlerle etkileştiği zaman ışığın polarizasyon durumu değişir. Elipsometrik parametreler  $\Delta$  ve  $\Psi$  değerleri ile verilir.

Gelme düzlemine paralel polarize olan yansıma genliğinin büyüklüğü  $R_p$ , dik polarize olmuş yansıma genliğine  $R_s$  oranı elipsometrik  $\rho$  parametresinin ifadesini verir.

$$\rho = \frac{R_p}{R_s} \quad (4.1)$$

Aynı parametreyi şu şekilde de ifade edebiliriz,

$$\rho = \frac{|Rp|}{|Rs|} e^{i(\Delta p - \Delta s)} = \tan \Psi e^{i\Delta} \quad (4.2)$$

Buradaki  $\Delta p$  paralel yönde polarize olan ışığın faz farkı,  $\Delta s$  dik yönde polarize olan ışığın faz farkıdır.  $\Delta$  ise  $Rp$  ve  $Rs$  arasındaki faz farkını verir.

$$\Delta = \Delta p - \Delta s \quad (4.3)$$

Bu denklemler elipsometrik parametrelerle fresnel katsayıları, dolayısı ile numunenin optik sabitleri arasında ilişki kurulabileceğini gösterir. Örneğin numunenin dielektrik fonksiyonu, polarizasyonunun değişimi bilgilerinden çıkarılabilir.

#### 4.1.1. Elipsometre bileşenleri

Resim 4.1'de gösterilen faz modülasyonlu spektroskopik elipsometre sistemi (Jobin Yvon-Horiba) numune üzerinden yansıyan ışığın polarizasyon durumunun bir fotoelastik modülatör yardımı ile mekanik bir hareket olmaksızın, 50 kHz frekansında değiştirilmesi üzerine temellenmektedir. Böylece, yüksek sinyal/gürültü oranı elde edilmiş ve geleneksel elipsometre sistemlerinde bazı durumlarda karşılaşılan düşük hassasiyet sorunundan sistem arındırılmıştır. Bu tekniğin 1 ms kadar küçük bir zamanda veri almaya olanak vermesi, dinamik olayların gözlenmesi için önem taşımaktadır. Ayrıca, 260 – 2100 nm gibi geniş bir dalga boyu aralığında ölçüm imkânı veren eldeki elipsometre sisteminin önemli özelliklerinden biri de delta değerini  $0^\circ$  ve  $180^\circ$  çevresinde doğru ölçebilmesidir.



Resim 4.1. Spektroskopik elipsometre cihazı

Sistem, başlıca olarak, bir 75 kW gücünde Xenon ışık kaynağı, otomatik goniometre üzerine monte edilmiş bir polarizör ve bir modulatör başlığı, bir monokromatör, bir motorize numune platformu ve bir kontrol biriminden oluşmaktadır. Polarizör başlığı, ışık kaynağından gelen ışık demetini toplar ve bir polarizör lens (Glan tipi) yardımı ile numune üzerine odaklanmaktadır. Odaklanan ışığın çapı manuel olarak 50, 100, 1 000  $\mu\text{m}$ 'ye ayarlanabilmektedir. Modulatör başlığı, numune üzerinden yansıyan ışık demetini toplar, fotoelastik modulatör yardımı ile modüle eder ve modüle edilmiş ışık demetini polarizör lens (Glan tipi) yardımı polarize ettikten sonra fiber optik kablolar yoluyla monokromatöre iletmektedir. Fotoelastik modulatör ve polarizör lens motorize dönen bir plaka üzerine sabitlenmişlerdir. Monokromatör'den çıkan ışık dalga boyuna göre hareket eden bir ayna yardımı ile ya ön çıkış yarığında fotoçoğaltıcı tübe (PMT, morötesi ve görünür dalga boylarında) ya da yan çıkış yarığında InGaAs dedektöre (yakın kızılötesi dalga boylarında,  $>880$  nm) ulaştırılır. Numune platformu birbirine dik iki doğrultuda bir motor ile mikrometre hassasiyetinde hareket ettirilerek, numunenin istenilen alanda tekbiçimliliği (uniformity), haritalama (mapping) yoluyla çözümlenebilmektedir. Numune üzerine düşen ışığın geliş açısı  $40$  ve  $90^\circ$  arası  $0.01^\circ$  kadar küçük basamaklarda otomatik olarak ayarlanabilmektedir. Ayrıca, ölçüm sistemi DeltaPsi2 isimli bir yazılımla hem kontrol edilebilmekte hem de elde edilen veriler kullanıcı için çokça kolaylaştırılmış bir ara yüzle çözümlenebilmektedir.

## 4.2. Profilometre

Bir nesnenin uzunluğunu veya derinliğini genellikle mikrometre ve nanometre boyutunda ölçen cihazların genel adıdır.

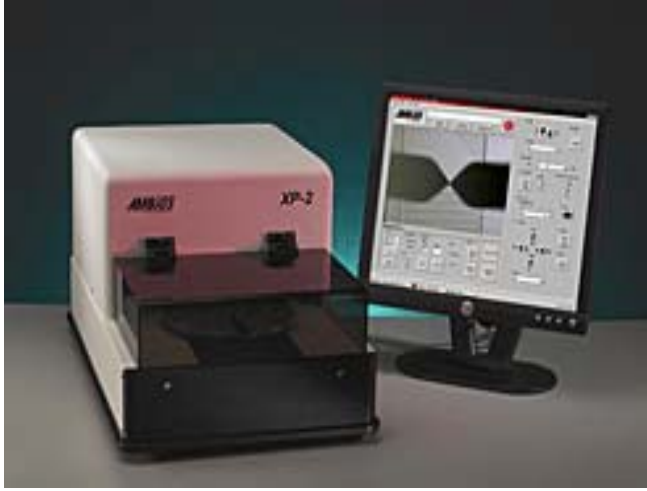
Tarihsel gelişimine bakıldığında profilometreler gramofon ses sistemi benzeri yüzey pürüzlülüğünü fonografi metoduyla ölçen mekanik cihazlar iken, günümüzde temassız (optik ve lazer) yöntemler ile ölçüm yapan cihazlardır.

### *Temaslı profilometreler*

Kristal bir uç ölçülecek numunenin kesiti boyunca belirli bir temas kuvveti ile gezerek yüzeydeki pürüzlülüğü ölçer. Tipik bir profilometre yüzey pürüzlülüğündeki 10 ila 65 000 nm arasındaki değişkenliği ölçebilir. Kristal ucun yükseklik pozisyonu analog bir sinyal üreterek bunu yardımcı cihazlar aracılığıyla dijital sinyale çevirir ve kaydeder.

### *Temassız profilometreler*

Çalışma prensibi temaslı profilometrelere benzer ancak, ölçüm için temas eden bir uç yerine optik teknolojisinden faydalanılır. Lazer, eş odaklı mikroskop ve dijital holografi teknolojisi kullanan cihazlar mevcuttur. Avantajı temas olmadığı için daha hızlı, yüzey tarafından aşınmaya maruz kalmadığından daha güvenilir ve ışık teknolojisindeki ilerlemeler paralelinde çözünürlüğü çok daha yüksektir.



Resim 4.2. Stylus XP-2 profilometresi

Sistem başlıca olarak, milimetrede  $6 \text{ A}^\circ$  luk bir hassasiyete sahiptir. Tekrar yeteneği  $10 \text{ A}^\circ$  veya ilerleme hızının % 0.1'idir. 1 000 ölçüm noktası önceden programlanabilir ve otomatik olarak bu noktalardan tekrarlı ölçümler alınabilir. Windows XP uyumludur ve üç boyutlu yazılım sayesinde ölçülen yüzeyin haritasını yada grafiğini çıkarabilir.

### 4.3. Optik Mikroskop

Optik mikroskop, materyali araştırmak için basit rutin incelemelerde geniş bir uygulama alanı sağlayan modüler dizaynlı bir modern sistem mikroskobudur. Numunenin yüzey özellikleri Resim 4.3'de gösterilen Leica DM6000 M optik mikroskobu kullanılarak analiz edildi. Leica DM6000 M optik mikroskobu görüntüyü 50 ile 2 000 kat büyütme özelliğine sahiptir. Leica Mikrosistemler, mikroyapının ölçümü, litografi ve analizi için kullanılır. İş yükünü azaltan ve uygun kullanım sağlayan yani modüleritesi, evrensel uygulama potansiyeli, kararlılığı, ergonomik olması gibi pek çok özelliğe sahiptir.



Resim 4.3. Leica DM6000 M Optik mikroskobu

Pek çok farklı yapılandırma özellikleri sayesinde sanayi mikroskop uygulamaları ve laboratuarlarda kullanılmaktadır. Objektiflerin geniş seçimi parlak bir görüntü kalitesi sağlar.

Optik mikroskop ölçümlerinin verdiği bilgi sınırlı olmasına rağmen hızlı ve direkt olması bakımından değerli bir ölçüm metodudur. Ayrıca, makul fiyatlarda olması bakımından birçok laboratuvar da yaygınca kullanılmaktadır. Bilindiği gibi mikroskop numuneyi derinlemesine inceleme imkânı tanımadığından, yalnızca yüzeysel bir inceleme imkânı sağlar.

## 5. DENEYSEL BİLGİLER

### 5.1. Deney

Sitrik asit çözeltisi, sitrik asit ile deiyonize suyu 1:1 ağırlık oranında yarım saat karıştırılarak oluşturulmuştur ve bir gün oda koşullarında bekletilmiştir. Aşındırma zamanları 2 dakika ile genellikle sabit tutulmuştur fakat 4:1 hacim oranı için 1 dakikalık aşındırma zamanı tercih edilmiştir. GaAs numuneler yaklaşık 1x2 cm boyutlarında dikdörtgen şeklinde kesilmiştir ve aşındırma çözeltilerine batırılmadan önce standart yağ arındırıcı temizleme yöntemleri ile temizlenmişlerdir. Aşındırma sırasında (numuneler çözelti içerisinde iken) sabit bir hızda devamlı çalkalanmıştır. Numuneler üzerinde aşınmış çeşitli basamaklar elde edebilmek için numuneler uygun bir biçimde maskelenmiştir. Tüm deney oda sıcaklığında yapılmıştır.

### 5.2. Deneysel Ölçüm ve Bulgular

Bu çalışmada, Zn katkılı ( $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  yoğunluğunda), Si katkılı ( $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  yoğunluğunda) ve katkılanılmamış yarı-yalıtkan GaAs (100), ayrıca MBE'de büyütülen Be katkılı, Si katkılı ve katkılanılmamış yarı-yalıtkan GaAs (100), si katkılı AlGaAs/GaAs çoklu yapıları numuneleri oda sıcaklığında, 1:1, 1,3:1, 1,5:1, 1,7:1, 2:1, 2,3:1, 2,5:1, 2,7:1, 3:1 ve 4:1 hacim yoğunluklu  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7:\text{H}_2\text{O}_2$  çözeltilerinin bir kısmı ile aşındırılmıştır. Bilindiği gibi,  $\text{H}_2\text{O}_2$  GaAs yüzeyine oksitleyici olarak etki ederken,  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$  oksit tabakayı kaldırma işlemini gerçekleştirir. Aşındırıcı çözelti içindeki reaktif moleküller GaAs yüzeyindeki bağları kırar ve yüzey oksitlenir. Arkasından, oksit tabaka aşındırıcı çözeltide çözülür ve dağılır. Çözelti içerisinde bulunan  $\text{H}_2\text{O}_2$ 'in potansiyeli oksitlenme için gerekli olan boşlukları (deşik ya da hole) değerlik bandında bulunan elektronları boşaltarak sağlar. Eğer redoks potansiyeli çözeltide bulunan iyonlarla denge halinde olan GaAs'in potansiyelinden yüksek ise aşındırma mümkün olur. Ayrıca, aşındırma hızını, her şeyden önce, GaAs enerji bandının çözeltide bulunan redox ikilisinin eneryi seviyelerine göreceli olarak pozisyonu belirler [9].



### Ölçümler

Tez çalışması sırasında, literatür başlığında bahsedilen çalışmalardan da faydalanarak yukarıda bahsedilen deney adımlarının tümü yerine getirilmiştir. Toplam yedi farklı çeşit numune üzerinde aşındırma işlemi yapılmıştır (Çizelge 5.1).

Çizelge 5.1. Aşınma sonrası profilometre ölçümlerindeki aşınma oranları

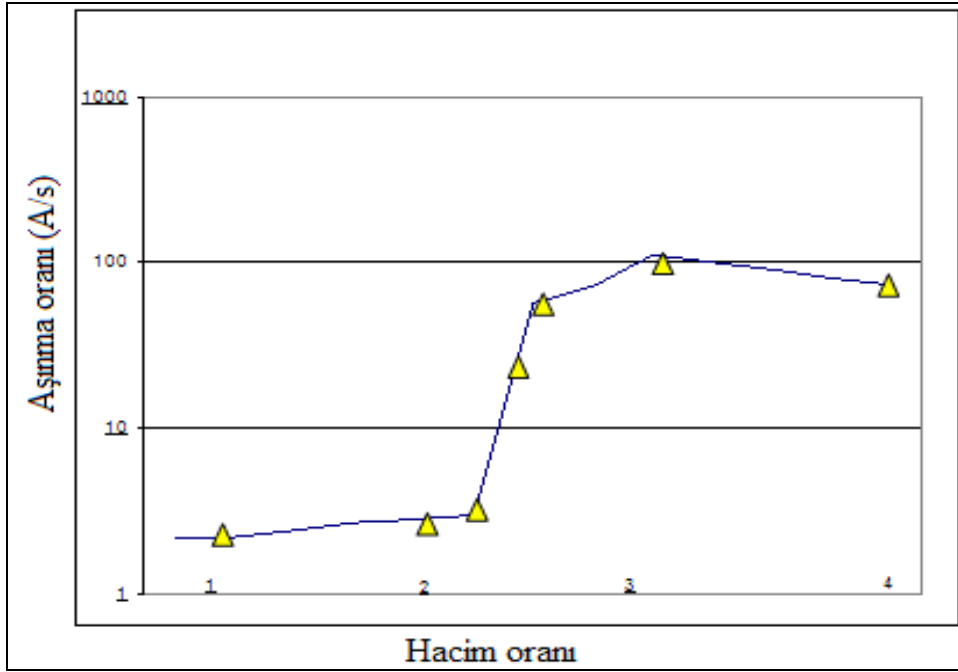
Hacim oranı $C_6H_8O_7:H_2O_2$	Aşınma oranı ( $\text{\AA}^0/s$ )						
	Wafer			Epilayer			
	n-type GaAs	p-type GaAs	SI GaAs	n-type GaAs	p-type GaAs	SI GaAs	n-type AlGaAs
1:1	2,14	2,24	1,44	1,49	1,66	1,56	1,19
1,3:1	-	-	1,85	-	-	-	-
1,5:1	-	-	1,83	-	-	-	-
1,7:1	-	-	2,67	-	-	-	-
2:1	2,81	2,59	82,25	-	-	-	-
2,3:1	2,98	3,58	79,77	-	-	-	-
2,5:1	56,91	49,30	-	-	-	-	-
2,7:1	71,95	58,89	90,10	-	-	-	-
3:1	110,84	86,87	73,20	-	-	-	-
4:1	72,77	59,00	58,85	-	-	-	-

*n-GaAs numune üzerinde aşındırma işlemi bilgileri*

Çizelge 5.2. n-GaAs aşınma oranı

Hacim oranı $C_6H_8O_7:H_2O_2$	Aşındırma oranı n-GaAs (Å/s)
1:1	2,14
1,3:1	-
1,5:1	-
1,7:1	-
2:1	2,81
2,3:1	2,98
2,5:1	56,91
2,7:1	71,95
3:1	110,84
4:1	72,77

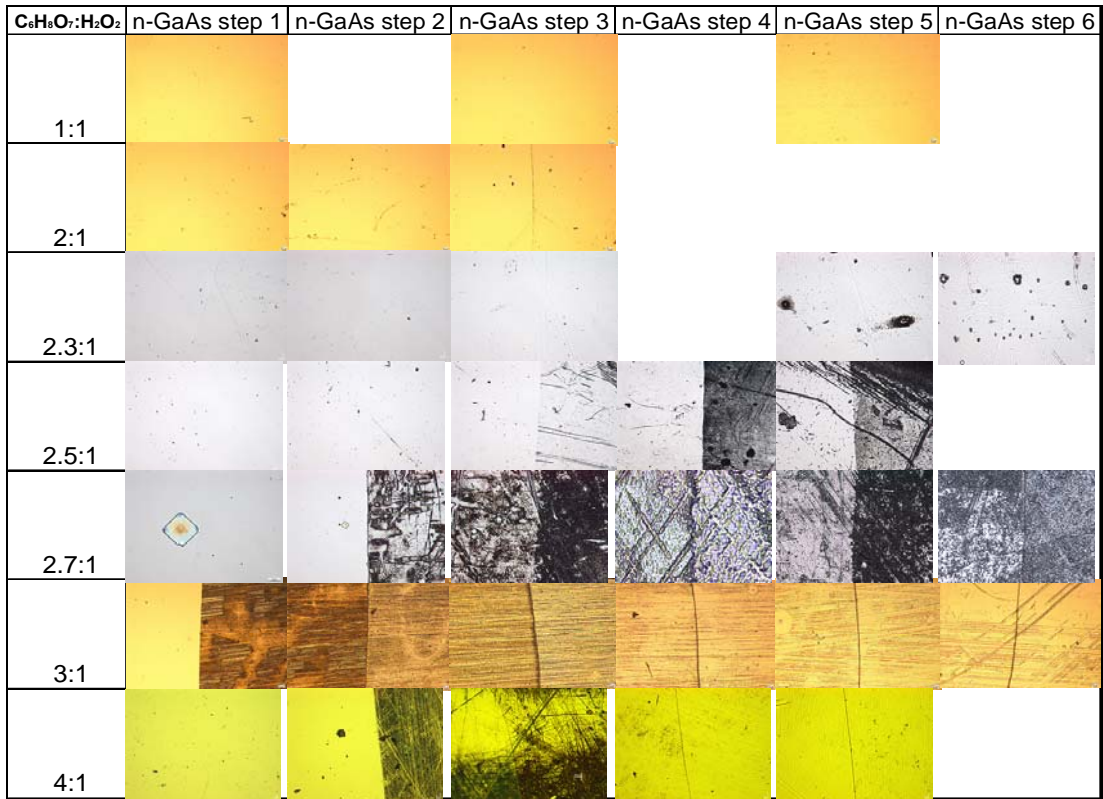
Burada n-GaAs numunesi  $C_6H_8O_7:H_2O_2$  farklı hacim oranlarında aşındırıldı. Profilometre ölçümlerinden alınan değerlerde 1:1, 2:1 ve 2,3:1 çözücü solüsyon hacim oranlarında aşınma hızları birkaç Å/s olarak bulunmuştur. Bu noktadan sonra aşınma hızında keskin bir artış gözlenmiştir. 2,5:1 hacim oranından sonra aşındırma hızındaki artış azalma eğilimi göstermiştir ve 3:1 hacim oranında aşınma hızı maksimum olmuştur (Bkz. Çizelge 5.2 ve Şekil 5.1).



Şekil 5.1. n-GaAs numunenin solüsyon hacim oranlarına göre aşınma oranları

Burada da görüldüğü gibi aşındırıcı solüsyon hacim oranı 2,3:1 ile 2,5:1 arasında aşınma hızında keskin bir artış olmuştur.

Aşındırılmış numunelerin yüzeyleri ve özellikle basamaklar çevresindeki geçiş bölgeleri optik mikroskop aracılığı ile incelenmiştir. Aşındırma işleminden sonra numune üzerinde oluşan basamakların (geçiş bölgelerinin) yüksek  $C_6H_8O_7:H_2O_2$  oranları için daha belirgindir. Mekanik parlatma işlemlerinin yüzey üzerindeki etkileri uzun çizikler şeklinde oldukça kolay fark edilmektedir (Şekil 5.2).



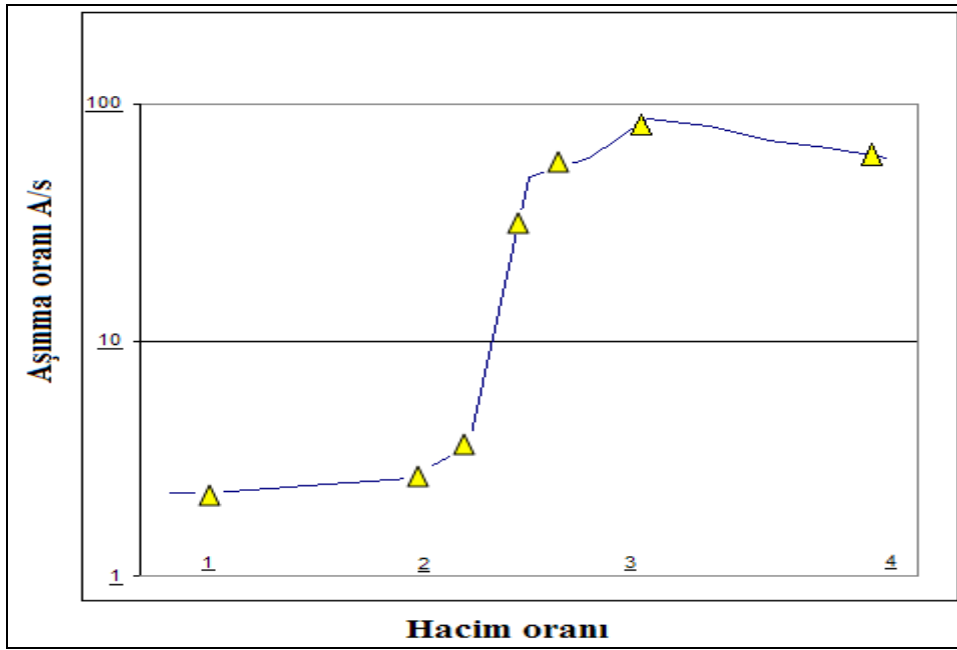
Şekil 5.2. n-GaAs numunenin aşınma sonrası yüzey görüntüsü

*p-GaAs numune üzerinde aşındırma işlemi bilgileri*

Çizelge 5.3. p-GaAs aşınma oranı

Hacim oranı $C_6H_8O_7:H_2O_2$	Aşındırma oranı p-GaAs ( $A^\circ/s$ )
1:1	2,24
1,3:1	-
1,5:1	-
1,7:1	-
2:1	2,59
2,3:1	3,58
2,5:1	49,30
2,7:1	58,89
3:1	86,87
4:1	59,00

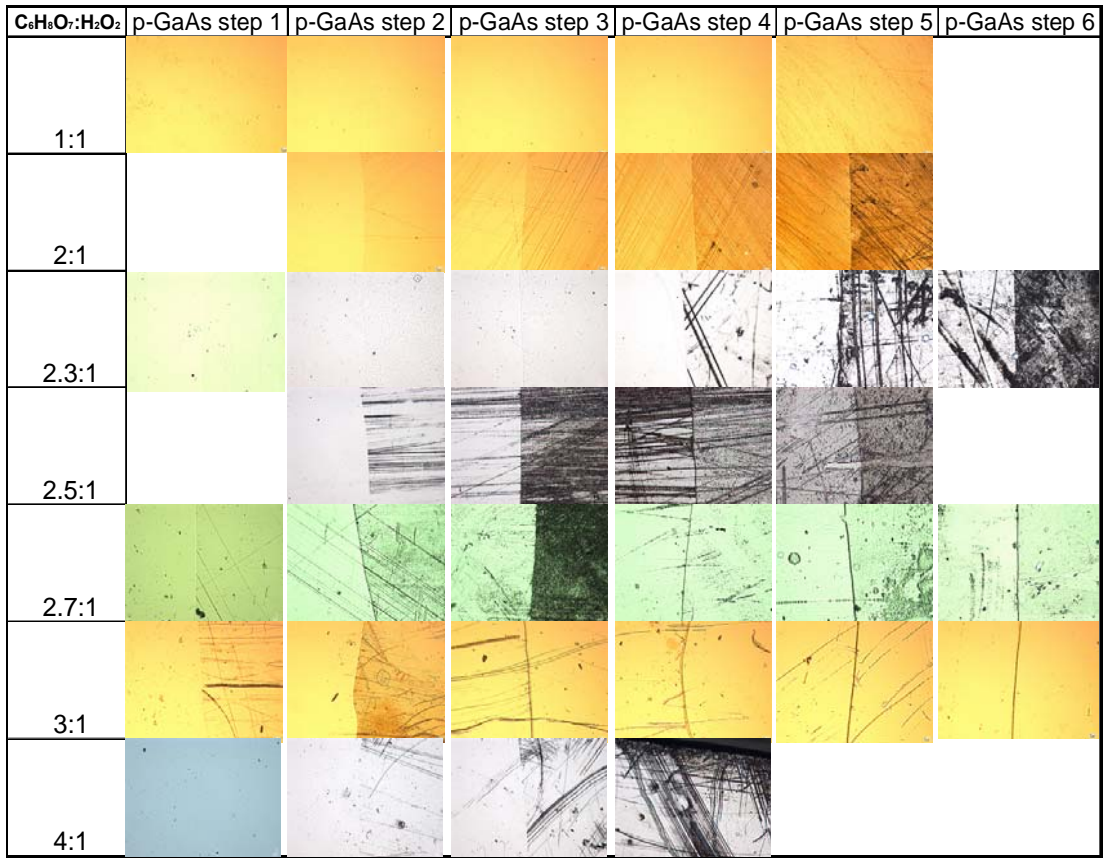
Burada ise p-GaAs numunesi  $C_6H_8O_7:H_2O_2$  farklı hacim oranlarında aşındırıldı. Profilometre ölçümlerinden alınan değerlerde 1:1, 2:1 ve 2,3:1 çözücü solüsyon hacim oranlarında aşınma hızları birkaç Å/s olarak bulunmuştur. Bu noktadan sonra aşınma hızında keskin bir artış gözlenmiştir. 2,5:1 hacim oranından sonra aşındırma hızındaki artış azalma eğilimi göstermiştir ve 3:1 hacim oranında aşınma hızı maksimum olmuştur (Bkz. Çizelge 5.3 ve Şekil 5.3).



Şekil 5.3. p-GaAs numunesinin solüsyon hacim oranlarına göre aşınma oranları

Burada da görüldüğü gibi aşındırıcı solüsyon hacim oranı 2,3:1 ile 2,5:1 arasında aşınma hızında keskin bir artış olmuştur.

Optik mikroskop ile bakılarak aşındırılmış numunelerin yüzeyleri ve özellikle basamaklar çevresindeki geçiş bölgeleri incelenmiştir. Aşındırma işleminden sonra numune üzerinde oluşan basamakların (geçiş bölgelerinin) yüksek  $C_6H_8O_7:H_2O_2$  oranları için yine n-GaAs numunesinde olduğu gibi p-GaAs numunesinde de daha belirgindir. Mekanik parlatma işlemlerinin yüzey üzerindeki etkileri uzun çizikler şeklinde oldukça kolay fark edilmektedir (Şekil 5.4).



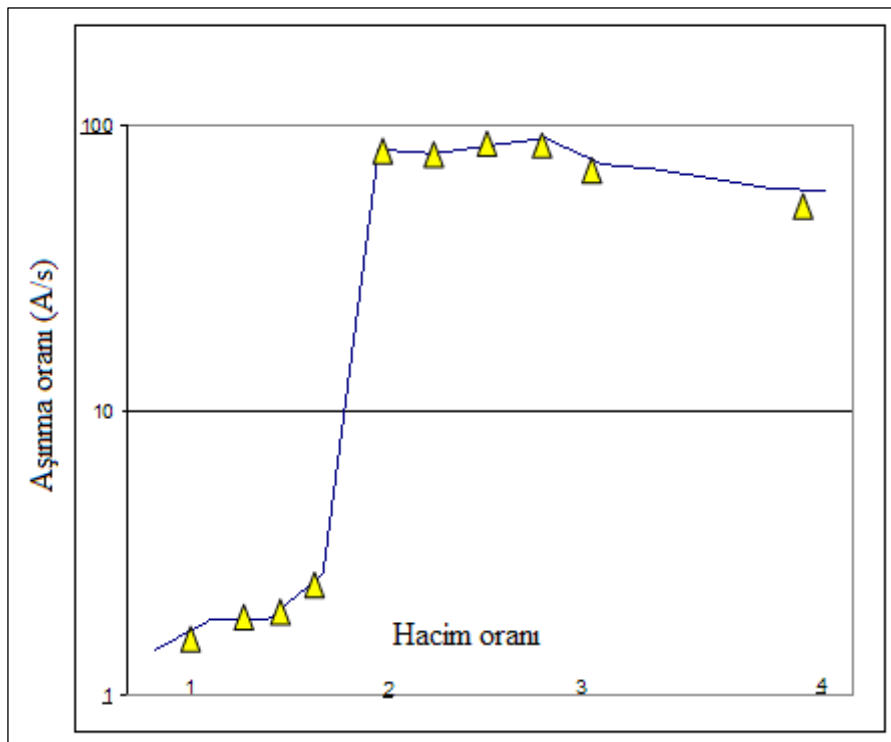
Şekil 5.4. p-GaAs numunenin aşınma sonrası yüzey görüntüsü

*Katkısız yarı yalıtkan GaAs numune üzerinde aşındırma işlemi bilgileri*

Çizelge 5.4. Katkısız yarı yalıtkan GaAs aşınma oranı

Hacim oranı $C_6H_8O_7:H_2O_2$	Aşındırma oranı SI-GaAs ( $A^\circ/s$ )
1:1	1,44
1,3:1	1,85
1,5:1	1,83
1,7:1	2,67
2:1	82,25
2,3:1	79,77
2,5:1	-
2,7:1	90,10
3:1	73,20
4:1	58,85

Burada katkısız yarı yalıtkan GaAs numunesi  $C_6H_8O_7:H_2O_2$  farklı hacim oranlarında aşındırıldı. Profilometre ölçümlerinden alınan değerlerde 1:1, 1,3:1, 1,5:1 ve 1,7:1 çözücü solüsyon hacim oranlarında aşınma hızları birkaç Å/s olarak bulunmuştur. Bu noktadan sonra aşınma hızında keskin bir artış gözlenmiştir. 2:1 hacim oranından sonra aşındırma hızındaki artış azalma eğilimi göstermiştir ve 2,7:1 hacim oranında aşınma hızı maksimum olmuştur (Bkz. Çizelge 5.4 ve Şekil 5.5).

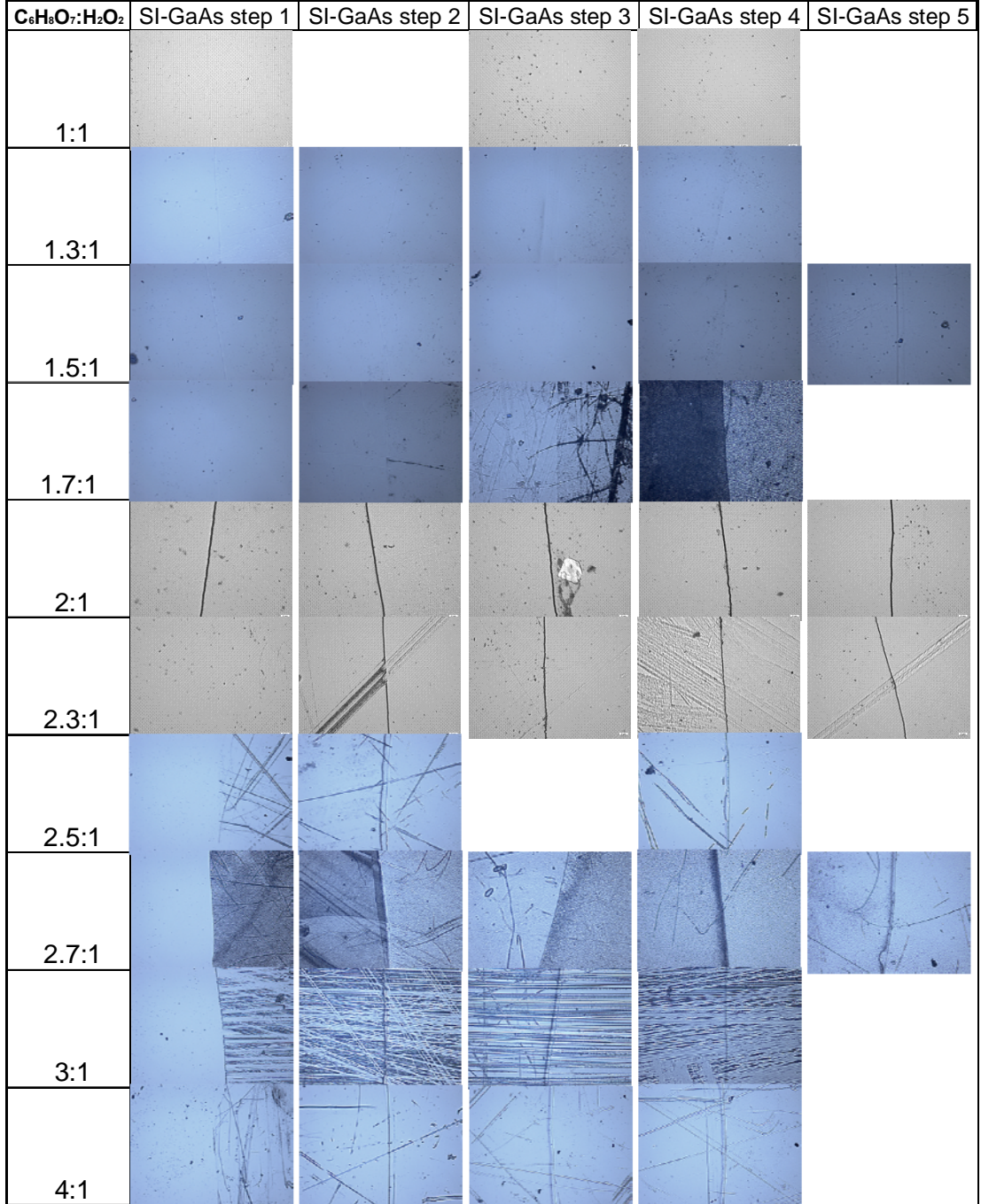


Şekil 5.5. SI- GaAs numunenin solüsyon hacim oranlarına göre aşınma oranları

Burada da görüldüğü gibi aşındırıcı solüsyon hacim oranı 1,7:1 ile 2:1 arasında aşınma hızında keskin bir artış olmuştur.

Optik mikroskop ile bakılarak aşındırılmış numunelerin yüzeyleri ve özellikle basamaklar çevresindeki geçiş bölgeleri incelenmiştir. Aşındırma işleminden sonra numune üzerinde oluşan basamakların (geçiş bölgelerinin) yüksek  $C_6H_8O_7:H_2O_2$  oranları için yine n-GaAs numunesi ile p-GaAs numunesinde olduğu gibi daha

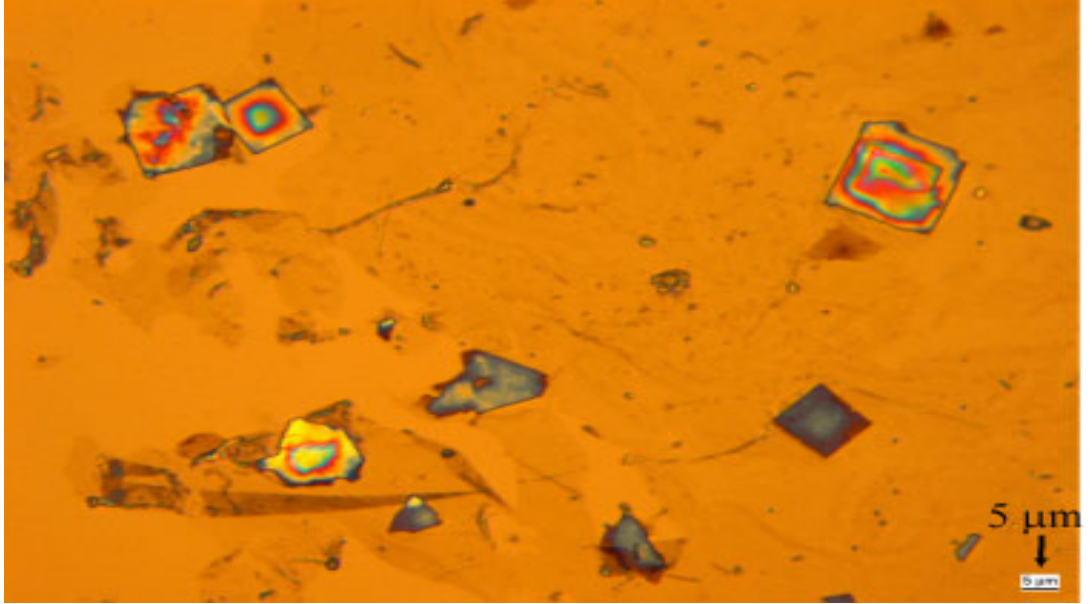
belirgindir. Mekanik parlatma işlemlerinin yüzey üzerindeki etkileri uzun çizikler şeklinde burada da kolay fark edilmektedir (Şekil 5.6).



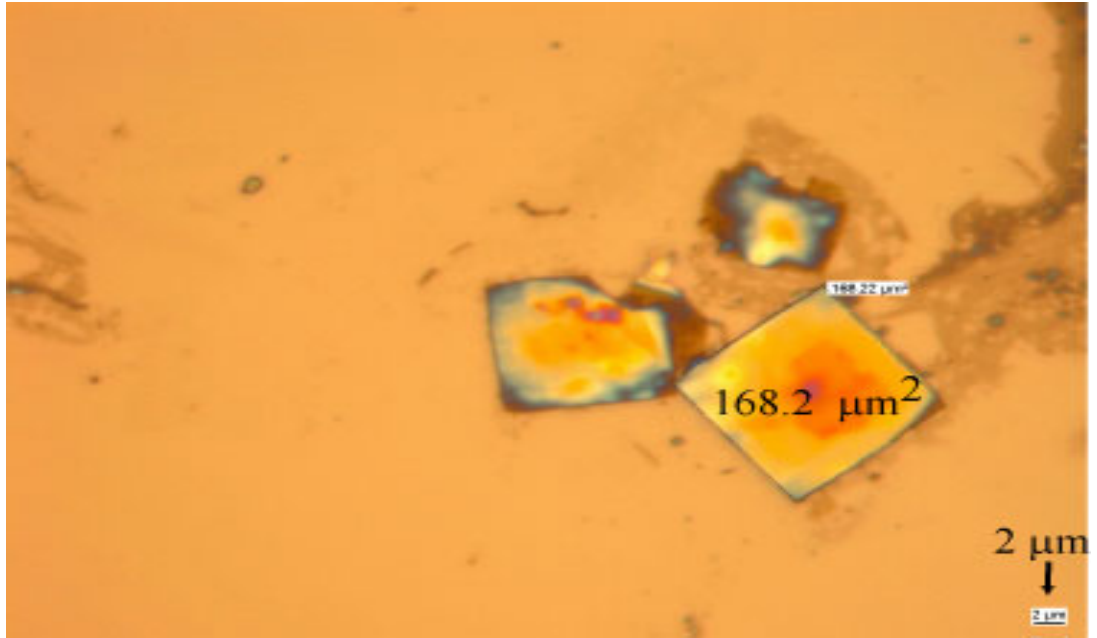
Şekil 5.6. SI-GaAs numunenin aşınma sonrası yüzey görüntüsü



Zn katkılı ve katkısız yarıyalıtkan GaAs numunelerine göre Si katkılı numunelerde kare şeklinde kusurların daha yoğun olduğu tespit edilmiştir (Resim 5.1).



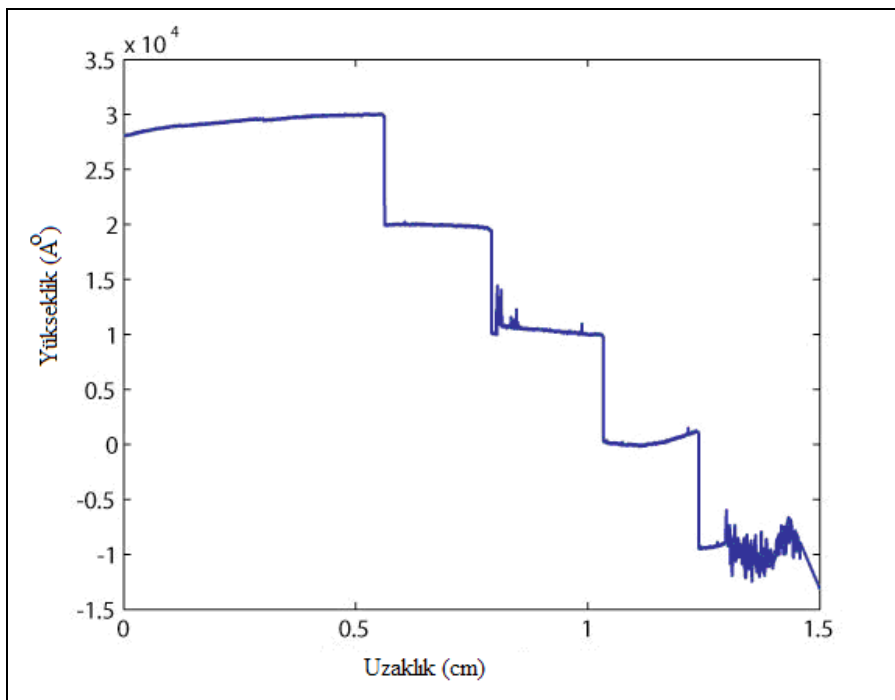
(a)



(b)

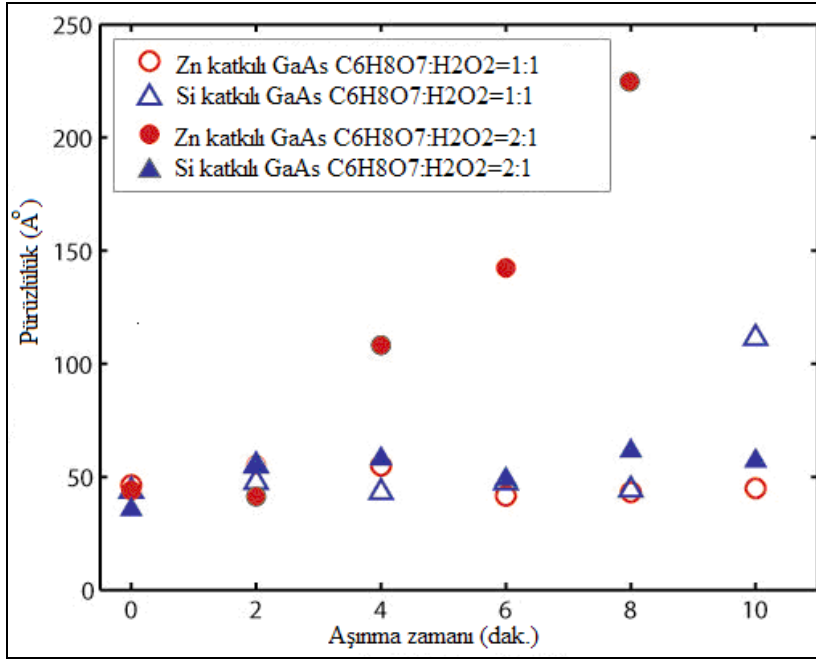
Resim 5.1.  $C_6H_8O_7/H_2O_2 = 2$  oranında 4 dakika aşındırılmış Si katkılı GaAs'in kare kusurları optik mikroskop ile inceleme (a ve b)

Profilometre ile aşındırdığımız numunenin kalınlığını ölçerek ne kadar aşındığını tayin ediyoruz. Şekil 5.7’de aşındırılacak numunenin ince bir kenarını aşındırmadan etkilenmemesi için resist bir maske ile kapatılmış ve aşındırma işlemi başlatılmıştır. Daha sonra numunenin aşındırılmış yüzeyinin bir kısmını yine aynı şekilde maske ile kaplatıp işlemi birkaç adım tekrarlayarak sonlandırıyoruz. Böylece profilometre ile ölçüm sonucu Şekil 5.7’deki gibi bulunuyor.



Şekil 5.7. Profilometre altında numunenin aşınma kalınlıklarının ölçümü

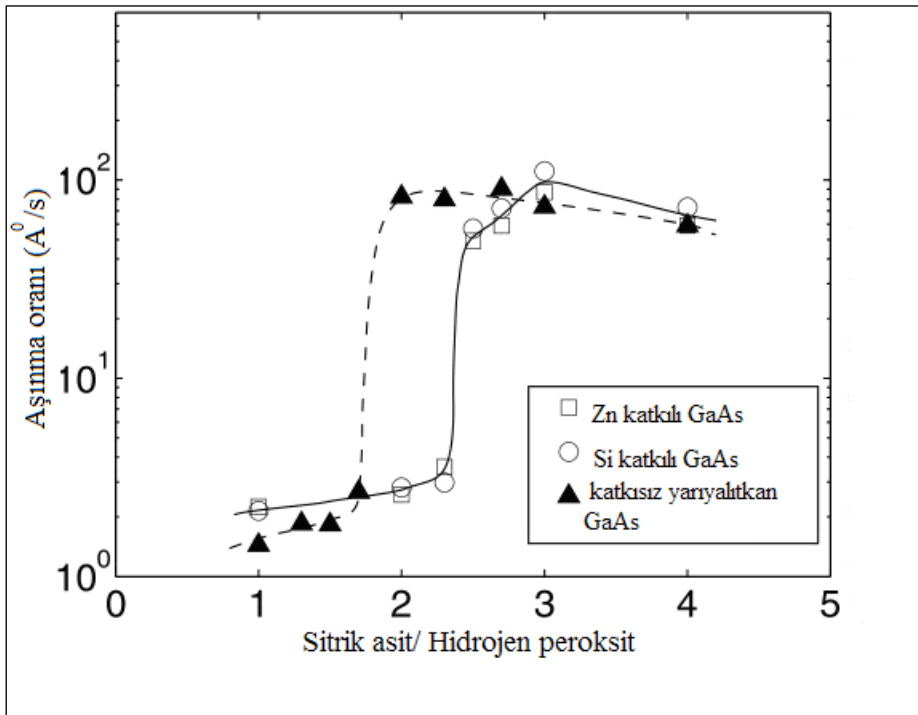
Numunelerin aşındırılmış yüzeylerinin yüzey pürüzlülüklerini spektroskopik elipsometre ölçümleri göstermiştir ki;  $C_6H_8O_7/H_2O_2=2$  oranı için, Zn katkılı GaAs numunelerinin yüzey pürüzlülük kalınlığının Si katkılı numunelerinkinden genellikle yüksek bulunmuştur ve aşınma zamanı arttırıldıkça yüzey pürüzlüğündeki artış şiddetlenmiştir (Şekil 5.8). Aşınmanın başlangıç aşamalarında yüzey pürüzlülüğünün aşınma zamanı arttıkça hafifçe arttığı ve daha sonra yüzey pürüzlülük kalınlığının düşme eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir.



Şekil 5.8. Elipsometre ile yüzey pürüzlülüğünün ölçümü

$C_6H_8O_7/H_2O_2$  oranının 2,5'den az olduğu oranlar için Zn ve Si katkılı GaAs numunelerin aşınma hızları birkaç  $\text{\AA}/s$  olarak bulunmuştur (Şekil 5.9). Bu kritik oranda ( $C_6H_8O_7/H_2O_2 = 2,5$ ) aşınma hızları çok keskin bir şekilde artmakta olduğu görülmüş fakat bu kritik orandan itibaren bu keskin artış kendini daha zayıf bir artışa bıraktığı tespit edilmiştir. Ayrıca, aşınma hızının  $C_6H_8O_7/H_2O_2 \geq 3$  değerleri için düşme eğilimi gösterdiği bulunmuştur. Bir başka deyişle, Zn ve Si katkılı GaAs numunelerinin aşınma hızı  $C_6H_8O_7/H_2O_2 = 3$  için maksimum olmaktadır. Bu davranış biçimi oksitlenme ve çözünme reaksiyonlarının bu hacim oranında dengelendiğini işaret etmektedir. Si katkılı numunelerin aşınma hızları,  $C_6H_8O_7/H_2O_2 \geq 2,3$  değerleri için, Zn katkılı numunelerden her zaman bir parça yüksek olduğu belirlenmiştir. Fakat bu hacim oranına kadar, Zn ve Si katkılı numunelerin aşınma oranlarında belirgin bir fark gözlenmemiştir. Öte yandan, katkılanmamış yarıyalıtkan GaAs numunelerinin aşınma dinamiği farklı bir davranış sergilemektedir. Aşınma hızındaki keskin artış benzer bir şekilde bu tür numuneler için de gözlenmiştir fakat bu geçiş daha düşük bir  $C_6H_8O_7/H_2O_2$  oranında,  $1,7 < C_6H_8O_7/H_2O_2 < 2$  aralığında, kendini göstermiştir.  $2 < C_6H_8O_7/H_2O_2 < 2,7$  aralığında bu keskin artış kendini daha zayıf bir artışa bırakmıştır. Aşınma hızının

$C_6H_8O_7/H_2O_2 \geq 2,7$  değerleri için düşme eğilimi olduğunu buluyoruz. Yine bir başka deyişle katkılanmamış yarı-yalıtkan GaAs numunelerinin aşınma hızı  $C_6H_8O_7/H_2O_2 = 2,7$  oranı için maksimum olmaktadır. Katkılanmamış yarı-yalıtkan GaAs numunesinin Zn ve Si katkılı GaAs numuneleri üzerinden seçici bir şekilde aşındırılabilceği bir bölge (Hacim oranının  $2 < C_6H_8O_7/H_2O_2 < 2,3$  olduğu aralık) tespit edilmiştir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9. Aşınma oranlarının grafiği

## 6. TARTIŞMA VE SONUÇ

### *Optik mikroskop ölçümlerinden çıkarılan sonuçlar*

- Aşındırılmış numunelerin yüzeyleri ve özellikle basamaklar çevresindeki geçiş bölgeleri optik mikroskop aracılığı ile incelenmiştir (Bkz. Şekil 5.2 ve 5.4 ve 5.6).
- Numuneyi aşındırdıkça yüzeyin altına indiğimizde, numunenin büyütülmesi sırasında meydana gelen kristal kusurlar açığa çıkıyor.
- Gözlediğimiz kusurlar genelde kare kusurlar şeklinde göze çarpıyor.
- Bu kusurlar numunenin büyütülmesi sırasında altta sıcaklığının homojen olarak her yerde aynı olmayışından, altta yüzey bozukluklarından ve büyütme şartlarından olabileceği düşünüldü.
- Aşındırma işleminden sonra numune üzerinde oluşan basamakların (geçiş bölgelerinin) yüksek  $C_6H_8O_7:H_2O_2$  oranları için daha belirgindir. Ayrıca Zn katkılı ve katkısız yarıyalıtkan GaAs numunelerine göre Si katkılı numunelerde kare şeklinde kusurların daha yoğun olduğu tespit edilmiştir (Bkz. Resim 5.1).
- Mekanik parlatma işlemlerinin yüzey üzerindeki etkileri uzun çizikler şeklinde oldukça kolay fark edilmektedir (Bkz. Şekil 5.6).

### *Spektroskopik elipsometre ölçümlerinden çıkarılan sonuçlar*

- Aşınmanın başlangıç aşamalarında yüzey pürüzlülüğünün aşınma zamanı arttıkça hafifçe arttığı ve daha sonra yüzey pürüzlülük kalınlığının düşme eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir.

- Bu davranış, eğer mekanik parlatma işleminin yüzey üzerindeki zararlı etkileri düşünülecek olursa çok şaşırtıcı görülmemektedir.
- Numunelerin aşındırılmış yüzeylerinin yüzey pürüzlülüklerini spektroskopik elipsometre ölçümleri göstermiştir ki;  $C_6H_8O_7:H_2O_2=2:1$  oranı için, Zn katkılı GaAs numunelerinin yüzey pürüzlülük kalınlığının Si katkılı numunelerinkinden genellikle yüksek bulunmuştur ve aşınma zamanı arttırıldıkça yüzey pürüzlülüğündeki artış şiddetlenmiştir (Bkz. Şekil 5.8).

#### *Profilometre ölçümlerinden çıkan sonuçlar*

- $C_6H_8O_7/H_2O_2$  oranının 2,5'den az olduğu oranlar için Zn ve Si katkılı GaAs numunelerin aşınma hızları birkaç Å/s olarak bulunmuştur. Literatüre baktığımızda Zn ve Si katkılı GaAs numuneleri için bu yapılmamıştır.
- Bu kritik oranda ( $C_6H_8O_7:H_2O_2 = 2,5:1$ ) aşınma hızları çok keskin bir şekilde artmakta olduğu görülmüş fakat bu kritik orandan itibaren bu keskin artış kendini daha zayıf bir artışa bıraktığı tespit edilmiştir.
- Ayrıca, aşınma hızının  $C_6H_8O_7:H_2O_2 \geq 3:1$  değerleri için düşme eğilimi gösterdiği bulunmuştur.
- Bir başka deyişle, Zn ve Si katkılı GaAs numunelerinin aşınma hızı  $C_6H_8O_7:H_2O_2 = 3:1$  için maksimum olmaktadır. Bu davranış biçimi oksitlenme ve çözünme reaksiyonlarının bu hacim oranında dengelendiğini işaret etmektedir.
- Si katkılı numunelerin aşınma hızları,  $C_6H_8O_7:H_2O_2 \geq 2,3:1$  değerleri için, Zn katkılı numunelerden her zaman bir parça yüksek olduğu belirlenmiştir. Fakat bu hacim oranına kadar, Zn ve Si katkılı numunelerin aşınma oranlarında belirgin bir fark gözlenmemiştir.

- Öte yandan, katkılanmamış yarı-yalıtkan GaAs numunelerinin aşınma dinamiği farklı bir davranış sergilemektedir. Aşınma hızındaki keskin artış benzer bir şekilde bu tür numuneler için de gözlenmiştir fakat bu geçiş daha düşük bir  $C_6H_8O_7:H_2O_2$  oranında,  $1,7:1 < C_6H_8O_7:H_2O_2 < 2:1$  aralığında, kendini göstermiştir.  $2:1 < C_6H_8O_7:H_2O_2 < 2,7:1$  aralığında bu keskin artış kendini daha zayıf bir artışa bırakmıştır. Aşınma hızının  $C_6H_8O_7:H_2O_2 \geq 2,7:1$  değerleri için düşme eğilimi olduğunu buluyoruz.
- Yine bir başka deyişle katkılanmamış yarı-yalıtkan GaAs numunelerinin aşınma hızı  $C_6H_8O_7:H_2O_2 = 2,7:1$  oranı için maksimum olmaktadır.
- Literatürde ise katkılanmamış yarı-yalıtkan GaAs numunelerinin aşınma hızı  $C_6H_8O_7:H_2O_2 = 1:1$  oranı için  $1,15 \text{ \AA/s}$  olarak bulunmuşken bizde ise  $1,44 \text{ \AA/s}$ ,  $C_6H_8O_7:H_2O_2 = 2:1$  oranı için  $1,42 \text{ \AA/s}$  olarak bulunmuşken bizde ise  $1,85 \text{ \AA/s}$ ,  $C_6H_8O_7:H_2O_2 = 3:1$  oranı için  $36,15 \text{ \AA/s}$  olarak bulunmuşken bizde ise  $73,20 \text{ \AA/s}$ ,  $C_6H_8O_7:H_2O_2 = 4:1$  oranı için  $37,25 \text{ \AA/s}$  olarak bulunmuşken bizde ise  $58,85 \text{ \AA/s}$  olarak bulunmuştur.
- Yine literatürde ise katkılanmamış yarı-yalıtkan GaAs numunesinin keskin artış gösterdiği aralık  $2:1 < C_6H_8O_7:H_2O_2 < 3:1$  oranında, bizim çalışmamızda ise bu aralık  $1,7:1 < C_6H_8O_7:H_2O_2 < 2:1$  oranlarında tespit edilmiştir.
- $C_6H_8O_7:H_2O_2$  oranının  $1,7:1$ 'den küçük olduğu oranlar ile  $C_6H_8O_7:H_2O_2$   $3:1$ 'den büyük olduğu oranlar için katkısız yarı yalıtkan GaAs numunelerinin, Zn ve Si katkılı GaAs numunelerinden daha düşük aşınma hızlarına sahip olduğu bulundu.
- Katkılanmamış yarı-yalıtkan GaAs numunesinin Zn ve Si katkılı GaAs numuneleri üzerinden seçici bir şekilde aşındırılabilceği bir bölge (Hacim oranının  $2:1 < C_6H_8O_7:H_2O_2 < 2,3:1$  olduğu aralık) tespit edilmiştir.

- Bizim MBE' de yapmış olduğumuz büyütme işleminde Si katkılı, Be katkılı ve katkısız yarıyalıtkan GaAs ve Si katkılı AlGaAs numunelerini  $C_6H_8O_7:H_2O_2 = 1:1$  için aşındırma sonuçlarında, n-AlGaAs' in aşınma hızı  $1,19 \text{ \AA/s}$  olarak bulunmuştur. Si ve Be katkılı GaAs yapılarının aşındırma hızları önceki numunelerde bulduğumuz aşınma hızlarından bir parça düşük olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan katkısız GaAs numunesinin önceki numunelerde bulduğumuz aşınma hızıyla önemli bir fark bulunmamıştır.
- Bu durum yarı yalıtkan malzemelerdeki kusurun fazla olduğu durumlarda hızlı aşınma, az olduğu durumlarda ise yavaş aşınma olduğunu düşündürmektedir.



## KAYNAKLAR

1. Panish M. B., Hayashi I. ve Sumski S., 'A technique for the preparation of low-threshold room-temperature GaAs laser diyote structures', *IEEE J. QE*, 5: 210 (1969).
2. Hayashi I., Panish M. B. ve Foy P.W., 'A low-threshold room-temperature injection laser', *IEEE J. QE*, 5: 211 (1969).
3. Wu J. L., Pan S. Y., ve Lin D. S., 'Stability and mechanism of selective etching of ultrathin Ge films on the Si(100) surface up on chlorine adsorption', *Phys. Rev.*, B 69, 045308 (2004).
4. Aldao C.M. ve Weaver J.H., 'Halogen Etching of Si via atomic-scale processes' *Prog. Surf. Sci.* 68 (4-6): 189 (2001).
5. Boland J.J. ve Weaver J.H., 'A surface view of etching', *Phys. Today*, 51 (8): 34 (1998).
6. Look, D. C., "Electrical Characterization of GaAs Materials and Devices", *John Wiley&Sons*, Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore, 1-57 (1989).
7. Juang J., Kuhn K. J. ve Darling R. B., 'Selective Etching of GaAs and AlGaAs with citric acid/hydrogen peroxide solutions', *Vac. J. Sci. Technol.*, B 8 (5):1122-1124 (1990).
8. Kim J., Lim D. H., ve Yang G. M., 'Selective Etching of AlGaAs/GaAs structures using the solutions of citric acid /H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and de-ionized H<sub>2</sub>O /buffered oxide etch', *Vac. J. Sci. Technol.*, B 16:558-560 (1998).
9. Moon E., Lee J. ve Yoo H. M., 'Selective Wet Etching of GaAs on AlGaAs for AlGaAs/InGaAs/AlGaAs Pseudomorphic high electron mobility transistor', *Appl J. Phys.*, 84: 3933-3938 (1998).
10. Zhuang D., Edgar J. H., 'Wet etching of GaN, AlN and SiC: a review', *Mater. Sci. and Eng.*, R 48: 1-46, (2005).
11. Sze S.M., 'Semiconductor Devices Physics and Technology', *John Wiley&Sons*, New York, 85-127 (2002).
12. Beiser A., 'Concepts Of Modern Physics', *McGraw-Hill*, New York, 5 (1995).
13. Kittel C., 'Katıhal Fiziğine Giriş', Bekir Karaoğlu, *Güven Kitap Yayın Dağıtım LTD. ŞTİ*, İstanbul, 6 (1996).
14. Seeger K., 'Semiconductor Physics: An Introduction 8<sup>th</sup> edition', *Springer*, Berlin, 10-32 (2002).

**EKLER**

## EK-1. Deneyin Yapılışı

### Deneyde kullanılan malzemeler

Beher

Erlen

Mezür

Cam petri

Kronometre

Elektronik hassas ( $10^{-4}$ ) tartı

Teflon tutaç

Teflon süzgeç

Kaşık

DI H<sub>2</sub>O (deiyonize su)

C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub> (sitrik asit)

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (hidrojen peroksit)

### Sitrik asit solüsyonunun hazırlanması

Hazırlayacağımız sitrikasit monohidratı, darasını aldığımız cam petri kabına koyuyoruz ve elektronik hassas ( $10^{-4}$ ) tartı da ölçüyoruz (Resim 5.1).

### EK-1. (Devam) Deneyin Yapılışı



Resim 1.1. Hazırlanacak solüsyonunun miktarına göre sitrik asit (monohidrat)

Daha sonra ölçtüğümüz sitrik asiti (monohidrat) erlen şişesine koyuyoruz (Resim 1.2).



Resim 1.2. Erlen şişesine konmuş sitrik asiti (monohidrat)

### EK-1. (Devam) Deneyin Yapılışı

Daha sonra sitrik asitle eşit miktarda deionize suyu karışım kabına ilave ediyoruz (Resim 1.3).



Resim 1.3. Kaba sitrik asitle eşit miktarda deionize su ilavesi

Çözünme tam olana kadar karıştır (Resim 1.4).



Resim 1.4. Çözünme tam olana kadar karıştırma görüntüsü

### EK-1. (Devam) Deneyin Yapılışı

Karışımı bir gün bekletiyoruz (Resim 1.5).



Resim 1.5. Bir gün bekletilen sitrik asit solüsyonu

### Sitrik asit:Hidrojen peroksit solüsyonunun hazırlanması

Kullanılacak aşınma oranına göre sitrik asit solüsyonunu kaba koyuyoruz (Resim 1.6).



Resim 1.6. İstenilen oranda sitrik asidin kaba konuluşu

### EK-1. (Devam) Deneyin Yapılışı

Yine bu orana uygun hidrojen peroksiti kaba ilave ediyoruz (Resim 1.7).



Resim 1.7. İstenilen oranda hidrojen peroksitin kaba konuluşu

Tekrar bir süre çözeltilimizi karıştırıyoruz (Resim 1.8).



Resim 1.8. sitrik asit:hidrojen peroksit çözeltilisi

## EK-1. (Devam) Deneyin Yapılışı

### Aşındırılacak numunenin hazırlanması

Aşındırılacak numunenin arka yüzünü maskeliyoruz (Resim 1.9).



Resim 1.9. İstenilen oranda sitrik asidin kaba konuluşu

Ön yüzde aşındırılmayacak kısmı maskeleyerek oluşacak değişimi gösterebiliriz (Resim 1.10).

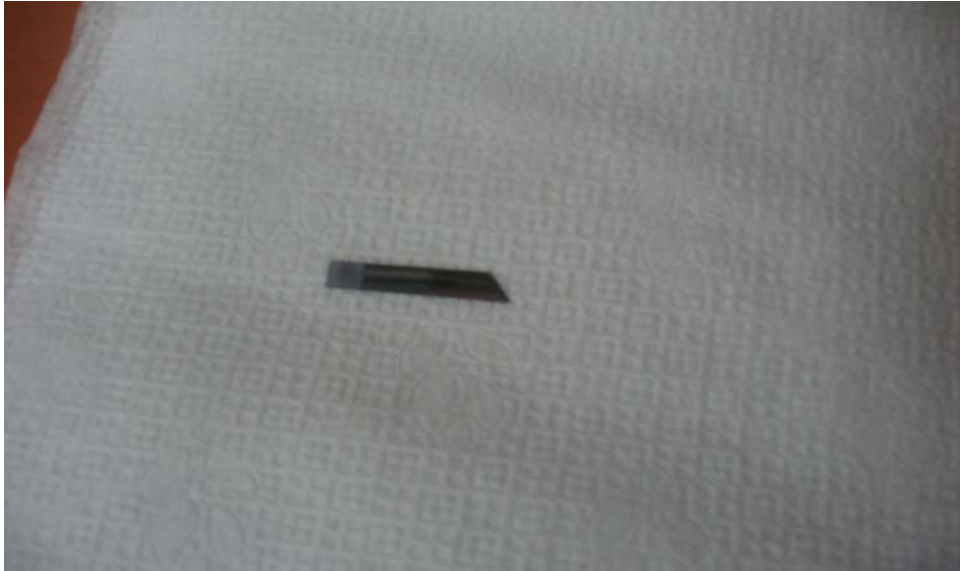


Resim 1.10. Ön yüzde aşındırılmayacak kısmın maskelenişi



#### EK-1. (Devam) Deneyin Yapılışı

Numuneyi kurutarak aşındırma işlemine hazır hale getiririz (Resim 1.11).



Resim 1.11. Numunenin kurutulması

Numuneyi teflon süzgece yerleştiririz (Resim 1.12).



Resim 1.12. Numunenin teflon süzgece yerleştirilmesi

### EK-1. (Devam) Deneyin Yapılışı

Numuneyi aşındırma solüsyonuna daldırarak aşındırma işlemini başlatırız (Resim 1.13).



Resim 1.13. Numunenin aşındırma solüsyonuna daldırılışı

Belirlenen zaman uyarınca numuneyi solüsyonda çalkalarız (Resim 1.14).



Resim 1.14. Numunenin aşındırma solüsyonunda aşındırılması

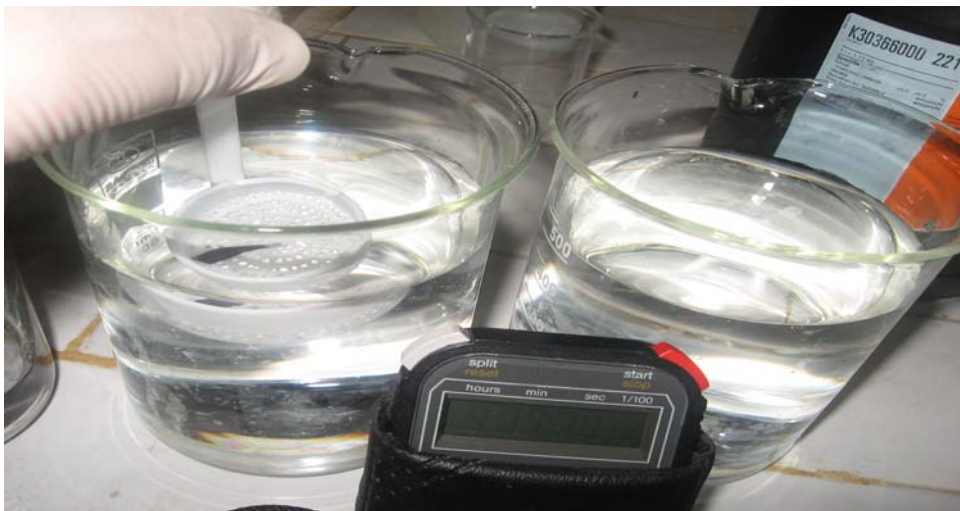
### EK-1. (Devam) Deneyin Yapılışı

Aşındırma süreci sonrası numuneyi aşındırıcı solüsyondan arındırmak için iki ayrı behere deionize su koyuyoruz (Resim 1.15).



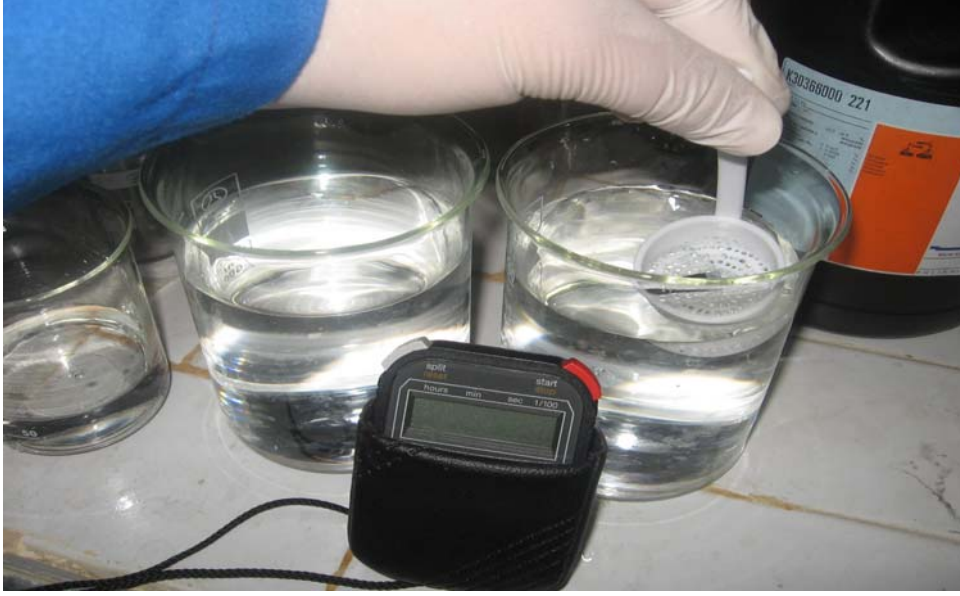
Resim 1.15. Hazırlanan deiyonize su kabları

Numuneyi solüsyondan çıkartıp sırayla deionize su kaplarında temizleriz (Resim 1.16,1.17).



Resim 1.16. İlk beherde temizleme işlemi

### EK-1. (Devam) Deneyin Yapılışı



Resim 1.17. İkinci beherde temizleme işlemi

Daha sonra numuneyi kuruturuz (Resim 1.18).



Resim 1.18. Numunenin kurutulması



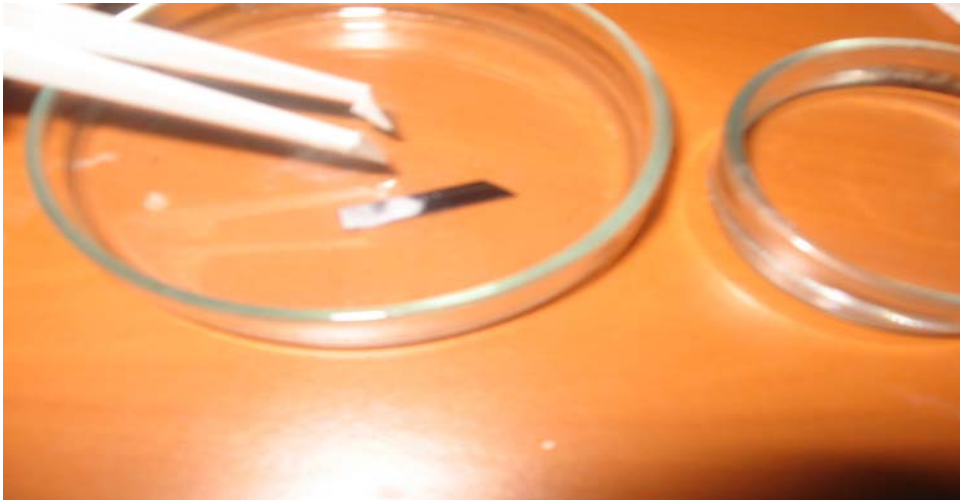
### EK-1. (Devam) Deneyin Yapılışı

Numunenin aşındırılan ön yüzünü, istenilen forma uygun olarak tekrar maskeleriz (Resim 1.19).



Resim 1.19. Aşındırılan kısmın bir bölümünün tekrar maskelenişi

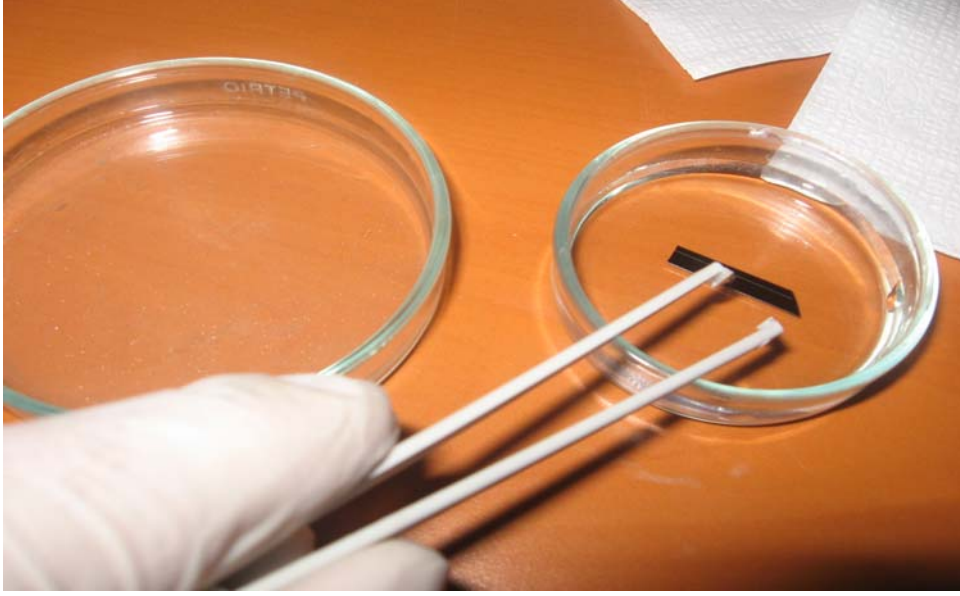
Aşındırma işlemini uygun sayıda tekrarlayarak istenilen yüzey yapısını elde ederiz. Tüm aşındırma adımları tamamlandığında numune üzerindeki maske malzemesini kaldırırız (örnekte aseton ile temizleme) (Resim 1.20).



Resim 1.20. Aseton ile maskenin temizlenmesi

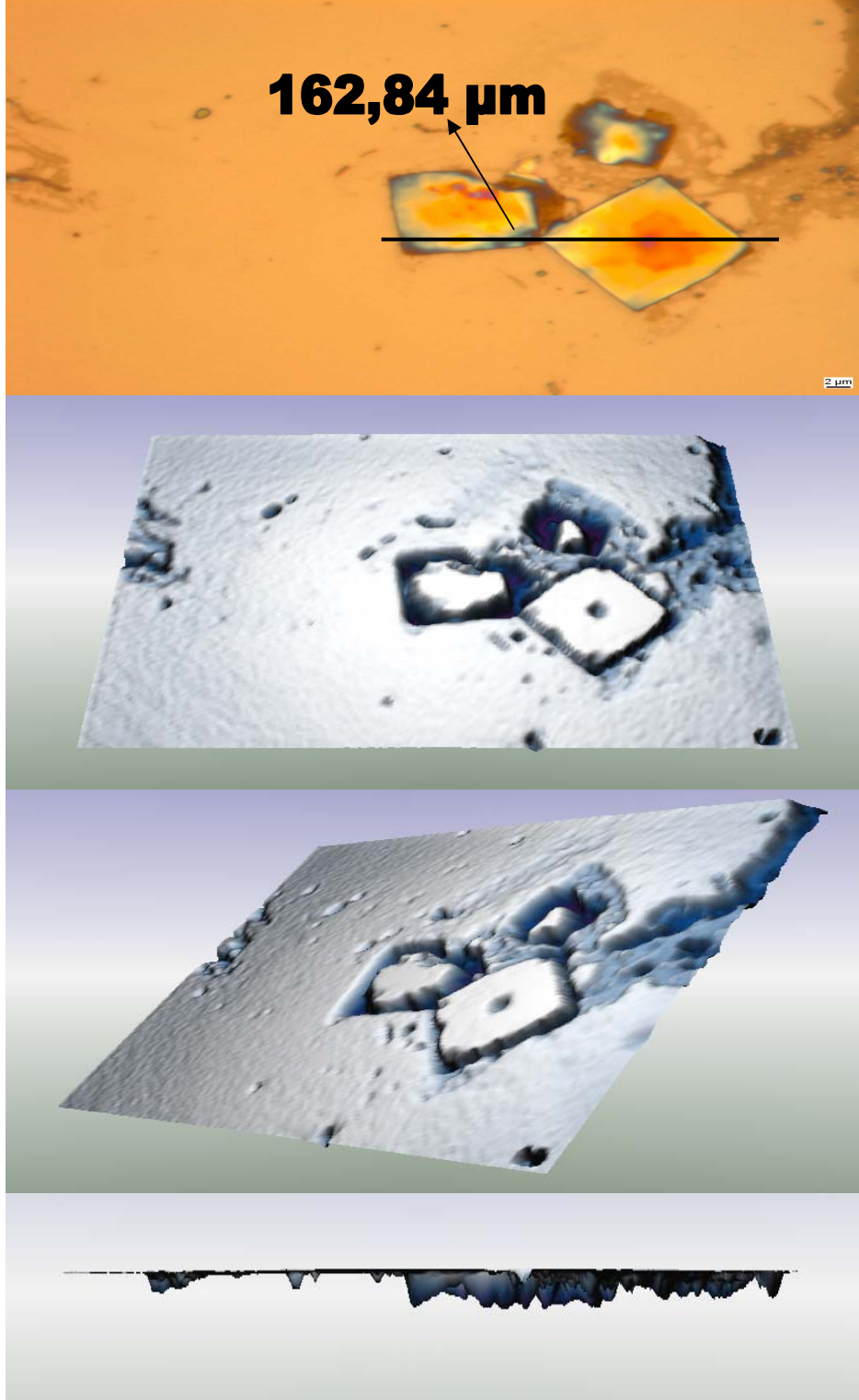
### EK-1. (Devam) Deneyin Yapılışı

Ardından numuneyi deionize suyla yıkar ve kuruturuz (Resim 1.21).



Resim 1.21. Numunenin deiyonize su ile durulanması

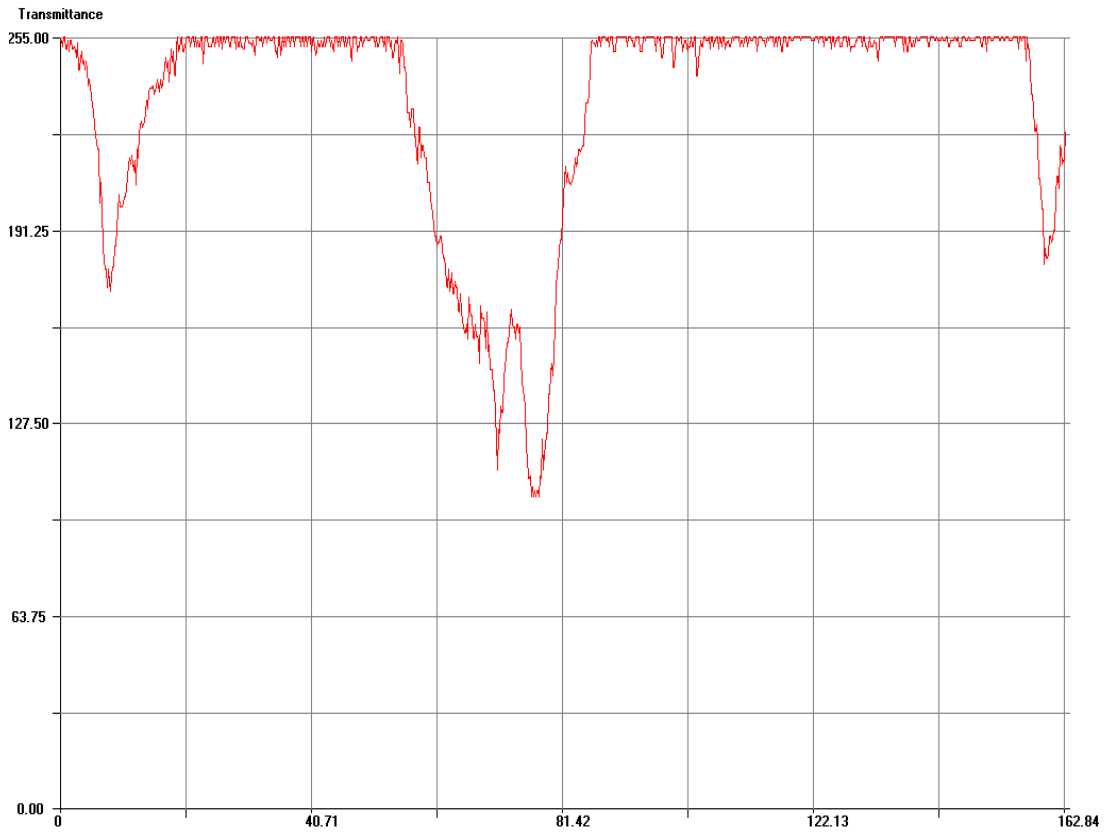
EK-2. Zn katkılı GaAs  $C_6H_8O_7:H_2O_2 = 2:1$



Resim 2.1. Zn katkılı GaAs kusuru

## EK-2. (Devam) Zn katkılı GaAs $C_6H_8O_7:H_2O_2 = 2:1$

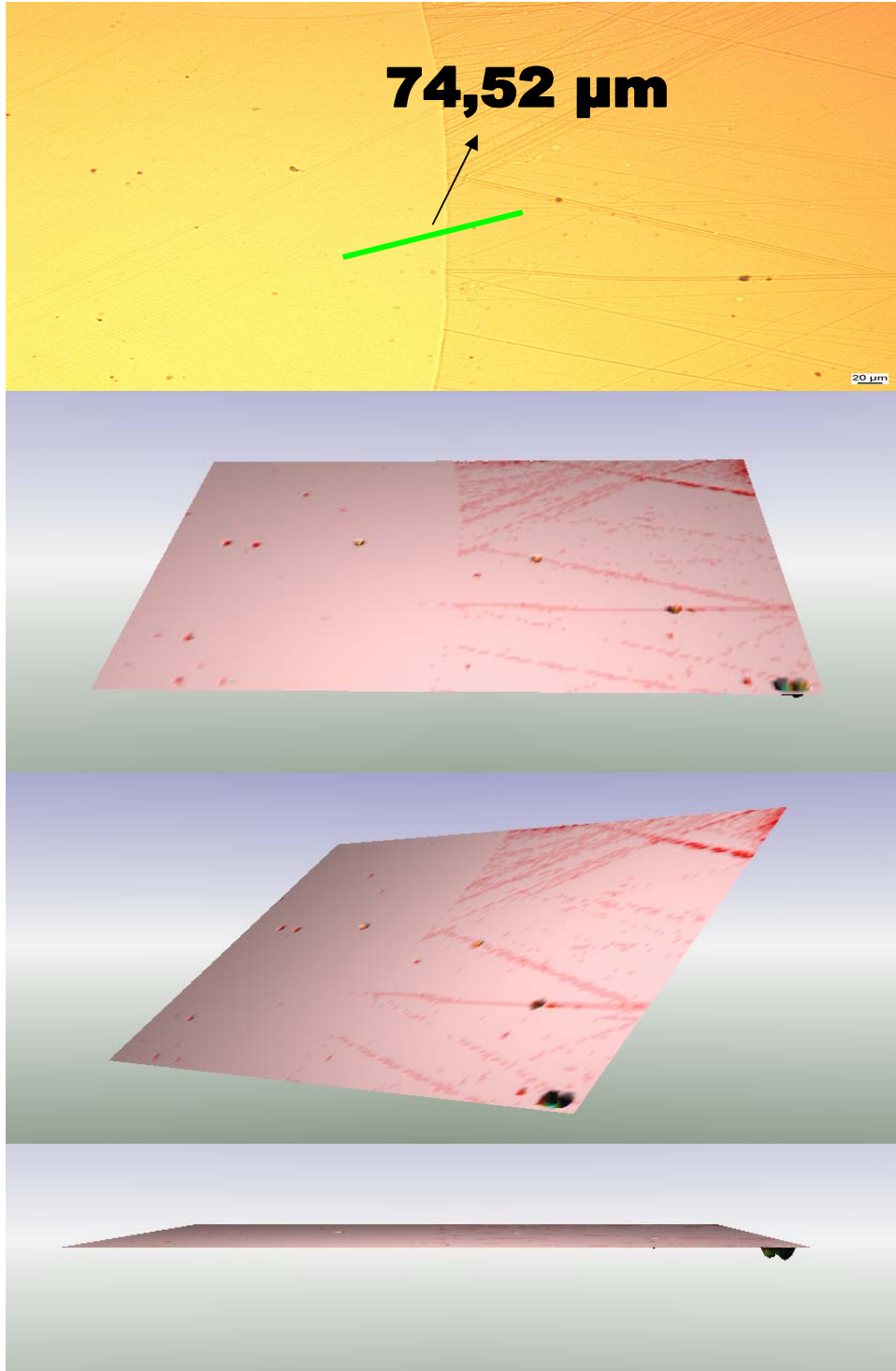
Zn katkılı GaAs  $C_6H_8O_7:H_2O_2 = 2:1$  oranı ile aşındırılmıştır. Optik mikroskop ile yüzey incelemesi yapıldığında yüzeyde numunenin büyütülmesi esnasındaki büyütme şartlarından kaynaklanan kare şeklinde yapı kusurları oluşumunu gözledik. Resim 2.1'in üzerinde işaretli olan 162,84  $\mu m$  uzunluğundaki şeridin yüzey profili (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Zn katkılı GaAs yüzey pürüzlüğü



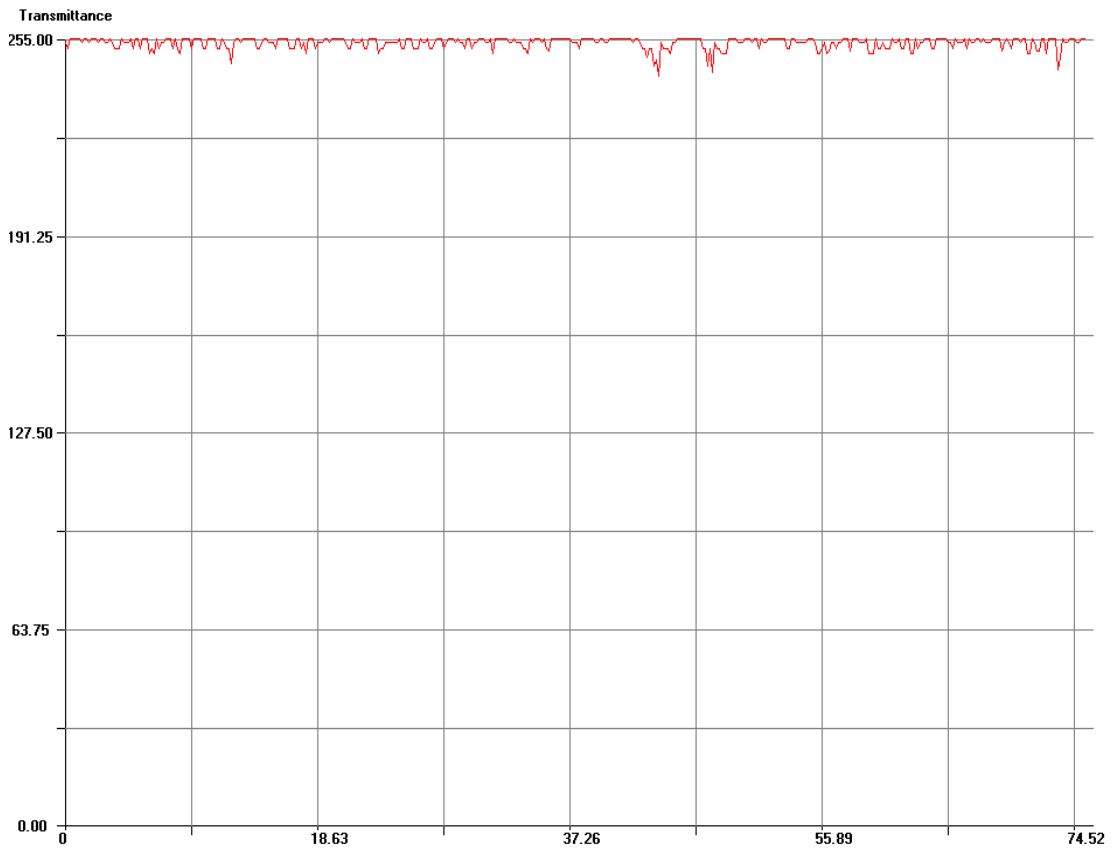
EK-3. Zn katkılı GaAs sitrik asit: hidrojen peroksit =2:1 step2



Resim 3.1. Zn katkılı GaAs sitrik asit: hidrojen peroksit =2:1 step2

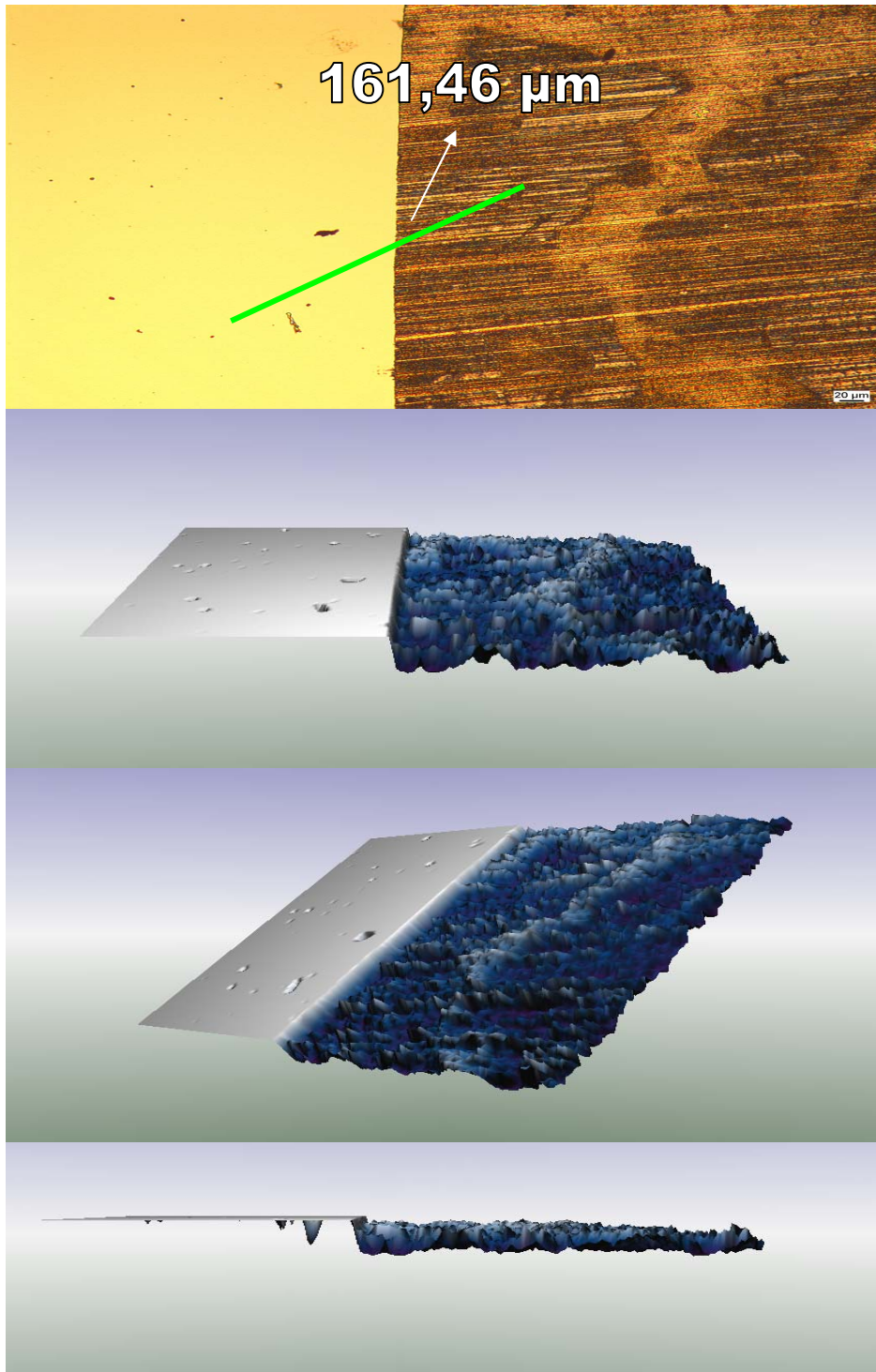
### EK-3. (Devam) Zn katkılı GaAs sitrik asit: hidrojen peroksit =2:1 step2

Zn katkılı GaAs  $C_6H_8O_7:H_2O_2 =2:1$  oranıyla ikinci aşındırılışı ile bir kez aşındırılmış bölgelerin kesişim yeri. Optik mikroskop ile yüzey incelemesi yapıldığında yüzeyde numunenin büyütüldükten sonra mekanik cilalama esnasında oluşan uzun çizgileri görebiliyoruz. Resim 3.1'in üzerinde işaretli olan 74,52  $\mu m$  uzunluğundaki şeridin yüzey profili (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Zn katkılı GaAs sitrik asit: hidrojen peroksit =2:1 step2

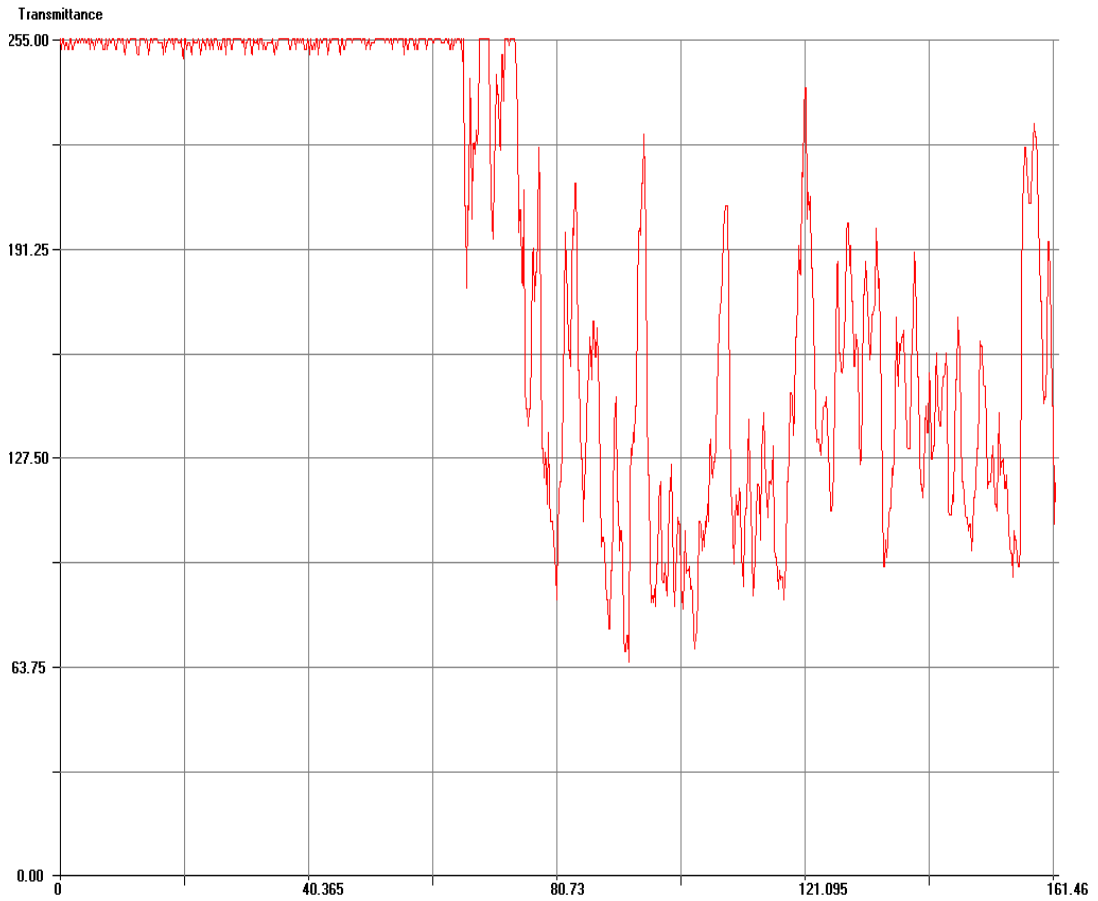
EK-4. Si katkılı GaAs  $C_6H_8O_7:H_2O_2 = 3:1$  step1



Resim 4.1. Si katkılı GaAs sitrik asit: hidrojen peroksit =3:1 step1

#### EK-4. (Devam) Si katkılı GaAs $C_6H_8O_7:H_2O_2 = 3:1$ step1

Si katkılı GaAs  $C_6H_8O_7:H_2O_2 = 3:1$  oranıyla birinci aşındırılışı ile hiç aşındırılmamış bölgelerin kesişim yeri. Optik mikroskop ile yüzey incelemesi yapıldığında yüzeyde numunenin çok hızlı aşındığı ve bu yüzden hassas aşınım yapamadığı görüldü. Bizim istediğimiz daha yavaş ve hassas aşınımdır. Resim 4.1'in üzerinde işaretli olan 161,46  $\mu m$  uzunluğundaki şeridin yüzey profili (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Si katkılı GaAs sitrik asit: hidrojen peroksit =3:1 step1

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ULU, Yusuf Alper  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 15.02.1977 Hatay  
 Medeni hali : Evli  
 Telefon : 0 (312) 475 49 53  
 e-mail : [yusufalperulu@yahoo.com](mailto:yusufalperulu@yahoo.com).

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /İleri Teknolojiler Bölümü	2007
Lisans	Çukurova Üniversitesi/ Fizik Bölümü	2002
Lise	Ankara Ayrancı Lisesi	1994

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

1. Mammadov T.S., Agaliyeva S.T., Akaoğlu B., Özçelik S., Ulu Y., ‘Wet Chemical Etching Of Si And Zn Doped GaAs And Undoped Semi-İnsulating GaAs With Citric Acid/Hydrogen Peroxide Solutions’, *J. Fizika vol.XIII 1-2*, p. 303-305 (2007).
2. Mammadov T.S., Agaliyeva S.T., Akaoğlu B., Özçelik S., Ulu Y., ‘Wet Chemical Etching Of Si And Zn Doped GaAs And Undoped Semi-İnsulating GaAs With Citric Acid/Hydrogen Peroxide Solutions’, *Fizika- 2007 International Conference*, Baku, Azerbaijan (2007).
3. Mammadov T.S., Akaoğlu B., Özçelik S., Agaleyeva S.T. Ulu Y., ‘Wet chemical etching doped , undoped and semi-insulating GaAs/AlGaAs with citric acid/hydrogen peroxide solutions’, *MECD-2007 International Conference*, p. 14-16 November (2007).

### Hobiler

Tenis, Bilgisayar teknolojileri, Basketbol