

GaAs/AlGaAs
TABANLI YARIİLETKEN YAPILARDAN
AYGIT ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Burcu ARPAPAY
Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı
Eylül-2010

Bu tez çalışması Anadolu Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu Başkanlığı (Proje No: 091014) ve TBAG-107T012 numaralı proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Burcu ARPAPAY'ın “**GaAs/AlGaAs Tabanlı Yarıiletken Yapılardan Aygıt Üretimi ve Karakterizasyonu**” başlıklı **Fizik** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 13.08.2010 tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı-Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Doç. Dr. UĞUR SERİNCAN	
Üye	: Doç. Dr. BÜLENT ASLAN	
Üye	: Prof. Dr. AYDIN DOĞAN	

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

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GaAs/AlGaAs TABANLI YARIİLETKEN YAPILARDAN AYGIT ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Burcu ARPAPAY

**Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Uğur Serincan,
2010, 89 sayfa**

Bu çalışmada, GaAs/AlGaAs tabanlı yarıiletken kuantum kuyulu yapılar fotolitografi ve ıslak aşındırma yöntemi kullanılarak aygıt haline getirilmiştir. Aygıt üretimi için yarıiletken yapının üzerine aygıt tanımlamaları yapılmış, ıslak aşındırma yöntemi kullanılarak malzeme aşındırılmış ve metal kaplama işlemi sonrasında yapılar paketlenmiştir. Bu basamaklar içerisinde en önemli ve kritik basamak olan ıslak aşındırma yönteminin uygulanması sırasında en uygun karışımın bulunabilmesi için değişik asit karışımları farklı oranlarda kullanılmıştır. Aşındırılan malzemelerin yüzey ve kesit yapıları SEM (taramalı elektron mikroskobu) yöntemiyle detaylı incelenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda yüzey kalitesi ve masatepe yapı tanımlamaları için en uygun karışımın sülfürik asit ve sitrik asit olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: GaAs/AlGaAs, ıslak aşındırma, sülfürik asit, sitrik asit, hidroklorik asit, masatepe yapı

ABSTRACT

Master of Science Thesis

DEVICE FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF GaAs/AlGaAs BASED SEMICONDUCTORS

Burcu ARPAPAY

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

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Uğur Serincan,
2010, 89 pages**

In this study, GaAs/AlGaAs based semiconductor quantum well structures were fabricated by using photolithography and wet etching. To fabricate devices, device definitions were patterned on the wafers, etched by using wet etching, and packaged after metallization. Various acid solutions with different ratios were used to find the most suitable solution in wet etching which is the most important and the critical step of all. The surface and cross section profiles of the etched structures were investigated in details by SEM (scanning electron microscopy) technique. It has been concluded at the end of these studies that, the best surface quality and mesa definitions have been established when the sulfuric acid and citric acid solutions were used.

Keywords: GaAs/AlGaAs, wet etching, sulfuric acid, citric acid, hydrochloric acid, mesa structure

TEŞEKKÜR

Tecrübelerinden, iş disiplininin yararlandığım değerli danışmanım Doç. Dr. Uğur Serincan'a, çalışmalarında sunduğu imkanlar, özverili çabaları, cesaretlendirici tutumu için çok teşekkür ederim. Arkadaşça ve anlayışlı yaklaşımıyla en zor çalışma koşullarımı çalışabilir kılan, hep desteğini hissettiğim hocam, Doç. Dr. Uğur Serincan ile çalışmakla şanslı olduğumu belirtmek isterim.

Sistematik çalışmanın nasıl olduğunu öğrendiğim Doç. Dr. Bülent Aslan'a, çalışmalarındaki büyük desteğine ve değerli yorumlarına çok teşekkür ederim. Kaçınmadan, sabırla harcadığı her anı, anlayışlı, arkadaşça tutumu ve en zor anlarımda yanımda olduğu için minnettarlık duyarım.

Bilkent Üniversitesi İleri Araştırma Laboratuvarı'nda çalışma imkanı sunan Prof. Dr. Atilla Aydın ve yardımları için grubuna teşekkür ederim.

Hall ölçümleri için laboratuvarında çalışma imkanı sunan Prof. Dr. Mehmet Parlak ve yardımları için Mustafa Kulakçı'ya teşekkür ederim.

SEM görüntülerinin alınmasında emeği geçen Bülent Arıkan'a ve akım-voltaj ölçümlerinde yardımları ve üzerimde denemekten hiç vazgeçmediği şakaları için Hülya Kuru'ya, Eskişehir'deki kılavuzum ve en zor anlarımda hep yanımda olan güleç yüzlü canım arkadaşım Tuğçe Karakulak'a ve keyifli bir çalışma ortamı içinde olduğumu hep hissettiren tüm Nanoboyut Araştırma Grubu arkadaşlarıma ayrı ayrı teşekkür ederim.

Bir nevi yol gösterenim, her yardım çağrıda beni cevapsız bırakmayan arkadaşım Leyla Başak Büklü'ye ve beni sesinden hiç mahrum bırakmayan Kadıköy dostum Ece Akten'e çok teşekkürler.

Onların yardımı olmadan tamamlayamayacağım bu çalışmada sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim, özellikle hayatımdaki en büyük destekçim, canım ablam Leyla Arpaway'a daim sevgisi, fedakarlığı ve sabrı için çok teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. EPİTAKSİYEL KRİSTAL BÜYÜTME TEKNİKLERİ VE AYGIT ÜRETİM AŞAMALARI	4
2.1. Epitaksiyel Kristal Büyütme Teknikleri	4
2.1.1. Moleküler demet epitaksi	5
2.1.2. Metal organik kimyasal buharlı büyütme	6
2.2. Aygıt Üretim Aşamaları	7
2.2.1. Temiz oda ve önemi	7
2.2.2. Fotolitografi	9
2.2.3. Diğer litografi teknikleri	16
2.2.4. Islak aşındırma	17
2.2.5. Kuru aşındırma	19
2.2.6. Metal katman kaldırma	20
2.2.7. Çabuk ısıtma işlemi	20
2.2.8. Güvenlik	22

3. GaAs, ISLAK AŞINDIRMA MEKANİZMASI ve ÇÖZELTİLERİ	24
3.1. GaAs Kristalografi	27
3.2. GaAs Islak Aşındırma Mekanizması	30
3.3. GaAs Islak Aşındırma Çözeltileri	34
3.3.1. $H_2SO_4-H_2O_2-H_2O$ çözeltisi	34
3.3.2. $HCl-H_2O_2-H_2O$ çözeltisi	37
3.3.3. $H_3PO_4-H_2O_2-H_2O$ çözeltisi	38
3.3.4. $C_6H_8O_7-H_2O_2-H_2O$ çözeltisi	39
3.3.5. $HF-H_2O_2-H_2O$ çözeltisi	40
3.4. GaAs'e Karşı AlGaAs Seçiciliği	40
3.5. N-tipi GaAs Omik Kontakları	41
 4. GaAs ISLAK AŞINDIRMA MEKANİZMALARININ İNCELENMESİ	 45
4.1. Temizleme	45
4.2. Fotolitografi	45
4.3. Tab Etme	47
4.4. Islak Aşındırma	47
4.4.1. $H_2SO_4-H_2O_2-H_2O$ çözeltisi ile GaAs aşındırma	49
4.4.2. $C_6H_8O_7-H_2O$ karışımı/ H_2O_2 çözeltisi ile GaAs aşındırma	56
4.4.3. $HCl-H_2O_2-H_2O$ çözeltisi ile GaAs aşındırma	60

5. N-TİPİ GaAs HALL ÖLÇÜMLERİ ve GaAs/AlGaAs KUANTUM KUYULU YAPILARIN AYGIT ÜRETİMİ	64
5.1. Si Katkılı GaAs Malzemelerin Hall Ölçümleri	64
5.2. GaAs/AlGaAs Kuantum Kuyulu Yapının Aygıt Üretimi ve Karanlık Akım-Voltaj Ölçümleri	68
6. SONUÇ	73
KAYNAKLAR	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

1.1. (a) Nokta kontak tipi ilk transistör, (b) taş baskı tekniği	1
1.2. Anadolu Üniversitesi, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu MBE sisteminin genel görünüşü	3
2.1. Sıvı faz epitaksi sisteminin şematik gösterimi	4
2.2. Bir MBE sisteminin şematik gösterimi	6
2.3. Taşıyıcı gaz olan hidrojen ile birlikte TMGa, TMAI ve arsin kaynaklarıyla çalışan MOCVD şeması	7
2.4. Maske deseni ile çakışan farklı konumlardaki parçacıklar	8
2.5. Baskı teknikleri şeması (a) temaslı, (b) yakın, (c) izdüşüm	10
2.6. Temaslı, yakın ve izdüşüm baskı hayali görüntülerinin karşılaştırılması	10
2.7. Temel görüntü sistemi	12
2.8. Cıva lambasının tayfı	12
2.9. Genel fotolitografi süreci, (a) fotorezist kaplama, (b) ışınlama ve (c) tab etme	15
2.10. Odaklanamayan X-ışınlarından kaynaklı gölge etkisi	16
2.11. Temel ıslak aşındırma mekanizması	18
2.12. (a) Anizotropik aşındırma, (b) izotropik aşındırma	19
2.13. Islak aşındırma en küçük boyut profili.....	19
2.14. Metal kaplama süreci, (a) numunenin üzeri fotorezist ile kaplanır, (b) fotolitografi sonrasında tab edilir, (c) yüzey metal ile kaplanır (d) fotorezist çözücü içine konularak üzeri metal kaplı fotorezist tabakası kaldırılır	20
2.15. RTP şematik çizim	21
2.16. RTP'de eşsıcaklık kipi	22
2.17. 3. derece HF asit yanığı	22
3.1. GaAs için enerji bant şeması	24
3.2. Elektrik alanın fonksiyonu olarak katkısız Ga ve Si elektronlarının sürüklenme hızı	25

3.3. GaAs enerji bant seviyeleri	26
3.4. Yüzey merkezli kübik (fcc) yapı	27
3.5. (a) GaAs kristalografik yapısı (b) GaAs birim hücrenin (111) düzleminin kesiti	28
3.6. GaAs yüzeyinde oluşturulan masatepe yapısı ve kristal yönelimler	29
3.7. (a) GaAs kristal yapısı, (b) farklı $\langle 111 \rangle$ A (Ga) ve $\langle 111 \rangle$ B (As) yönleri	30
3.8. 0 °C’de elde edilen H ₂ SO ₄ -H ₂ O ₂ -H ₂ O çözeltisinin üçlü şeması	35
3.9. Yüksek H ₂ SO ₄ çözeltilerinde aşındırma hızının karıştırma etkisi	36
3.10.(a) Yüksek H ₂ SO ₄ , düşük H ₂ O ₂ ve (b) düşük H ₂ SO ₄ , yüksek H ₂ O ₂ çözeltilerinde aşındırma hızının kristal yönüne bağlılığı	36
3.11.30 °C’de n-tipi (100) GaAs yüzeyinden elde edilen deneysel sonuçların üçlü şeması	38
3.12. Farklı yüzeyler için aşınma derinliği ile aşınma zamanı arasındaki ilişki	39
3.13.(a) Oda sıcaklığında C ₆ H ₈ O ₇ -H ₂ O karışımı/H ₂ O ₂ çözeltisinin hacim oranının fonksiyonu olarak Al _x Ga _{1-x} As (x < 0,5) aşınma hızları (b) Al kompozisyonun fonksiyonu olarak, çözeltinin hacim oranının değişimi	40
3.14. Farklı katkılama seviyelerine sahip metal/yarıiletken arayüzeyleri boyunca iletim mekanizmaları	42
3.15. (a) Farklı sıcaklıklarda tavlanan GeNiAu metal kontak dirençleri, (b) farklı sıcaklıklarda tavlanan GeNiAu kontaklarında oluşan bileşikler	44
4.1. (a) UniTemp, RV-129 elmas uçlu çizici (b) Laurell, WS-400BZ-6NPP/LITE döner kaplayıcı (c) MIDAS, MDA-400M-6 maske hizalayıcı (d) KLA Tencor, P-6 profilometre	46
4.2. Tüm örnekler için kaplanan fotorezist kalınlığını gösteren profilometre ölçümü	47
4.3. n-tipi GaAs alttaşından 5×5 mm ² boyutunda kesilen örneklerin gösterimi ve SEM kesit analizi için 2,5×2,5 mm ² boyutundaki örneklerin masatepe kesitlerinin yön tanımlamaları	48
4.4. (100) düzleminde büyütülmüş GaAs alttaşı ve kristalografik yön tanımlamaları	48

4.5. Farklı oranlarda $H_2SO_4/H_2O_2/H_2O$ karışımlarıyla aşındırılmış n-tipi GaAs yüzeylerinin SEM görüntüleri. (a) 1:1:1, (b) 1:5:1, (c) 5:1:1, (d) 5:1:20, (e) 1:8:40, (f) 1:8:80, (g) 1:8:160, (h) 1:8:1000	50
4.6. 5:1:20 oranında $H_2SO_4/H_2O_2/H_2O$ karışımıyla sırasıyla 1, 3, 5 ve 7 dk aşındırılan 4 farklı örneğin aşındırma derinliklerinin profilometre ölçümü	52
4.7. 1:1:1 oranında $H_2SO_4/H_2O_2/H_2O$ karışımıyla sırasıyla 40, 60 ve 90 sn aşındırılan 3 örneğin aşındırma derinliklerinin profilometre ölçümü	53
4.8. 3:1:1 oranında $H_2SO_4/H_2O_2/H_2O$ karışımıyla sırasıyla 30 ve 60 sn aşındırılan 3 farklı örneğin aşındırma derinliklerinin profilometre ölçümü	53
4.9. $H_2SO_4/H_2O_2/H_2O$ karışımının boyut kaybı etkisini gösteren SEM görüntüleri (a) 1:8:160 (b) 1:8:1000	54
4.10. [011] ve $[0\bar{1}1]$ yönlerinde kesiti alınan, farklı oranlarda $H_2SO_4/H_2O_2/H_2O$ çözeltileriyle aşındırılan GaAs aşındırma profillerinin SEM görüntüleri (a) 1:5:1 (b) 1:8:40 (c) 1:8:80	55
4.11. [011] ve $[0\bar{1}1]$ yönlerinde kesiti alınan, farklı oranlarda $H_2SO_4/H_2O_2/H_2O$ çözeltileriyle aşındırılan GaAs aşındırma profillerinin SEM görüntüleri (a) 5:1:1 (b) 5:1:20	56
4.12. Farklı oranlarda $C_6H_8O_7-H_2O$ karışımı/ H_2O_2 ile aşındırılmış GaAs yüzeylerinin SEM görüntüleri (a) 5:1 (b) 10:1 (c) 20:1 (d) 50:1	57
4.13. [011] ve $[0\bar{1}1]$ yönlerinde kesiti alınan, farklı oranlarda $C_6H_8O_7-H_2O$ karışımı/ H_2O_2 çözeltileriyle aşındırılan GaAs aşındırma profilleri (a) 5:1 (b) 10:1 (c) 20:1 (d) 50:1	58
4.14. $H_2SO_4/H_2O_2/H_2O$ ve $C_6H_8O_7-H_2O$ karışımı/ H_2O_2 çözeltileriyle aşındırılmış SEM görüntülerinin karşılaştırılması (a) 1:8:80 $H_2SO_4/H_2O_2/H_2O$ karışımı (b) 10:1 $C_6H_8O_7-H_2O$ karışımı/ H_2O_2	59
4.15. (a) 5:1 $C_6H_8O_7-H_2O$ karışımı/ H_2O_2 (b) 3:1:1 $H_2SO_4/H_2O_2/H_2O$ ve (c) 1:8:160 $H_2SO_4/H_2O_2/H_2O$ çözeltileri için derinlik karşılaştırılması	60
4.16. Farklı oranlarda $HCl/H_2O_2/H_2O$ ile aşındırılmış GaAs yüzeylerinin SEM görüntüleri (a) 1:4:40 (b) 1:1:1 (c) 1:1:9 (d) 1:9:1	61

4.17. [011] ve $[0\bar{1}1]$ yönlerinde kesiti alınan, farklı oranlarda HCl/H ₂ O ₂ /H ₂ O çözeltileriyle aşındırılan GaAs aşındırma profilleri (a) 80:4:1 (b) 1:9:1 (c) 1:4:40	62
4.18. Aşındırma işlemi sırasında örnek yüzeyi üzerinde yer alan kabarcıkların aşındırmaya etkisini gösteren SEM görüntüleri.....	63
5.1. Hall Etkisi	65
5.2. TPT, HB 16 tel bağlayıcı	66
5.3. (a) Hall çubuğu aygıtı (b) paketlenmiş Si katkılı GaAs	66
5.4. Paketlenmiş Yapı 2A ve 2B	70
5.5. Yapı 2A'nın akım yoğunluğu-voltaj grafiği	71
5.6. Yapı 2B'nin akım yoğunluğu-voltaj grafiği	71
5.7. Yapı 2A ve 2B'nin akım-voltaj değerlerinin karşılaştırılması	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

1.1. Bazı önemli yarıiletken büyütme ve aygıt üretimi teknikleri	2
2.1. Fotolitografi için ışık kaynakları	13
3.1. 300 K’de Si, SiO ₂ ve GaAs özelliklerinin karşılaştırılması	26
3.2. Difüzyon sınırlı ve tepkime hız sınırlı ıslak aşındırma mekanizmasının temel özellikleri	32
3.3. GaAs için H ₂ SO ₄ ve HCl çözeltilerinin özellikleri	37
5.1. MBE sisteminde büyütülen farklı Si katkılı üç GaAs epikatmanların kalınlıklarını, beklenen ve ölçülen taşıyıcı konsantrasyon değerleri	67

KISALTMALAR DİZİNİ

CD	: Kritik boyut (critical dimension)
DUV	: Derin morötesi (deep ultraviolet)
LPE	: Sıvı faz epitaksi (liquid phase epitaxy)
MBE	: Moleküler demet epitaksi (molecular beam epitaxy)
MOCVD	: Metal organik kimyasal buharlı büyütme (metal organic chemical vapour deposition)
RH	: Bağlı nem
RTP	: Çabuk ısıtma işlemi (rapid thermal processing)
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscopy)
StpHt	: Basamak yüksekliği (step height)
UV	: Morötesi (ultraviolet)

1. GİRİŞ

Yarıiletken malzemeler, geçmişten günümüze birçok aygıtın keşfedilmesinde ve geliştirilmesinde büyük bir rol oynamış ve oynamaktadır. Tam olarak yarıiletken teknolojisi, 1947 yılında Bell laboratuvarlarında John Bardeen ve Walter Brattain tarafından germanyum (Ge) kristalinin kontaklarına voltaj uygulandığında çıkış elektrik sinyalinin, giriş sinyalinden daha yüksek olduğunun gözlenmesiyle başladı [1]. Bu elektronik aygıt “nokta kontak tipi transistör” olarak adlandırıldı (Şekil 1.1a). Bu önemli gözlem sonrasında William Shockley liderliğindeki bu grup, 1960 ve 1970’li yıllarda çok yaygın olarak kullanılan iki kutuplu transistörü geliştirmişlerdir [2]. 1950’li yıllardan itibaren ise yarıiletken teknolojisi, silisyum (Si) ve galyum arsenik (GaAs) gibi yarıiletkenlerle birlikte hızlı bir şekilde gelişmiş ve güneş pili, ışık yayan diyot (light emitting diode, LED), metal oksit yarıiletken alan etkili transistör (metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET), lazer ve kızılötesi algılayıcı gibi birçok önemli yarıiletken tabanlı aygıt keşfedilmiştir.

Yarıiletken teknolojinin ilerlemesi, aygıt üretimi tekniklerinin gelişmesini de beraberinde getirmiştir. 2000 yıl önce Afrikalılar tarafından çelik elde etmek için fırınlarda metalik kristallerin büyütülmesi [3] ve 1789 yılında keşfedilen taş levha üzerinden desen aktarımı olarak adlandırılan taş baskı (litografi, Şekil 1.1b) [4] gibi çok eskilere dayanan yöntemler, bir miktar değiştirilerek güncel teknolojiyle uyumlu hale getirilmiştir. Bu tarihi yöntemler öncülüğünde geliştirilen bazı önemli buluşlar Çizelge 1.1’de özetlenmiştir [3].



Şekil 1.1. (a) Nokta kontak tipi ilk transistör [5], (b) taş baskı tekniği [6]

Çizelge 1.1. Bazı önemli yarıiletken büyütme ve aygıt üretimi teknikleri

Yıl	Buluş	Kişi
1918	Czochralski kristal büyütme	Czochralski
1925	Bridgman kristal büyütme	Bridgman
1952	III-V bileşikleri	Welker
1957	Litografik fotorezist	Andrus
1957	Oksit maskeleme	Frosch and Derrick
1957	CVD*	Sheftal, Kokorish ve Krasilov
1958	İyon ekme	Shockley
1969	MOCVD**	Manasevit ve Simpson
1971	Kuru Aşındırma	Irving, Lemons ve Bobos
1971	MBE***	Cho

*Kimyasal Buharlı Büyütme (Chemical Vapour Deposition)

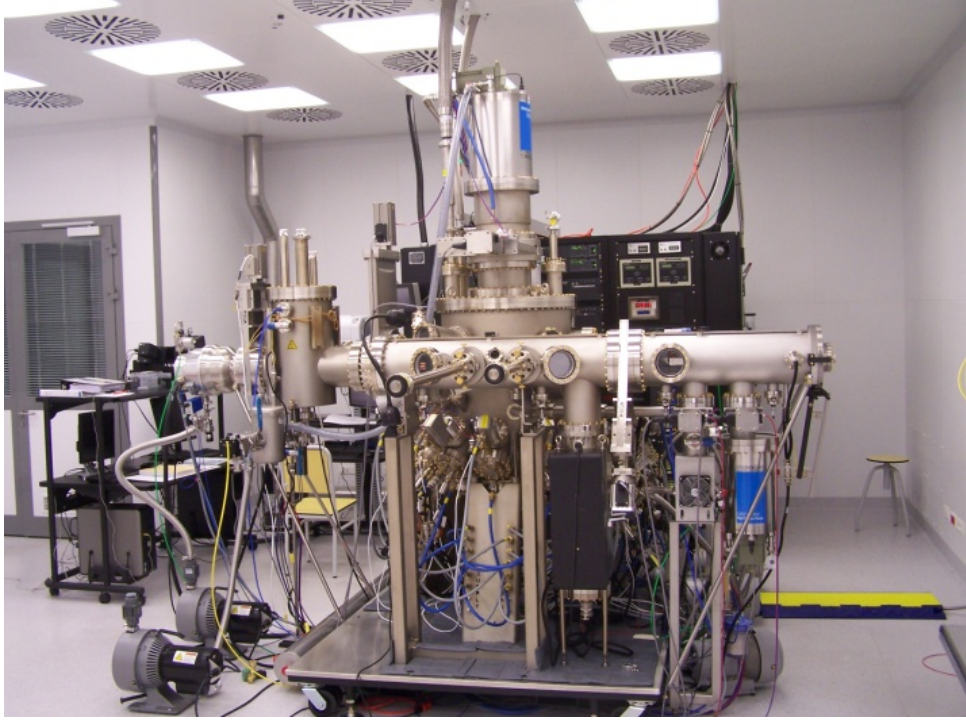
**Metal Organik Kimyasal Buharlı Büyütme (Metal Organic Chemical Vapour Deposition)

***Moleküler Demet Epitaksi (Molecular Beam Epitaxy)

Yarıiletken aygıt üretimi sürecinde, aygıt tanımlamaları en çok ıslak aşındırma yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. Amaca yönelik uygun ve farklı kimyasal malzemelerin tek başlarına ve/veya karıştırılarak kullanıldığı bu yöntem, her ne kadar Si ve GaAs için olgunlaşmış olsa da, farklı yapılara olan ihtiyaçtan dolayı sürekli olarak gelişme göstermektedir.

Bu çalışmanın amacı, GaAs ıslak aşındırma mekanizmalarının incelenmesi ve GaAs/AlGaAs kuantum kuyulu yapıların fotolitografi ve ıslak aşındırma yöntemi kullanılarak aygıt haline getirilmesidir. Bu kapsamda, GaAs için farklı ıslak aşındırma çözeltilerinden en uygun karışımlar belirlenmiştir. Bu süreçte, farklı oranlarda karıştırılan çözeltilerin aşındırma hızlarına ve oluşturulan masatepe (mesa) yapıların kesit görüntülerine bakılarak en uygun reçete belirlenmiş ve aygıt üretiminde kullanılmıştır. Literatürden yararlanılarak uygun n-tipi GaAs metal kontaklar seçilmiş ve oluşturulan iki farklı reçete ile üretilen aygıtların 80 K sıcaklığında karanlık akım ölçümleri alınıp sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bunlara ek olarak, geliştirilen reçete, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'ndaki moleküler demet epitaksi (molecular beam epitaxy, MBE) sistemi (Şekil 1.2) kullanılarak büyütülen, farklı seviyelerde Si atomlarıyla katkılanan, GaAs epikatmanlar üzerine uygulanarak Hall ölçümleri yapılabilmesi için aygıtlar üretilmiştir. Üretilen aygıtlar paketlenildikten (ölçüme hazır hale getirilmesi için altın tel bağlantılarının yapılması) sonra, Hall ölçümleri yapılmış

ve katkı miktarları belirlenmiştir. Bulunan değerler, yeni kurulan MBE sisteminin ölçümlemesi (kalibrasyon) için önem taşımaktadır.



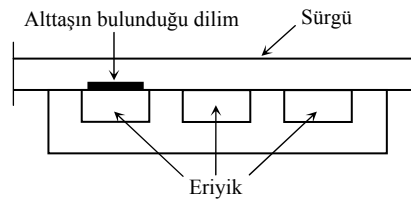
Şekil 1.2. Anadolu Üniversitesi, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu MBE sisteminin genel görünüşü

2. EPİTAKSİYEL KRİSTAL BÜYÜTME TEKNİKLERİ ve AYGIT ÜRETİM AŞAMALARI

2.1. Epitaksiyel Kristal Büyütme Teknikleri

Epitaksi, tek kristal alttaş üzerine tek kristal tabaka büyütmeye yöntemidir. “Üstüne” anlamına gelen *epi* ile “ayarlama” anlamına gelen *taksi* (taxi) sözcüklerinin birleşiminden oluşan, Yunanca kökenli bir kelimedir. Büyütülen ince tabakalar, “epitaksiyel tabaka” olarak adlandırılır [7]. Yarıiletken teknolojisinde, yüksek kalitede aygıtların üretilebilmesi için geliştirilen ve halen gelişmeye devam eden epitaksiyel büyütmeye, önemli bir tekniktir.

70’li yıllara kadar kullanılan en eski büyütmeye tekniği sıvı faz epitaksisidir (liquid phase epitaxy, LPE) [8]. Bu yöntemde alttaş, bir sürgü içine yerleştirilir ve içinde büyütülecek erimiş halde bulunan malzemeleri içeren bir bot boyunca hareket ettirilir (Şekil 2.1). Eriyik, katılma noktasının hemen altındaki sıcaklıklara soğutulur ve alttaş üzerinde katılmasına izin verilir. Bununla birlikte eriyik içinde, tercihen katkılama malzemeleri de bulunabilir. Botun farklı kısımlarında farklı eriyikler bulunabilir, böylece sürgü çekildikçe alttaş boyunca farklı epitaksiyel tabakalar büyütülebilir [9]. Maliyeti düşük bir büyütmeye tekniği olan LPE’nin başlıca sorunu, geniş yüzeylerde homojen tabakalar büyütmeye zorluğudur [9].



Şekil 2.1. Sıvı faz epitaksi sisteminin şematik gösterimi

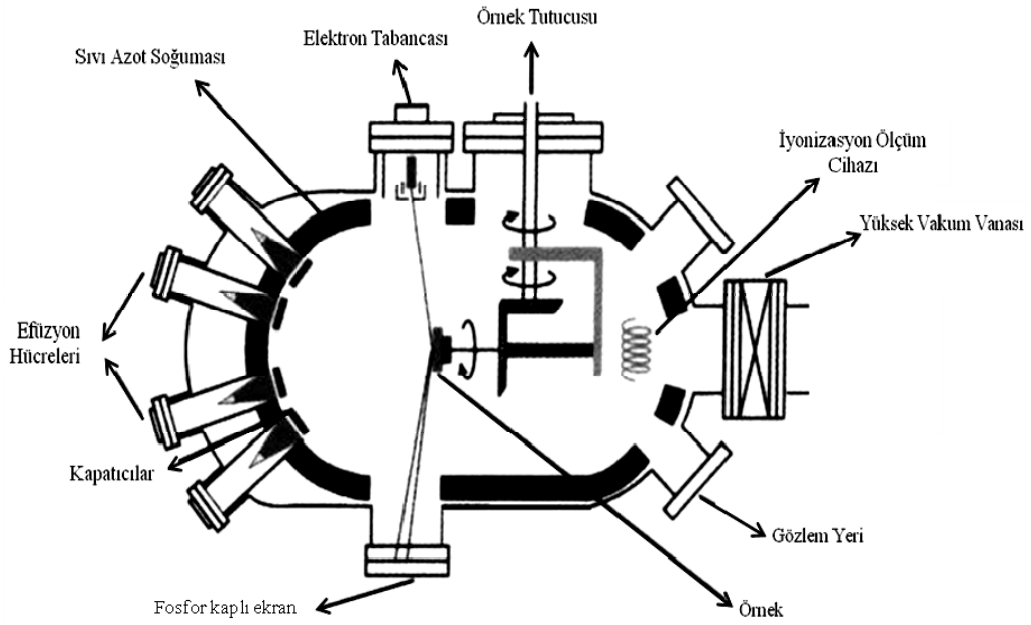
Bir diğer teknik olan buhar faz epitaksisi (vapor phase epitaxy, VPE), çoğunlukla aynı epitaksiyel tabakaların büyütülmesi için kullanılır. Birleşenlerin istenen kristal formu oluşturması bir gaz ortamında gerçekleşen kimyasal

tepkimeye dayalı bir büyütme yöntemidir. Yüksek saflıkta malzemeler büyütme üstünlüğüne sahip olmasına rağmen çoklu katman yapılar büyütme için uygun bir yöntem değildir [8]. Ayrıca, sistemde kullanılan hidrojen (H) ve oksijenin (O) patlama tehlikesi yaratması ve gaz formundaki moleküllerin zehirli olmasından dolayı ciddi güvenlik önlemleri almak gerekmektedir [8].

2.1.1. Moleküler demet epitaksi

MBE sisteminde, üzerine yüksek saflıkta tabakaların büyütüleceği alttaş çok yüksek vakum ($\sim 10^{-9}$ - 10^{-11} Torr) altındaki bir hazne içine yerleştirilir (Şekil 2.2). Alttaş üzerine büyütülecek her bir malzeme, yüksek sıcaklıklara dayanıklı “efüzyon hücresi” olarak adlandırılan, birbirlerinden yalıtılmış kendi hücresinde bulunmaktadır. Her efüzyon hücresinin, içindeki malzemenin hazneye istenildiği zaman verilmesini sağlayan kapatici (shutter) mevcuttur. Hangi malzeme büyütülecekse ona ait efüzyon hücresi ısıtılır ve içinde buharlaşan malzeme, efüzyon hücresinin kapaticısı açıldığında alttaş üzerine ulaşır. Büyütme sırasında alttaş, yüzeyi boyunca homojen bir büyütme sağlanabilmesi için döndürülür ve aynı zamanda birleşecek atomlara, yüzey difüzyonu için gerekli enerjiyi sağlamak amacıyla ısıtılır. Tipik olarak GaAs için büyütme hızı $1 \mu\text{m/sa}$, yani yaklaşık 1 saniye başına 1 atomik tabakadır (1 ML/sn).

Büyütme sürecini ve kristal yapısını analiz etmek için büyütme sırasında yansı yüksek enerji elektron kırınımı (reflection high energy electron diffraction, RHEED) tekniğinden faydalanılır [9]. Bu teknikte, büyütme haznesine bağlı elektron tabancası ile elektron demeti üretilir. Elektron demeti, birkaç derece açı yapacak şekilde örnek yüzeyine gönderilir. Yüzeye gelen elektron demeti, kristal düzlemler tarafından kırınıma uğrayarak fosfor kaplı bir ekrana yansır ve bir kamera yardımıyla bilgisayar ekranına aktarılarak kristal düzlemler gözlenebilir [8, 9].



Şekil 2.2. Bir MBE sisteminin şematik gösterimi [10]

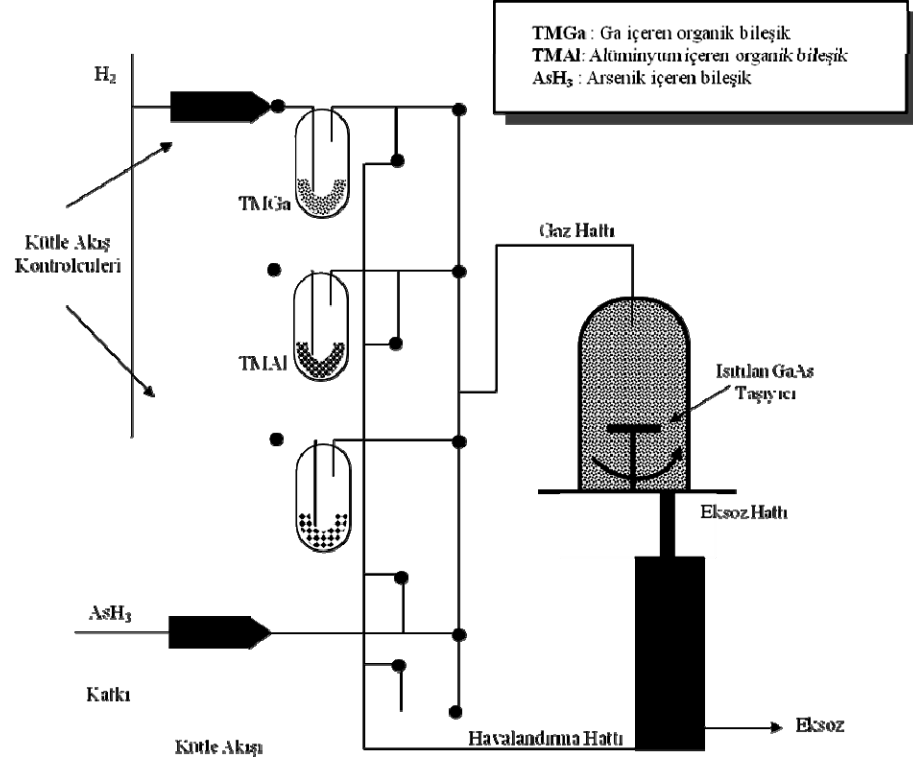
MBE tekniği, kimyasal bir tepkime gerçekleşmediği için en kolay ve kontrol edilebilir büyütme tekniklerinden biridir [8]. Ga, As, Al, Si gibi hemen hemen tüm yarıiletkenler ve bileşiklerinin büyütülebilmesi ve katkılanması mümkündür [10]. Olumsuzlukları ise, yüksek vakum gereksinimi (10^{-10} ile 10^{-11} torr), maliyeti yüksek karmaşık donanımı ve yavaş büyütme oranıdır [9].

2.1.2. Metal organik kimyasal buharlı büyütme

MOCVD, diğer önemli büyütme tekniklerinden biridir. MBE yönteminde olduğu gibi atomik tabakalar halinde büyütme işlemi yapılabilmektedir. MOCVD sisteminde kullanılan zehirli gazlardan dolayı ölümcül kazalarla karşılaşmamak için ciddi güvenlik önlemleri almak gerekir.

MBE sisteminden farklı olarak, bu yöntemde kullanılan gazlar element halinde değil, kristali oluşturacak olan elementleri içeren karmaşık moleküllerdir. Bu nedenle büyütme, ısıtılan alttaş yüzeyinde oluşan kimyasal tepkimeye bağlıdır. Örneğin GaAs büyütme için genellikle Triethyl Galyum ($\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$) ve Arsin

(AsH₃) kullanılır (Şekil 2.3). Kristal büyütme, Denklem (2.1)'deki tepkimeye göre gerçekleşir.



Şekil 2.3. Taşıyıcı gaz olan hidrojen ile birlikte TMGa, TMAI ve arsin kaynaklarıyla çalışan MOCVD şeması [8]

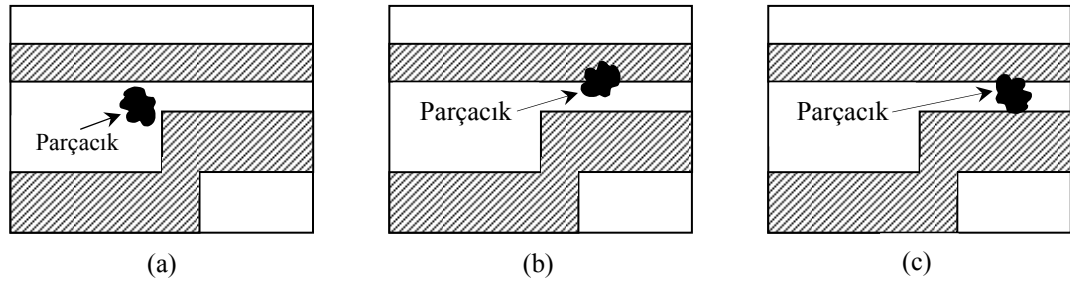
2.2. Aygıt Üretim Aşamaları

2.2.1. Temiz oda ve önemi

Üretim yapılan ortamın temizliği, aygıtların performansını etkileyen önemli noktalardan biridir. Ortamdaki parçacıkların üretim sırasında kusurlara yol açmaması için ilk olarak ortam temizliği sağlanır. Bunun için “temiz oda”lara ihtiyaç duyulur. Temiz oda, bulunduğumuz ortamdaki parçacık sayısının kontrol altında tutulduğu ve dışarıdakine kıyasla parçacık sayısının daha az olduğu bir

ortamdır. İlk temiz odalar, hastanelerde enfeksiyona neden olabilecek bakterileri kontrol etmek amacıyla ameliyathaneler için inşa edilmiştir. Daha sonra yarıiletken endüstrisinin gelişmesiyle, aygıt üretimi sırasında kusur kontrolünün öneminin anlaşılmasıyla temiz oda teknolojisi yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [11].

Ortam temizliğinin önemi, bir maske üzerinde farklı konumlarda olan üç parçacığı içeren Şekil 2.4’de gösterilmiştir. Maske üzerindeki bu parçacıklar, tasarlanan desen ile birlikte malzeme yüzeyine taşınır. Şekil 2.4a’da gösterilen parçacık, negatif fotorezist için istenmeyen boşluklara, pozitif fotorezist için istenmeyen fazlalıklara sebep olur. Örneğin, Şekil 2.4b’deki parçacık, iki metal tabaka arasında akımı kısıtlamaya neden olabilir. Şekil 2.4c’deki parçacık ise iki iletken bölge arasında kısa devreye yol açabilir [12]. Çalışılan en küçük boyutun onda biri kadar olan parçacıklar bile kirliliğe sebep olabilir [11].



Şekil 2.4. Maske deseni ile çakışan farklı konumlardaki parçacıklar

Temiz odalar, havadaki parçacık sayısına göre sınıflandırılır. İngiliz sisteminde X-Sınıfı, havanın birim kübik ayak başına, çapı 0,5 μm ya da daha büyük olan en fazla X kadar sayıda parçacık içerdiğini belirtir: 100 sınıfı bir temiz alanda hava, birim ayak küp başına 100 ya da 100’den daha az sayıda parçacık içerir [9]. Metrik sistemde ise birim metre küp başına, çapı 0,5 μm ya da daha büyük olan parçacıkların logaritma tabanında sınıf tanımlaması yapılır. Örneğin, 100 sınıfı (İngiliz sistem) ile eş olan M3,5 (metrik sistem) temiz odada, bir metre küp başına 3.500 veya daha az parçacık bulunmalıdır [3].

Özellikle fotorezist için önemli olan sıcaklık ve nem, temiz oda için kontrol edilmesi gereken değişkenlerdir. Bağıl nemin (RH) çok düşük olması (%20 RH altında), fotorezistin kurummasına neden olabilir. Bağıl nemin çok yüksek

olması durumunda ise (%50 RH yukarısı), numune yüzeyine tutunma ve çatlama problemleri yaşanabilir. Bu nedenle ortamdaki nem miktarı, ışınlama ve tab etme uygulamalarını etkileyebilir [9].

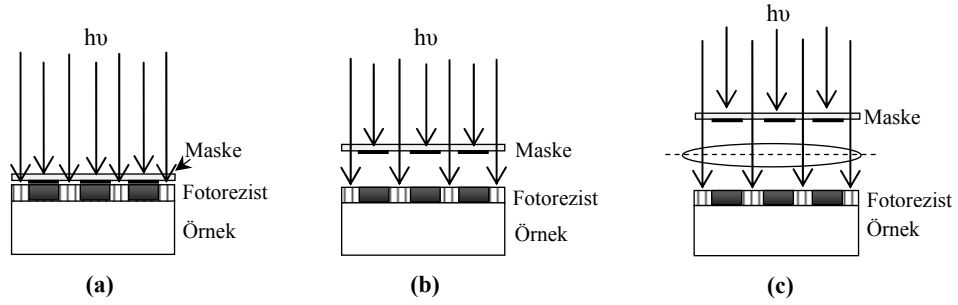
Temiz odada çalışırken ortam atmosferini korumak ve kirliliğini önlemek için temiz oda kuralları mevcuttur. Temiz oda içinde çalışanlar, başlıca kirlilik kaynağıdır. Bunun için temiz oda kıyafeti ve galoş giyilir, bone ve eldiven takılır. Bu aşamadan sonra temiz odaya girilmeden önce hava duşu alınır. Amaç, basınçlı hava akışı ile temiz oda kıyafetlerinin üzerindeki parçacıkların temizlenmesidir. Bunların yanında temiz odada çalışırken konuşmak, öksürmek ve hapşırarak kirliliğe neden olacağından ya maske takılmalı ya da çalışma bölgesinden uzaklaşılmalıdır. Temiz oda içinde bir şey içmemek ya da yememek, parfüm, kolonya tarzı malzemelerin kullanılmaması ve dışarıdan temiz odaya girecek nesnelerin de mutlaka temizlenerek içeri sokulması gerekmektedir. Çoğu durumda yapılan bu temizlik yeterli olmayacağı için, temiz oda için özel üretilen, toz ve parçacık yaymayan ürünler kullanılmalıdır.

2.2.2. Fotolitografi

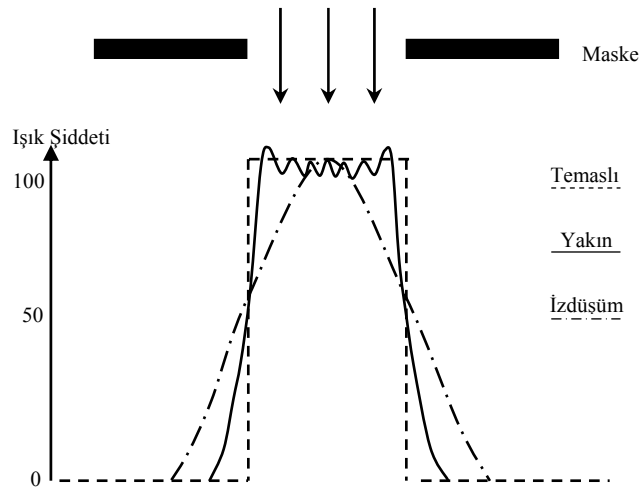
Fotolitografi, morötesi (ultraviolet, UV) ya da derin morötesi (deep ultraviolet, DUV) ışık kaynağı kullanarak bir maske üzerindeki aygıt modelinin numune üzerine aktarılmasıdır. Bu yöntemde numune yüzeyi, ışığa duyarlı “fotorezist” olarak adlandırılan bir malzeme ile kaplanır ve ışığa maruz bırakılan fotorezist kaplı numune, uygun bir çözelti içine konulduğunda gizli aygıt modeli ortaya çıkar. Fotolitografi üzerine düşünülmesi gereken etmenler ise; yüksek çözünürlük ve hassasiyet, düşük kusur yoğunluğu, tam ve doğru hizalamadır [11].

İşinleme işleminin verimi için önemli değişkenlerden biri olan çözünürlük, en küçük desen boyutunun fotorezist kaplı numune üzerine gerçek şekline bağlı kalarak aktarılma derecesidir. Fotolitografi sisteminde ışık, maskenin saydam yerlerinden geçer ve fotoreziste ulaşır. Temel olarak üç işinleme metodu vardır; temaslı (contact), yakın (proximity) ve izdüşüm (projection) baskı (Şekil 2.5). Şekil 2.6’da üç işinleme metoduyla elde edilen hayali görüntüler

karşılaştırılmıştır. Temaslı baskıda fotorezist kaplı film ile maske fiziksel olarak birbirine dokunur. En eski ve kolay kullanılan yöntemdir. Maskeye çok yakın olduğundan yaklaşık 1 μm çözünürlük sağlanır [3]. Ancak maske ile örnek üzerinde olan yükseklik farkından dolayı gerçekte 1-2 μm kadar hava boşluğu vardır [8]. Olumsuzluğu, fiziksel temastan kaynaklı, hem örnek hem de maske üzerinde oluşan parçacıklardır. Her fotolitografi işleminde maske üzerinde biriken bu parçacıklar, numune üzerinde kusur yaratır ve maskenin ömrü kısalmır [3, 11]. Maske hasarını en düşük düzeye indirmek için diğer bir yöntem olan yakın baskı yöntemi kullanılır. Maske ile örnek arasında genelde 10-50 μm arası değişen bir mesafe vardır. Bu boşluktan dolayı ışık maskenin kenarlarından geçerken kırınımına uğrar ve çözünürlük 2-5 μm arasına düşer [3].



Şekil 2.5. Baskı teknikleri şeması (a) temaslı, (b) yakın, (c) izdüşüm



Şekil 2.6. Temaslı, yakın ve izdüşüm baskı hayali görüntülerinin karşılaştırılması [13]

Bu yöntemde, teorik olarak aktarılabilen en küçük kritik boyut (CD, critical dimension),

$$CD = 3/2 \sqrt{\lambda(G + \frac{FT}{2})} \quad (2.2)$$

eşitliği ile verilir [13]. Burada, λ , kullanılan ışığın dalgaboyu; G, maske ile örnek arasındaki mesafe, FT ise fotorezist kalınlığıdır. İzdüşüm baskıda ise, hem maske tahribatını hem de çözünürlüğün düşmesini engellemek için maskeden kırınımına uğrayan ışık, objektif mercekler aracılığıyla toplanarak örneğe ulaşır. İzdüşüm baskı sisteminin çözünürlüğü;

$$l_m = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (2.3)$$

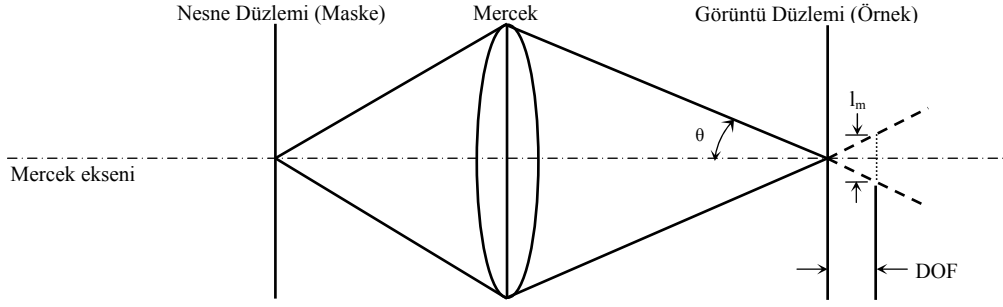
eşitliğiyle ifade edilmektedir [13]. k_1 , sistem sabiti; NA (numerical aperture) sayısal açıklık ise,

$$NA = n \sin \theta \quad (2.4)$$

denklemleri ile ifade edilir. n, ortamın kırılma indisidir, genelde ortam hava olduğu için 1 olarak alınır ve θ , Şekil 2.7’de gösterildiği gibi mercekten geçen ışık kaynağının örnek yüzeyinde odaklandığı noktada oluşturduğu koninin yarı açısıdır. Diğer önemli özelliklerden biri, ışığın odaklandığı ve aktarılan görüntünün netlik derecesini belirleyen alan derinliğidir (depth of field, DOF). Alan derinliği,

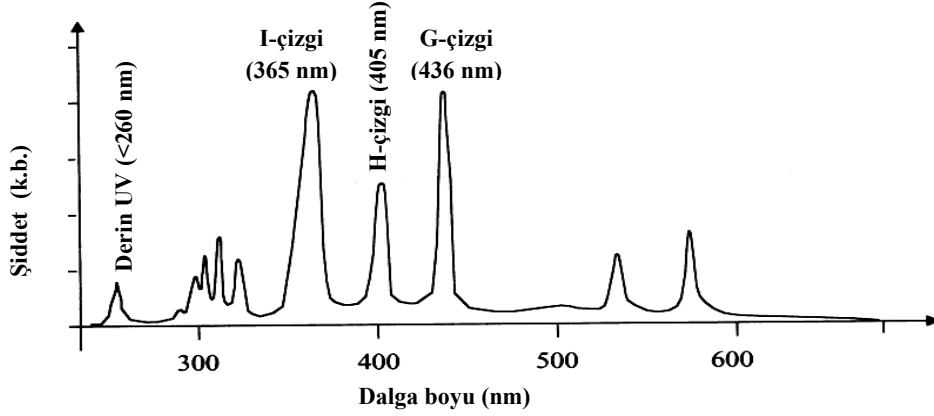
$$DOF = \frac{\pm l_m/2}{\tan \theta} \approx \frac{\pm l_m/2}{\sin \theta} = k_2 \cdot \frac{\lambda}{(NA)^2} \quad (2.5)$$

eşitliği ile verilir. Denklem (2.5)’de k_2 , sistem sabitidir.



Şekil 2.7. Temel görüntü sistemi

Fotolitografide ışık kaynağının dalga boyu, fotorezistin hassasiyetine göre ve basılacak en küçük boyuta göre seçilir. Çizelge 2.1’de genel olarak kullanılan ışık kaynakları özetlenmiştir. Örnek olması için Şekil 2.8’de cıva lambasının tayfı sunulmuştur. Cıva lamba tayfında G-çizgi, H-çizgi ve I-çizgi sırasıyla 436 nm, 405 nm ve 365 nm dalga boylarına karşılık gelen tepelere sahiptir. G-çizgi ve I-çizgi en sık kullanılanlardır ve bunlarla 0,50 μm ile 0,35 μm ’ye kadar çalışılabilir. Daha küçük boyutlarla çalışırken ise çözünürlüğü arttırmak amacıyla dalga boyu daha küçük olan ekzimer lazer kaynakları tercih edilir [11].



Şekil 2.8. Cıva lambasının tayfı [11]

Çizelge 2.1 Fotolitografi için ışık kaynakları [11]

		Dalgaboyu (nm)	En küçük boyut (µm)
Cıva Lambası	G-line	436	0,50
	H-line	405	
	I-line	365	0,35-0,25
Ekzimer lazer	XeF	351	
	XeCl	308	
	KrF (DUV)	248	0,25-0,13
	ArF	193	0,15-0,07
Flor lazer	F ₂	157	0,10 ve daha küçük

Aygıt deseninin numune üzerine aktarılmasında kullanılan maske, ilk adımda bilgisayar destekli tasarım (computer aided design, CAD) tabanlı veya benzeri bir programda çizilir. Bu sayısal veri, bilgisayar kontrollü elektron demet ya da lazer litografi sistemine aktarılır. Maske malzemesi olarak genellikle üzeri krom (Cr) kaplı soda-lime ya da kuvarz kullanılır. Maske malzemesine karar verilirken, kullanılan fotolitografi ışık kaynağının dalgaboyu ve alttaşın ısı genleşme katsayısı göz önünde bulundurulur. Soda-lime cam, 350 nm'den küçük dalgaboylarını güçlü bir şekilde soğurduğu için daha küçük dalgaboylu ışık kaynağı kullanılan sistemlerde kuvarz kullanılır. Soda-lime camın, ısı genleşme katsayısı kuvarztan daha büyüktür; 5 inç büyüklük için her 1 °C sıcaklık farkında, 1-2 µm değişim olur. Ancak kuvarz ile kıyaslandığında daha ekonomiktir [14].

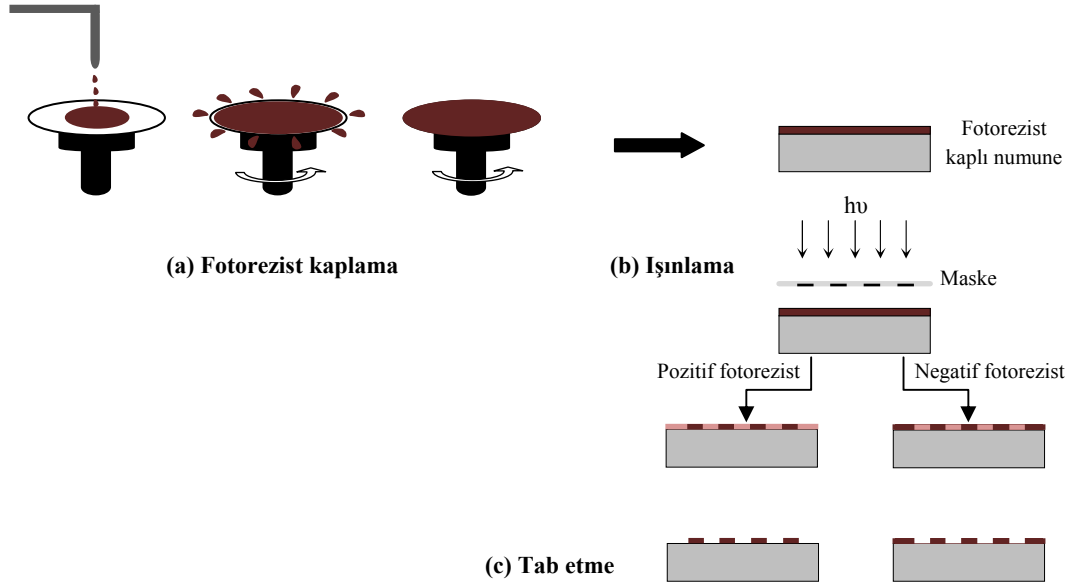
Fotorezist UV ışığa duyarlı bir malzemedir [11]. Yüksek enerjili ışığa olan bu duyarlılıktan dolayı fotolitografi odası fotorezist için zararlı olmayan sarı ışıkla aydınlatılır [3, 15]. İki çeşit fotorezist vardır: Negatif ve pozitif fotorezist. Negatif fotorezistin ışığı gören yerleri, fotokimyasal tepkimeyle sertleşir ve çözelti içinde ışığı görmeyen yerleri çözünür. Bunun sonucunda, tasarım görüntüsünün tam tersi numune üzerine aktarılır. Pozitif fotorezistte ise ışığı gören yerler çözelti içinde çözünür ve görmeyen yerler numune üzerinde kalır. Böylece, tasarım görüntüsünün aynısı numune üzerine çıkarılır. Aygıt modelinin eksiksiz olarak aktarımını sağlamak için fotorezistin çözünürlüğünün iyi olması,

aşındırmaya karşı yüksek dirence, yüzeye homojen ve güçlü olarak tutunma özelliğine sahip olması gerekir. Aşındırmaya karşı direnci düşükse, aşındırma işleminde özellikle derinlik mesafesinin belirlenememesi sorunu yaşanır. Yüksek çözünürlük için fotorezist daha ince bir tabaka olarak kaplanır ancak kalınlık ne kadar ince olursa aşındırmaya karşı direnci o kadar düşer. Birbirine ters düşen bu iki koşuldan dolayı, uygulanan işleme göre biri tercih edilir. Aynı zamanda fotorezistin, numune üzerine kaplanırken kullanılan döndürme hızı, sonrasındaki ısıtma sıcaklığı ve ışınlama akısına göre dayanıklılığı değişir [11].

Fotolitografi işlemi genel olarak sırasıyla, alttaş temizleme, ön ısıtma, fotorezist kaplama, hafif ısıtma, hizalama-ışınlama, tab etme, mikroskop altında inceleme ve sert ısıtma aşamalarını kapsar (Şekil 2.9). Fotolitografi işlemine başlamadan önce numune yüzeyinin temizliği önemlidir. Numune üzerindeki parçacıklar, fotorezistin homojen kaplanmamasına ve yüzeye sağlam tutunmama probleminin neden olabilir. “Ön ısıtma”, numune yüzeyi üzerindeki nemi kaldırmak için uygulanır ve fotorezistin yüzeye daha iyi tutunması için gereklidir. Eğer fotorezist yüzeye sağlam tutunmazsa sonraki aşındırma süreçlerinde fotorezist altından yatay olarak aşınma gözlemlenebilir [3]. Fotorezist kaplama sırasında eğer numune hala sıcaksa, fotorezistin buharlaşmasına sebep olur ve çözücü oranı kaybolur. Bu sıcaklık farkı, fotorezistin akışmazlığına (viscosity) etki eder, dolayısıyla kaplama sırasında fotorezist kalınlığını ve homojen dağılımını da etkiler. Bu yüzden, fotorezist kaplamadan önce ısıtma sonrası numunenin uygun sıcaklığa gelmesi için beklenmesi sağlıklıdır.

Yüzeyi fotorezist kaplandıktan sonra numune tekrar ısıtılır; bu işleme “hafif ısıtma” denir. Fotorezistin sıvı fazdan katı faza geçmesini ve numune üzerine daha iyi yapışmasını sağlar. Bu ısıtmadan sonra fotorezist kalınlığı yaklaşık %10-20 arası azalır. Hafif ısıtma sıcaklığı ve zamanı, fotorezist tipine (pozitif ya da negatif) bağlı ve aygıt üretim işlemine özgü olarak değişebilir. Sıcaklık çok düşük ya da ısıtma süresi çok az olduğunda, yüzeye tutunma probleminden dolayı bir sonraki adımda fotorezist, numune yüzeyinden ayrılabilir. Gereğinden fazla ısıtma, fotorezistin erkenden polimerleşmesine neden olur ve ışığa hassasiyeti azalır. Hafif ısıtmadan sonra numunenin oda sıcaklığına kadar soğuması beklenir. Hizalama ve ışınlama sırasında numunenin sabit

sıcaklıkta olması önemlidir: Isıl genleşme etkisinden dolayı 1 °C'lık sıcaklık değişimi, yukarıda bahsedildiği gibi numune yüzeyine aktarılan desenin boyutunda mikron mertebesinde değişime neden olabilir.



Şekil 2.9. Genel fotolitografi süreci, (a) fotorezist kaplama, (b) ışınlama ve (c) tab etme

“Tab etme” işlemi, fotolitografiden sonra fotorezist kaplı numune üzerindeki istenmeyen kısımların kaldırılmasıdır. Tab edilirken pozitif fotorezist için ışık gören, negatif fotorezist için ışık görmeyen yerler kalkar. Farklı fotorezistler için tab etme çözeltileri değişir.

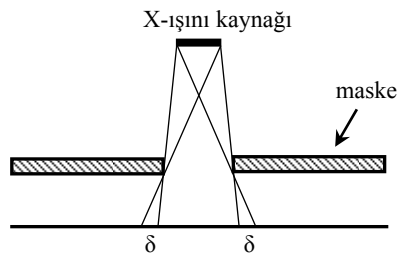
Tab etme işleminden sonra “sert ısıtma” işlemi gelir. Sert ısıtma, fotorezisti sağlamlaştırır ve aşınmaya karşı direncini artırır. Fotorezist çeşidine göre sıcaklık ve süresi farklılık gösterir. Aynı tip fotorezist için sert ısıtma sıcaklığı, hafif ısıtma sıcaklığından daha yüksektir. Normalden daha az süre ya da daha düşük sıcaklıkta ısıtma, fotorezistin fazla aşınmasına, tersi durumda ise fotorezist sınırları dışına çıkarak çözünürlüğün daha kötü olmasına neden olabilir [11].

2.2.3. Diğer litografi teknikleri

Fotolitografi yaygın olarak kullanılan temel bir teknik olmakla birlikte, DUV kaynakla bile çözünürlük $0,5 \mu\text{m}$ civarındadır. Bu nedenle, daha küçük boyutlarda yapıların üretilmesi için başka litografi teknikleri geliştirilmiştir.

“Elektron demet litografi”, fotolitografide kullanılan maskelerin yapımında ve aygıt tasarımının doğrudan numune üzerine çıkarılmasında kullanılan bir tekniktir. Optik litografiye göre en önemli üstünlüğü maske kullanılmamasıdır. Böylece, maske kusurlarının numune yüzeyine aktarımı engellenir. Olumsuzlukları ise karmaşık bir donanımına sahip, maliyetinin yüksek ve baskı zamanının uzun olmasıdır.

“X-ışını litografi”de, $2-10 \text{ \AA}$ dalgaboyu aralığındaki X-ışınları kullanılır. Angstrom mertebesinde olan küçük dalgaboyları, litografi için kırınım etkisinin hemen hemen yok olmasını sağlar ve numuneden geri saçılım ya da yansımalar ihmal edilecek boyuta iner. Ayrıca çoğu parçacıklar X-ışınlarına geçirgendir, bu yüzden numune ya da maske üzerindeki parçacıklar ışınlama sürecini etkilemezler [9]. X-ışınları, paralel olarak hizalanamadığından ve odaklanamadığından nokta kaynak davranışı göstermez. Bu nedenle, Şekil 2.10’da gösterildiği gibi bir gölge etkisi ortaya çıkar. Bu etki, kaynağın boyutuna ve maske ile numune arasındaki uzaklığa bağlıdır. Çözünürlüğü sınırlayan bu etki, optik litografiye göre daha yüksek olmasına rağmen, elektron demet litografiye göre daha düşüktür [9].



Şekil 2.10. Odaklanamayan X-ışınlarından kaynaklı gölge etkisi

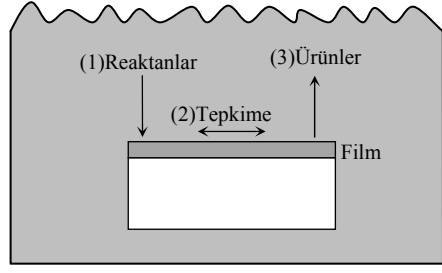
Diğer tekniklere göre daha yeni olan “iyon demet litografi”, elektron demet litografi sistemi ile benzerdir. Elektronlar yerine iyonlar kullanılır.

İyonların elektronlara göre kütleleri daha ağır olduğundan rezist içerisinde ve numuneden saçılmaları daha azdır [3, 9]. Düşük enerjili ve az sayıda ikincil elektronlar üretildiğinden, saçılma etkisinden daha çok demet çapı tarafından çözünürlüğü sınırlanır. İyonlar, elektronlara göre reziste daha çok enerji aktarır ve sonucunda baskı süresini azaltır. Bir olumsuzluğu, rezist altında kalan numunenin iyon demetinden etkilenmesidir.

2.2.4. Islak aşındırma

Islak aşındırma, sıvı kimyasallar (ya da aşındırıcılar) kullanılarak yüzeydeki katmanların kaldırılması işlemidir. Yarıiletkenler, yalıtkanlar ve metal filmler için kullanılabilir bir yöntemdir. Epitaksiyel büyütme öncesi, kirli yüzeylerin temizlenmesi, doğal oksit yüzeyinin kaldırılması ya da aygıt üretimi sürecinde masatepe yapılarının oluşturması amacıyla kullanılır. Her uygulama öncesi düşünülmesi gereken anahtar etmenler hız, homojenlik, seçicilik, CD kontrolü, aşınma profili ve yüzey hasarıdır [16]. Islak aşındırmanın en olumlu özelliği, yüzeyde hemen hemen hiç elektronik hasara sebep olmamasıdır. Birçok malzemeye uygulanabilir, kimyasal seçiciliği yüksek, istenildiğinde kristalografik aşındırma gerçekleştirilebilir ve düşük maliyetli bir yöntemdir.

Islak aşındırma, yüzeyde meydana gelen kimyasal tepkimeler ile gerçekleşir. Difüzyon yolu ile aktarılan aşındırıcılar, yüzey ile kimyasal tepkimeye girerler ve sonucunda çıkan ürünler yüzeyden uzaklaşır (Şekil 2.11). Çözünme oranını iki mekanizma sınırlar. İlk mekanizma, aşındırma hızının, yüzeye ulaşabilen reaktanların hızıyla ya da yüzeyden çıkan ürünlerin uzaklaşma hızıyla kontrol edildiği “difüzyon sınırlı” aşındırmadır. Aşındırıcı türlerinin difüzyon katsayıları çok küçük olduğundan ($\sim 10^{-9}$ m²/s) bu doğal bir oluşumdur [9]. İkincisi, yüzeyde meydana gelen kimyasal tepkime hızının kontrol edilmesiyle aşındırma hızı sınırlanabilir ve “tepkime hız sınırlı” aşındırma olarak adlandırılır. Sınırlayıcı mekanizma, kimyasalların bileşiminin ve sıcaklığın bir fonksiyonudur [3, 9].

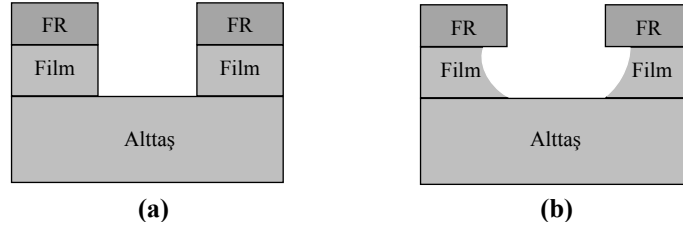


Şekil 2.11. Temel ıslak aşındırma mekanizması

Aşındırma hızı, aşındırma sürecinde yüzeydeki malzemenin ne kadar hızlı kaldırıldığının bir ölçüsüdür. Aşınma öncesi ile aşınma sonrası kalınlık farkının, aşınma süresine bölünmesi ile hesaplanır.

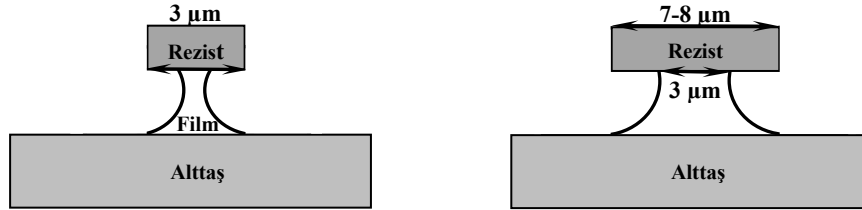
Aşındırma sonrası aygıt üretim basamaklarını etkileyebilecek önemli özelliklerden biri profildir. Özel uygulamalar dışında tercih edilen, hiç CD kaybı olmadan fotorezistin yanal yüzeyinden aşağıya doğru dik bir şekilde aşınarak oluşan anizotropik profildir (Şekil 12.2a). Aşındırma profili, taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscopy, SEM) kullanarak gözlenebilir. Şekil 2.12b’de gösterildiği gibi genellikle fotorezist altından yanal olarak aşınmaya ve boyut kaybına sebep olan izotropik profil, yanal aşınma oranının neredeyse dik aşınma derinliğine yaklaşmasından kaynaklanır.

Genellikle aşındırma sürecinde üç tür malzemeyle ilgilenilir: fotorezist, aşındırılacak olan film ve alttaş. Aynı yapıdaki farklı malzemelerin aşınma oranları arasındaki farklılık, “seçicilik” olarak adlandırılır. Seçicilik oranı, farklı malzemeler arasındaki aşınma hızlarının oranıdır [11]. Bu oran, farklı tabakaların seçiciliğinin olup olmadığını belirtmektedir. Şöyle ki: birbirine yakın aşındırma hızlarına sahip farklı katmanlar seçicilik olmadan kaldırılabilirken farklı aşınma hızlarına (yüksek seçicilik oranına) sahip katmanlar için seçicilik söz konusudur. Böylece, katmanlar arasına yerleştirilecek yüksek seçicilik oranına sahip bir katmanla aşındırma işlemi o katmanda durdurulabilir. “Öncelikli aşındırma” ise bazı kristalografik düzlemlerin diğerlerine tercihen, aşınma farkının olmasıdır. Böylece, en yavaş aşınan kristalografik düzlemler profilin son halini belirler ve bu farklılıktan dolayı aşınma profili anizotropik olur [17].



Şekil 2.12. (a) Anizotropik aşındırma, (b) izotropik aşındırma

Dik bir aşınma profili elde etmek çok zordur ve genelde aşınmalar izotropik eğilimlidir. Bu durumda sınırlı boyut kontrolü vardır. 3 μm 'den küçük boyutlarda çalışıldığında, izotropik aşınmadan dolayı aşındırma süreci zorlaşır (Şekil 2.13) [11].



Şekil 2.13. Islak aşındırma en küçük boyut profili

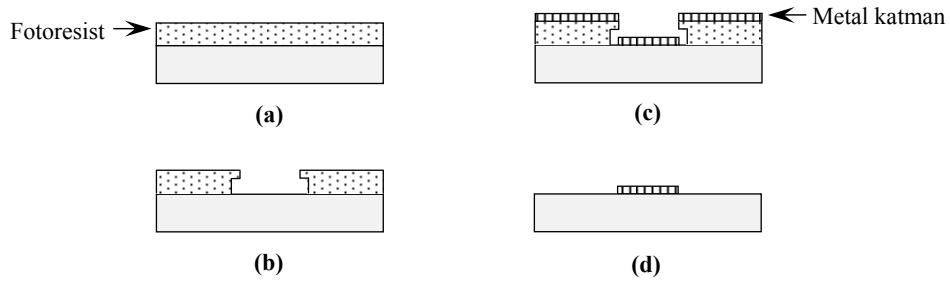
2.2.5. Kuru aşındırma

Kuru aşındırma tekniklerinde, plazma ya da iyon demeti yoluyla malzemenin aşındırılması sağlanır. Anizotropik aşındırma profili elde edilebilmesi ve boyut kaybının engellenmesiyle, daha küçük yapılar ile çalışılabilir. Aşındırma sürecinde gazlar kullanıldığı için kimyasal kirlilik daha azdır. Aşındırma değişkenlerinin karmaşık olması, ıslak aşındırma gibi neredeyse her malzeme için kullanılamaması bu yöntemin olumsuzlukları arasındadır. Kuru aşındırmada başlıca, plazma aşındırma, reaktif iyon aşındırma (reactive ion etching, RIE) ve iyon freze aşındırmayı içeren farklı teknikler kullanılır [9].

2.2.6. Metal kaplama

Bu süreçte, öncelikle litografi ile malzemenin yüzeyinde metal kaplanacak yerlerin tanımlaması yapılır. Tüm yüzey metal kaplandıktan sonra numune, fotorezisti çözen bir çözücü içine konularak metal tabakasının altındaki fotorezistin çözünmesi sağlanır ve geriye sadece doğrudan numune üzerine kaplanan metal tabaka kalır (Şekil 2.14).

Metal kaplanması istenen yerlerin dışındaki metal katmanın kaldırılabilmesi için metal kaplama sırasında sıcaklığın çok yüksek olmaması (fotorezistin yanmaması için) ve metal katmanın yüzeye tutunmasının sağlam olması gereklidir.

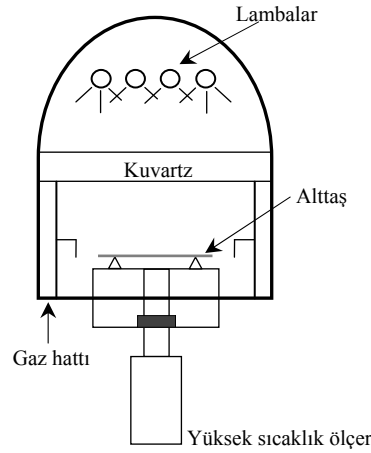


Şekil 2.14. Metal kaplama süreci, (a) numunenin üzeri fotorezist ile kaplanır, (b) fotolitografi sonrasında tab edilir, (c) yüzey metal ile kaplanır (d) fotorezist çözücü içine konularak üzeri metal kaplı fotorezist tabakası kaldırılır

2.2.7. Çabuk ısıtma işlemi

Çabuk ısıtma işlemi (rapid thermal processing, RTP) cihazı; ısı yayan enerji kaynağı, işlem haznesi, sıcaklık ölçümü, gaz paneli, su taşıma sistemi ve kontrol birimi donanımından oluşur [18]. Genelde kullanılan enerji kaynağı, tungsten filamanları ve ark lambalarıdır. İşlem haznesi silisyum karbür, paslanmaz çelik ya da alüminyumdan oluşur ve kuvarz pencerelere sahiptir (Şekil 2.15). Bu sistemlerde sıcaklık ölçümü için iki yöntem kullanılır. Kesin bir yöntem olan alttaşa temas halinde olan termocuift (thermocouple) ve alttaşın arka kısmına doğru yönlendirilen temas gerektirmeyen optiksel bir yöntem olan yüksek sıcaklık

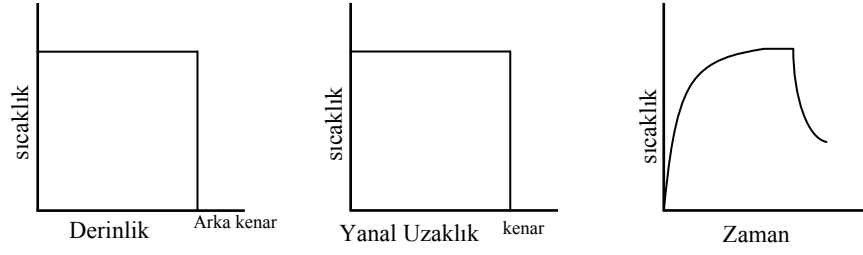
ölçerdir (pyrometer). Sıcaklığın düzgün dağılımı, ısıtma kaynağının optiksel özellikleri, konumu, şekli ve boyutu tarafından etkilenir. Aynı zamanda ana haznenin şekli ve boyutu, pencere ve duvarın optiksel özellikleri, işlem haznesi içindeki örneğin konumu gibi değişkenler de sıcaklığın düzgün dağılımını etkiler [18].



Şekil 2.15. RTP şematik çizim

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan ve bizim de bu çalışmada kullandığımız çabuk ısıtma işlemi, eşsıcaklık işlemidir (Şekil 2.16). Enerji kaynağı, numunenin bulunduğu hacim içinde aynı sıcaklık değerini sağlayacak şekilde tasarlanır. Örnekler, çevreden yalıtılmış bir ortamda (yatay ve dikey olarak) aynı sıcaklık dağılımını hissederler. Yaklaşık 300 °C/s'ye kadar ısınma oranları çok kısa sürede tüm örneği gerekli tavlama sıcaklığına çıkarmak için kullanılır ve örnek bu sıcaklıkta belli bir süre tutulur. Bu işlem için genellikle tepe noktası sıcaklık değerleri 400-1250 °C arasındadır [19].

RTP ile farklı uygulamalar gerçekleştirilebilir: çabuk ısıtma tavlama (RTA), çabuk ısıtma temizleme (RTC), çabuk ısıtma kimyasal buhar depolama (RTCVD), çabuk ısıtma oksitleme (RTO) ve çabuk ısıtma nitrileme (RTN) bunlardan bazılarıdır [20].



Şekil 2.16. RTP’de eşsıcaklık kipi

RTP’nin, tipik fırın uygulamalarına göre en önemli farkı, örneklerin bulunduğu ortam ile ısı denge durumunda olmamalarıdır. Çoğu uygulama için RTP’nin geleneksel fırınlara göre en büyük üstünlüğü, toplam işlem süresinin çok azalmış olmasıdır.

2.2.8. Güvenlik

Aygıt üretimi işleminde özellikle tehlikeli kimyasallarla çalışıldığından olası kazalarda zararın en aza indirilebilmesi için güvenlik önlemleri almak çok önemlidir. İlk olarak hangi kimyasallarla çalışılıyorsa ona ait güvenlik veri föyü okunmalıdır. Bir kaza durumunda neler yapılması gerektiği mutlaka bilinmeli ve gerekli teçhizat laboratuvarlarda hazır bulunmalıdır. Sıvı kimyasallarla çalışıldığı için çözeltilerin buharı solunmamalı, deriye-göze değmemesine özen gösterilmelidir. Örneğin, hidroflorik (Hydrofluoric, HF) asit anestezik özelliğinden dolayı en tehlikeli asittir ve deriye temas ettiğinde diğer asitlere göre daha hızlı etki etmektedir (Şekil 2.17). Bu nedenle HF ile çalışırken bu asite dayanıklı özel koruyucu önlük-eldiven giyilmeli ve gözlerin korunması için gözlük takılmalıdır.

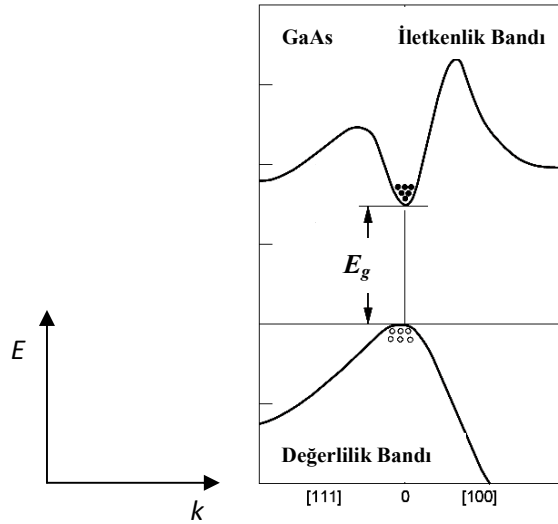


Şekil 2.17. 3. derece HF asit yanığı

Çalışılan ortamda, zehirli gazların insan sağığı için kritik seviyelerde olup olmadığının ölçülmesi de güvenlik önlemleri içerisinde yer almalıdır. Bunun için, çalışılan kimyasallara ve ortamda bulunabilecek zehirli gazlara göre temin edilecek gaz algılayıcı cihazlarla ortamın sağık koşulları sürekli gözlenmelidir. Temin edilecek cihazların, tehlikenin gerçekleşmesi durumunda, hem sesli hem de görüntülü uyarı özelliğinin bulunması çalışılan ortamdaki kişinin kolay farkedilir şekilde uyarılması açısından önemlidir. Bunun dışında ortamdaki oksijen yeterlilik seviyesi de sürekli gözetim altında tutulması gereken önemli bir güvenlik önlemidir.

3. GaAs, ISLAK AŞINDIRMA MEKANİZMASI ve ÇÖZELTİLERİ

GaAs, üç değerlikli galyum (Ga) elementi ile beş değerlikli arsenik (As) elementinin birleşiminden oluşan, doğrudan bant aralığına (E_g) sahip bir yarıiletkenidir. Yani, iletkenlik bandının (E_c) en küçük enerji değeri ile değerlilik bandının (E_v) en büyük enerji değeri aynı kristal momentumuna sahiptir (Şekil 3.1). Bu durumda, elektron-boşluk çiftinin oluşması ve yeniden birleşmesi sırasında enerji (E) ve momentumun (k) korunumu için sadece enerjide değişim olması yeterlidir. Elektronlar, foton yayarak ya da soğurarak bu geçişlerin gerçekleşmesini sağlar.



Şekil 3.1. GaAs için enerji bant şeması [9]

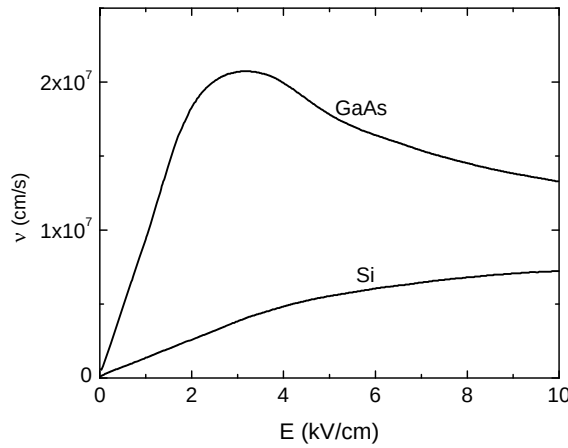
Eğer elektronlar yeterli enerjiye sahip ve kristal örgü ile saçılma yoluyla etkileşiyorsa, iletkenlik bandının diğer en küçük enerji değerlerine geçiş yapabilirler. Bu olay önemlidir çünkü kristalde elektrik alan (E) arttıkça belli bir kritik değerden sonra elektronun hızındaki azalma durumunu açıklar. Daha yüksek vadilerdeki elektronlar, diğerlerine oranla daha büyük kütleye sahip gibi davranırlar; dolayısıyla, böyle bir geçişten sonra hızları düşer (Şekil 3.2). Katkılama veya kusurlar söz konusu olduğunda bant aralığında var olanlara ek başka enerji seviyeleri oluşur. Şekil 3.3'te görüldüğü üzere kusurlardan ya da

katkılamadan dolayı oluşan enerji seviyeleri, bant aralığındaki konumuna göre “sığ” ve “derin” enerji seviyeleri olarak adlandırılır [9].

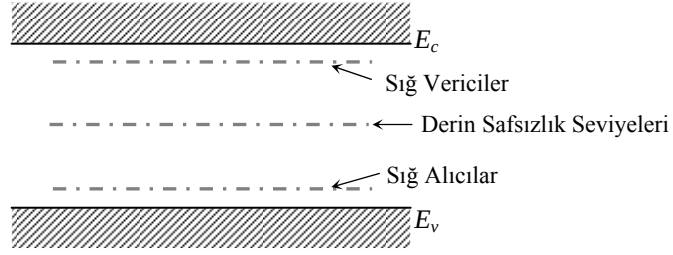
Elektrik alan altındaki bir yarıiletken içindeki taşıyıcılar, elektrik alan kuvvetinin fonksiyonu olan bir hızda sürüklenirler. Düşük elektrik alan altında bu ilişki doğrusaldır ve bu orantının sabiti “mobilité” olarak adlandırılır:

$$v = \mu E \quad (3.1)$$

burada v elektron sürüklenme hızı (cm/s), E elektrik alan (V/cm) ve μ birimi $\text{cm}^2/\text{V.s}$ olan mobilitedir. Bu kararlı hız, iki zıt kuvvetin sonucudur: Hızı artırmaya eğilimli olan elektrik alan kuvveti ve kristal örgüde elektronların hızını sınırlayan elektron saçılmalarıdır. Şekil 3.2’den de görüldüğü üzere elektrik alan arttıkça doğrusal ilişki devam etmez. Elektrik alan şiddetinin $\sim 3,5 \text{ kV/cm}$ ’nin üzerinde olduğu zaman GaAs içindeki elektronların sürüklenme hızlarının ve dolayısıyla mobilitelerinin düşmesinin sebebi, yukarıda bahsedilen elektronların yüksek vadilere geçişleridir. Si’da görünmeyen GaAs’ın bu özelliği, günümüzde farklı uygulamalarda kullanılmaktadır [9]. Doğrusal kısımda ise elektronun mobilitesi sıcaklığın ve safsızlık konsantrasyonun bir fonksiyonudur.



Şekil 3.2. Elektrik alanın fonksiyonu olarak katkısız GaAs ve Si içinde elektronların sürüklenme hızı [9]



Şekil 3.3. GaAs enerji bant seviyeleri

Si, günümüzde elektronik teknolojisinde en çok kullanılan element olma özelliğini korumaktadır. Bunun nedeni, üretim aşamalarının çok iyi bilinmesi ve üretiminin ucuz olmasıdır. Ancak, Si dolaylı bant aralığına sahip bir yarıiletken olmasından dolayı (Çizelge 3.1), optik uygulamalar için uygun değildir. Bu boşluğu doldurabilecek doğrudan bant aralıklı yarıiletkenlerin başında GaAs gelmektedir. İstenildiği zaman yüksek özdirençli GaAs üretilebilmesi de (Si tabanlı aygıtlarda SiO_2 kullanılmaktadır) bu malzemenin günümüz elektronik uygulamalarında kullanılabilmesini sağlamaktadır [9]. Si'ye kıyasla yüksek mobilitelere sahip olması GaAs'i, daha hızlı ve az güç tüketen sistemlerde kullanılabilirliği bakımından avantajlı kılmaktadır.

Çizelge 3.1. 300 K'de Si, SiO_2 ve GaAs özelliklerinin karşılaştırılması [21, 22]

	Si	SiO_2	GaAs
Kristal yapı	Elmas	Amorf	Çinko sülfür
Bant aralığı	Dolaylı	Doğrudan	Doğrudan
Bant aralığı enerjisi (eV)	1,12	9,00	1,42
Elektron sürüklenme mobilitesi ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	≤ 1.400		≤ 8.500
Boşluk sürüklenme mobilitesi ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	≤ 450		≤ 400
Özdirenç ($\Omega \text{ cm}$)	$2,3 \times 10^5$	$10^{14} - 10^{16}$	$3,3 \times 10^8$

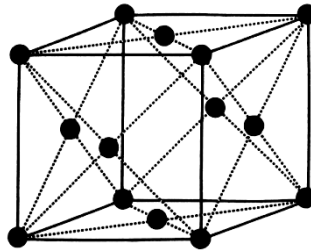
3.1. GaAs Kristalografi

GaAs kristali, her biri yüzey merkezli kübik (fcc) yapı olan iki alt örgünün birleşimidir. Şekil 3.4'te gösterildiği gibi fcc yapısı, küpün her köşesinde ve her yüzünün merkezinde atomlar içerir. Ga ve As atomları, bu yapılandırmada dizilirler. “Çinko Sülfür” yapısı olarak adlandırılan, As atomlarını içeren fcc örgüsü ile [111] doğrultusunda birim hücrenin dörtte biri kadar yer değiştirmiş Ga atomlarını içeren fcc örgüsünün birleşimidir. Birim hücresi küp olan GaAs için Ga ve As atomlarının dizilişi Şekil 3.5a'da gösterilmiştir. Her Ga atomu dört tane komşu As ve her As atomu dört tane komşu Ga atomuna sahiptir. GaAs örgü sabitini a ile ifade edersek, bu komşular arasındaki bağ uzunluğu $r_o = 3a/4$ kadardır ve bu bağlar $109,47^\circ$ 'lik açılarla dört üçgen yüzlü (tetrahedral) bağ ile birbirinden ayrılır. 300 K'de, katkılanmamış GaAs'ın örgü sabiti ve yoğunluğu,

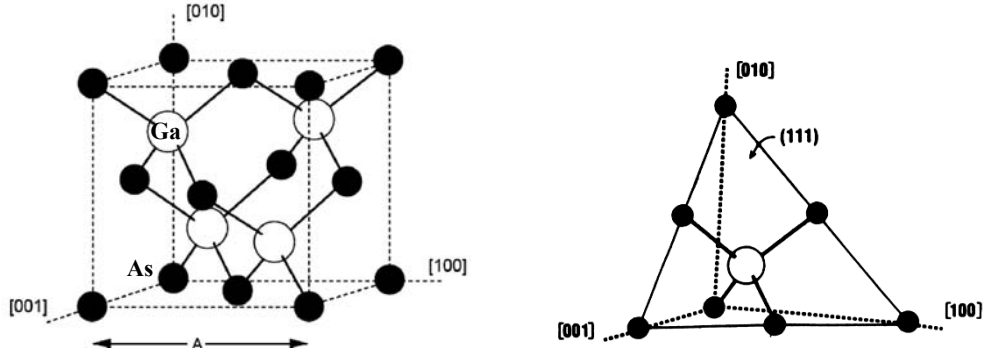
$$a = 5,65325 \pm 0,00002 \text{ Å} \quad (3.2)$$

$$d = 5,3174 \pm 0.0026 \text{ g/cm}^3 \quad (3.3)$$

değerlerine eşittir. GaAs katkılı olduğunda örgü parametresi %0,02 kadar değişebilir [9]. GaAs kristal yapı içerisinde As ve Ga atomlarının 1:1 oranından farklı olması örgü parametresini etkiler. As atomunun fazla olduğu durumlarda örgü parametresi azalırken, Ga atomunun fazla olduğu durumlarda artar. Ancak, bu değişimler %0,02 geçmeyecek kadardır.



Şekil 3.4. Yüzey merkezli kübik (fcc) yapı

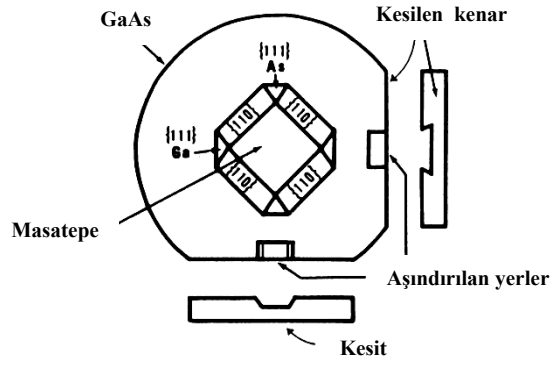


Şekil 3.5. (a) GaAs kristalografik yapısı (b) GaAs birim hücresinin (111) düzleminin kesiti [9]

Kristalin analizini yapmak için örgü düzlemleri ve doğrultularının bilinmesi gerekir. Bunun için “Miller indisleri” kullanılır. Bu indisler yazım şekillerine göre farklı anlamlar ifade eder:

- i. $[]$ doğrultuyu ifade eder: $[111]$, $[100]$ yönü gibi
- ii. $()$ düzlemi ifade eder: (101) , (110) düzlemi gibi
- iii. $< >$ simetri yönünden birbirine eşdeğer olan doğrultu ailesini ifade eder:
Örneğin $<110>$ ailesi, $[110]$, $[101]$, $[011]$ doğrultularını içerir
- iv. $\{ \}$ simetri yönünden birbirine eşdeğer olan düzlemler ailesini ifade eder.

GaAs aygıt üretiminde en çok kullanılan (100) yönelimli alttaşlardır. Şekil 3.6’da (100) GaAs alttaş üzerinde oluşturulan masatepe yapısı ve kristal düzlemleri görülmektedir. Düzlemler incelendiğinde $\{111\}$ B yüzeyinin, $\{111\}$ A yüzeyinden daha küçük olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu $\{111\}$ A ailesi düzlemlerinin daha yavaş aşınmasından kaynaklanmaktadır [9]. $\{111\}$ düzlem ailesi, Ga ya da As olacak şekilde tek tip atom içerir (Şekil 3.5b). Düzlemlerin yanına konan A ve B harfleri sırasıyla Ga ve As düzlemini temsil eder. Böylece, sekiz düzlem içeren $\{111\}$ ailesi, dört tanesi sadece Ga atomlarını içeren $\{111\}$ A ve diğer dört tanesi sadece As atomları içeren $\{111\}$ B ailesi olarak ikiye ayrılır. Şekil 3.7b’de ise GaAs için farklı A ve B yönleri gösterilmiştir. $[111]$, $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$, $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ ve $[1\bar{1}\bar{1}]$ doğrultuları A yani Ga tipidir. $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$, $[11\bar{1}]$, $[1\bar{1}1]$ ve $[\bar{1}11]$ doğrultuları B yani As tipidir [17].

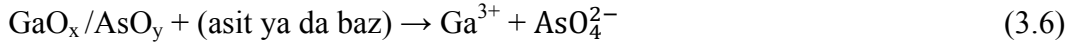


Şekil 3.6. GaAs yüzeyinde oluşturulan masatepe yapısı ve kristal yönelimler [9]

GaAs, farklı değerlik sayısına sahip iki atomdan oluştuğundan kutupludur (polar). Bunun sonucu olarak, $\langle 100 \rangle$ ve $\langle 110 \rangle$ doğrultu aileleri hariç diğer tüm eksenler doğal olarak kutupludur. Bu durum en açık olarak (111) düzleminden görülebilir. Şekil 3.7a'dan yararlanarak, (111) düzlemlerini ele alalım: [111] doğrultusuna dik olan, As_{21-26} (alt indisler birim hücredeki As ya da Ga atomlarının konumlarını temsil eder) atomlarını içeren As düzlemi, Ga_{21-23} atomlarını içeren Ga düzlemi, As_{11-13} atomlarını içeren As düzlemi şeklinde devam eder. Her (111)B düzlemi en yakın komşu Ga düzleminden $0,82 \text{ \AA}$ kadar mesafeyle birbirinden ayrılır. Böylece, üç As atomu (As_{24-26}), Ga_{23} atomuna geniş açı yapan üç iyonik-kovalent bağ ile bağlanır. As_{13} atomu ise Ga_{23} atomuyla $2,45 \text{ \AA}$ uzaklığında dört yüzlü karakteristiğinde tek bağ yapar. Grup III ve grup V elementi arasında üç bağ ile birbirine tutunan en yakın mesafeli iki atomik düzlem, kendi düzlemine dik, zayıf bir bağla bağlanmaktadır. Şöyle ki, üç As atomu (As_{24-26}), Ga_{23} atomuna üç iyonik-kovalent bağ ile bağlıyken sonraki As_{13} , Ga_{23} ile karakteristik dört yüzlü yapısında tek bir bağ ile bağlıdır. Kristal $\langle 111 \rangle$ yönünde kırılma ya da aşındırmaya maruz kaldığında, açıkta olan güçlü bağların kopması kaçınılmaz olur. Diğer bir deyişle, tek ve zayıf olan bağ kırılacak ve güçlü üç bağ yapan düzlemler açıkta kalacaktır.

şeklinde verilir. “Oksidan”, oksitleme etmeninin konsantrasyonunu temsil eder. “m”, Ga ve As atomlarının oksitlenmesini sağlayan etmen moleküllerin sayısına bağlıdır. “{GaAs}”, açığa çıkan Ga ve As atomlarının etkili yüzey konsantrasyonudur. “ k_{ox} ” tepkime faktörü, “k” Boltzmann sabiti, “T” Kelvin cinsinden sıcaklık ve “ E_{ox}^* ”, oksitleme tepkimesi için aktivasyon enerjisidir.

Oksitleme aşamasından sonra gelen ikinci adım ise oksit tabakasının çözünmesinin sağlanmasıdır. Oksit tabakasının çözünmesi, genelde profili kontrol eder. Yüzey oksidine, kullanılan asit ya da baz hücum eder ve çözünme sonucu Ga^{3+} ve AsO_4^{2-} iyonları çözeltiye verilir.



Bu basamak, aşındırmanın difüzyon limitli ya da tepkime hız limitli olacağını belirleyen basamaktır. Aşındırma hızı ise,

$$Hız_{aşındırma} = k_{diss}[\text{asit ya da baz}]^n \{\text{oksit}\} \exp(-E_{diss}^*/kT) \quad (3.7)$$

ile ifade edilir. “[asit ya da baz]ⁿ”, asit ya da bazın konsantrasyonunu belirtir ve “n”, çözünme tepkimesinde açığa çıkan tüm H^+ veya OH^- sayılarına bağlıdır. “{oksit}”, çözünmede en yavaş olan oksit türlerinin etkili konsantrasyonunu temsil eder. “ k_{diss} ”, tepkime faktörü ve “ E_{diss}^* ”, çözünme için gerekli aktivasyon enerjisidir.

Yüzeyin başlangıçta oksitlenmesi için gereken aktivasyon enerjisi, malzemenin katkılama tipine ve kristalografik yüzeyine göre hissedilir şekilde değişir. Bu nedenle, örneklerin bu özellikleri göz önüne alınarak aşındırma hızının bulunması daha sağlıklı sonuçların elde edilebilmesi için önemlidir. Aşındırma çözeltisi içinde yeteri kadar oksitleyici olduğu durumda çözünme işleminin hızı, asit ya da bazların toplamıyla belirleniyorsa “difüzyon sınırlı”, çözünme tepkimesinin aktivasyon enerjisi tarafından belirleniyorsa “tepkime hız sınırlı” olarak adlandırılır. Tepkimenin difüzyon sınırlı olması için,

- aşındırma işleminde aktivasyon enerjisi 5 kcal/mol'den daha az,
- aşındırma çözeltisindeki reaktanların yüksek konsantrasyonda,

- çözelti yüksek akışmazlıklı

olmalıdır. Çözünmenin tepkime hız sınırlı olması için ise,

- aşındırma işleminde aktivasyon enerjisi 10 kcal/mol'den daha çok,
- aşındırma çözeltisindeki reaktanlar düşük konsantrasyonda

olmalıdır. Bunun yanında, çözeltiyi seyrelterek daha yavaş aşındırma hızı sağlamakla birlikte tepkime, difüzyon sınırlı iken tepkime hız sınırlı bir aşındırmaya çevrilebilir. Bu değişim, standart olarak kullanılan reçetelere uygulandığında beklenen sonuçlardan farklı tepkiler görülebileceğinden dikkatli olunmalıdır. Çizelge 3.2'de difüzyon sınırlı ve tepkime hız sınırlı tepkimelerin değişkenlere göre özeti sunulmuştur.

Çizelge 3.2. Difüzyon sınırlı ve tepkime hız sınırlı ıslak aşındırma mekanizmalarının temel özellikleri [17]

Değişken	Difüzyon sınırlı	Tepkime hız sınırlı
Zamana bağlılık	Aşınma hızı zamanın karekökü ile orantılıdır	Aşınma hızı aşındırma zamanı ile doğru orantılıdır
Karıştırmaya bağlılık	Aşınma hızında artış gözlenir	Aşınma hızında değişim gözlenmez
Sıcaklığa bağlılık	Düşük aktivasyon enerjili olduğundan sıcaklığa duyarlı değildir	Yüksek aktivasyon enerjili olduğundan sıcaklığa daha duyarlıdır
Anizotropik aşındırma	Kristal yönelime göre daha izotropik bir aşındırmadır	Düzlemler ailesinin aşınma hızı değişimi $\{111\}_{As} > \{100\} > \{111\}_{Ga}$ şeklindedir
Rezist kenarı	Rezist kaplı kısımların yüzeyindeki aşındırıcıların difüzyonu, bu sınırlarda daha fazla aşındırmaya neden olur	Bu etki gözlenmez
Kimyasal parlatma	Yüzeydeki çıkıntılar difüzyon akımına daha çok maruz kaldığı için yüzey daha pürüzsüz olur	Yüzey topografisi korunur

Çizelge 3.2. (Devam) Difüzyon sınırlı ve tepkime hız sınırlı ıslak aşındırma mekanizmalarının temel özellikleri [17]

Kalan oksit tabaka kalınlığı ve kompozisyonu	Yüksek aşındırma hızına sahip olanlar yüzeyde ince bir oksit tabakası bırakırken yüksek akışmazlıklı, düşük aşınma hızına sahip olanlar ise daha kalın oksit tabakası bırakır	Düşük aşınma hızına sahip olanlar 40 Å kalınlığından az oksit tabakası bırakır
Katkılama tipi (n ya da p) ve konsantrasyona bağlılık	Etkisi çok küçük	Eğer aşındırma hızı oksitleme sınırlı ise elektron konsantrasyonunun artmasıyla aşınma hızında da artış gözlenir

Çok hızlı aşındırma oranı, malzemenin yüzey kalitesinin düşük olmasına neden olur. Genellikle oksitleme hızı oksidan oranı ile kontrol edilir ve oran arttıkça oksitleme hızı da artar. Ancak çözeltinin H_2O_2 oranı %15'ten fazla olduğunda yüzey pürüzlü olma eğilimdedir. Oluşan oksidin çözülmesi ise pH ile kontrol edilir. pH 7,5'ten büyük olduğunda yüzey pürüzlülüğü artar. Dikkat edilmesi gereken diğer bir husus; kullanılan kimyasaldan bağımsız olarak, hızlı aşındırıcıların yavaş olanlara göre aşındırma zamanlarının ve dolayısıyla aşındırma miktarlarının kontrol edilmesinin daha zor olmasıdır. Genel olarak tercih edilen aşınma hızı aralığı 0,2-0,5 $\mu\text{m/dk}$ 'dır. Aşınma hızı, sıcaklık arttıkça $\exp(-\Delta E/kT)$ ilişkisiyle artmaktadır [17]. Burada T sıcaklık, ΔE ise bağlı aktivasyon enerjisidir. Çoğu aşınma hız değerleri 18-25 °C arasında kaydedilir. Aşındırma işleminde önemli noktalardan birisi, 10 °C'lık sıcaklık artışının, 15 kcal/mol kadar aktivasyon enerjine sahip bir tepkimenin hızını iki katına çıkarmasıdır. Bu nedenle, sıcaklık değişimlerinde, aşındırma derinliğini kontrol etmek çok önemlidir. Aşındırma çözeltilerinin, zamanla konsantrasyon değişiminin sonucu olarak, aşındırma hızı değişebilir. Genelde, artan zamanla birlikte çözelti aynı görüldüğü halde aşındırma hızı azalır. Aşındırma hız değişimleri, çözeltinin karıştırılmasından dolayı sıcaklık değişiminden de kaynaklanabilir.

Aşındırma işlemine başlamadan önce düşünülmesi gereken diğer bir konu ise, yüzeyin kimyasal karakteridir. Tüm III-V yarıiletken yüzeylerinde, maruz kaldıkları atmosfere ve süresine bağlı olarak, kalınlığı değişen doğal bir oksit tabakası oluşur. Oksitlemeye ek olarak geçici organik kalıntılar da olabilir. Doğal oksit, aşındırma çözeltisinden oluşan oksitten farklı şekilde tepkimeye girdiğinden, aşındırma hızının başlangıcında beklenmeyen değişimler ve örnek yüzeyi boyunca homojen olmayan aşındırma gözlemlenebilir. Bazı aşındırıcılara karşı direnci yüksek olan oksit formları oluşturabilen alüminyum (Al) ve antimon (Sb) içeren malzemeler, bu etkiye daha eğilimlidir. Aynı zamanda, aşınma hızı yüksek çözelti, yavaş olanlara göre oksitlenmiş yarıiletken yüzeyinde daha kalın kalıntı bırakmaya yatkındır [17]. Bu durumda, daha sağlıklı bir sonuç almak için aşındırma öncesi ön temizlik yapılması tercih edilir. Doğal oksit tabakasının kaldırılması için fosforik ya da hidroklorik asit kullanılabilir.

3.3. GaAs Islak Aşındırma Çözeltileri

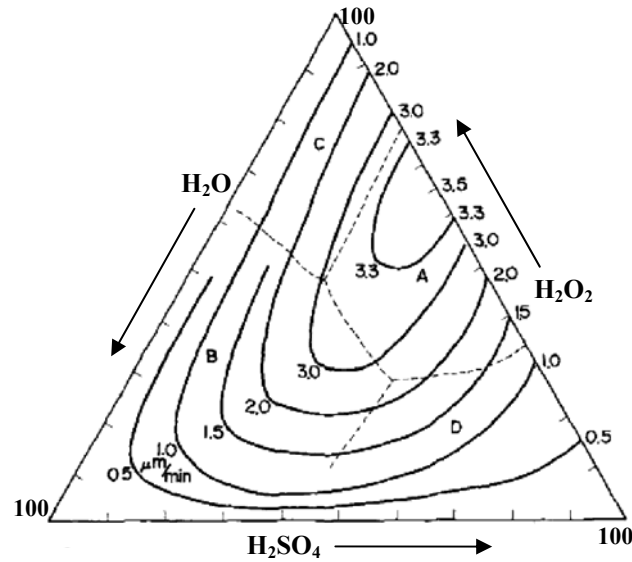
3.3.1. H_2SO_4 - H_2O_2 - H_2O çözeltisi

GaAs aşındırması için en çok kullanılan, sülfürik asit (H_2SO_4), hidrojen peroksit (H_2O_2) ve saf su (H_2O) karışımıdır. Çoğunlukla parlatma ve/veya masatepe aşındırma için kullanılır [9, 23-26].

H_2SO_4 , akışmazlığı yüksek bir çözeltidir. H_2SO_4 oranının yüksek olduğu aşındırma çözeltileri difüzyon sınırlı olma özelliği gösterir ve düz yüzeyler elde etmek için kullanılan parlatma işleminde kullanışlıdır. Genellikle 4:1:1 veya 3:1:1 oranları yüzeyleri parlatmak ya da yüzey hasarını kaldırmak için kullanılır [9]. Bu tür çözeltilerde aşındırıcıya karşı maske görevi gören rezist kaplı kısımların kenarından aşağıya doğru aşınma miktarı, diğer yerlere göre eşit oranda olmaz [24]. Bu etki, rezist kaplı yüzeyin üzerindeki moleküllerin, rezist ve GaAs ara yüzeyine sızmasından dolayı, rezist kenarına yakın GaAs yüzeyinin daha fazla aşındırıcı moleküllere maruz kalmasıyla ilgilidir [27]. Aşındırma hızı çok yüksek olduğundan kontrollü aşındırma süreci sınırlanır. Bunu engellemek için genellikle daha seyreltik karışımlar tercih edilir. Düşük H_2SO_4 oranına sahip aşındırma

çözeltileri ile düz tabanlı çukurlar elde edilir ve tepkime hız sınırlı davranış özelliği gösterir [24].

0 °C’de (100) GaAs malzemesinin aşınma hızlarını gösteren Şekil 3.8, karışım oranının fonksiyonu olarak aşınma hızı hakkında bilgi verir. H_2SO_4 - H_2O ve H_2O_2 - H_2O birleşiminde aşınma gözlenmezken, H_2SO_4 - H_2O_2 çözeltisiyle en yüksek aşınma hızı elde edilir ve sabit H_2SO_4 ve H_2O_2 oranında H_2O arttıkça aşınma hızı düşer. A bölgesinde (yüksek H_2SO_4 ve H_2O_2 konsantrasyonu) çözelti sıcaklığının yaklaşık 20 °C yukarısında ve B bölgesinde (yüksek H_2O konsantrasyonu) sıklıkla daha kararmış bir yüzey gözlenir. Çözelti sıcaklığının 0-70 °C arasında, C bölgesi (yüksek H_2O_2 konsantrasyonu) ve D bölgesinde (yüksek H_2SO_4 konsantrasyonu) ayna gibi parlak yüzeyler elde edilir [24].

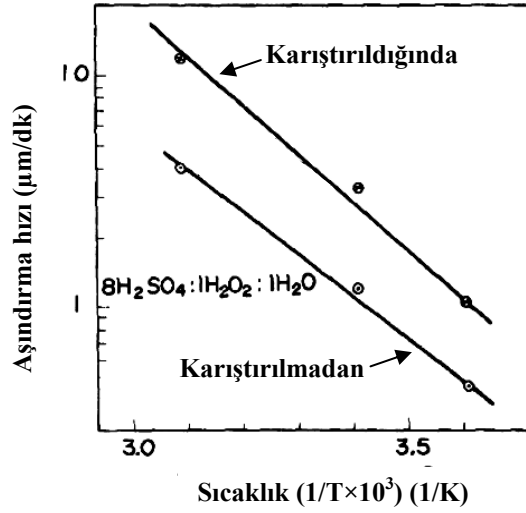


Şekil 3.8. 0 °C’de elde edilen H_2SO_4 - H_2O_2 - H_2O çözeltisinin üçlü şeması [24]

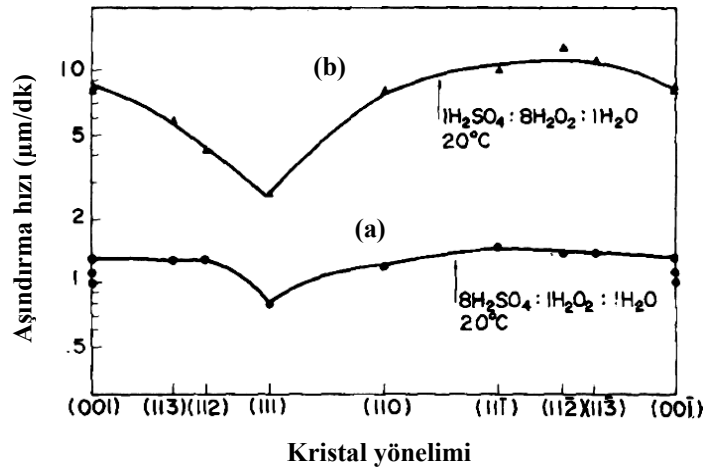
(Şema içindeki sayılar, $\mu m/dk$ biriminden aşınma hızlarını ve tüm eksenler yüzde cinsinden hacim oranını göstermektedir)

Şekil 3.9’da yüksek H_2SO_4 oranı kullanılarak aşınma hızının sıcaklığa ve karıştırmaya bağlı değişimi gösterilmektedir. Çözelti, ultrasonik yöntemle karıştırıldığında, aşınma hızında artış gözlenir. Düşük H_2SO_4 oranına sahip çözeltilerde karıştırmaya bağlı aşınma hızında bir değişim gözlenmez [24].

Aynı koşullar altında yüksek ve düşük H_2SO_4 konsantrasyonu için yönelim etkisi Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Her iki koşul için de en yavaş aşınma hızına (111)A yüzeyi sahiptir [24].



Şekil 3.9. Yüksek H_2SO_4 çözeltilerinde karıştırmanın aşındırma hızına etkisi [24]



Şekil 3.10. (a) Yüksek H_2SO_4 , düşük H_2O_2 ve (b) düşük H_2SO_4 , yüksek H_2O_2 çözeltilerinde aşındırma hızının kristal yönelimine bağlılığı [24]

Çizelge 3.3'te n-tipi (100) GaAs malzemesine farklı oranlarda H_2SO_4 içeren aşındırma çözeltileri uygulandığında elde edilen bulgular özetlenmektedir [26].

Çizelge 3.3. GaAs için H₂SO₄ ve HCl çözeltilerinin özellikleri [26]

Asit	Hacim oranları	Konsantrasyon (mol/l)		Aşındırma derinliğinin yanal aşındırmaya oranı			Bağıl Anizotropi	Aşındırma hızı (100) (µm/dk)	Yan kesit görünüm	
		Asit	H ₂ O ₂	< 011 >	<011>	<100>			(011)	(011)
H ₂ SO ₄	1:8:1	1,8	8	0,30	0,30	0,90	1	14,6		
H ₂ SO ₄	1:8:40	0,36	1,6	0,89	0,68	1,2	0,55	1,2		
H ₂ SO ₄	1:8:80	0,2	0,9	0,62	0,62	0,86	0,32	0,54		
H ₂ SO ₄	1:8:160	0,10	0,49	0,71	0,71	0,93	0,27	0,26		
H ₂ SO ₄	1:8:1000	0,018	0,079	0,82	0,76	0,95	0,22	0,038		
H ₂ SO ₄	1:1:8	1,8	1	0,77	0,53	1	0,61	1,3		
H ₂ SO ₄	4:1:5	7,1	1	0,49	0,29	0,70	0,83	5		
H ₂ SO ₄	8:1:1	14	1	0,52	0,43	0,61	0,35	1,2		
H ₂ SO ₄	3:1:1	11	2	0,44	0,44	0,53	0,19	5,9		
HCl	1:4:40	0,27	0,87	0,51	0,28	0,97	1,1	0,22		
HCl	1:1:9	1,1	0,89	0,22	0,18	0,037	0,69	0,20		
HCl	40:4:1	10,6	0,87	0,54	0,54	0,54	~0	>5		
HCl	8:4:1	11,2	0,46	0,7	0,7	0,7	~0	1,1		

3.3.2. HCl-H₂O₂-H₂O çözeltisi

Hidroklorik asit (HCl) çözeltisi, izotropik aşındırma özelliği gösterdiğinden yönelim etkisinin önemli olmadığı uygulamalar için kullanışlıdır. Bu özelliği, difüzyon sınırlı aşındırmayı beraberinde getirdiğinden karıştırmaya duyarlıdır.

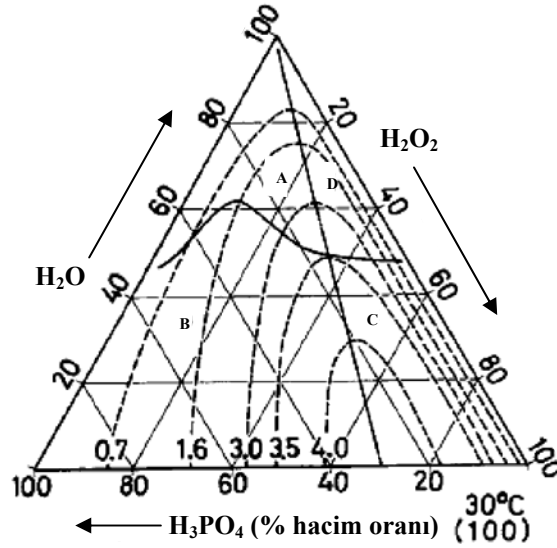
Çizelge 3.3'te yüksek ve düşük HCl oranlarında karışımların aşınma hızları ve profilleri gösterilmektedir. Düşük HCl oranlarında, H₂SO₄ sisteminde olduğu gibi yönelime bağlı aşındırma gözlenir. Yatay yönde aşındırma, içlerinde en az 1:1:9 oranında gözlenir. Yüksek HCl oranı içeren çözelti ise izotropik davranırken yatay yönde aşındırmada artış gözlenir [26].

3.3.3. $\text{H}_3\text{PO}_4\text{-H}_2\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$ çözeltisi

Fosforik asit (H_3PO_4), H_2O_2 ve H_2O çözeltisinin özellikle angstrom mertebesinde aşındırma hassasiyetinin olması oldukça düzgün yüzeyler elde edilmesini sağlar [18].

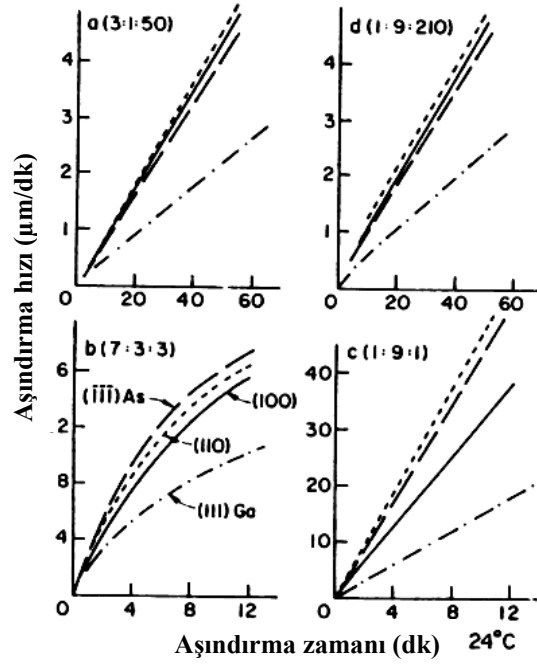
Şekil 3.11, 30 °C’de n-tipi (100) GaAs yüzeyinden elde edilen deneysel sonuçları gösteren üçlü şemadır. Şekil 3.12’de görüldüğü üzere a, b ve d bölgelerinde aşınma hızı zamana bağlı olarak doğrusal değişirken, b bölgesinde eksponensiyel olarak zamanın kareköküne bağlı değişir ve difüzyon limitli çözelti olduğunu destekler. Yavaş, kararlı ve kusursuz GaAs aşındırma için a bölgesine giren çözeltiler, kristalografik aşındırma için ise c bölgesine giren çözeltilerin uygun olduğu gözlenmiştir.

H_3PO_4 çözeltisi ekzotermik olmayan bir tepkimedir. H_2O_2 , aşınma tepkimesinde aşırı derecede tüketilmediği için kararlı bir çözeltidir [28].



Şekil 3.11. 30 °C’de n-tipi (100) GaAs yüzeyinden elde edilen deneysel sonuçların üçlü şeması

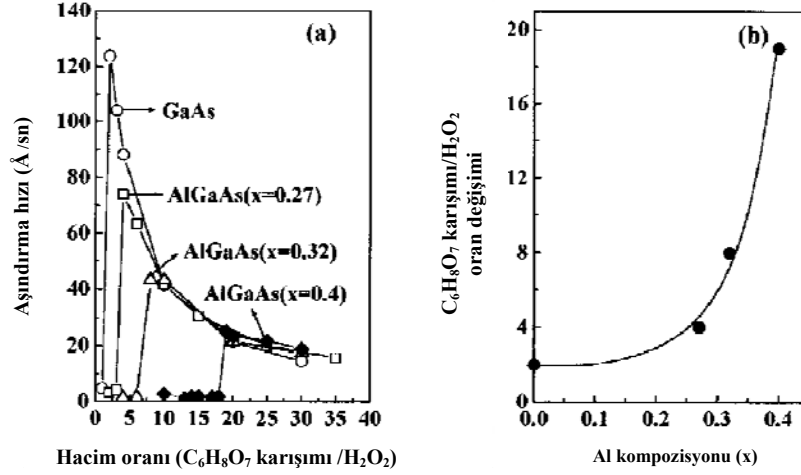
(Şema içindeki sayılar, $\mu\text{m/dk}$ biriminden aşınma hızlarını ve tüm eksenler yüzde cinsinden hacim oranını göstermektedir) [28]



Şekil 3.12. Farklı yüzeyler için aşınma derinliği ile aşınma zamanı arasındaki ilişki [28]

3.3.4. $C_6H_8O_7-H_2O_2-H_2O$ çözeltisi

Organik bir asit olan $C_6H_8O_7$ tabanlı aşındırma çözeltileri, pürüzsüz ve düzgün yüzeyler üretir [17]. Tüm konsantrasyonları için düz tabanlı çukurlar elde edilir ve diğer aşındırıcılara göre fotoreziste daha az etki etme özelliğine sahiptir [29]. Bir diğer üstünlüğü, AlGaAs malzemesine karşı GaAs için seçici aşındırma sağlamasıdır. Şekil 3.13a'da $Al_xGa_{1-x}As$ malzemesinin, GaAs malzemesine karşı farklı $C_6H_8O_7$ karışımı/ H_2O_2 oranına karşılık farklı aşınma hızlarına sahip olduğu görülür. Yaklaşık 19:1 ($C_6H_8O_7$ karışımı/ H_2O_2) oranında tüm malzemeler için seçicilik kaybolur ve neredeyse eşit aşındırma hızına ulaşılır. Şekil 3.13b ise, $Al_xGa_{1-x}As$ malzemesinin aşınmaya başladığı $C_6H_8O_7$ karışımı/ H_2O_2 oranının, Al konsantrasyonuna bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir [30].



Şekil 3.13. (a) Oda sıcaklığında C₆H₈O₇ karışımı/H₂O₂ çözeltisinin hacim oranının fonksiyonu olarak Al_xGa_{1-x}As (x < 0,5) aşınma hızları. (b) Al kompozisyonun fonksiyonu olarak, çözeltinin hacim oranının değişimi [30]

3.3.5. HF-H₂O₂-H₂O çözeltisi

H₂O₂/H₂O oranı yüksek çözeltilerde kristalografik GaAs aşındırma gözlenir. Yüksek HF oranına sahip çözeltilerde ise izotropik profil elde edilir [16, 31]. Bunun yanında H₂O₂ bileşeni katmadan HF ile Al mol kesiti 0,45'ten büyük olan AlGaAs malzemesi için seçici aşındırma gerçekleştirilebilir.

HF, fotoreziste kolaylıkla etkidüğinden tepkime sırasında istenmeyen bir durum olan fotorezistin kalkmasına neden olur [14].

3.4. GaAs'e Karşı AlGaAs Seçiciliği

Seçiciliği belirleyen faktörler, oksidan ile asit miktarı, sabit asit/oksidan oranının seyreltme derecesi ve pH'dır. Örneğin, pH değeri artırıldığında GaAs'in, AlGaAs'e göre aşınma oranı daha fazladır.

Eksi yüklü iyonların tercihen Ga ve Al ile bileşikler oluşturmadığı inorganik/H₂O₂ çözeltilerinde AlGaAs, GaAs'ten daha yüksek aşınma hızına sahiptir. Bu artış Al mol miktarı ile doğru orantılıdır. Örneğin, 1,1 pH değerine sahip bir çözelti için GaAs aşınma hızı 0,3 µm/dk iken AlGaAs aşınma hızı 0,65 µm/dk'dır.

$x > 0,4$ olan $Al_xGa_{1-x}As$ için 10:1 oranından daha yüksek seçici aşındırma HF ile mümkündür. Seçicilik, asit ve oksidan oranına göre değişiklik gösterir. Ancak, GaAs'e karşı AlGaAs seçici olarak aşındırılacağı zaman daha az tehlikeli bir aşındırıcı tercih edilir.

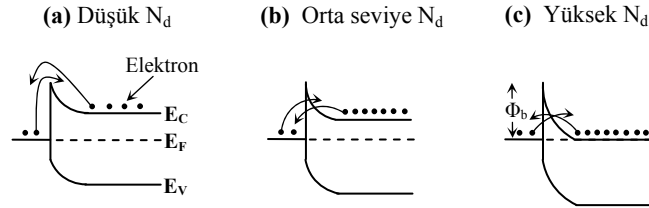
Organik asitler kullanılarak daha yüksek derecede seçici aşındırmalar gerçekleştirilebilir. GaAs için en yüksek aşındırma hızı $0,3 \mu m/dk$ olan ve $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ 'e karşı seçicilik oranı 100:1, 5:1 ($C_6H_8O_7$ karışımı/ H_2O_2) oranından elde edilir. Çözelti karışım oranı 8:1'den itibaren $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ aşınma hızı artar ve 20:1 oranından daha büyük olduğunda ise neredeyse seçicilik özelliği kaybolur [32].

Seçici aşındırma, çoklu epitaksiyel tabakalı yapılar için belirlenen ara bir tabakada aşınmanın durması amacıyla da kullanılır ve aşınma derinliğini kontrol etmek için kolaylık sağlar. Bu yöntem ile Al konsantrasyonun küçük değişimleriyle ara tabakanın aşınması daha da geciktirilebilir. Aşındırmayı durdurucu tabaka, taşıyıcıların nüfuz edeceği kadar ince ise durdurucu etkisi olmayabilir. Diğer bir deyişle, durdurucu olarak kullanılan ara tabakanın belli bir kalınlıkta olması gerekir [16].

3.5. N-tipi GaAs Omik Kontakları

Bir yarıiletken ile bir metal birleştirildiğinde, yarıiletkenin iletkenlik ve değerlilik bandı bükülerek yarıiletkenle metalin fermi seviyeleri eşitlenir. Şekil 3.14'de n-tipi GaAs için tipik üç farklı katkı durumu şematik olarak gösterilmektedir. Burada engel enerjisi (Φ_b), metalin fermi seviyesi ile arayüzeydeki GaAs'in iletkenlik bandının arasındaki enerji farkıdır. Düşük katkılı ($N_d < 10^{17} cm^{-3}$) GaAs durumunda arınmış bölge geniştir (Şekil 3.14a). Elektronlar, GaAs ve metal arasında potansiyel engelini termiyonik salım (thermionic emission, TE) ile aşarlar. Şekil 3.14b, orta seviyede ($10^{17}-10^{18} cm^{-3}$) katkılanmış GaAs durumunu göstermektedir. Bu durumda elektronlar hem termiyonik salım hem de tünelleme ile metal/GaAs arayüzeyini geçerler. Akım, ısı enerjisiyle elektronların potansiyel engelinin ortasından tünelleme yapması ile kontrol edilir. Buna termiyonik alan salım (thermionic-field-emission, TFE) denir. GaAs aşırı

katkılanmış ise ($N_d > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) elektronlar metalden yarıletkene alan salım (field emission, FE) yolu yani tünelleme yaparak geçerler (Şekil 3.14c). Neredeyse tüm metal/yarıiletken ara yüzeylerinde engel oluşumu mevcuttur. Omik kontak yapmak için bu engel yüksekliğinin olabildiğince düşük olması amaçlanır.



Şekil 3.14. Farklı katkılama seviyelerine sahip metal/yarıiletken arayüzeyleri boyunca iletim mekanizmaları [31]

10^{17} cm^{-3} 'ten daha fazla katkılanmış GaAs omik kontaklarında TFE ve FE akım taşıma mekanizmaları baskındır [33]. Düşük özdirence sahip omik kontak elde etmek için, engel yüksekliğini düşürmek ve katkılama seviyesini (N_d) arttırmak gereklidir. Φ_b ve N_d değerleri MBE ya da MOCVD gibi sistemlerle kontrol edilebilir ve ısıtma işlemi uygulamadan düşük dirençli omik kontaklar üretilir. Bu kontaklar “yerinde omik kontak” (in situ ohmic contacts) olarak adlandırılır ve $1 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}^2$ 'den daha düşük dirence sahip omik kontaklar elde edilir [33]. Ancak katkılama seviyesinin en az $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ olması gereklidir [9]. MBE sistemi ile bu seviyede katkı yapılar büyütülebilmekte ancak her büyütme tekniği ile bu mertebeye yüksek katkı malzemeler elde etmek kolay değildir. Böyle bir yöntem yerine, kaplanan metal tabakanın yarıiletken yüzeyine difüzyonunu sağlamak ve kontak direncini düşürmek amacıyla uygulanan ısıtma işlemli omik kontaklar daha az maliyetli ve yaygın olarak kullanılan klasik bir yöntemdir.

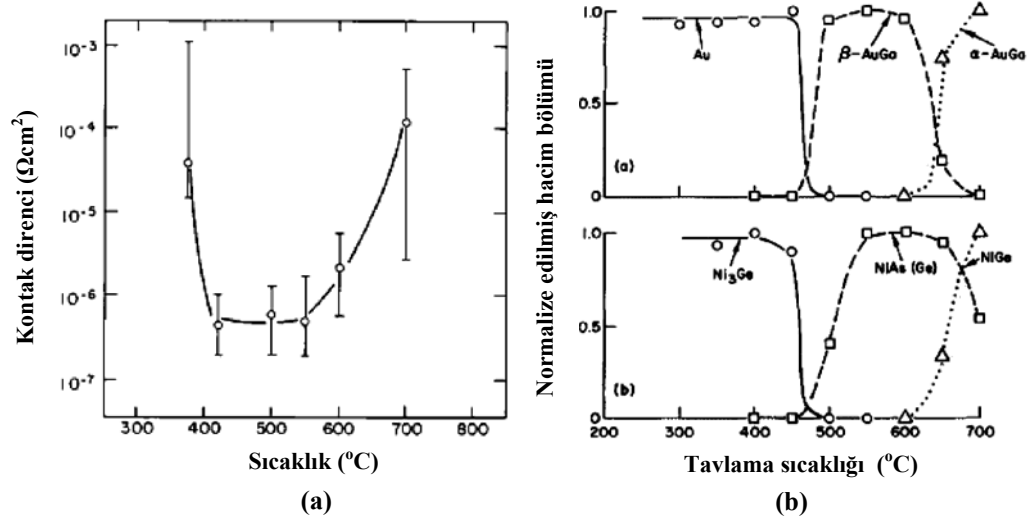
En çok kullanılan n-tipi GaAs omik kontakları germanyum (Ge) tabanlı omik kontaklardır. Buharlaştırma sırasıyla germanyum/altın (GeAu) kontakları numune üzerine kaplandıktan sonra ısıtma işlemi uygulama sırasında sıcaklık yükseldikçe GeAu alaşımı erimeye başlar. Ga atomları metal içine nüfuz eder ve daha az oranda As buharlaşmasıyla Au, GaAs içine ($\approx 1.000\text{-}3.000 \text{ \AA}$) nüfuz eder

[9]. Bu derinlik, ısıtma sıcaklığı, ısıtma zamanı ve Au miktarına bağlı olarak değişir. GaAs kristal yapısında Ga atomlarının metal içine nüfuz etmesiyle açıkta kalan yerlere Ge atomları yerleşir ve verici görevini üstlenir. N-tipi GaAs ile metal tabakası arasında yüksek katkılı bir arayüzeyin oluşumu sonucu engel yüksekliği azalır. Bu kontaklarda 363 °C sıcaklığın altında Au ve GaAs arasında etkileşim gözlenmez. Az miktarda Ge, GaAs yüzeyine doğru ve Ga, metal tabakasına doğru nüfuz eder. 363 °C'den yüksek sıcaklıklarda Au ve GaAs arasında fark edilir bir etkileşim olur ve Ga difüzyonu daha da artar. Yaklaşık 450 °C'de ise metal yarıiletken arayüzeyinde yer yer AuGeAs ve üzerinde sırasıyla AuGe, AuGa bileşikleri gözlenir [33].

GeAu kontakları pürüzlü yüzeylere sahiptir. GaAs içine doğru olan Ge difüzyonu homojen değildir ve yüzey delikli bir yapı gibi görünür. Au'nın yatay yönde yayılma etkisinden küçük boyutta yapılarla çalışmayı sınırlandırır [34]. Bu kontaklara getirilen önemli bir gelişme nikel (Ni) kontak tabakasının eklenmesidir. Ni, GeAu alaşımını daha da sıvılaştırarak Ge'un GaAs içine difüzyonunu kolaylaştırır ve kontak yüzeyinin pürüzlülüğünü azaltır. $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ Si katkılı n-tipi GaAs üzerinde NiGeAu kontaklarının sıcaklığa bağlı kontak direnci değişimi Şekil 3.15'te gösterilmektedir. Farklı sıcaklıklarda 2 dk tavlanan NiGeAu kontaklarının dirençleri, düzlem iletim ölçümü (transmission line measurements, TLM) tekniği ile hesaplanmıştır [35]. 400 °C altındaki sıcaklıklarda tavlanan kontaklarda omik davranış gözlenmezken 420 °C'de yüksek dirençli omik kontaklar elde edilir ve bu sıcaklıkta direnç değişimi oldukça geniş bir aralıkta değişir. En düşük kontak dirençleri 440 °C'de elde edilmiştir. 550 °C'ye kadar ise direnç değişimi gözlenmezken, 600 °C'de iki katı kadar yükselmiştir.

Isıl işlem uygulamadan önce metal yüzeyinde sadece Au, Ge ve Ni'e karşılık gelen X-ray kırınım tepeleri gözlenir. Yüksek sıcaklıklarda tavlandıktan sonra Au, Ge ve Ni, GaAs ile tepkimeye girer ve sıcaklık değişimlerine bağlı olarak yeni bileşikler gözlemlenir (Şekil 3.15b). En düşük kontak direnç değerleri, GaAs yüzeyine temas halinde olan NiAs(Ge) ile üzerinde oluşan β -AuGa faz oluşumlarında elde edilir. Bununla birlikte numune yüzeyine kaplanan ilk metal tabaka Ni olduğu durumlarda metal katmanın GaAs yüzeyine tutunmasını daha da

artırır. Ge'un GaAs içine doğru nüfuz etme derinliğini azalttığından arayüzeydeki pürüzlülüğü azaltır. NiGeAu kontaktarı, kontak tabaka kalınlığı mikron mertebesinde daha küçük olan aygıtlar için toplam NiGeAu metal kalınlığı azaltılarak daha kullanışlı hale getirebilir [35].



Şekil 3.15. (a) Farklı sıcaklıklarda tavlanan GeNiAu metal kontak dirençleri, (b) farklı sıcaklıklarda tavlanan GeNiAu kontaktarında oluşan bileşikler [34]

4. GaAs ISLAK AŞINDIRMA MEKANİZMALARININ İNCELENMESİ

Bu bölümde, (100) yönelimli, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ Si katkılı n-tipi GaAs malzemesi için üç farklı ıslak aşındırma çözeltisi ile yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. SEM ve profilometre teknikleri kullanılarak çözeltilerin GaAs üzerindeki özellikleri incelenmiştir. Tüm örnekler, elmas uçlu çizici (Şekil 4.1a) ile ($5 \times 5 \text{ mm}^2$ boyutunda) kesilerek hazır hale getirilmiştir. Deneysel işlemler, Anadolu Üniversitesi, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'ndaki 100 Sınıfı temiz odada gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.1a-d).

4.1. Temizleme

Temizleme işleminde örnekler sırasıyla aseton ve izopropanol içinde bekletilmiştir. Bu işlem bütün örnekler için iki defa tekrarlanmıştır. Aseton, örnek yüzeyindeki organik molekülleri ve fotorezisti çözer. İzopropanol ise asetondan kaynaklanan yüzeydeki kirliliği kaldırır [15]. Son basamakta, örnekler seyreltilmiş HCl içine konulmuş ve böylece yüzeydeki doğal oksit tabakası kaldırılmıştır [9]. Temizleme sürecinin ayrıntıları aşağıda açıklandığı gibidir.

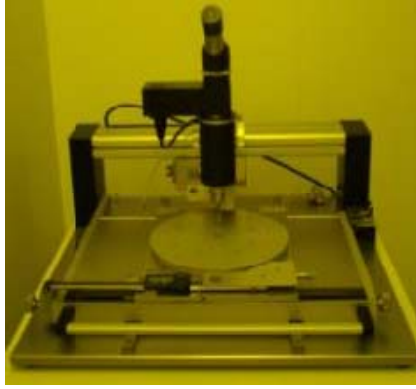
Örnekler;

1. Oda sıcaklığında 5 dk aseton içinde bekletilmiştir.
2. Kaynayan izopropanol içinde 5 dk bekletilmiştir.
3. Saf su ile yıkanarak, kuru azot ile kurutulmuştur.
4. 1:1 oranında HCl/H₂O karışımı içinde 30 sn bekletilmiştir.
5. Akan saf su altında yaklaşık 1 dk tutulmuştur ve kuru azot ile kurutulmuştur.

4.2. Fotolitografi

Fotolitografi, örneklerin yüzeyinin fotorezistle kaplanmasıyla başlar. 310-420 nm aralığında UV dalgaboyuna duyarlı AZ5214E tipi fotorezistin [15] örnek yüzeyine homojen kaplanması için döner kaplayıcı (Şekil 4.1b) sırasıyla 5 sn, 500 rpm ve 40 sn, 5000 rpm ayarlarında kullanılmıştır. Işınlama işleminden önce örnekler ısıtıcıda 110 °C'de 1 dk ısıtılmıştır.

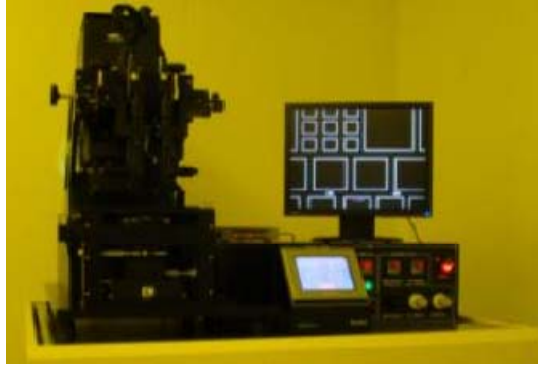
En yüksek yoğunluğu yaklaşık 365 nm dalgaboyu civarında olan cıva lambasına sahip maske hizalayıcı (Şekil 4.1c) kullanılarak, maske ile örneği hizalama ve ışınlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Örnekler, 200 mJ/cm^2 enerjili UV ışığına 10 sn boyunca maruz bırakılmıştır.



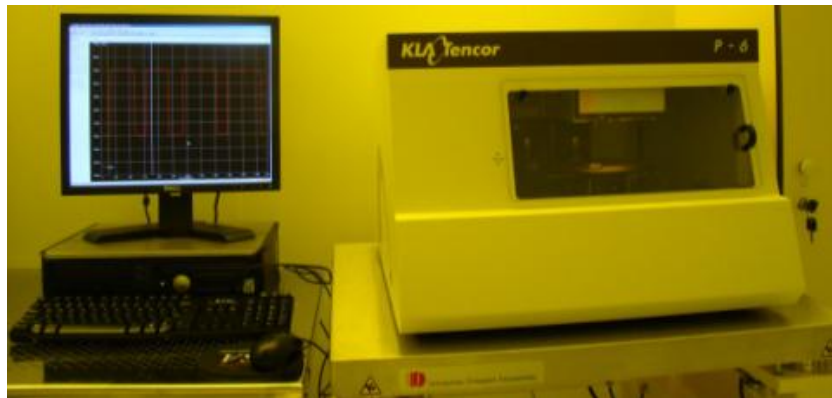
(a)



(b)



(c)

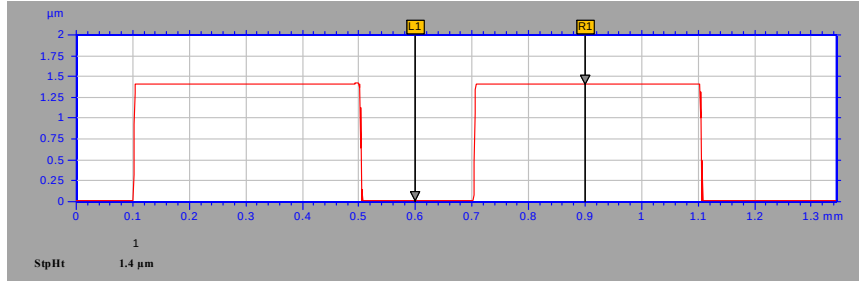


(d)

Şekil 4.1. (a) UniTemp, RV-129 elmas uçlu çizici (b) Laurell, WS-400BZ-6NPP/LITE döner kaplayıcı (c) MIDAS, MDA-400M-6 maske hizalayıcı (d) KLA Tencor, P-6 profilometre

4.3. Tab Etme

Örnek üzerinde UV ışığına maruz bırakılan fotorezist kaplı kısımların kaldırılması için 1:4 oranında AZ400K/H₂O karışımı (tab çözeltisi) hazırlanmıştır. Tab çözeltisi içine konulan örneğin ışık gören fotorezist kısımlarının çözünmesi sırasında yüzeydeki renk değişiminden işlemin tamamlanıp tamamlanmadığı anlaşılmıştır. Renk değişimi bittiğinde tab çözeltisi içinden çıkarılıp, saf su ile temizlenerek kuru azot ile kurutulmuştur. Bunun sonucunda masatepe yapılarını tanımlayan maske deseni örnek üzerine aktarılmıştır. Şekil 4.2’de gösterildiği üzere yüzeye kaplanan fotorezist kalınlığı yaklaşık 1,4 µm’dir.



*StpHt (Step height): Basamak yüksekliği

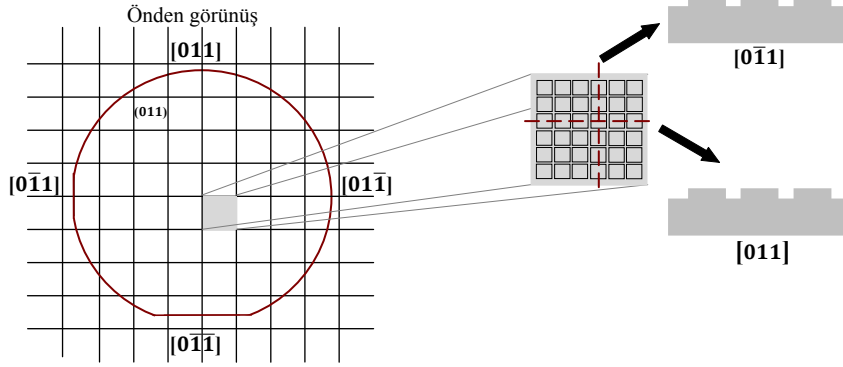
Şekil 4.2. Tüm örnekler için kaplanan fotorezist kalınlığını gösteren profilometre ölçümü

4.4. Islak Aşındırma

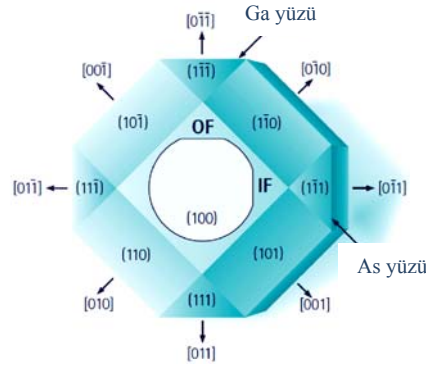
Bu aşamada, üç farklı aşındırma çözeltisi için farklı oranlarda karışımlar hazırlanmıştır. H₂SO₄ ve HCl tabanlı karışımlar hazırlanırken belirlenen oranlarda beher içine ilk önce su, ardından asit eklenmiştir. Termometre ile karışımın sıcaklığı kontrol edilmiş ve oda sıcaklığına düştükten sonra H₂O₂ eklenmiştir. Artan sıcaklık yine kontrol edilerek karışımın oda sıcaklığına düşmesi beklenmiştir. C₆H₈O₇ tabanlı karışımlar, C₆H₈O₇-H₂O (monohydrate) ve H₂O, ağırlık cinsinden 1:1 oranında karıştırılarak hazırlanmıştır. Suyun içinde C₆H₈O₇-H₂O’ın çözünmesi için 80 °C’de yaklaşık 15 dk ısıtılmıştır. Su içinde çözünen C₆H₈O₇-H₂O karışımı yaklaşık 15 dk sonra oda sıcaklığına düştükten sonra H₂O₂ belirlenen hacim oranında eklenmiştir. Aşındırma öncesi örneklerin

sert ısıtma süresi 10 dk'dır ve 5 dk soğuması için beklenmiştir. Aşındırma işlemleri, karıştırılmadan ve oda sıcaklığında (20-23 °C) gerçekleştirilmiştir. Örneklerin aşındırılma derinlikleri 5 µm çapında ölçüm ucuna sahip profilometre ile ölçülmüştür (Şekil 4.1d).

Aşındırma görüntülerinin, SEM ile kesit analizinin yapılması için örnekler 2,5×2,5 mm² boyutunda kesilmiştir. Şekil 4.3'de gösterildiği gibi 5×5 mm² boyutundaki örnekler üzerinde oluşturulan masatepe yapılarının ortasından geçecek şekilde birbirine 90 derece olacak şekilde kesilmiştir. Kesilen örnekler arka tarafından, alttaşın hangi kısmından alındığını belirlemek ve yönünü kaybetmemek için işaretlenmiştir. Böylece, örneklerin kesit alanının hangi düzleme baktığı Şekil 4.4'de gösterildiği gibi daire şeklinde olan alttaşın küçük (minor) ve büyük (major) kesik işaretleri kullanılarak kolaylıkla anlaşılmıştır.



Şekil 4.3. n-tipi GaAs alttaşından 5×5 mm² boyutunda kesilen örneklerin gösterimi ve SEM kesit analizi için 2,5×2,5 mm² boyutundaki örneklerin masatepe kesitlerinin yön tanımlamaları



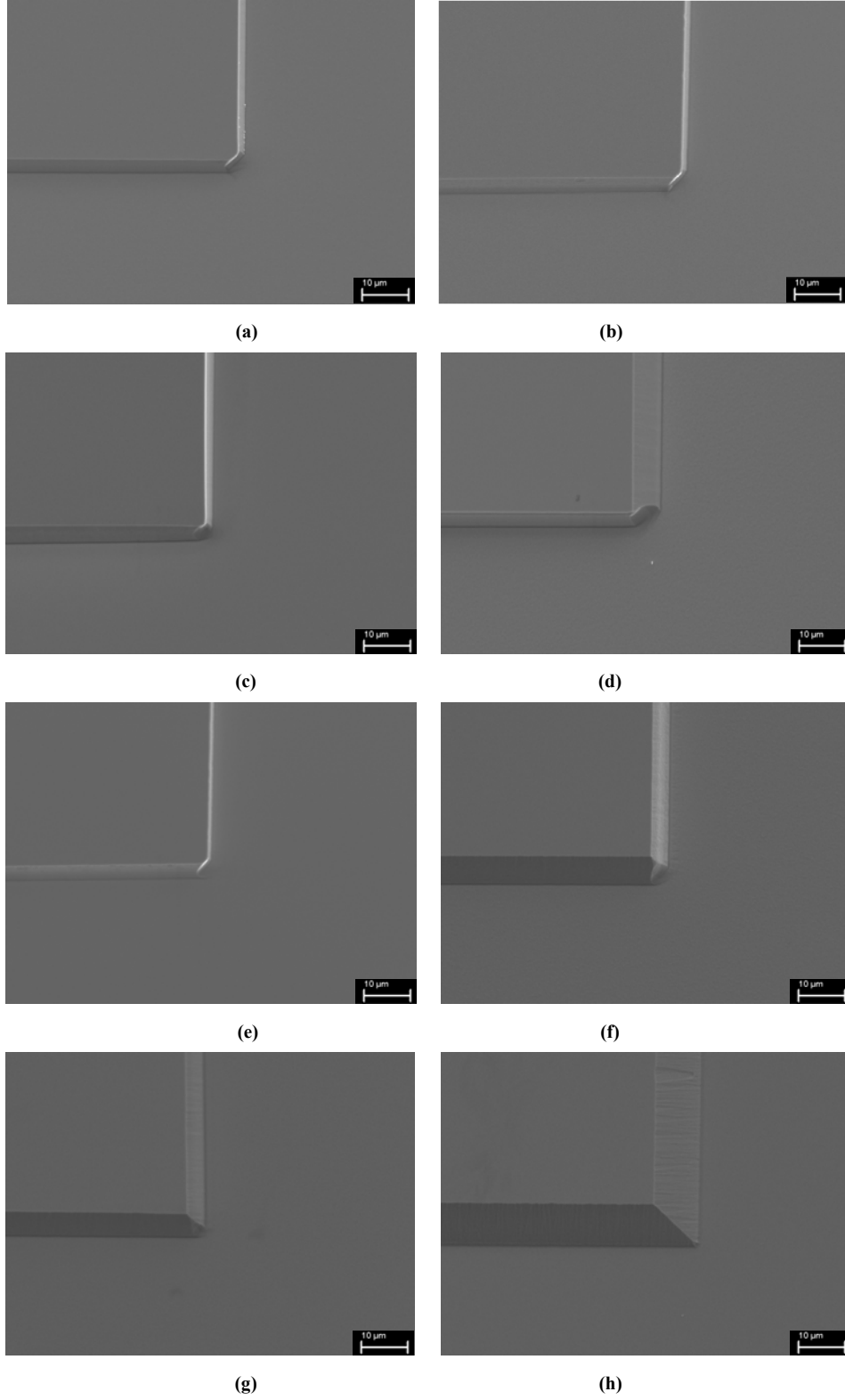
Şekil 4.4. (100) düzleminde büyütülmüş GaAs alttaşı ve kristalografik yön tanımlamaları

4.4.1. H₂SO₄/H₂O₂/H₂O çözeltisi ile GaAs aşındırma

N-tipi GaAs yüzeylerinin incelenmesi için 8 farklı H₂SO₄/H₂O₂/H₂O karışımı hazırlanmıştır. Her bir çözelti içine aynı anda üç örnek konulmuş ve yaklaşık 3 µm derinliğe kadar aşındırılmıştır. Şekil 4.5a-h, hazırlanan H₂SO₄ tabanlı karışımlarla aşındırılan n-tipi GaAs yüzeylerinin masatepe köşesinden alınan SEM görüntülerini göstermektedir.

5:1:1, 1:5:1, 5:1:20, 1:1:1 ve 1:8:40 oranındaki karışımlarda ayna gibi parlak yüzeyler elde edilmiştir. 1:8:40 oranından daha seyreltik çözeltilerde (1:8:80, 1:8:160 ve 1:8:1000) çoğunlukla kararmış yüzeyler gözlenmiştir. Bunun nedeni şöyle açıklanabilir; pratikte yüzeyden bir atomun kaldırılması, altındaki katmanı açıkta bırakmasının yanında yatay yönde gelen aşındırıcıların kaldırılan atom yakınındaki diğer atomları da kaldırmasına izin verir. Bu durum, küçük derecede pürüzlülüğe (small-scale roughness, microfaceting) neden olabilmekte [9] ve çıplak gözle bakıldığında yüzeyin rengi kararmış görünmektedir. Orijinal yüzeyin düzgünlüğü küçük derecede pürüzlülüğü de etkilemektedir. Bunun sonucunda düzgünlük derecesine göre daha pürüzlü yüzeyler elde edilebilir. Bu etkiden dolayı kristal kusurları da yüzey renginin değişimine sebep olabilir. Aynı zamanda 1:8:80, 1:8:160 ve 1:8:1000 oranındaki aşındırma çözeltilerinde tepkime hız sınırlı mekanizma baskın olduğundan yüzey topografisini koruma eğilimindedir. Bu nedenle, yukarıda bahsedilen küçük derecede pürüzlülük ya da kristal kusurların etkisinin, bu orandaki çözeltilerde görülme olasılığını daha yükseltir.

5:1:20 oranındaki karışımdan parlak yüzeyler elde edilmesine rağmen aynı pürüzlülük gözlenmektedir (Şekil 4.5d). 5:1:1 oranındaki karışımı, akışmazlığı yüksek ve difüzyon hız sınırlı bir çözeltidir. 5:1:20 oranı yüksek H₂SO₄ konsantrasyonuna sahip seyreltilmiş bir çözelti olduğundan difüzyon sınırlı ile tepkime hız sınırlı mekanizma arasında bir özellik göstermektedir. Buna dayanarak, 1:1:1 oranındaki çözeltinin difüzyon hız sınırlı baskın olduğu söylenebilir. Sonuçta, kullanılan çözeltiler için yüzeyler arasındaki pürüzlülük çok fazla değildir ve GaAs/AlGaAs kuantum kuyulu yapıların aygıt üretimde kritik bir rol oynamamaktadır.



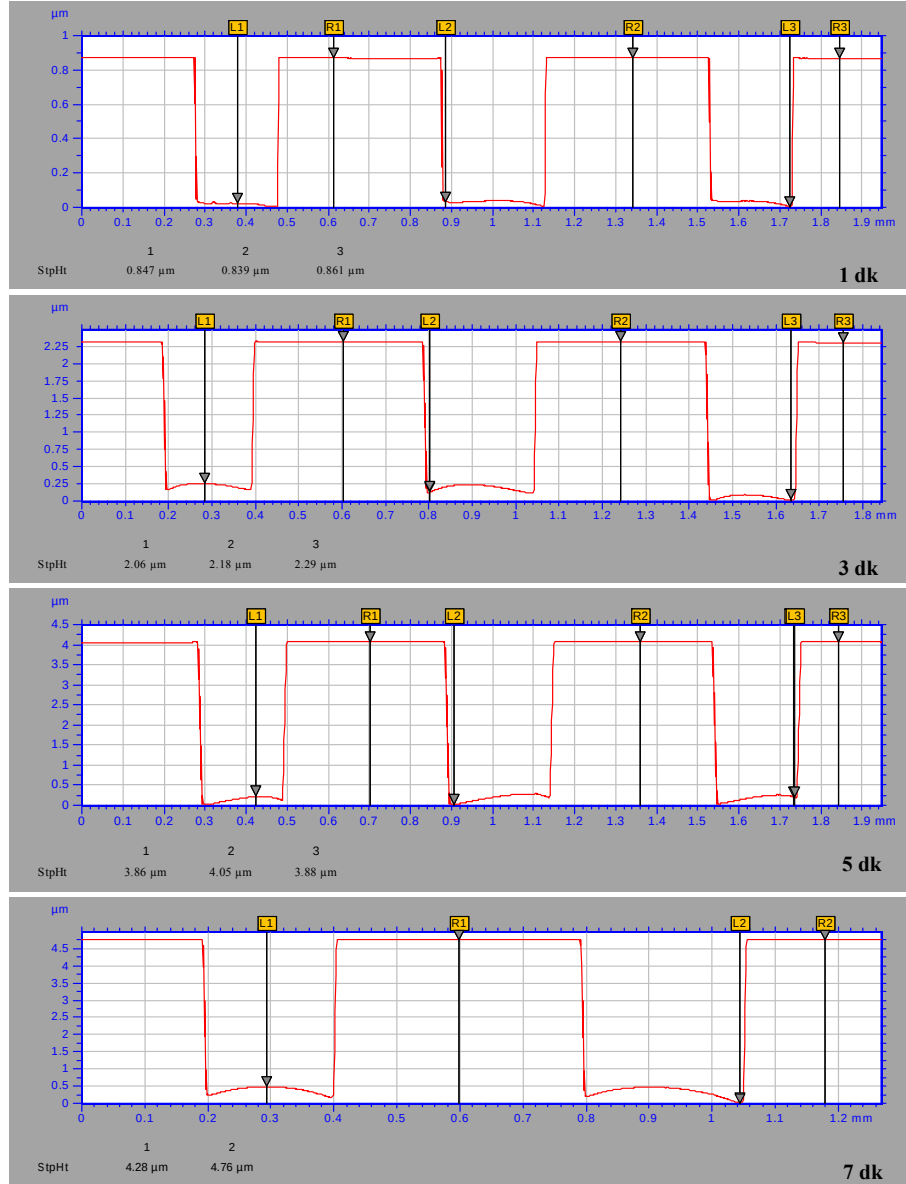
Şekil 4.5. Farklı oranlarda $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ karışımlarıyla aşındırılmış n-tipi GaAs yüzeylerinin SEM görüntüleri. (a) 1:1:1, (b) 1:5:1, (c) 5:1:1, (d) 5:1:20, (e) 1:8:40, (f) 1:8:80, (g) 1:8:160, (h) 1:8:1000

Yüksek aşındırma hızına sahip çözeltilerin, 1:8:40 (~1,2 µm/dk), 1:1:1 (~4,2 µm/dk), 1:5:1 (~8,6 µm/dk) oranındaki karışımlar olduğu gözlenmiştir. Aşınma hızları yüksek olduğundan aşındırma derinliği kontrolü daha zordur, dolayısıyla bu orandaki karışımlarla çalışmak avantajlı değildir.

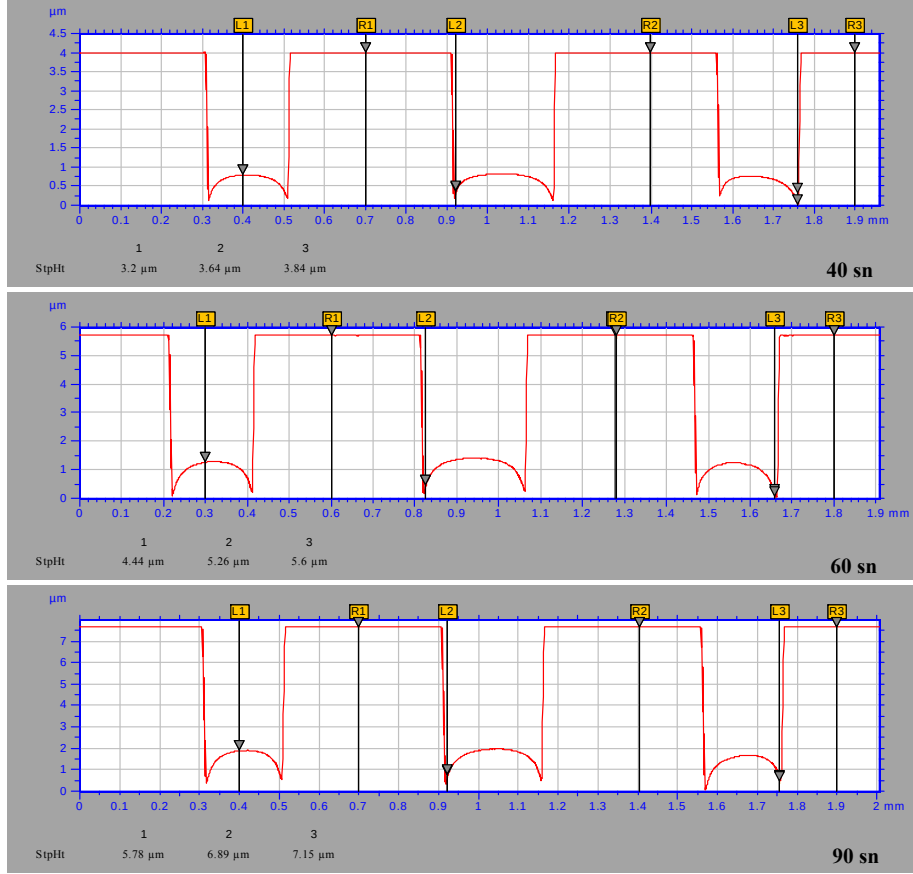
H₂SO₄/H₂O₂/H₂O karışımlarıyla aşındırılarak inilen derinliklerin homojenliğini incelemek amacıyla 5:1:20, 1:1:1 ve 3:1:1 oranında üç çözelti hazırlanmıştır. 5:1:20 oranındaki karışım içine 4 örnek konulmuş ve sırasıyla 1, 3, 5 ve 7 dk aşındırılmıştır. Şekil 4.6'da aşındırılan masatepe yapılarının profilometre ölçümleri sunulmuştur. Masatepe yapılarının bitişiğinde ve aşındırılan yerlerin orta kısımlarında bir farklılık gözlemlenmektedir: Masatepeye daha yakın kısımlar, iki masatepe arasında kalan kısımlara göre daha fazla aşındırılmıştır (mask trenching). Masatepe kenarından aşındırılan kısımlar ile orta kısımlar arasındaki derinlik farkı 1 ve 3 dk için genellikle yaklaşık 0,013 µm iken, 5 dk'dan sonra bu fark yaklaşık 0,180 µm'ye yükselmektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi 5:1:20, H₂SO₄ oranı yüksek seyreltilmiş bir çözeltilidir ve difüzyon hız sınırlı aşındırma etkisinin hala geçerli olduğu görülmektedir. 1:1:1 oranı için aşındırma hızı çok yüksektir (~4,2 µm/dk). Bu çözeltiyi kullanarak gerekli derinliklere inmek için aynı çözelti içine konulan üç örnek sırasıyla 40, 60 ve 90 sn aşındırılmıştır. Şekil 4.7'de görüldüğü üzere masatepe yapılarının bitişiğindeki kısımlar ile orta kısımların aşındırma derinlikleri arasındaki fark 5:1:20 oranına göre daha yüksektir. Yaklaşık 0,4 µm olan bu fark, süre uzadıkça yaklaşık 1,3 µm'ye kadar artmıştır. Son olarak 3:1:1 oranındaki karışım içine konulan 2 örnek sırasıyla 30 ve 60 sn aşındırılmıştır (Şekil 4.8). 3:1:1 oranı için masatepe bitişiğinde ve orta kısımlarda aşındırılan yerler arasındaki farkın en yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu etkiden dolayı 1:1:1 ve 3:1:1 oranındaki karışımlar, difüzyon hız sınırlı aşındırma özelliği göstermektedir. 5:1:20 oranı için ise daha az baskın olduğu söylenebilir.

Tüm oranlar, farklı süreler için kendi içlerinde karşılaştırılmıştır. Örneğin, 1 dk'lık aşındırma sonucunda, farklı masatepe kenarları incelendiğinde farklı aşınma yükseklikleri değerlerine ulaşılmıştır: 0,839 ve 0,861 µm (Şekil 4.6). Benzer şekilde, 3 dk'lık aşındırma işleminin sonucunda da iki farklı masatepe kenarı için yapılan ölçümde 2,18 ve 2,29 µm (Şekil 4.6) değerleri bulunmuştur.

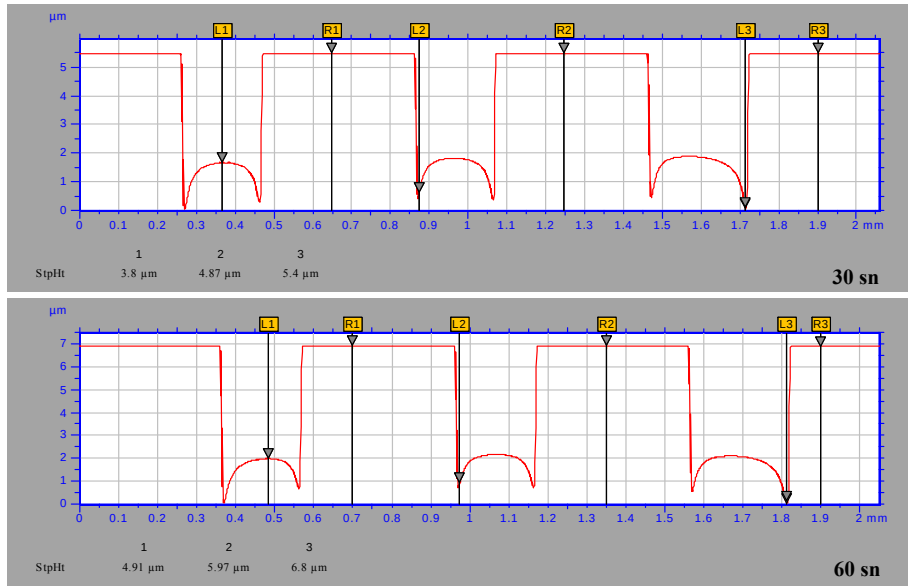
Bölüm 3’de bahsedildiği gibi, fotorezist üzerindeki aşındırıcıların difüzyonunun eklenmesiyle masatepe bitişiğindeki yerler daha fazla aşınmaya maruz kalır. Bu bölgedeki difüzyonun düzensiz olmasının böyle bir duruma neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.6. 5:1:20 oranında $H_2SO_4/H_2O_2/H_2O$ karışımıyla sırasıyla 1, 3, 5 ve 7 dk aşındırılan 4 farklı örneğin aşındırma derinliklerinin profilometre ölçümü

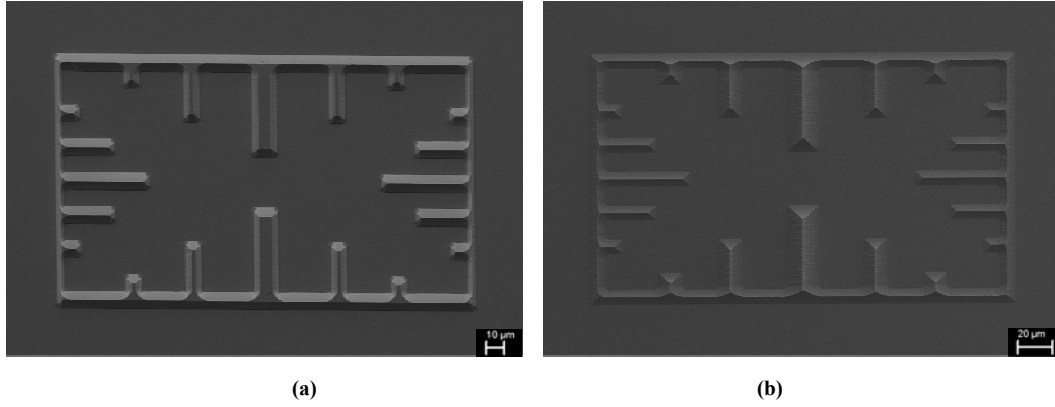


Şekil 4.7. 1:1:1 oranında $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ karışımıyla sırasıyla 40, 60 ve 90 sn aşındırılan 3 örneğin aşındırma derinliklerinin profilometre ölçümü



Şekil 4.8. 3:1:1 oranında $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ karışımıyla sırasıyla 30 ve 60 sn aşındırılan 3 farklı örneğin aşındırma derinliklerinin profilometre ölçümü

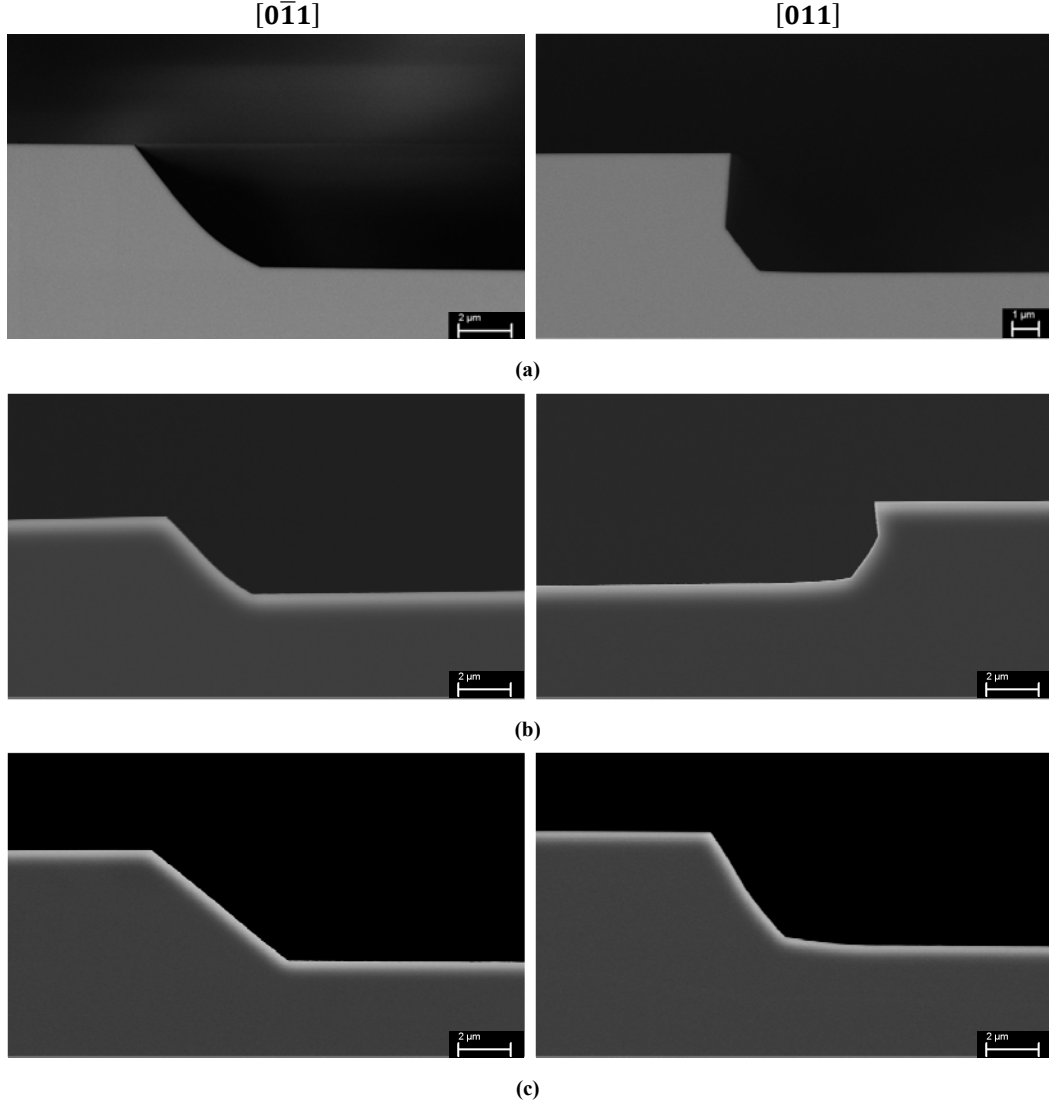
Bir aşındırma işleminde derinlik kontrolü, inilen derinliklerin tüm yüzey boyunca homojen olması, yüzeye zarar verilmemesi ve boyut kaybı olmaması önemlidir. Bu değişkenler göz önüne alındığında 1:8:80 ($\sim 0,500 \mu\text{m/dk}$), 1:8:160 ($\sim 0,250 \mu\text{m/dk}$) ve 1:8:1000 ($\sim 0,039 \mu\text{m/dk}$) çözeltilerinin uygun olduğu gözlenmiştir. Ancak 1:8:1000 oranı yavaş aşındırma hızına sahip olmasına rağmen, aynı derinliklere inildiği göz önüne alındığında, boyut kaybı 1:8:80 ve 1:8:160 oranına göre daha fazladır. Özellikle küçük boyutlarla çalışmak için bu oran Şekil 4.9b’de görüldüğü üzere avantajlı değildir. Tüm incelenen $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ karışımları içinde en uygun oranların 1:8:80 ve 1:8:160 olduğu görülmüştür.



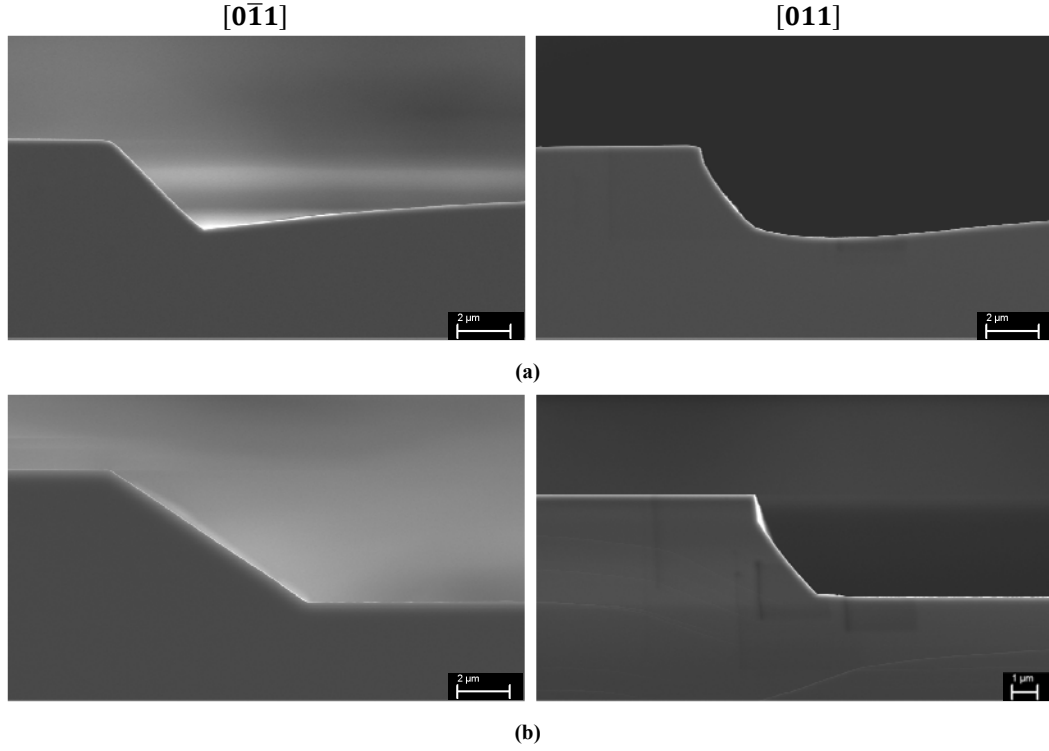
Şekil 4.9. $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ karışımının boyut kaybı etkisini gösteren SEM görüntüleri (a) 1:8:160 (b) 1:8:1000

$\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ çözeltisinin kristalografik etkilerini incelemek amacıyla 1:5:1, 1:8:40, 1:8:80, 5:1:1, 5:1:20 oranında karışımlar hazırlanmıştır. Şekil 4.10, (100) düzlemi üzerinde birbirine dik $[011]$ ve $[0\bar{1}1]$ yönlerinin SEM görüntülerini göstermektedir. Yüksek H_2O_2 oranına (1:5:1) sahip karışımların kristal yönlenmeye bağlı olduğu görülmektedir ve bu, tepkime hızı sınırlı bir aşındırma olduğunun göstergesidir. Yüksek H_2O_2 oranına sahip çözeltiler seyreltildiğinde 1:8:40, 1:8:80 oranında görüldüğü üzere kristal yönlenme azalmaktadır. Yüksek H_2SO_4 oranına (5:1:1) sahip karışımlarda ise kristal yönlenme diğerlerine göre daha azdır. Ve bu karışım seyreltildiğinde (5:1:20) yine benzer değişim göstermektedir (Şekil 4.11b). Ayrıca Şekil 4.10 ve 4.11’de

görüldüğü üzere, 5:1:1 oranı hariç tüm karışımlarda düz aşındırılmış yüzeyler elde edilmektedir.



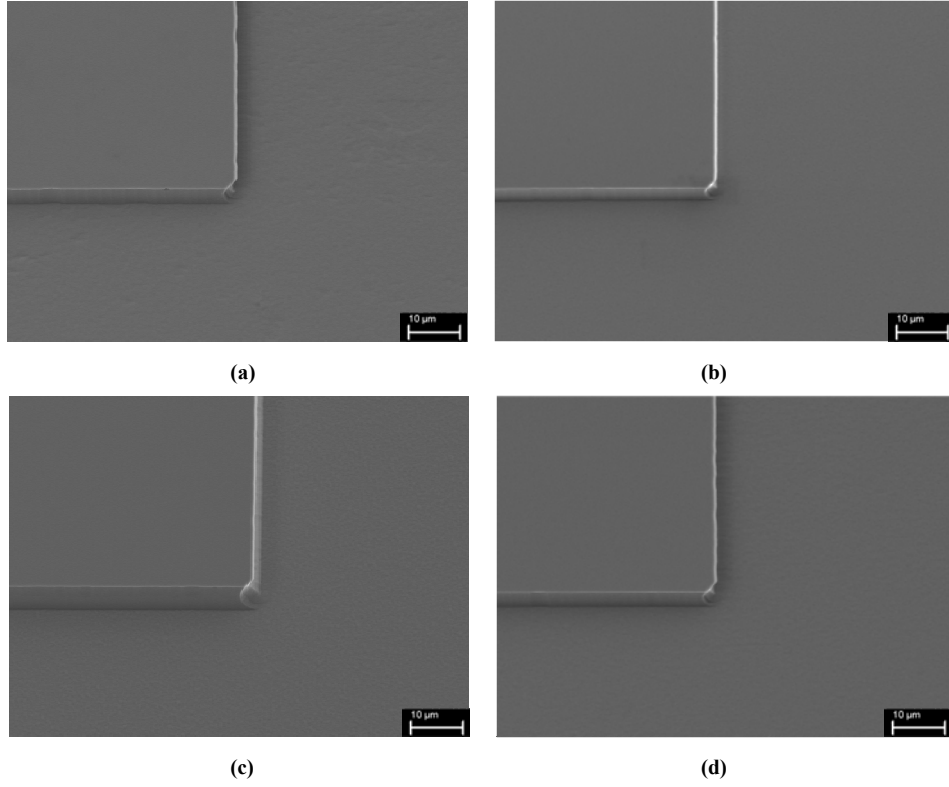
Şekil 4.10. $[011]$ ve $[0\bar{1}1]$ yönlerinde kesiti alınan, farklı oranlarda $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ çözeltileriyle aşındırılan GaAs aşındırma profillerinin SEM görüntüleri (a) 1:5:1 (b) 1:8:40 (c) 1:8:80



Şekil 4.11. [011] ve [011] yönlerinde kesiti alınan, farklı oranlarda $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ çözeltileriyle aşındırılan GaAs aşındırma profillerinin SEM görüntüleri (a) 5:1:1 (b) 5:1:20

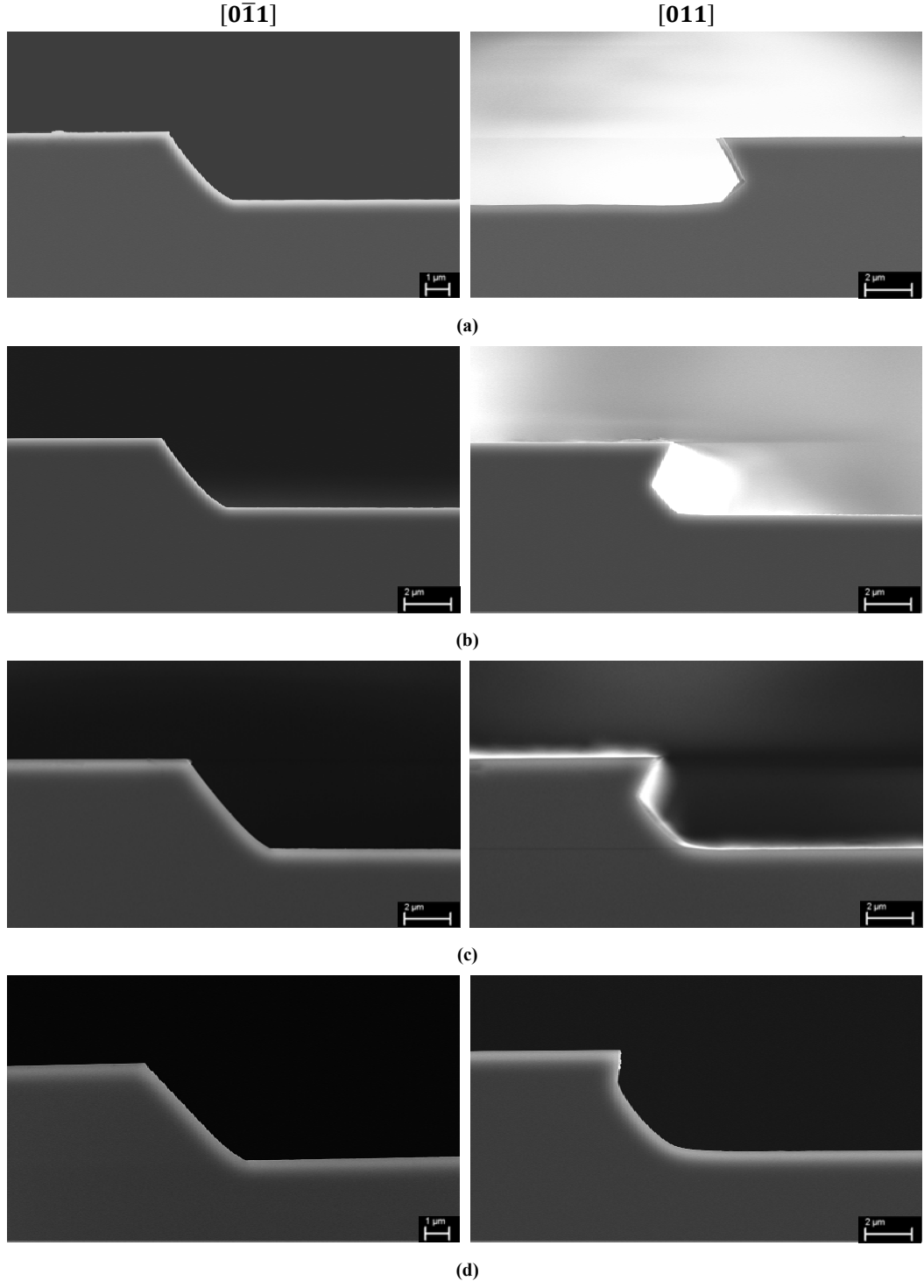
4.4.2. $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$ karışımı/ H_2O_2 çözeltisi ile GaAs aşındırma

Bu bölümde, 5:1, 10:1, 20:1 ve 50:1 oranlarında $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$ karışımı/ H_2O_2 çözeltilerin GaAs aşındırması üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bahsi geçen oranlarda karışımlar hazırlanmış ve örnekler ortalama 4 μm derinliğinde aşındırılmıştır. Kullanılan oranlar için aşındırılan n-tipi GaAs yüzeylerinde renk farklılığı gözlenmemiştir. Şekil 4.12’de görüldüğü üzere 5:1 oranında aşındırılan GaAs yüzeyleri diğer oranlara kıyasla daha pürüzlüdür.



Şekil 4.12. Farklı oranlarda $C_6H_8O_7-H_2O$ karışımı/ H_2O_2 ile aşındırılmış GaAs yüzeylerinin SEM görüntüleri (a) 5:1 (b) 10:1 (c) 20:1 (d) 50:1

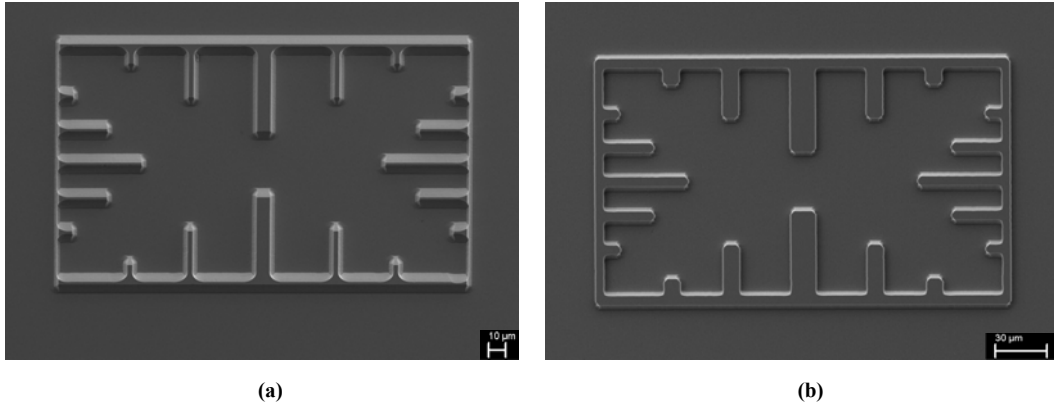
5:1, 10:1, 20:1, 50:1 oranlarında $C_6H_8O_7-H_2O$ karışımı/ H_2O_2 çözeltileriyle aşındırılan GaAs [011] ve $[0\bar{1}1]$ yönlerinde aşındırma profilleri Şekil 4.13’de gösterilmektedir. Hazırlanan her oran için geçerli olmak üzere, aşındırılan yüzeyler düz tabanlara sahiptir. $[0\bar{1}1]$, [011] yönlerinde kristalografik yönlenmeler ise neredeyse aynıdır. Aşındırmanın kristalografik yönlenmeye bağlı olması, 5:1, 10:1, 20:1 ve 50:1 oranındaki $C_6H_8O_7-H_2O$ karışımı/ H_2O_2 çözeltilerinin tepkime hız sınırlı olduğunun göstergesidir.



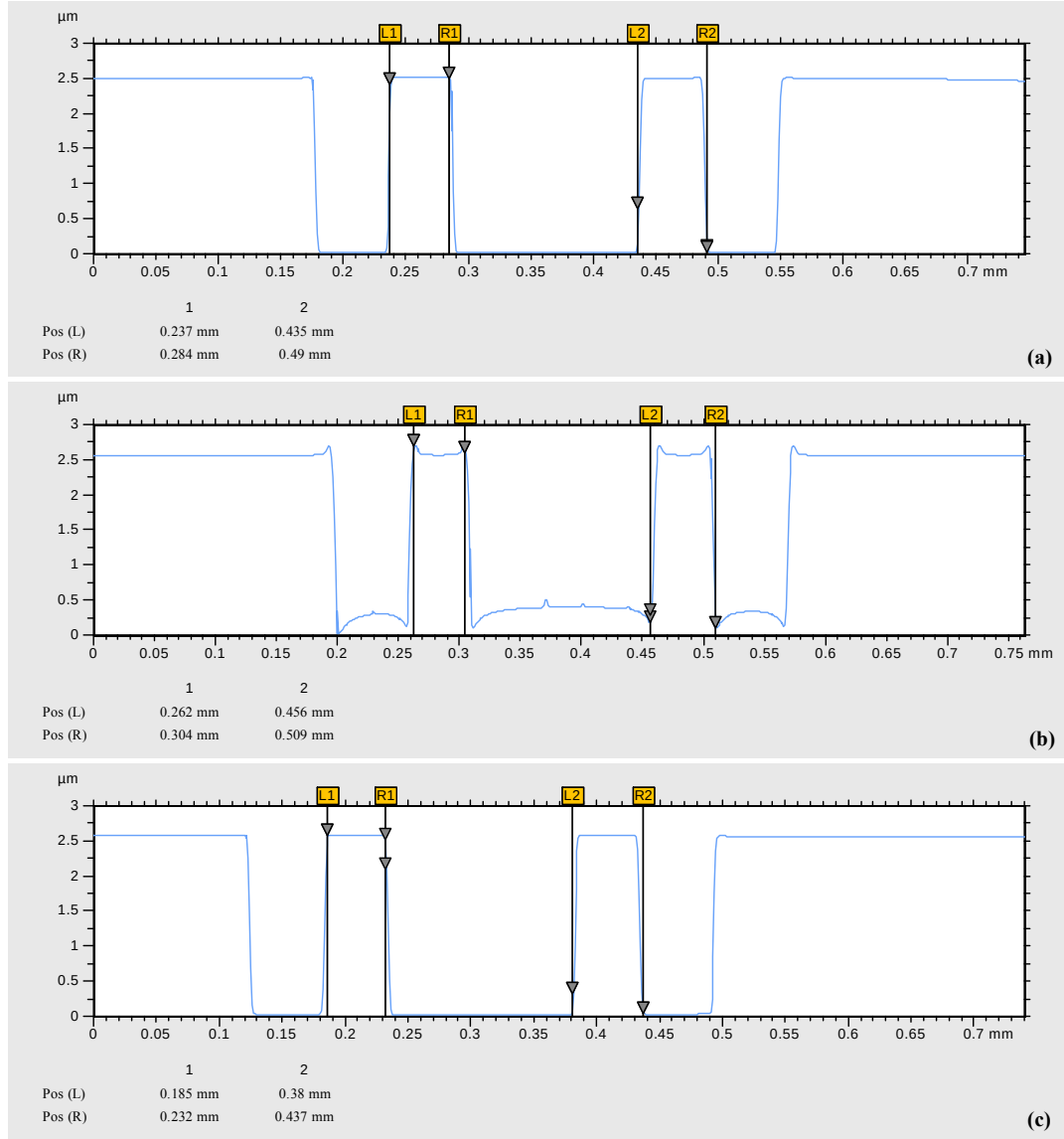
Şekil 4.13. $[011]$ ve $[0\bar{1}1]$ yönlerinde kesiti alınan, farklı oranlarda $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}_2$ karışımı/ H_2O_2 çözeltileriyle aşındırılan GaAs aşındırma profilleri (a) 5:1 (b) 10:1 (c) 20:1 (d) 50:1

$C_6H_8O_7-H_2O$ karışımı/ H_2O_2 , GaAs aşındırma hızı düşük karışımlardır: 5:1 ($\sim 0,29 \mu m/dk$), 10:1 ($\sim 0,23 \mu m/dk$), 20:1 ($\sim 0,09 \mu m/dk$), 50:1 ($\sim 0,04 \mu m/dk$). Fotoreziste etkisi ise $H_2SO_4/H_2O_2/H_2O$ karışımlarına göre daha azdır. Fotorezistin asitlere karşı direncini arttırmak için daha kalın kaplamak ya da sert ısıtma işleminin süresini arttırmak gibi yöntemler uygulanabilmesine rağmen $C_6H_8O_7$, H_2SO_4 'e göre fotoreziste daha az etkilediği için daha avantajlı olduğu söylenebilir. Özellikle küçük boyutlarla çalışılırken bu durum önem kazanır. Şekil 4.14'de gösterildiği üzere yaklaşık aynı derinliklerde 1:8:80 $H_2SO_4/H_2O_2/H_2O$ ve 10:1 $C_6H_8O_7-H_2O$ karışımı/ H_2O_2 çözeltileriyle aşındırılan iki örneğin büyüklükleri 10-15-20 μm arasında değişen yapıların boyut kaybının 10:1 oranında daha az olduğu açıkça görülmektedir.

Şekil 4.15, 5:1 $C_6H_8O_7-H_2O$ karışımı/ H_2O_2 ve 3:1:1, 1:8:160 $H_2SO_4/H_2O_2/H_2O$ çözeltileriyle aşındırılan fotorezist kaplı masatepe yapılarının genişliğini veren profilometre ölçümünü göstermektedir. Üç karışım için de aşındırmadan önce uygulanan sert ısıtma süresi 2 dk'dır ve örnekler 1 μm aşındırılmıştır. $600 \times 600 \mu m^2$ boyutundaki masatepe yapılardan alınan ölçümlerde, 5:1 oranında $C_6H_8O_7-H_2O$ karışımı/ H_2O çözeltisinde toplam boyut kaybı yaklaşık 8 μm iken 3:1:1 ve 1:8:160 $H_2SO_4/H_2O_2/H_2O$ karışımı için yaklaşık 11 μm 'dir.



Şekil 4.14. $H_2SO_4/H_2O_2/H_2O$ ve $C_6H_8O_7-H_2O$ karışımı/ H_2O_2 çözeltileriyle aşındırılmış SEM görüntülerinin karşılaştırılması (a) 1:8:80 $H_2SO_4/H_2O_2/H_2O$ karışımı (b) 10:1 $C_6H_8O_7-H_2O$ karışımı/ H_2O_2



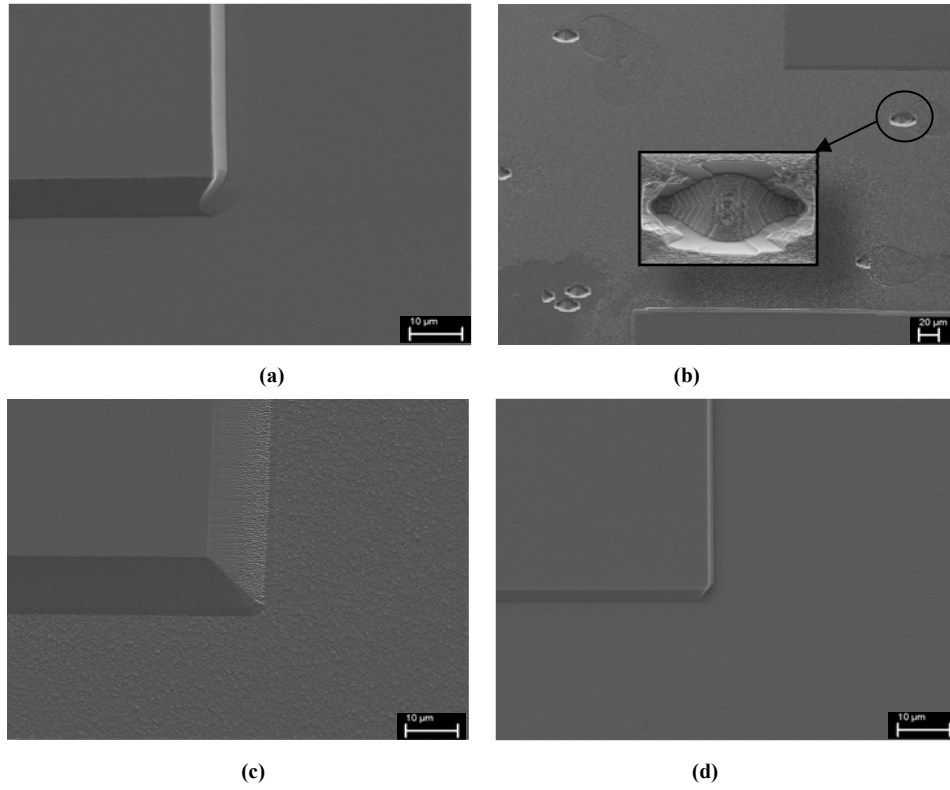
*Pos (position): Konum

Şekil 4.15. (a) 5:1 $C_6H_8O_7$ - H_2O karışımı/ H_2O_2 (b) 3:1:1 H_2SO_4 / H_2O_2 / H_2O ve (c) 1:8:160 H_2SO_4 / H_2O_2 / H_2O çözeltileri için derinlik karşılaştırılması

4.4.3. HCl / H_2O_2 / H_2O çözeltisi ile GaAs Aşındırma

1:4:40, 1:1:1, 1:1:9 ve 1:9:1 oranlarında HCl / H_2O_2 / H_2O çözeltisi hazırlanarak GaAs yüzeyine etkileri incelenmiştir. Şekil 4.16'da görüldüğü üzere H_2SO_4 / H_2O_2 / H_2O ve $C_6H_8O_7$ - H_2O karışımı/ H_2O_2 çözeltilerine göre en pürüzlü yüzeyler 3:1:50, 1:1:1, 1:1:9 oranlarında gözlenmiştir. 1:1:1 oranı HCl / H_2O_2 / H_2O çözeltisi içine örnekler konulduğunda yüzeyin tamamen kabarcıklarla kaplanmış

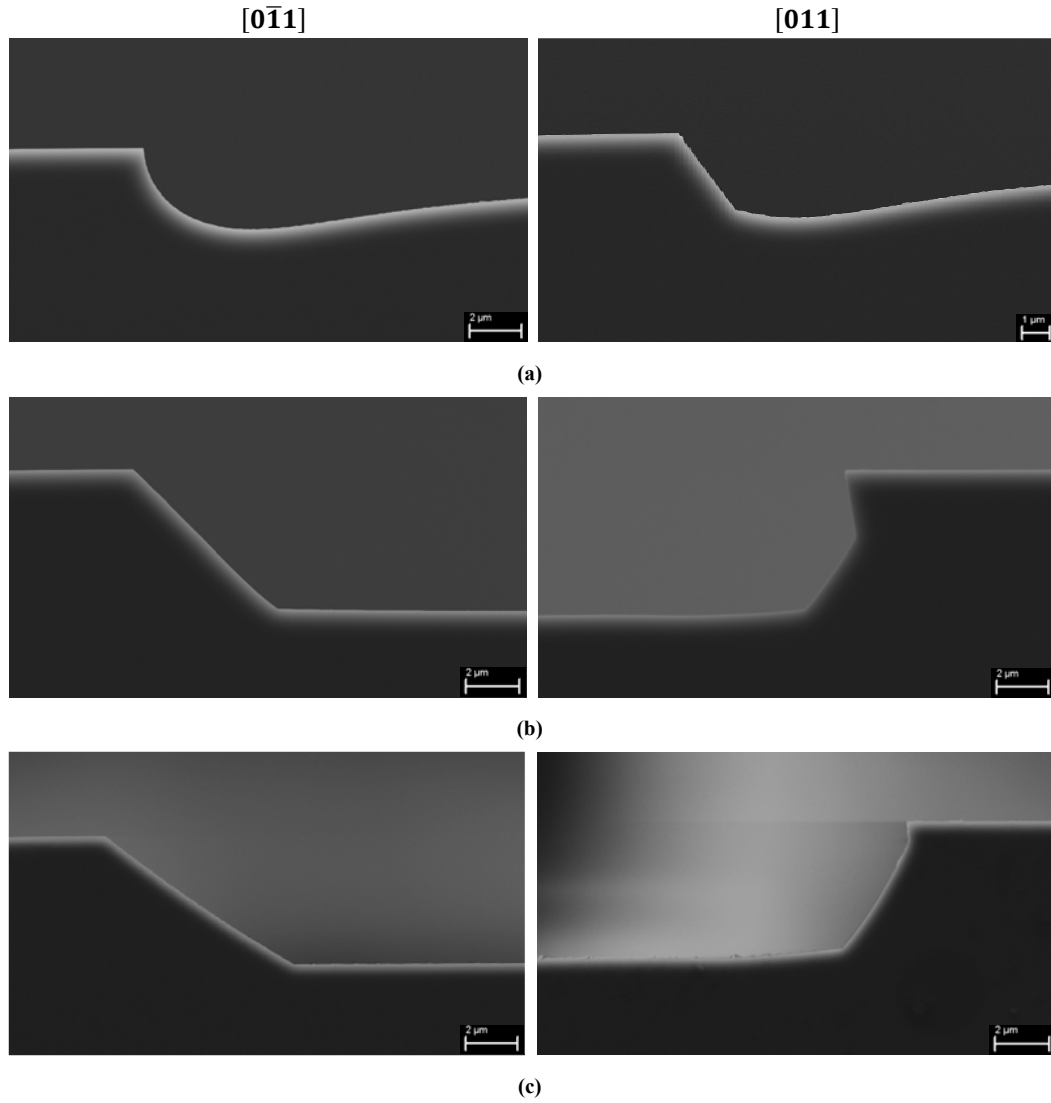
olduğu gözlenmiştir. Çözelti karıştırılarak kabarcıkların örneklerin yüzeyinden uzaklaştırılmasına rağmen yeni kabarcıklar oluşmuştur. Bu nedenden dolayı aşındırma hızına karar verilememiştir. Şekil 4.16b’de yüzeydeki kabarcıkların hareket izleri görülmektedir ve yer yer diğer yüzeylere göre yaklaşık 200 nm kadar aşındırılmış yerler mevcuttur. Bunun nedeni olarak kabarcıklar arasında direk aşındırıcının sızdığı yerlerin diğer yerlere göre daha fazla aşındırıldığı düşünülmektedir. Seyreltilmiş 1:1:9 ($\sim 0,2 \mu\text{m/dk}$) oranında ise (100) düzleminin aşındırılması çok pürüzlüdür ve diğerlerine göre fotorezisti daha fazla aşındırıldığından boyut kaybına neden olmaktadır. En düzgün yüzeyler 1:4:40 ($\sim 0,22 \mu\text{m/dk}$) ve 1:9:1 ($\sim 5,4 \mu\text{m/dk}$) oranındaki karışımlardan elde edilmiştir.



Şekil 4.16. Farklı oranlarda HCl/H₂O₂/H₂O ile aşındırılmış GaAs yüzeylerinin SEM görüntüleri
(a) 1:4:40 (b) 1:1:1 (c) 1:1:9 (d) 1:9:1

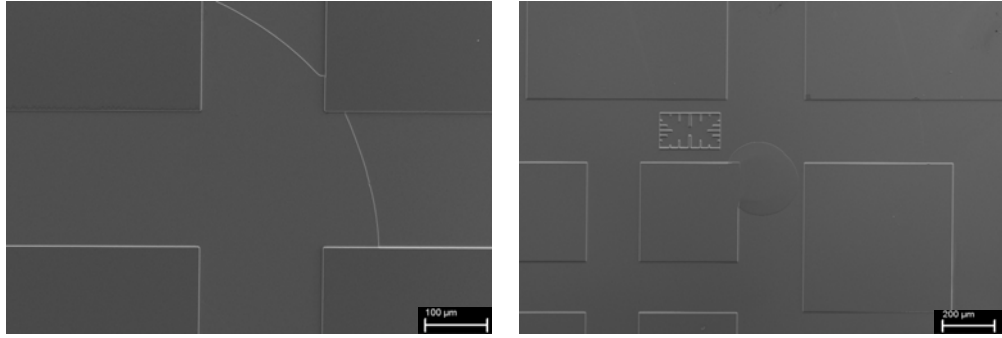
1:4:40, 1:9:1, 80:4:1 HCl/H₂O₂/H₂O karışımlarının aşındırma profilleri ise Şekil 4.17’de gösterilmektedir. 80:4:1 oranı [0 $\bar{1}$ 1] düzleminde izotropik bir görünüm sergilerken, [011] düzleminde anizotropik bir görünüm elde edilmiştir.

Şekil 4.17a’da görüldüğü üzere aşındırılan yüzeyler düz tabanlı değildir. Kristal yönetime bağlı olmaması ve düz tabanlı aşındırılmış yüzeyler elde edilememesi, difüzyon sınırlı bir aşındırma olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda bu oranda yüksek HCl konsantrasyonuna sahip çözeltinin renginin sarı olduğu ve yaklaşık 5 dk sonra çözeltide kabarcıklar oluşmaya başladığı gözlenmiştir. Yaklaşık 30 dk sonra çözeltideki kabarcıklar azalmakla birlikte rengi soluk sarıya dönmüştür. Yüksek H₂O₂ konsantrasyonuna sahip 1:9:1 ve 1:4:40 oranlarında aşındırılmış düz tabanlar görülmekle birlikte (Şekil 4.17b ve c) kristal yönetime bağlı aşındırma sergilerler.



Şekil 4.17. [011] ve [011] yönlerinde kesiti alınan, farklı oranlarda HCl/H₂O₂/H₂O çözeltileriyle aşındırılan GaAs aşındırma profilleri (a) 80:4:1 (b) 1:9:1 (c) 1:4:40

Genel olarak, $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ çözeltilerinin diğer incelenen çözeltilere göre örneklerin yüzeyinde kabarcık oluşumuna daha eğilimli olduğu gözlenmiştir. Bu durumda, kabarcıkların yüzeydeki konumu kritiktir (Şekil 4.18). Eğer iki masatepe yapısı arasında bir kabarcık varsa istenilen derinliğe inilemeyeceğinden ya da iki masatepe arasında bağlantı oluşturabileceğinden aygıtların çalışmamasına neden olabilecektir.



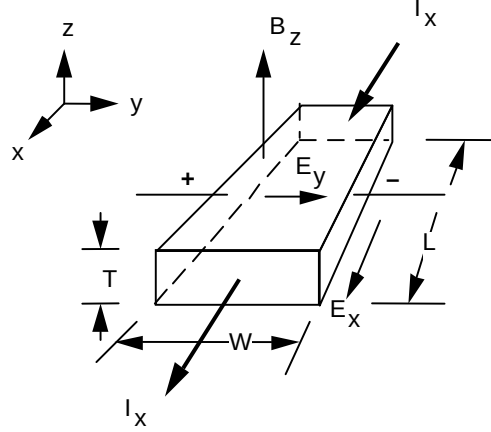
Şekil 4.18. Aşındırma işlemi sırasında örnek yüzeyi üzerinde yer alan kabarcıkların aşındırmaya etkisini gösteren SEM görüntüleri

5. N-TİPİ GaAs HALL ÖLÇÜMLERİ ve GaAs/AlGaAs KUANTUM KUYULU YAPILARIN AYGIT ÜRETİMİ

Bu bölümde, Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'nda kurulu MBE sisteminde yarı-yalıtkan GaAs alttaşlar üzerine büyütülen farklı seviyelerde Si katkılı GaAs epikatmanların Hall ve iki farklı reçete uygulanarak üretilen GaAs/AlGaAs kuantum kuyulu aygıtların akım-voltaj (I-V) ölçümleri anlatılmıştır. Si katkılı GaAs epikatmanların Hall çubuğu ile GaAs/AlGaAs kuantum kuyulu yapının aygıt üretimi Bilkent Üniversitesi, İleri Araştırma Laboratuvarı olanakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

5.1. Si Katkılı GaAs Malzemelerin Hall Ölçümleri

Bir yarıiletken içinden geçen akıma dik yönde bir manyetik alan uygulandığında Hall etkisi gözlenir (Şekil 5.1). Hareket yönlerine paralel olmayan bir manyetik alan içinde hareket eden yükler üzerine Lorentz kuvveti etki eder. Manyetik alanın etkisiyle yükler izledikleri yoldan sapar ve malzemenin bir yüzünde birikir. Diğer yüz, akım taşıyıcı yüklerin yokluğu nedeniyle zıt yüklü kalır. Böyle bir dağılımın doğrultusu hem yük taşıyıcılarının hareket doğrultusuna hem de manyetik alanın doğrultusuna dik olur. Bunun sonucunda bir elektrik alan oluşur. Bu elektrik alan daha fazla yüklerin göçünü engeller. Bunun sonucu olarak yarıiletken üzerinden akım geçmeye devam ettiği sürece “Hall voltajı” olarak adlandırılan sabit bir potansiyel fark oluşur. Bu Hall etkisine dayalı ölçümler, yarıiletken malzemelerin dirençleri, taşıyıcı konsantrasyonları ve mobiliteleri hakkında bilgi verir.



Şekil 5.1. Hall Etkisi

MBE sisteminde büyütülen üç farklı kalınlıkta ve oranda Si katkılı GaAs epikatkmanların, homojen dağılımını test etmek için alttaşın 2 farklı yerinden $1 \times 1 \text{ cm}^2$ boyutunda örnekler kesilmiştir. Tasarlanan Hall çubuğu maskesi ile üretilen yapıların aygıt üretim aşamaları aşağıdaki gibidir.

✓ Fotolitografi (Hall çubuğu tanımlamaları için)

- Fotorezist kaplama: 40 sn 5000 rpm
- Hafif ısıtma: 1 dk 110 °C
- Işınlama: 150 mJ 60 sn
- Tab etme: 10 ml AZ400K + 40 ml de-iyonize su
- Sert ısıtma: 5 dk 120 °C
- Islak Aşındırma: (1:8:80) $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ (Aşındırma derinliği: epikatkman kalınlığı + 1 μm)

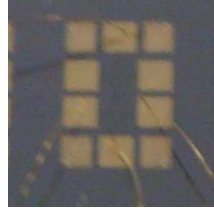
✓ Fotolitografi (Hall çubuğu masatepe metalizasyon için)

- Hafif ısıtma: 1 dk 110 °C
- Işınlama: 150 mJ 60 sn
- Tab etme: 10 ml AZ400K + 40 ml de-iyonize su
- Metal Buharlaştırma: 33 nm Ge + 66 nm Au + 35 nm Ni + 100 nm Au
- Aseton içine koyularak üzeri metal kaplı fotorezist kısımların örnek yüzeyinden kaldırılması
- Çabuk ısıtma işlemi: H_2/N_2 altında 425 °C 60 sn

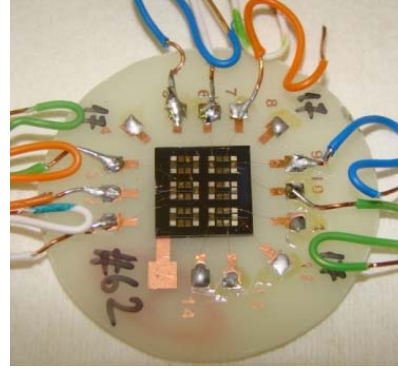
Aygıt tanımlamasını takiben tel bağlayıcı ile Hall çubuğu yapılar paketlenerek ölçümlere hazır hale getirilmiştir (Şekil 5.2 ve Şekil 5.3).



Şekil 5.2. TPT, HB 16 tel bağlayıcı



(a)



(b)

Şekil 5.3. (a) Hall çubuğu aygıtı (b) paketlenmiş Si katkılı GaAs

Hall ölçümleri oda sıcaklığında, 1 Tesla manyetik alan altında yapılmıştır. 10 mA ve 25 mA değerlerinde, manyetik alan ve akım yönü değiştirilerek 4 Hall voltajı değeri ölçülmüş ve ortalaması hesaplanmıştır. Tüm örnekler için her Hall aygıtından alınan ölçüm sonuçlarından taşıyıcı konsantrasyonu Denklem (5.1) ve (5.2) kullanılarak hesaplanmıştır. Aynı yapılar için ortalaması alınarak beklenen ve ölçülen değerler Çizelge 5.1’de gösterilmektedir.

R_H , Hall direnci,

$$R_H = \frac{V_{H(ort)} t}{IB} \quad (5.1)$$

ifadesi ile verilmektedir. Burada; $V_{H(ort)}$ ortalama Hall voltajı, B manyetik alan, I akım, t epikatman kalınlığını göstermektedir.

n taşıyıcı konsantrasyonu ise,

$$n = \frac{1}{R_H e} \quad (5.2)$$

denklemleri ile verilir. Burada e , elektron yüküdür.

Çizelge 5.1. MBE sisteminde büyütülen farklı seviyelerde Si katkılı üç GaAs epikatmanın kalınlıkları, beklenen ve ölçülen taşıyıcı konsantrasyon değerleri

Si katkılı GaAs epikatman no	Epikatman kalınlığı (μm)	n (cm^{-3}) (beklenen)	n (cm^{-3}) (ölçülen)
#59	4	4×10^{16}	$3,84 \times 10^{17}$
#60	2	2×10^{17}	$2,51 \times 10^{18}$
#61	1	1×10^{18}	$5,05 \times 10^{18}$

Katkı konsantrasyonları hesaplamalarında, yarı-yalıtkan GaAs-Si katkılı GaAs arayüzeyindeki ve Si katkılı GaAs-hava arayüzeyindeki arınmış bölgenin oluşumu sonucu elektriksel aktif epikatman kalınlığı azalacaktır. Ancak 10^{17} - 10^{18} cm^{-3} mertebelerindeki katkılarda, arınmış bölge genişlikleri az olduğundan [36], hesaplamalarda büyütülen epikatman kalınlıkları kullanılmıştır. Ölçülen değerlerin, beklenen değerlerden farklı olması, MBE sisteminin kalibrasyonunun gerekliliğini göstermiştir. Si katkı konsantrasyonu için tahmini Si efüzyon hücresi sıcaklıkları kullanıldığı için sonuçların beklenen değerlerden sapması anlaşılır bir durumdur. Bu bilgiler ışığında, MBE sistemindeki Si efüzyon hücresi sıcaklıkları kalibre edilmiş ve üretilen yeni örneklerde beklenen değerlerle ölçülen değerlerin uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

5.2. GaAs/AlGaAs Kuantum Kuyulu Yapının Aygıt Üretimi ve Karanlık Akım-Voltaj Ölçümleri

Kuantum Kuyulu Kızılötesi Algılayıcılar (KKKA), kızılötesi ışınımı algılayarak, karanlık ortamda, sıcak cisimleri ve hareketini tespit eden aygıtlardır. 8-12 μm aralığında geniş bant tepkiselliğine sahip olacak şekilde kuantum kuyulu 3 farklı yapı tasarlanmış ve büyütürülmüştür. Yapıların geçirimli elektron mikroskobu (TEM) tekniği ile incelenmesi T.Karakulak tarafından çalışılmıştır [37]. Daha önceki bölümlerde anlatılan çalışmalar sonucunda aygıt haline getirilen yapıların optiksel ve elektriksel karakterizasyonu üzerine çalışmalar ise H.Kuru tarafından yapılmıştır [38]. Bu bölümde çalışmanın bütünlüğü ve içeriği bakımından sadece Yapı 2 üzerinde yapılan çalışmalar anlatılmıştır.

• Tasarlanan Yapı 2

4000Å n+ GaAs Si: $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

500Å AlGaAs x=0,20

60Å GaAs merkezde 15 Å Si katkılı: $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

400Å AlGaAs x=0,20

60Å GaAs merkezde 15 Å Si katkılı: $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

10 tekrar:

100Å AlGaAs x=0,20

200Å değişken AlGaAs: x=0,25'den 0,20'ye

100Å AlGaAs x=0,25

50Å GaAs merkezde 25 Å Si katkılı: $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

100Å AlGaAs x=0,25

200Å değişken AlGaAs: x=0,20'den 0,25'ye

100Å AlGaAs x=0,20

60Å GaAs merkezde 15 Å Si katkılı: $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

400Å AlGaAs x=0,20

60Å GaAs merkezde 15 Å Si katkılı: $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

500Å AlGaAs x=0,20

7000Å n+ GaAs Si: $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

1000Å GaAs tampon

GaAs SI alttaş

Aygıt üretimi aşamasında ilk olarak örnekler $1 \times 1 \text{ cm}^2$ boyutlarında kesilmiştir. Üretilen örneklerin homojenliğini ve kalitesini test etmek amacıyla

farklı büyüklüklerde (kenar uzunlukları 400, 600, 800, 1000 ve 1500 µm olan kareler) masatepe aygıt maskesi ve kontak alabilmek için uygun kontak maskesi tasarlanmıştır. Aygıt üretimi için 2 ayrı reçete kullanılmıştır. Kullanılan reçetelerin (A ve B olmak üzere) ayrıntıları aşağıda açıklandığı gibidir.

Yapı 2A Reçetesi:

✓ Temizleme

- 5 dk aseton × 2
- 5 dk kaynayan izopropanol × 2
- 30 sn (1:1) HCl/H₂O karışımı

✓ Fotolitografi (Masatepe tanımlamaları için)

- Fotorezist kaplama: 40 sn 5000 rpm
- Hafif ısıtma: 1 dk 110 °C
- Işınlama: 150 mJ 60 sn
- Tab etme: 10 ml AZ400K + 40 ml de-iyonize su
- Sert ısıtma: 5 dk 120 °C
- Islak aşındırma: 200 ml de-iyonize su + 2,5 ml H₂SO₄ + 20 ml H₂O₂
- Aşındırma zamanı: 3 dk 25 sn
 - Aşındırma derinliği + Fotorezist kalınlığı: 3,2 µm
 - Aşındırma derinliği: 1,8 µm

✓ Fotolitografi (Üst halka kontak ve alt kontak metalizasyonu için)

- Hafif ısıtma: 1 dk 110 °C
- Işınlama: 150 mJ 60 sn
- Tab etme: 10 ml AZ400K + 40 ml de-iyonize su
- Metal buharlaştırma: 33 nm Ge + 66 nm Au + 35 nm Ni + 100 nm Au
- Aseton içine koyularak üzeri metal kaplı fotorezist kısımların örnek yüzeyinden kaldırılması
- Çabuk ısıtma işlemi: H₂/N₂ altında 425 °C 60 sn

Yapı 2B Reçetesi:

✓ Temizleme

- 5 dk aseton x 2
- 5 dk kaynayan izopropanol × 2
- 30 sn (1:1) HCl/H₂O karışımı

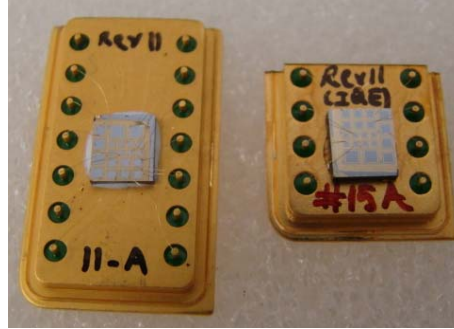
✓ Fotolitografi (Masatepe tanımlamaları için)

- Fotorezist kaplama: 40 sn 5000 rpm
- Hafif ısıtma: 1 dk 110 °C
- Işınlama: 150 mJ 60 sn
- Tab etme: 10 ml AZ400K + 40 ml de-iyonize su
- Sert ısıtma: 5 dk 120 °C
- Islak aşındırma: (25 gr $C_6H_8O_7$ asit + 25 gr H_2O) + 5 ml H_2O_2
- Aşındırma zamanı: 8 dk
 - Aşındırma derinliği + Fotorezist kalınlığı: 3,3 μm
 - Aşındırma derinliği: 1,9 μm

✓ Fotolitografi (Üst halka kontak ve alt kontak metalizasyonu için)

- Hafif ısıtma: 1 dk 110 °C
- Işınlama: 150 mJ 60 sn
- Tab etme: 10 ml AZ400K + 40 ml de-iyonize su
- Metal buharlaştırma: 25 nm Ni + 55 nm Ge + 80 nm Au
- Aseton içine koyularak üzeri metal kaplı fotorezist kısımların örnek yüzeyinden kaldırılması
- Çabuk ısıtma işlemi: N_2 altında 415 °C 15 sn

Aygıt üretimi tamamlandıktan sonra tel bağlayıcı ile farklı masatepe büyüklüklerinden üst kontaklar ve alt kontaklar alınarak paketlenmiş (Şekil 5.4) ve akım-voltaj ölçümleri için hazır hale getirilmiştir.

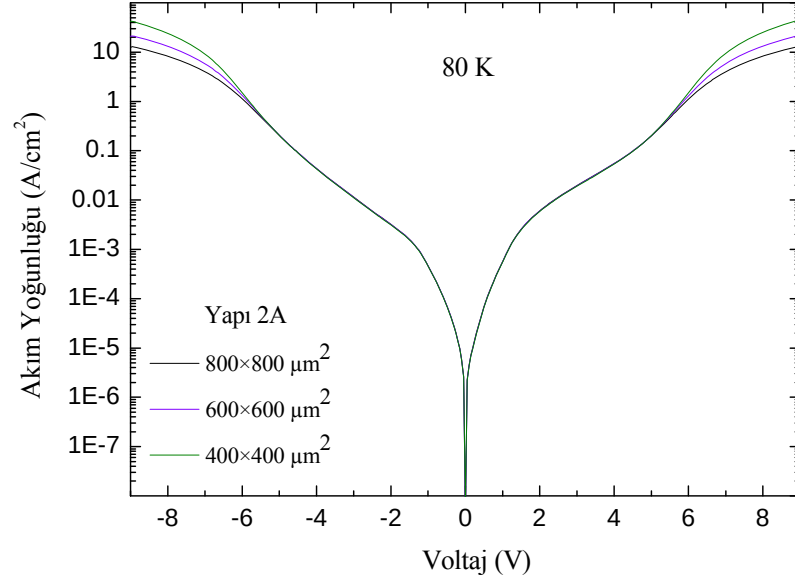


Şekil 5.4. Paketlenmiş Yapı 2A ve 2B

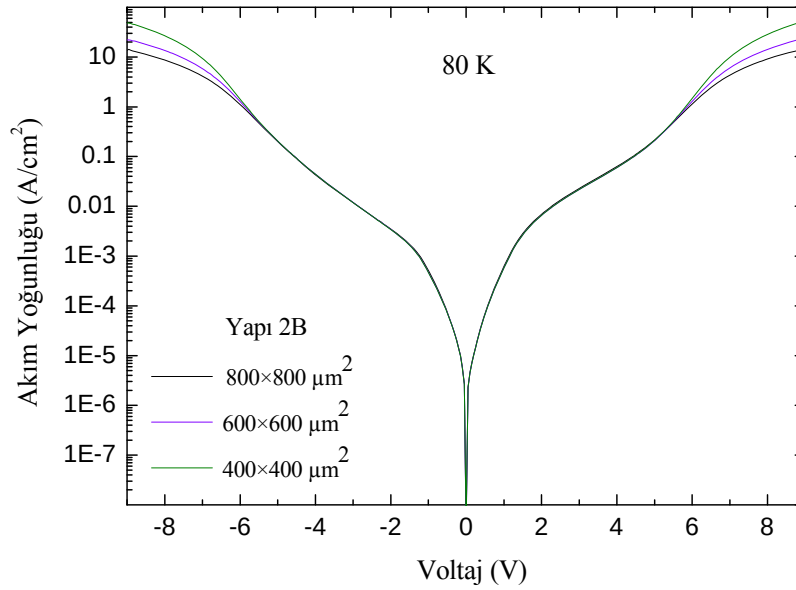
400, 600 ve 800 μm kenar uzunluğuna sahip masatepe yapılarının 80 K'de karanlık akım-voltaj ölçümleri yapılmıştır. Şekil 5.5 ve 5.6'dan görüldüğü üzere yapılar diyot karakteristiği göstermekte ve değişik büyüklükteki masatepe yapılarından elde edilen karanlık akım yoğunluğu değerleri üst üste binmektedir. Farklı büyüklükte masatepe yapılarından elde edilen akım yoğunluklarının üst üste binmesi, büyütülen yapıların homojen olduğunu ve aygıt

üretim sürecinde bir sorun oluşmadığını dolayısıyla üretilen aygıtların düzgün çalıştığını göstermektedir.

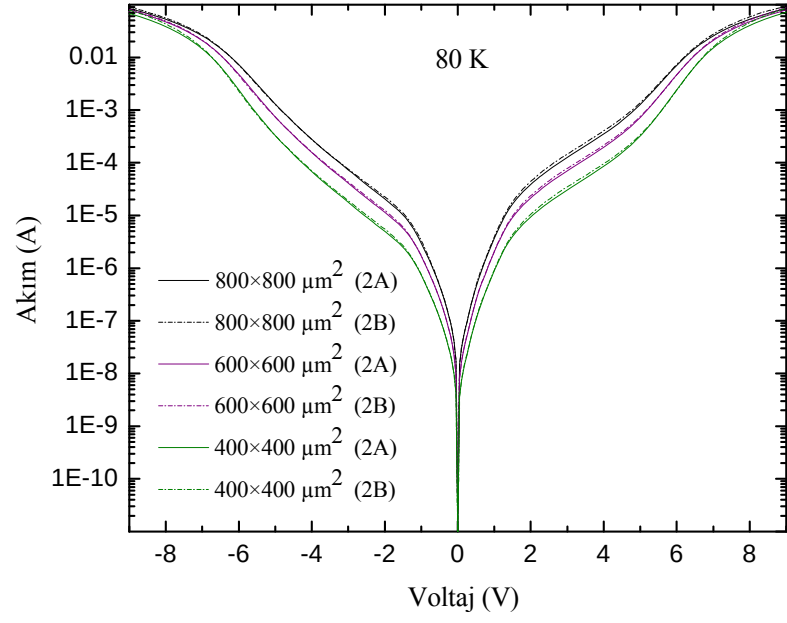
Şekil 5.7’de Yapı 2A ve 2B’nin 400, 600 ve 800 μm kenar uzunluğundaki masatepe yapıları kullanılarak ölçülen akım değerleri karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere Yapı 2 için reçetenin değiştirilmesi, ölçümlerin yapıldığı sıcaklık için sonuçları etkilememiştir.



Şekil 5.5. Yapı 2A’nın akım yoğunluğu-voltaj grafiği



Şekil 5.6. Yapı 2B’nin akım yoğunluğu-voltaj grafiği



Şekil 5.7. Yapı 2A ve 2B'nin akım-voltaj değerlerinin karşılaştırılması

6. SONUÇ

Yarıiletken malzemeler, geçmişten günümüze aygıtların keşfedilmesinde ve geliştirilmesinde önemli görev üstlenmişlerdir. Si'dan sonra en sık kullanılan yarıiletkenler, GaAs ve GaAs tabanlı bileşiklerdir.

Bu çalışmada GaAs/AlGaAs tabanlı yarıiletkenlerin aygıt üretimi üzerine çalışılmıştır. GaAs için günümüzde en sık kullanılan ve diğer yöntemlere göre kısmen daha basit bir yöntem olan ıslak aşındırma çözeltileri incelenmiştir. Hazırlanan farklı asit çözeltilerinin GaAs aşındırma işlemindeki görevi, tepkisi ve işlevi araştırılmıştır. Yeni kurulan MBE sisteminin kalibrasyon işlemleri amacıyla büyütülen Si katkılı GaAs epikatmanlardan Hall çubuğu aygıtları üretilerek Hall ölçümleri yapılmıştır. En son olarak GaAs/AlGaAs kuantum kuyulu yapıların aygıt üretimi gerçekleştirilmiş ve 80 K'de karanlık akım-voltaj ölçümleri yapılmıştır.

GaAs malzemesi için uygun 3 farklı aşındırma çözeltisi ($\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$ karışımı/ H_2O_2 ve $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$) kullanılarak aygıt yapıları oluşturulmuş, SEM ve profilometre tekniklerinden yararlanılarak bu yapılar incelenmiştir. Her bir çözelti için asit, H_2O_2 , H_2O oranları değiştirilerek GaAs aşındırma işlemi sonrası aşındırma hızı, yüzey ve kesit, profili ve kristalografisi hakkında bilgi edinilmiştir. Fotoreziste olabildiğince az etkimesi, aşındırma hızının 0,5-0,2 μm aralığında olması, aşındırılan yüzeylerin düzgün ve düz tabanlı yüzeylere sahip olması göz önünde bulundurularak en uygun çözeltilerin 1:8:80 oranında $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ ve 10:1 oranında $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$ karışımı/ H_2O_2 olduğuna karar verilmiştir.

Nanoboyut Araştırma Laboratuvarı'ndaki MBE sisteminde büyütülen farklı Si katkılı GaAs epikatmanların katkı konsantrasyonlarının hesaplanması için Hall çubuğu aygıtı, uygun aşındırma çözeltisi sonuçlarından yararlanılarak üretilmiştir. Elde edilen veriler ışığında, MBE sisteminin Si katkı miktarı kalibrasyonu yapılmış ve doğru katkı oranlarına sahip GaAs/AlGaAs yapıların büyütülmesinin önü açılmıştır.

1:8:80 $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_2\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ ve 10:1 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7\text{-H}_2\text{O}$ karışımı/ H_2O_2 oranındaki aşındırma çözeltileri ve metal kaplama basamağı için literatürden faydalanarak

seçilen Ge/Au/Ni/Au ve Ni/Ge/Au metal katmanlar olmak üzere, iki farklı reçete hazırlanmıştır. GaAs/AlGaAs kuantum kuyu yapılarından biri üzerinde denenen bu reçetelerle üretilen aygıtlar kullanılarak 80 K sıcaklıkta akım-voltaj ölçümleri yapılmıştır. Farklı iki ayrı reçete kullanılarak üretilen aygıtlar arasında, ölçülen sıcaklıkta, bir fark olmadığı gösterilmiştir. Bu yapılar için, özellikle farklı metal tabaka kaplanmasıyla olası kontak direnci değişimleri ölçümleri etkilememiştir. Yaklaşık $10^{-5} \Omega\text{cm}^2$ mertebesinde olan kontak dirençleri, yapıların direnci (düşük sıcaklıklarda $M\Omega$ mertebesinde) ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir olduğu için bu beklenen bir sonuçtur. Akım-voltaj ölçümleri sonucunda aygıt üretiminin başarıyla gerçekleştirildiği ve MBE’de byttrlen malzemenin homojen bir dağılım sergilediği gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Bardeen, J., Brattian, W.H., “The Transistor, a Semiconductor Triode”, *Phys. Rev.*, **74**, 230-231, 1948.
- [2] Shockley, W., “The Theory of p-n Junction in Semiconductors and p-n Junction Transistors”, *Bell Syst. Techn. J.*, **28**, 435-441, 1949.
- [3] May G.S., Sze S.M., *Fundamentals of Semiconductor Fabrication*, Wiley International Edition, USA, 2004.
- [4] Hepher, M., “The Photoresist Story”, *J. Photo. Sci.*, **12**, 181, 1967.
- [5] Brumfiel, Geoff., *Bell Labs Bottoms Out*, 20 Ağustos 2008.
<http://www.nature.com/news/2008/080820/full/454927a.html>
- [6] Australian Museum, *The Lithographic Process*, 26 Kasım 2009.
<http://australianmuseum.net.au/The-Lithographic-process>
- [7] Wikipedia, *Epitaxy*, 17 Temmuz 2010.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Epitaxy>
- [8] Singh, J., *Semiconductor Optoelectronics Physics and Technology*, McGraw-Hill International Editions, 1995.
- [9] Williams, R., *Modern GaAs Processing Methods*, Artech House, Boston, London, 1990.
- [10] Henini, M., “Molecular Beam Epitaxy: from research to manufacturing”, *Thin Solid Films*, **306**, 331-337, 1997.
- [11] Xiao, H., *Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology*, Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 2001.
- [12] Duffalo, J.M., Monkowski, J.R., “Particulate Contamination and Device Performance”, *Solid State Technol.*, **27**, 109-114, 1984.
- [13] *Handbook of Semiconductor Technology*, Processing of Semiconductors, Edited by Jackson K.A. and Schröter W., Volume 2, WILEY-VCH, Germany, 2000.
- [14] Cornell NanoScale Science and Technology Facility, *Mask Making Equipment Resources*, 2010.
http://www.cnf.cornell.edu/cnf_process_mask_equipment.html#materials
- [15] Microchemicals Katalog, *Lithography*, 2008/2009.

- [16] Baca A.G. and Ashby C.I.H., *Fabrication of GaAs Devices*, The Institution Of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 2005.
- [17] *Gallium Arsenide: Materials, Devices and Circuits*, Edited by M.J.Howes and D.V. Morgan, Chapter 4, John Wiley&Sons Ltd, 1985.
- [18] Roozeboom, F., Parekh, N., “Rapid Thermal Processing systems: A review with Emphasis on Temperature Control”, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **8**, 1249-1259, 1990.
- [19] Hart, M.J. ve Evans, A.G.R., “Rapid Thermal Processing in Semiconductor Technology”, *Semicond. Sci. Technol.*, **3**, 421-436, 1988.
- [20] Gyurcsik, R.S., Riley, T.J., Sorrell, F.Y., “A Model for Rapid Thermal Processing: Achieving Uniformity Through Lamp Control”, *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, **4**, 9-13, 1991.
- [21] Anonim, *Semiconductors*, 2010.
<http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/>
- [22] Virginia Semiconductors, *The Properties of Si, Ge, SiO₂ and Si₃N₄*, Haziran 2002.
<http://www.virginiasemi.com/pdf/generalpropertiesSi62002.pdf>
- [23] Adachi, S. ve Oe, K., “Chemical Etching of (001) GaAs”, *J. Electrochem. Soc.*, **130**, 2427-2435, 1983.
- [24] Lida, S. ve Ito, K., “Selective Etching of Gallium Arsenide Crystals in H₂SO₄-H₂O₂-H₂O System”, *J. Electrochem. Soc.*, **118**, 768-771, 1971.
- [25] MacFadyen, D.N., “On the Preferential Etching of GaAs by H₂SO₄-H₂O₂-H₂O”, *J. Electrochem. Soc.*, **130**, 1934-1941, 1983.
- [26] Shaw, D.W., “Localized GaAs Etching with Acidic Hydrogen Peroxide Solutions”, *J. Electrochem. Soc.*, **128**, 874-880, 1981.
- [27] Shaw, D.W., “Enhanced GaAs Etch Rates Near the Edges of a Protective Mask”, *J. Electrochem. Soc.*, **113**, 958-959, 1966.
- [28] Mori, Y. ve Watanabe, N., “A New Etching Solution System, H₃PO₄-H₂O₂-H₂O, for GaAs and Its Kinetics”, *J. Electrochem. Soc.*, **125**, 1510-1514, 1978.
- [29] Otsubo, M., Oda, T., Kumabe, M. ve Miki H. “Preferential Etching of GaAs Through Photoresist Masks”, *J. Electrochem. Soc.*, **123**, 676-680, 1976.

- [30] Kim, J.H., Lim, D.H. ve Yang G.M., “Selective Etching of AlGaAs/GaAs Structures Using the Solutions of Citric Acid/H₂O₂ and De-ionized H₂O/Buffered Oxide Etch”, *J. Vac. Sci. Technol. B*, **16**, 558-560, 1998.
- [31] Takebe, T., Yamamoto, T., Fujii, M. ve Kobayashi K. “Fundamental Selective Etching Characteristics of HF+H₂O₂+H₂O Mixtures for GaAs”, *J. Electrochem. Soc.*, **140**, 1169-1180, 1993.
- [32] DeSalvo, G.C., Tseng, W.T., ve Comas J., “Etch Rates and Selectivities of Citric Acid/Hydrogen Peroxide on GaAs, Al_{0,3}Ga_{0,7}As, In_{0,2}Ga_{0,8}As, In_{0,53}Ga_{0,47}As, In_{0,52}Al_{0,48}As and InP”, *J. Electrochem. Soc.*, **139**, 831-835, 1992.
- [33] Iliadis, A., ve Singer, K.E., “The Role of Germanium in Evaporated Au-Ge Ohmic Contacts to GaAs”, *Solid-State Electronics*, **26**, 7-14, 1983.
- [34] Murakami, M., “Development of Ohmic Contact Materials for GaAs Integrated Circuits”, *Materials Science Reports*, **5**, 273-317, 1990.
- [35] Shih, Y., Murakami, M., Wilkie, E.L., ve Callegari, A.C., “Effects of interfacial microstructure on uniformity and thermal stability of AuNiGe ohmic contact to n-type GaAs”, *J. Appl. Phys.*, **62**, 582-592, 1987.
- [36] Chandra A., Wood, C.E.C., Woodard, D.W., ve Lester, E.C., “Surface and Interface Depletion Corrections to Free Carrier-Density Determinations by Hall Measurements”, *Solid-State Electronics*, **22**, 645-650, 1979.
- [37] Karakulak, T., *GaAs/AlGaAs Tabanlı Kuantum Kuyularının Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) ile Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2010.
- [38] Kuru, H., *GaAs/AlGaAs Kuantum Kuyularının Optiksel ve Elektriksel Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2010.