

KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTROKİMYASAL AŞINDIRMA YÖNTEMİ İLE GaAs ÜZERİNDE ÜÇ
BOYUTLU MİKRO VE NANO YÜZEY ÜRETİMİ**

DOKTORA TEZİ

Hasan YÜNGEVİŞ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

HAZİRAN 2023

KARAMANOĞLU MEHMETBEY ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTROKİMYASAL AŞINDIRMA YÖNTEMİ İLE GaAs ÜZERİNDE ÜÇ
BOYUTLU MİKRO VE NANO YÜZEY ÜRETİMİ**

DOKTORA TEZİ

Hasan YÜNGEVİŞ
(200816103)

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sabriye AÇIKGÖZ

HAZİRAN 2023

TEZ ONAYI

Hasan YÜNGEVİŞ tarafından hazırlanan “**Elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile GaAs üzerinde üç boyutlu mikro ve nano yüzey üretimi**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman:

Prof. Dr. Sabriye AÇIKGÖZ

Jüri Üyeleri

İmza:

Prof. Dr. Hamdi ŞÜKÜR KILIÇ

Prof. Dr. Sabriye AÇIKGÖZ

Prof. Dr. Faruk ÖZEL

Doç. Dr. Aydın RUŞEN

Dr. Öğr. Üyesi Yasemin GÜNDOĞDU

Tez Savunma Tarihi: 19/06/2023

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Doç. Dr. Ahmet KAYABAŞI
Enstitü Müdürü



BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Hasan YÜNGEVİŞ





Biricik eşime ve oğluma,



ÖNSÖZ

“Elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile GaAs üzerinde üç boyutlu mikro ve nano yüzey üretimi” başlıklı bu çalışmada, n tipi ve p tipi GaAs yarı iletkenleri yüzeyinde elektro kimyasal aşındırma yöntemi ile Ga_2O_3 altıgen çubuklar, arsenik oksit mikrokristaller, homojen gözenekli yapılar ve mikro yarıklar olmak üzere farklı tipte ve boyutta üç boyutlu mikro ve nano yapılar oluşturulmuştur.

Bu çalışmanın yürütülmesinde çok değerli emekleri olan beni pozitif motivasyonu ile destekleyen sabırlı tez danışmanım Prof. Dr. Sabriye AÇIKGÖZ’ e, çalışmalarımın bir kısmında emeği geçmiş Emin ÖZÜNAL ve Ayşegül ŞAHİN’ e dostlukları ve yardımları için sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

114F451 nolu proje ile bu tez çalışmasına vermiş olduğu maddi desteklerden dolayı TÜBİTAK’a teşekkürlerimi sunarım

Haziran 2023

Hasan YÜNGEVİŞ



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxiii
ABSTRACT	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması	3
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
2.1 Yarı İletken Malzemeler	7
2.1.1 Yarı iletkenlerde rekombinasyon süreçleri ve taşıyıcı ömrü	11
2.1.1.1 Işımalı rekombinasyon süreci	11
2.1.1.2 Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinasyon süreci	12
2.1.1.3 Auger rekombinasyon süreci	12
2.1.1.4 Yüzey rekombinasyonları	13
2.1.2 Yarı iletkenlerin optik özellikleri	14
2.1.2.1 Absorbsiyon	14
2.1.2.2 Kendiliğinden emisyon	15
2.1.2.3 Uyarılmış emisyon	16
2.1.2.4 Fotoluminesans	16
2.1.3 Yarı iletken nano yapılar	18
2.1.3.1 Sıfır boyutlu nano yapılar	19
2.1.3.2 Tek boyutlu nano yapılar	20
2.1.3.3 İki boyutlu nano yapılar	21
2.1.3.4 Üç boyutlu nano yapılar	21
2.1.4 Nano yapı malzemelerin üretimi	22
2.1.4.1 Aşağıdan yukarıya üretim yöntemleri	22
2.1.4.2 Yukarıdan aşağı üretim yöntemleri	23
3. MALZEME VE YÖNTEM	31
3.1 Malzeme	31
3.1.1 Kullanılan kimyasal maddeler	31
3.1.2 Çift hücreli elektrokimyasal aşındırma işleminde kullanılan cihazlar	31
3.2 Metot	32
3.2.1 GaAs yarı iletkenleri üzerinde üç boyutlu mikro ve nano yüzeylerin oluşturulması	32
3.2.2 Aşındırılan GaAs yüzeylere boya moleküllerinin bağlanması	33
3.2.3 Floresan yaşam ömrü ölçümleri	34
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	43

4.1 n-GaAs Yarı İletkenlerin HF: Etanol Çözeltisi İçerisinde Elektrokimyasal Aşındırma İşlemi	43
4.1.1 Akım yoğunluğunun etkisi	43
4.1.2 Aşındırma süresinin etkisi	47
4.1.3 Aydınlatma kaynağının etkisi.....	48
4.1.4 Asit konsantrasyonunun etkisi	49
4.1.5 HF- Etanol çözeltisi içerisinde aşındırılan n-GaAs numunelerin foto ışına özelliklerinin belirlenmesi.....	50
4.1.6 HF- Etanol çözeltisi içerisinde aşındırılan n-GaAs numunelerin FLIM analizi sonuçları.....	52
4.1.7 Perilen bağlanan numunelerin FLIM analizleri	54
4.2 n-GaAs Yarı İletkenlerin HCl: Etanol Çözeltisi İçerisinde Elektrokimyasal Aşındırma İşlemi	58
4.2.1 Akım yoğunluğunun etkisi	58
4.2.2 Aşındırma süresinin etkisi	59
4.2.3 Aydınlatma kaynağının etkisi.....	60
4.2.4 HCl- Etanol çözeltisi içerisinde aşındırılan n-GaAs numunelerin foto ışına özelliklerinin belirlenmesi	62
4.2.5 HCl- Etanol çözeltisi içerisinde aşındırılan n-GaAs numunelerin FLIM analizi sonuçları.....	63
4.3 n-GaAs Yarı İletkenlerin HCl: Saf Su Çözeltisi İçerisinde Elektrokimyasal Aşındırma İşlemi	65
4.3.1 Akım yoğunluğunun etkisi	65
4.3.2 Aşındırma süresinin etkisi	66
4.3.3 Aydınlatma kaynağının etkisi.....	66
4.3.4 HCl- Saf su çözeltisi içerisinde aşındırılan n-GaAs numunelerin foto ışına özelliklerinin belirlenmesi.....	67
4.3.5 HCl- Saf su çözeltisi içerisinde aşındırılan n-GaAs numunelerin FLIM analizi sonuçları.....	68
4.4 p-GaAs Yarı İletkenlerin HF: Etanol Çözeltisi İçerisinde Elektrokimyasal Aşındırma İşlemi	71
4.4.1 Mikrokristaller/ mikro çubuklar	71
4.4.1.1 Akım yoğunluğunun etkisi	71
4.4.1.2 Aşındırma süresinin etkisi	73
4.4.1.3 Mikrokristallerin ve mikro çubukların foto ışına özelliklerinin belirlenmesi	76
4.4.1.4 Mikrokristallerin ve mikro çubukların FLIM analizi sonuçları	77
4.4.2 Gözenekli yapı.....	79
4.4.2.1 Akım yoğunluğunun etkisi	80
4.4.2.2 Aşındırma süresinin etkisi	82
4.4.2.3 Mikro yarıkların FLIM analizi sonuçları	84
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	87
KAYNAKLAR.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	97

KISALTMALAR

SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
FLIM	: Floresan yaşam ömrü görüntüleme mikroskobu
LED	: Işık yayan diyot
EDS	: Enerji dağılım spektroskopisi
TCSPC	: Zaman uyumlu tek foton sayma tekniği
SRH	: Shockley-Read-Hall
DOS	: Durum yoğunluğu
CVD	: Kimyasal buhar biriktirme
XPS	: X-ışını fotoelektron spektrometresi
PL	: Fotoluminesans spektrometresi
APTES	: Aminotrietoksilan



SEMBOLLER

Si	: Silisyum
Ge	: Germanyum
GaAs	: Galyum arsenit
HCl	: Hidroklorik asit
H₂SO₄	: Sülfürik asit
CdS	: Kadmiyum sülfür
ZnS	: Çinko sülfür
CdSe	: Kadmiyum selenit
GaP	: Galyum fosfat
C₂H₅OH	: Ethanol
C₂₀H₁₂	: Perilen
CH₃OH	: Methanol
Sb	: Antimuan
B	: Bor
D(E)	: Durum yoğunluğu
E_v	: Valans bandı enerji seviyesi
E_g	: Yasak bant aralığı
E_c	: İletim bandı enerji seviyesi
n	: Taşıyıcı elektron yoğunluğu
α	: Soğurma katsayısı
a_0	: Bohr uyarım yarıçapı
e	: Elektron yükü
λ	: Dalga boyu
ϵ	: Dielektrik katsayısı
τ	: Floresan yaşam ömrü
k_{ET}	: Elektron transfer oranı
T	: Sıcaklık



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Literatür taraması özet çizelgesi.	6
Çizelge 3.1 : FLIM sisteminde kullanılan lazerlerin özellikleri.	37
Çizelge 4.1 : ROI 1 ve ROI 2 bölgelerine ait yaşam ömrü ölçüm sonuçları ve fitting parametreleri.....	53
Çizelge 4.2 : Perilen bağlanan Ga_2O_3 prizmaların farklı noktalarından alınan floresan yaşam ömrü değerleri ve bu noktalar için hesaplanan Ga_2O_3 - perilen boya molekülleri arasındaki elektron transferi oranları (k_{ET}).	57
Çizelge 4.3 : Şekil 4.16’da görülen FLIM resimlerinde farklı renkteki bölgelerden (mavi, yeşil, sarı ve kırmızı) alınan tek nokta ölçümleri için hesaplanan yaşam ömrü parametreleri.	65
Çizelge 4.4 : Şekil 13’ de görülen FLIM resimlerinde farklı renkteki bölgelerden (mavi, yeşil ve kırmızı) alınan tek nokta ölçümleri için hesaplanan yaşam ömrü parametreleri.	69
Çizelge 4.5 : FLIM resminde seçilen farklı iki noktadan alınan tek nokta ölçümleri için hesaplanan yaşam ömrü parametreleri.	71



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Elektriksel özelliklerine göre malzemeler.	7
Şekil 2.2 : Bant seviyelerinin oluşumunun şematik anlatımı.	8
Şekil 2.3 : (a) İletken, (b) yarı iletken, (c) yalıtkan malzemelerde band yapısının gösterimi.	9
Şekil 2.4 : (a) Değerlik elektronunun uyarılması, (b) Uyarılmış seviyeye geçen elektrondan kalan boşluğun, komşu elektron ile doldurulması sonucu boşluğun yer değiştirmesi.	9
Şekil 2.5 : n tipi katkılama şematik anlatımı.	10
Şekil 2.6 : p tipi katkılama şematik anlatımı.	11
Şekil 2.7 : Işımalı rekombinasyon süreci.	12
Şekil 2.8 : SRH rekombinasyon süreci.	12
Şekil 2.9 : Auger rekombinasyon süreci.	13
Şekil 2.10 : Elektronun ışık ile uyarılması.	15
Şekil 2.11 : Safsızlık içeren yarı iletkenlerde absorpsiyon.	15
Şekil 2.12 : Kendiliğinden emisyon.	16
Şekil 2.13 : Uyarılmış emisyon.	16
Şekil 2.14 : (a) Floresan ışımada stokes kayması, (b) Floresan ışımanın şematik anlatımı.	17
Şekil 2.15 : Singlet ve triplet elektron geçişleri.	17
Şekil 2.16 : (a) Fosforesan ışımada stokes kayması, (b) Fosforesan ışımanın şematik anlatımı.	18
Şekil 2.17 : Farklı yönlerden sınırlandırılan nano malzemelerin şematik gösterimi.	19
Şekil 2.18 : (a) Yığinsal yarı iletkenlerin, (b) Sıfır boyutlu nano yapıların durum yoğunluğu.	19
Şekil 2.19 : Kuantum noktalar boyuta bağlı ışıma dalga boyunun değişimi.	20
Şekil 2.20 : Tek boyutlu nano yapıların durum yoğunluğu.	21
Şekil 2.21 : İki boyutlu nano yapıların durum yoğunluğu.	21
Şekil 2.22 : CVD sistemi şematik gösterimi.	22
Şekil 2.23 : Moleküler ışın epitaksisi şematik anlatımı.	23
Şekil 2.24 : Farklı öğütme yöntemleri (a) eksenel değirmen, (b) geleneksel değirmen, (c) atritör değirmen.	24
Şekil 2.25 : Öğütülmeden önce, (b) Eksenel değirmen ile 4 saatlik öğütme sonrasında elde edilmiş CoFe_2O_4 tanecikler.	24
Şekil 2.26 : Lazer ablasyonu şematik anlatımı.	25
Şekil 2.27 : Elektrokimyasal aşındırma işlemi.	26
Şekil 2.28 : Farklı elektrolitik sıvılar içerisinde aşındırılmış n-GaAs. (a) HF: Dimetilformamit (DMF) (1:3), (b) HCl:DMF (1:3), (c) H_2SO_4 :DMF (1:3).	27
Şekil 2.29 : (a) beyaz LED (b) mavi LED (c) CW HeNe laser (633 nm), (d) pulsed hydrogen laser (337 nm), (e) pulsed diode laser (405 nm), and (f) pulsed diode laser (467 nm)	28

Şekil 2.30 : Farklı akım şiddetleri ile üretilmiş gözenekli silikon yapılar.	28
Şekil 2.31 : Farklı sürelerde aşındırılan (a) 5 dk, (b) 7,5 dk, (c) 10 dk, (d)15 dk.....	29
Şekil 3.1 : Elektrokimyasal aşındırma şematik gösterimi.....	32
Şekil 3.2 : Çift hücreli elektrokimyasal aşındırma işlemi için kurulan düzenek.	33
Şekil 3.3 : Perilen boya moleküllerinin aşındırılan yüzeylere bağlanması.	34
Şekil 3.4 : TCSPC tekniği şematik anlatımı.	34
Şekil 3.5 : Yaşam ömrü eğrisinin birçok ölçümle oluşumu.....	35
Şekil 3.6 : Yaşam ömrü eğrisinin çift üstel fonksiyon ile analiz edilmesi.....	36
Şekil 3.7 : El yapımı FLIM sistemi şematik gösterimi.	37
Şekil 3.8 : (a)Lazer başlığından çıkan eliptik şekilli lazer ışını. (b) tek modlu fiberden geçirildikten sonra lazer ışını.	38
Şekil 3.9 : Tek modlu fiberden geçirilen lazer ışığının hizalanması.	39
Şekil 3.10 : (a) 405 nm dalga boyundaki lazer için kullanılan, (b) 470 nm dalga boyundaki lazer için kullanılan iki renkli aynaların yansıtma ve geçirgenlik eğrileri.	39
Şekil 3.11 : (a) 405 nm lazer için (b) 470 nm lazer için kullanılan artık lazer ışığının dedektöre ulaşmasını engelleyen farklı filtrelerin geçirim grafikleri.	40
Şekil 3.12 : Pinhol şematik gösterimi.	41
Şekil 3.13 : FLIM görüntüsünün oluşturulması.....	42
Şekil 4.1 : (a) 5, (b) 10, (c) 20 ve (d) 30 mA/cm ² akım yoğunluklarında aşındırılan n-GaAs yüzeylerin SEM fotoğrafları.....	44
Şekil 4.2 : (a)İşlem görmemiş GaAs EDS analizi , (b)çubuksu hegzagonal yapıların üzerinden alınan nokta EDS analizi.	45
Şekil 4.3 : Referans GaAs numunelerin ve hegzagonal prizmaların XPS spektrumları (a)genel spektrum, (b) Ga3d, (c) Ga2p çekirdek seviye spektrumları. ...	46
Şekil 4.4 : Farklı sürelerde aşındırılan n-GaAs yüzeylerin SEM resimleri (a) 1, (b) 2, (c) 3 dk.....	47
Şekil 4.5 : (a) halojen lamba, (b) mavi LED, (c) sürekli modda 470nm lazer (d) darbeleri modda 470 nm lazer olmak üzere farklı aydınlatma kaynakları kullanılarak aşındırılan GaAs yüzeylerin SEM fotoğrafları.....	48
Şekil 4.6 : Farklı derişimlerde asit içeren çözeltiler içerisinde aşındırılan GaAs yüzeylerin SEM resimleri HF: Ethanol(a) 1:1, (b) 1:2, (c) 1:3 (d) 1:4. .	50
Şekil 4.7 : Foto ışımaya spektrumları değişimleri (a) akıma bağlı, (b) zamana bağlı, (c) aydınlatma kaynağına bağlı (d) asit konsantrasyonuna bağlı değişimler.	51
Şekil 4.8 : (a) Yüzeyin SEM resmi (b) aynı numune yüzeyinden elde edilen FLIM resmi (c) Farklı ROI 1 ve ROI 2 bölgelerinden alınan yaşam ömrü eğrileri.	53
Şekil 4.9 : Farklı boyuttaki numunelerden alınan şiddete bağlı FLIM görüntüleri. ..	54
Şekil 4.10 : (a), Perilen molekülünün monomer ve eksimer ışımaya spektrumları (b) ve (c) perilen ile boyanan farklı boyuttaki hegzagonal çubukların FLIM resimleri.....	55
Şekil 4.11 : Perilen molekülleri ve Ga ₂ O ₃ yarı iletkeni arasındaki elektron transferlerinin şematik gösterimi.	58
Şekil 4.12 : Farklı akım yoğunluklarında aşındırılan GaAs yüzeylerin SEM resimleri (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mA/cm ² (d) çekirdeklenme bölgelerinin büyütülmüş görüntüsü.	59
Şekil 4.13 : Farklı sürelerde aşındırılan GaAs yüzeylerin SEM resimleri (a) 1, (b) 2, (c) 3 dk.....	60
Şekil 4.14 : (a) Halojen lamba, (b) beyaz LED, (c) 470 nm ve (d) 405 nm darbeleri lazer ile aydınlatılarak hazırlanan GaAs numunelerin SEM görüntüleri.	

(e) Kristaller üzerinden alınan EDS spektrumu (f) elementlerin atomik yüzde oranları.....	61
Şekil 4.15 : HCl-Etanol ortamında üretilen GaAs numunelerin ışıma spektrumlarının (a) akım şiddetine göre, (b) aşındırma süresine göre, (c) aydınlatma kaynağına göre değişimleri.	62
Şekil 4.16 : HCl- Etanol çözeltisi içinde hazırlanan yüzeylerden alınan yaşam ömrüne bağlı FLIM görüntüleri.	64
Şekil 4.17 : FLIM resimlerinde farklı renkte görünen bölgelerden (mavi, yeşil, sarı ve kırmızı) alınan tek nokta yaşam ömrü eğrileri.	64
Şekil 4.18 : HCl:Saf su elektrolit çözeltisi içerisinde (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mA/cm ² akım yoğunluklarında hazırlanan yüzeylerin SEM resimleri.....	66
Şekil 4.19 : HCl: Saf su elektrolit çözeltisi içerisinde (a) 1, (b) 2 ve (c) 3 dk aşındırılarak hazırlanan yüzeylerin SEM resimleri.	66
Şekil 4.20 : Farklı aydınlatma kaynakları kullanılarak üretilen GaAs numunelerin SEM görüntüleri. (a) Halojen lamba, (b) LED, (c) şiddeti 30 mW/cm ² ve (d) 50 mW/cm ² olan 470 nm darbeli lazer.	67
Şekil 4.21 : HCl-Saf su ortamında üretilen GaAs numunelerin ışıma spektrumlarının (a) akım şiddetine göre, (b) aşındırma süresine göre, (c) aydınlatma kaynağına göre değişimleri.	68
Şekil 4.22 : HCl- Saf su Çözeltisi içerisinde aşındırılan n-GaAs numunenin (a) SEM resmi (b) ışıma şiddetine bağlı FLIM resmi (c) yaşam ömrü histogramı ve (d) yaşam ömrüne bağlı FLIM resmi.	69
Şekil 4.23 : (a) Seçilen gözenekli numunenin SEM resmi, (b) yaşam ömrüne bağlı FLIM resmi ve (c) farklı iki noktada alınan yaşam ömrü eğrisi.	70
Şekil 4.24 : p-GaAs aşındırma işlemi sonucu oluşan yapının şematik anlatımı.....	71
Şekil 4.25 : Farklı akım yoğunluklarında aşındırılan GaAs yüzeylerin SEM resimleri (a) 15, (b) 30 ve (c) 45 mA/cm ² (d) yüzey kristallerinin EDX analiz sonucu.....	72
Şekil 4.26 : Farklı sürelerde aşındırılan GaAs yüzeylerin SEM resimleri (a) 2, (b) 3, (c) 4 dk.	73
Şekil 4.27 : İşlenmemiş GaAs, yüzeyi mikrokristallerle kaplanan ve mikro çubukla kaplanan bir numunelerin XPS analiz sonucu (a), As3d piki (b) ve Ga3d piki(c).	76
Şekil 4.28 : Aşındırılan P-GaAs numunelerin ışıma spektrumlarının (a) akım şiddetine göre, (b) aşındırma süresine göre değişimleri.....	77
Şekil 4.29 : (a) As ₂ O ₃ ve (b) Ga ₂ O ₃ şiddet temelli FLIM görüntüleri.....	77
Şekil 4.30 : Mikrokristallerin FLIM ölçüm sonuçları (a) FLIM görüntüsü, (b) Floresan yaşam ömrü histogramı, (c) FLIM eğrisi.	78
Şekil 4.31 : Şekil 10. Mikro-çubukların FLIM ölçüm sonuçları (a) FLIM görüntüsü, (b) Floresan yaşam ömrü histogramı, (c) FLIM eğrisi.....	79
Şekil 4.32 : Karanlıkta (a) 15, (b) 30 ve (c) 45 mA/cm ² akım yoğunluğunda aşındırılan yüzeylerin SEM görüntüleri, bütün görüntülerde ölçek 1 mikrondur.	80
Şekil 4.33 : Halojen lamba aydınlatması ile farklı akım yoğunluklarında aşındırılan GaAs yüzeylerin yüksek büyütme SEM resimleri (a) 15, (b) 30 ve (c) 45 mA/cm ²	82
Şekil 4.34 : Karanlık ortamda (a) 1, (b) 2 ve (c) 3 dk süreyle aşındırılan p-GaAs yarı iletkenlerinin SEM görüntüleri. Bütün görüntülerde ölçek 1 mikrondur.	83
Şekil 4.35 : Farklı sürelerde aşındırılan GaAs yüzeylerin yüksek büyütme SEM resimleri (a) 2, (b) 3, (c) 4 dk.	84

Şekil 4.36 : Farklı kalınlıktaki mikro yarıkların (a), (b) ve (c) SEM resimleri, (d), (e) ve (f) yaşam ömrüne bağlı FLIM resimleri ve (g), (h) ve (i) seçilen ROI bölgelerindeki yaşam ömrü histogramları. **85**



ÖZET

Doktora Tezi

ELEKTROKİMYASAL AŞINDIRMA YÖNTEMİ İLE GaAs ÜZERİNDE ÜÇ BOYUTLU MİKRO VE NANO YÜZEY ÜRETİMİ

Hasan YÜNGEVİŞ

Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği AnaBilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sabriye AÇIKGÖZ

Haziran, 2023, 98 sayfa

Elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile altıgen çubuklar, mikro kristaller, homojen gözenekli yapılar ve mikro yarık yapıları olmak üzere çeşitli üç boyutlu mikro ve nano yüzeyler n ve p tipi GaAs yarı iletkenleri üzerinde başarıyla oluşturulmuştur. Enerji dağılım spektroskopisi ve X-ışını fotoelektron spektrometresi birlikte kullanılarak altıgen çubuk yapılarının ve mikro kristallerin kimyasal bileşimi tespit edilmiştir. Her iki teknikte altıgen çubukların Ga_2O_3 ve mikro kristallerin ise arsenik oksit türlerinden oluştuğunu teyit etmiştir. Aşındırma parametrelerinin değiştirilmesi ile çubukların, mikrokristallerin, gözenekli ve mikro yarık yapıların boyutu ve oluşma yoğunluğu kontrol edilmiştir. Oluşturulan yapıların ışımaya özellikleri fotoluminesans spektrometresi ile incelenmiştir. Ga_2O_3 çubukların 470 nm’ de ve As_2O_3 kristallerin ise 520nm’ de emisyon piki gözlemlenmiştir. Gözenekli yapılar 470 nm ve 680 nm’de olmak üzere çift tepeli bir ışımaya yapmıştır. Işıma şiddeti gözenek boyutunun azalması ile artmıştır. Mikro ve nano yapıların taşıyıcı ömrünün belirlenmesi için FLIM analizleri gerçekleştirilmiştir. Taşıyıcı rekombinasyon yaşam ömrünün yüzeyde oluşan yapının boyutundan doğrudan etkilendiği sonucuna varılmıştır. Boyut azaldıkça, yüzey rekombinasyonları daha dominant rekombinasyon süreci haline gelerek, rekombinasyon hızını önemli ölçüde arttırmıştır. Ek olarak Ga_2O_3 yüzeyler perilen boya molekülleri ile bağlanarak konjuge bir sistem oluşturularak bu sistemin verimliliği ölçülmüştür. Agrega perilen molekülleri ile Ga_2O_3 yarı iletkenleri arasında yüksek verimlilikte bir elektron transferinin gerçekleştiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: GaAs, Ga_2O_3 , As_2O_3 , elektrokimyasal aşındırma, gözenekli yapı, yarı iletken, FLIM, nano yapı, mikro yapı, dağlama.

* Bu çalışma 114F451 nolu TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmiştir.



ABSTRACT

Ph.D. Thesis

“3D MICRO AND NANO SURFACE MANUFACTURING ON GaAs BY ELECTROCHEMICAL ETCHING METHOD”

Hasan YÜNGEVİŞ

Karamanoğlu Mehmetbey University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Metallurgy and Materials Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Sabriye AÇIKGÖZ

Haziran, 2023, 98 pages

Various 3D micro and nano surfaces were successfully formed on n, p-GaAs semiconductors by electrochemical etching. Hexagonal rods, micro crystals, homogenous porous surfaces and micro groove surfaces were formed on the surface of GaAs semiconductors. Energy-dispersive X-ray spectroscopy and X-ray photoelectron spectroscopy were used simultaneously for chemical analysis of hexagonal rods and micro crystals. Both techniques were confirmed that hexagonal rods composed of Ga_2O_3 and micro crystals composed of arsenic oxide species. Size and formation density control of rods, micro crystals, pores and micro grooves were achieved by changing etching parameters. The emission properties of the formed structures were investigated by photoluminescence spectrometry. Strong emission peak was observed at about 470 nm in Ga_2O_3 formed samples and at 520 nm in arsenic oxide formed samples. Two emission peaks were observed in porous GaAs samples at about 470 nm and 680 nm. Emission intensity was increased by decreasing pore size. FLIM analyses were performed to gain information about carrier life time for each micro/nano structures. It has been concluded that the carrier recombination life time was strongly affected by the size of the structures formed on the surface. As the size decreases, surface recombination becomes dominant, increasing the recombination rate significantly. In addition, a quantitative analysis of a conjugate system prepared by functionalizing hexagonal Ga_2O_3 prisms with perylene organic dye molecules was reported. Highly efficient electron transfer process was observed between aggregated perylene molecules and Ga_2O_3 due to excimer trap states.

Keywords: GaAs, Ga_2O_3 , As_2O_3 , electrochemical etching, porous structure, semiconductor, FLIM, nanostructure, microstructure.

* This work is supported by TÜBİTAK under grant number 114F451.



1. GİRİŞ

Yarı iletken malzemeler temel durumda yalıtkan olup, ısı, ışık, elektriksel veya manyetik bir dış etki ile iletken olan bu dış etki kalktığında tekrar temel yalıtkan durumuna dönen eşsiz maddelerdir. Bu benzersiz elektriksel özellikleri sayesinde yarı iletkenler keşfedildikleri günden beri yaygın kullanım alanına sahip olmuşlardır. Diyot, transistor gibi elektronik devre elemanları ile başlayan yarı iletken uygulamaları günümüzde elektronik sanayisinin temelini oluşturmaktadır. Bugün entegre devreler, güneş pilleri, lazerler, LED' ler yarı iletken malzemelerden üretilmektedir. Si, Ge ve GaAs en çok kullanılan yarı iletkenlerdir. Ucuz olması, kolay bulunabilmesi gibi nedenlerle en yaygın olarak kullanılan yarı iletken silisyumdur fakat yüksek elektron mobilitesi, direk geçişli band yapısı, geniş sıcaklık aralıklarında çalışılabilmesi gibi özellikleri GaAs yarı iletkenini Silisyuma önemli bir alternatif yapmaktadır. GaAs günümüzde LED, lazer diyot, optik pencere, güneş pili uygulamalarında sıklıkla kullanılmasının yanında, yüksek radyasyon direnci sayesinde uzay çalışmalarında da tercih edilmektedir. Ayrıca GaAs cihazlar düşük gürültü oluşturması nedeniyle cep telefonu, uydu gibi haberleşme cihazlarında kullanılan mikrodalga entegre devrelerin üretiminde kullanılmaktadır.

Elektron mikroskoplarının keşfi ile birlikte nano teknolojinin gelişimi, diğer malzeme türleri gibi yarı iletken malzemeleri ve bu malzemelerin uygulama alanlarını da büyük oranda değiştirmiştir. Nano ve mikro yapıli malzemeler makroskobik boyuttaki malzemeler ile kıyaslandığında, bu malzemelerin güçlendirilmiş ve iyileştirilmiş optik, elektrik, katalitik, mekanik ve manyetik özelliklere sahip olduğu görülmektedir. Nano malzemelerin güneş pilleri, yeni lazerler, elektronik aygıtlar, biyolojik ve kimyasal sensörler gibi optoelektronik aygıtların üretilmesinde etkin ve verimli bir şekilde kullanılabilmesi sebebiyle, bu malzemelerin kolay ve ucuz maliyetli yöntemlerle üretilmesi önemli oranda dikkatleri üzerine çeken bir konu olmuştur. Nano yapıdaki malzemeler moleküler ışın epitaksi, elektron litografisi, kimyasal buhar biriktirme, odaklanmış iyon litografisi, lazer ablasyonu ve kimyasal buhar depozisyonu gibi yöntemler ile

üretilebilmektedir. Ancak bu tür yöntemlerle nano yüzey üretimi maliyetli ve kitlesel üretim için çok uygun değildir. Elektrokimyasal aşındırma ise nano boyutta gözeneklere sahip yarı iletken yüzeyler oluşturulması için kullanılan hızlı, basit ve oldukça ucuz maliyeti bir yöntemdir. Bu yöntemle oluşturulan yüzeylerin morfolojik özellikleri kullanılan elektrolitik sıvı, asit konsantrasyonu, akım yoğunluğu, aşındırma süresi ve aydınlatma kaynağı gibi parametrelere bağlı olarak değişebilmektedir. Bu çalışmada, n ve p tipi galyum arsenik (GaAs) yarı iletken yüzeyleri aydınlatılarak elektrokimyasal olarak aşındırılmıştır. Elektrolitik kimyasal çeşidi, derişimi, aşındırma süresi, aşındırma akım şiddeti, aydınlatma kaynağı türü gibi parametrelerin değişiminin elde edilecek son yapıya etkisi incelenmiştir. Bu parametrelerin her birinin değişiminin elde edilecek yarı iletken yüzeyin morfolojisine olan etkisinin incelenmesi, boyut ve şekil kontrollü üretim için bir temel veri kaynağı oluşturmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında üretilen GaAs mikro ve nano yüzeylerin floresan ışıma spektrumu ve floresan yaşam ömrü gibi önemli iki optik özelliği belirlenmiştir. Floresan yaşam ömrü yani elektron-boşluk rekombinasyon hızı yarı iletken cihazların verimliliği ile ilişkili önemli bir parametredir. Yarı iletkenlerin yüzeyinde oluşan mikro ve nano yapılar yüzeydeki taşıyıcı- boşluk rekombinasyon zamanını değiştirmektedir. Yarı iletken cihazların performansını doğrudan etkileyen bu sürenin belirlenmesi bu cihazların verimliliği hakkında fikir sahibi olunması açısından önemlidir. Ayrıca GaAs yüzeyler üzerine floresan boya molekülleri yerleştirilmesi ile bu yüzeylerin floresan yaşam ömürleri modifiye edilebilmektedir. GaAs yüzeyler ve boya molekülleri arasındaki fotonik etkileşimler flüoresans yaşam ömrü görüntüleme mikroskobu (FLIM) ile analiz edilmiştir. FLIM, ışıma yapabilen flüoresan malzemelerin uyarılmış enerji seviyesinde ortalama yaşam ömrü farklarına dayanarak görüntüleme yapılabilen özel bir ışık mikroskobu tekniğidir. Flüoresan yoğunluğu, saçılma, flüoresans bozulması (photobleaching) ve absorbsiyon gibi ışıma şiddeti üzerinde etkili olan faktörlerden bağımsız olduğu için, flüoresans yaşam ömrü çok yönlü ve özel bir fiziksel parametredir. Bunun yanı sıra, flüoresans yaşam ömrü floroforun içinde bulunduğu ortamın sıcaklık, pH, oksijen seviyesi, polaritesi, makro moleküllere bağlanması ve iyon yoğunluğu gibi fiziksel koşullarına duyarlı bir parametre olduğu için, yaşam ömrü ölçümleri görüntüleme uygulamaları için karşılık oluşturabilme olanağı sağlamaktadır.

FLIM mikroskopunda yapılan ölçümler zaman uyumlu tek foton sayma (TCSPC) tekniği ile yapılmıştır. TCSPC tekniğinin temel prensibi, flüoresan numunelerin darbeli lazer kullanılarak uyarılması ile numunenin ışıma yapması arasında geçen zamanın ölçülmesi ve her bir gecikme zamanının istatistiksel olarak toplanması ile yaşam ömrü eğrisinin elde edilmesidir. Ayrıca, maksimum ışık verimliliği ve ulaşılabilir en yüksek duyarlılık için FLIM sistemi konfokal bir yapıya sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Literatürde Galyum arsenik nanoyapıların flüoresan ışıma özelliklerinin bu kadar detaylı incelendiği bir çalışma bulunmamaktadır.

Bütün bu bilgiler ışığında bu tezin amacı, n ve p tipi GaAs yarı iletkenleri yüzeyinde elektrokimyasal aşındırma yöntemi kullanılarak üç boyutlu mikro ve nano boyutta yapılar oluşturmaktır. Elektrokimyasal aşındırma parametreleri değiştirilerek elde edilen GaAs yüzeylerin kimyasal, morfolojik ve optik özellikleri incelenecektir. Oluşacak yapıların yüzey karakterizasyonları için etkin bir şekilde kullanılabilir yüksek çözünürlük kalitesine sahip bir konfokal floresans yaşam ömrü görüntüleme mikroskobu (FLIM) kullanılarak, flüoresan malzemelerin içinde bulunduğu dış ortamın özelliklerine bağlı olarak değişen yaşam ömrü gibi önemli bir fiziksel parametre incelenip fotonik etkileşimler analiz edilecektir.

1.1 Literatür Araştırması

Bu tez çalışmasında üç boyutlu GaAs nano ve mikro yüzeylerin hazırlanması için elektrokimyasal aşındırma yöntemi kullanılmıştır. Elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile oluşturulan gözenekli yapılar ilk defa A. Uhler, tarafından yapılan 1956 tarihli çalışmada gözlemlenmiştir (Uhler, 1956). Uhler tarafından yapılan bu çalışmanın asıl amacı silisyum ve germanyum plakalara mikro elektronik devrelerde kullanma amacı ile şekil vermektir. Bu nedenle gözlemlenen gözenek oluşumları detaylı bir şekilde incelenmemiştir. Ancak Arita ve Sunohara 1977 yılında yaptıkları çalışmada elektrokimyasal aşındırma tekniği ile homojen bir gözenekli silisyum yapının oluşturulabileceğini göstermişlerdir ve detaylı fiziksel ve kimyasal analizler yapmışlardır (Arita ve Sunohara, 1977).

Canham' ın UV bir ışık kaynağı ile aydınlatılan gözenekli silisyum yapıların 600 nm pik değerine sahip bir foto ışıma yaptığını keşfetmesi, elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile yarı iletken yüzeylerde mikro ve nano yapılar oluşturma çalışmaları daha

popüler olmuştur (Canham, 1990; Hirschman ve diğerleri, 1996; Richter ve Steiner, 1991)

GaAs yarı iletkeni için yapılan ilk elektrokimyasal aşındırma çalışmaları da Si gibi, mikro elektrik devrelerde kullanım için şekil vermek olduğundan, numune üzerinde oluşması muhtemel mikro veya nano yapılar incelenmemiş, daha çok aşınma oranı kontrol edilmiştir (Saitoh ve diğerleri, 1975; Hoffmann ve diğerleri, 1981; Ostermayer ve Kohl, 1981; Tisone ve Johnson, 1983). Canham'ın silisyum nano yapılarda keşfettiği görünür bölgedeki ışıma, silisyumda olduğu gibi nano GaAs yapılarda da oldukça ilgi çekici bulunmuş ve bu yapıların optik özellikleri incelenmiştir (Schmuki ve diğerleri, 1996; Lockwood ve diğerleri, 1999; Atwater ve diğerleri, 2000). Özellikle poroz GaAs yapıların oluşturulması için kullanılan elektrokimyasal aşındırma işlemi ve bu işlem sonucunda yarı iletkeninde oluşan optik özellik değişimleri son zamanlarda birçok çalışmanın konusu olmuştur. Naddaf, 2009 yılında HCl çözeltisi içerisinde aşındırılan GaAs nano yapıların görünür bölgede ışıma yaptığını ve daha düşük bir yansımaya sahip olduğunu göstermiştir (Naddaf ve Saloum, 2009). Ritenour 2013 tarihli çalışmasında [111] yönelimli n-GaAs yarı iletkenlerini 0,1 M H₂SO₄ içerisinde, zaman ve akım yoğunluğunu değiştirip elektrokimyasal olarak aşındırarak farklı boyutlarda nano ve mikro yapılar oluşturmuştur. Bu yapıları içeren GaAs yarı iletkeninin yüksek kuantum verimliliğine ve düşük yansıma oranına sahip olduğunu göstermiştir (Ritenour ve diğerleri, 2013). Seredin ve arkadaşları ise farklı koşullar ile aşındırdıkları GaAs yüzeyinde oluşan poroz yapıların foto luminesans bant yoğunluğunda artışa ve luminesans verimliliğinde %20' den fazla artışa neden olduğunu göstermiştir (Seredin ve diğerleri, 2018). Yarı iletkenlerin elektrokimyasal aşındırılması çalışmalarında akım yoğunluğu, elektrolitik çözelti derişimi ve tipi aydınlatma yönü gibi farklı elektrokimyasal aşındırma parametreleri değiştirilerek oluşacak nihai mikro ve nano yapıya etkisi farklı çalışmalarda incelenmiştir (Taib ve diğerleri, 2014; Das ve Sarkar, 2016; Kopani ve diğerleri, 2020), fakat monokromatik veya koherent bir aydınlatma kaynağının kullanımının oluşan mikro-nano yapıyı etkileyip etkilemediğini inceleyen bir çalışmaya literatürde taramalarında rastlanmamıştır. Ancak Açıkgoz ve arkadaşları Si ve Ge yarı iletkenleri ile yaptıkları çalışmalarda, farklı özellikteki aydınlatma kaynakları kullanarak aşındırılmış, koherent ve monokromatik bir aydınlatma kaynağı kullanılarak daha homojen yapılar elde

edilebileceğini göstermişlerdir (Acikgoz ve diğerleri 2012; Acikgoz ve diğerleri, 2017).

Çizelge 1.1’ de verilen literatür taraması özetinde de görüldüğü gibi şu ana kadar farklı aşındırma parametreleri ile elektrokimyasal aşındırma yapılarak çeşitli yarıiletken yüzeylerde mikro ve nano yapılar oluşturulmuştur. Ancak bu çalışmalarda bir veya iki aşındırma parametresi değiştirilerek oluşan yüzey morfolojisi incelenmiş olmasına rağmen, bu süreci bir bütün olarak inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada n-GaAs ve p-GaAs yarıiletkenleri, bütün aşındırma parametreleri tek tek değiştirilerek aşındırılmıştır ve bu işlem sonucunda nihai mikro-nano yapının değişimi incelenmiştir. Bu yönü ile bu tez çalışması GaAs yarıiletkeninin aşındırılmasını konu alan çalışmalar için yol gösterici bir kaynak olacaktır.

Çizelge 1.1’ de görüldüğü gibi aşındırılan GaAs yüzeylerde görünür dalga boyunda ışıma spektrumları gözlemlenmiştir. Bu ışıma yüzeydeki gözenekli yapı ile ilişkilendirilmiş ve ışıma şiddetinin bu yapının değişiminin gözeneklerin çoğalması ile arttığı rapor edilmiştir. Bu çalışmalar fotoluminesans spektrometresi gibi bütün yüzeyden gelen ışımlar ile yapılan ölçüm yapan cihazlarla yapılmıştır. Yapılan literatür taramalarında elektrokimyasal aşındırma işlemi ile şekillendirilen yarıiletken yüzeylerin floresan yaşam ömrü görüntüleme mikroskobu ile incelenerek aşındırılan yüzeylerin ışıma karakteristiğini açıklayan çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasında GaAs üzerinde oluşturulan mikro ve nano yapılar floresan yaşam ömrü görüntüleme mikroskobu ile incelenmiştir. Böylece görünür bölgede gözlemlenen ışımanın yüzeyde oluşturulan mikro ve nano yapılarla ilişkisi görsel olarak açıkça ortaya konularak literatüre önemli bir katkı yapılmıştır.

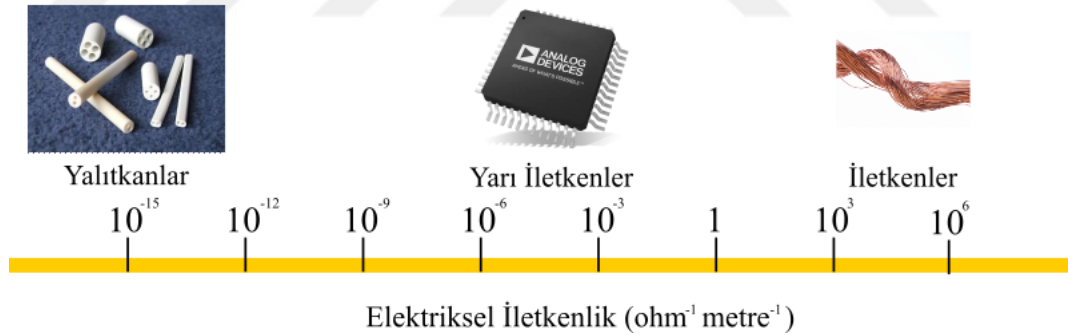
Çizelge 1.1 : Literatür taraması özet çizelgesi.

Çalışma	Kaynak
Elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile aşındırılan Si yarı iletkenler üzerinde gözenekli yapılar gözlemlenmiştir.	Uhlir, 1956
Elektrokimyasal aşındırma sonucunda gözenekli homojen Si yapılar oluşturulmuştur.	Arita ve Sunohara, 1977
Elektrokimyasal aşındırma ile üretilen gözenekli Si yapılarda, görünür bölgede ışıma gözlemlenmiştir.	Canham, 1990; Richter ve Steiner, 1991
GaAs yarı iletkeninin yüzeyi mikro elektrik devrelerde kullanım amacıyla elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile işlenmiştir.	Saitoh ve diğerleri, 1975; Hoffmann ve diğerleri, 1981; Ostermayer ve Kohl, 1981
Aşındırılmış GaAs yüzeylerde görünür bölgede ışıma gözlemlenmiştir.	Schmuki ve diğerleri, 1996; Lockwood ve diğerleri, 1999; Atwater ve diğerleri, 2000
Aşındırılan GaAs yüzeylerin daha az yansıtıcı olduğu gösterilmiştir.	Naddaf ve Saloum, 2009; Ritenour ve diğerleri, 2013
Aşındırma işlemi sırasında farklı aydınlatma kaynakları kullanılarak n-Si yüzeyinde farklı morfolojiler elde edilmiştir.	Acikgoz ve diğerleri, 2012
Aşındırma işlemi sırasında farklı aydınlatma kaynakları kullanılarak n-Ge yüzeyinde farklı morfolojiler elde edilmiştir.	Acikgoz ve diğerleri, 2017
Aşındırılan GaAs yüzeylerin daha yüksek foto ışıma verimliliğine sahip olduğunun gösterilmiştir.	Seredin ve diğerleri, 2018
Elektrolitik çözelti tipinin değişimi ile n- GaAs üzerinde farklı gözenek yapılar elde edilmiştir.	Taib ve diğerleri, 2014
Akım şiddeti artışı sonucu, aşındırılan n-Si yüzeyinde oluşan gözenek boyutunun arttığı gösterilmiştir.	Das ve Sarkar, 2016
Aşındırma süresinin artışı sonucunda aşındırılan n-Si yüzeyinde oluşan gözenek boyutunun ve yoğunluğunun arttığı görülmüştür.	Kopani ve diğerleri, 2020

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Yarı İletken Malzemeler

Elektriksel iletkenlik malzemenin elektrik akışına izin verme ölçütüne karşılık gelen bir fiziksel değerdir. Katı malzemeler elektriksel iletkenliklerine göre temelde iletken, yalıtkan ve yarı iletkenler olarak sınıflandırılırlar. Şekil 2.1’ de elektriksel iletkenliklerine göre malzemeler görülmektedir. İletkenler, elektron akışına izin veren, elektriksel iletkenlik değeri yüksek ($\approx 10^2$ - 10^8 Sm^{-1}) maddelerdir. Yalıtkanlar, elektron akışına direnci yüksek, iletkenliği düşük ($\approx 10^{-11}$ - 10^{-19} Sm^{-1}) malzemelerdir. Yarı iletkenler temel durumda yalıtkan olup, mekanik, ısı, ışık gibi dış bir etki yardımı ile iletken hale gelirler ve dış etki ortadan kalktığında temel yalıtkan hallerine geri dönerler.



Şekil 2.1 : Elektriksel özelliklerine göre malzemeler.

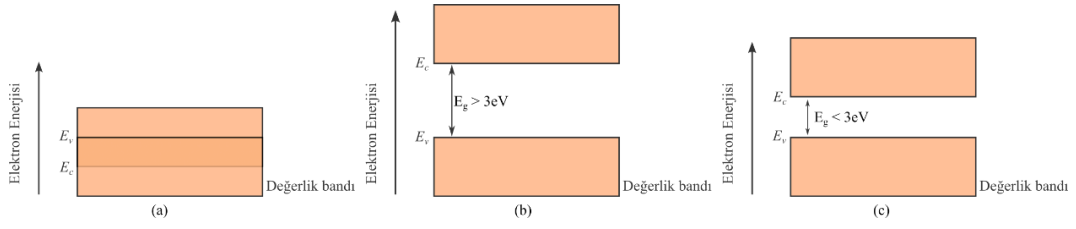
Yarı iletkenliğin daha iyi anlaşılması için band teoreminden bahsetmek gerekir. Bohr atom modeline göre, serbest uzaydaki bir atomun elektronlarından herhangi birinin enerjisi, içinde döndüğü yörünge tarafından belirlenir. Fakat katı bir madde birbirine yakın komşu atomlardan oluşur. Bu komşu atomların elektron yörüngeleri çok yaklaşır veya üst üste gelebilir. Bu nedenle katı bir madde içerisindeki elektronların hareketinin doğası ile izole bir atomun hareketinin doğası birbirinden farklıdır. Katı bir kristal içerisinde her elektronun eşsiz bir konumu olduğu için her elektronun sahip olduğu enerji farklıdır. Farklı ama birbirine yakın enerji

seviyeleri bir araya gelerek kesikli enerjilerden oluşan sürekli bir enerji bantlarını oluşturur bu oluşum şekil 2.2’ de şematik olarak gösterilmiştir. Değerlik elektronlarının enerji seviyesi değerlik bandını oluşturur. Değerlik bandının üstündeki enerji seviyeleri ise iletim bandı olarak adlandırılır.

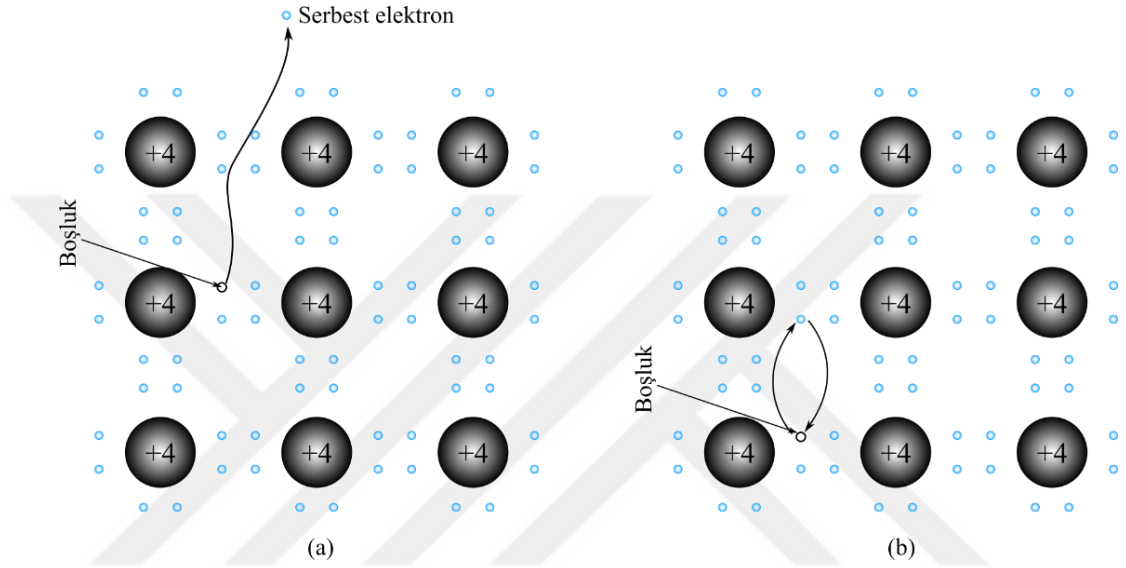


Şekil 2.2 : Bant seviyelerinin oluşumunun şematik anlatımı.

Şekil 2.3’ de iletken, yarı iletken ve yalıtkan maddelerin bant yapıları gösterilmektedir. Eğer iletim bandının en düşük enerji seviyesi metalik malzemelerde olduğu gibi değerlik bandının en yüksek enerji seviyesinden düşükse, değerlik bandındaki elektronlar kolaylıkla iletim bandına geçebilirler. İletken malzemelerde dış bir enerjiye gereksinim duymadan serbestçe dolaşabilen elektronlar sayesinde elektriksel iletkenlik sağlanır. Eğer değerlik bandının en yüksek enerji seviyesi ile iletim bandının en düşük enerji seviyesinden daha düşük olursa dışarıdan bir enerji girişi olmadıkça değerlik bandındaki elektronlar iletim bandına geçemez. Değerlik bandının en yüksek seviyesi ile iletim bandının en düşük enerji seviyesi arasındaki fark yasak enerji aralığı veya bant boşluğu olarak adlandırılır. Bant boşluğu 3 eV den büyük maddeler yalıtkan olarak adlandırılır, değerlik bandındaki elektronlar dışarıdan enerji verilmesi durumunda bile yasak bant aralığını geçemezler. Bant boşluğunun 3 eV dan küçük olması durumunda değerlik elektronları dışarıdan bir enerji ile uyarılmaları halinde iletim bandına geçerler. Bu süreç sonunda iletim bandına atlayan elektron değerlik bandında bir boşluk oluşturur. Bu boşluk komşu atomların değerlik elektronları tarafından doldurulur. Şekil 2.4’de IV A gurubu yarı iletkenlerinde elektron uyarılması ve boşluk ilerlemesi çizim ile gösterilmektedir. Çizimde de görüldüğü gibi, hem serbest kalan elektronlarca, hemde değerlik bandındaki boşluk ilerlemesi ile sağlanır.



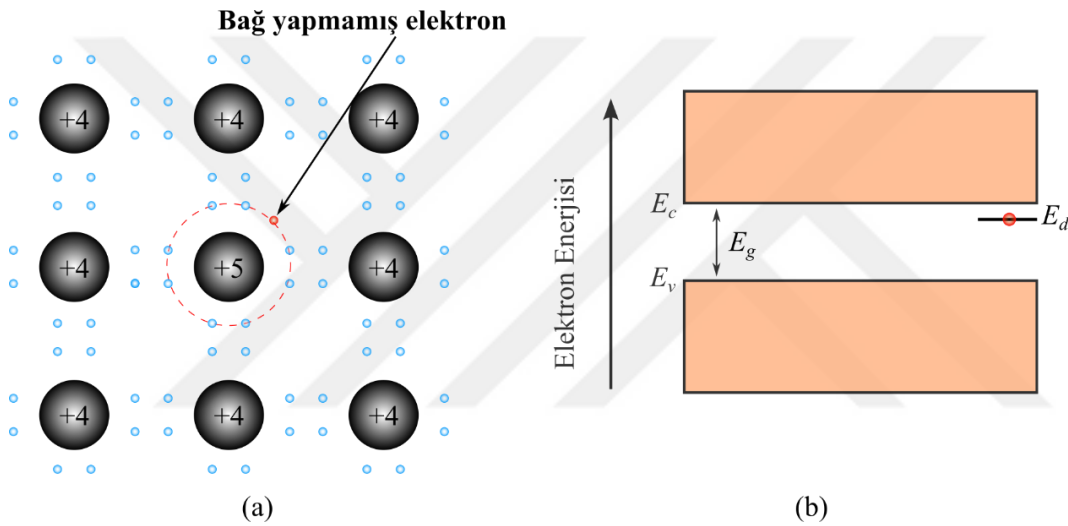
Şekil 2.3 : (a) İletken, (b) yarı iletken, (c) yalıtkan malzemelerde band yapısının gösterimi.



Şekil 2.4 : (a) Değerlik elektronunun uyarılması, (b) Uyarılmış seviyeye geçen elektrondan kalan boşluğun, komşu elektron ile doldurulması sonucu boşluğun yer değişmesi.

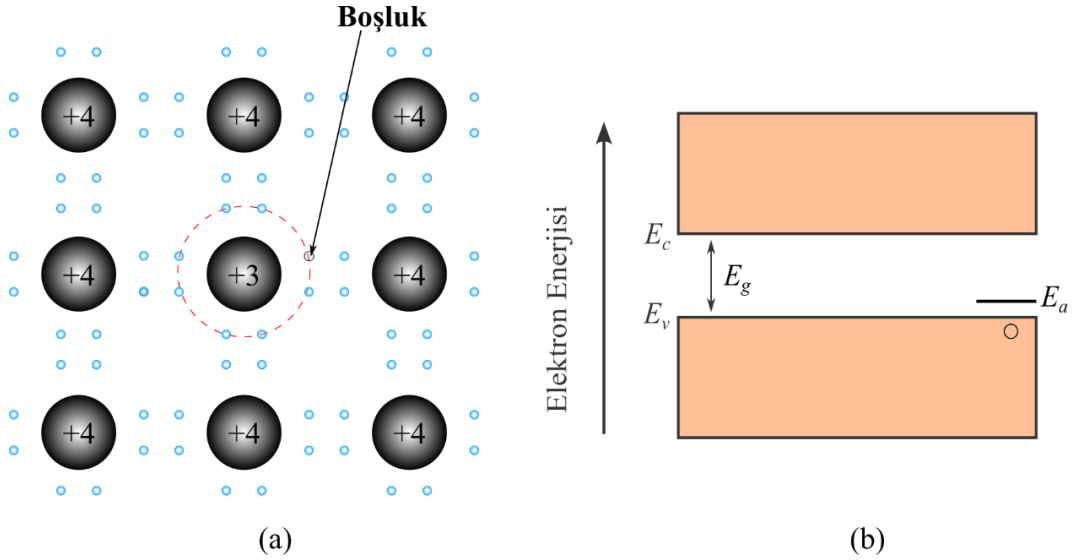
Katkılanmamış halde yarı iletkenlik özelliği gösteren maddelere has yarı iletken malzemeler denir. Denge durumunda bu tip malzemelerin valans bandı tamamen dolu iletim bandı ise tamamen boştur. Dış bir enerji ile uyarım gerçekleştiğinde iletim bandına geçen elektron sayısı ile değerlilik bandında oluşan boşluk sayısı eşittir. Has yarı iletkenler kontrollü olarak safsızlık ilave edilerek elektriksel özellikleri iyileştirilebilir, bu işlem katkılama olarak adlandırılır. Katkılama işlemi sonrasında katkılama şekline göre yarı iletkenlerde elektron – boşluk dengesi bozulur. Katkılanmış yarı iletkenler, katkılama türüne göre elektronda zengin n tipi veya boşlukça zengin p tipi yarı iletken olmak üzere iki tiptir. Son yörüngesinde, yarı iletkenin son yörüngesinden daha fazla elektron içeren bir elementle katkılanan yarı iletkenlere n-tipi yarı iletken denir. Örneğin dört değerlilik elektronuna sahip silisyum (Si) elementi son yörüngesinde beş elektron olan antimuan (Sb) ile katkılanması durumunda Sb atomunun 4 elektronu şekil 2.5 (a)'da görüldüğü gibi

kendisini çevreleyen Si atomları ile bağ yapar, kalan 1 elektron boşta kalır. Boştaki bu elektron Sb atomuna zayıf elektostatik kuvvetle bağlıdır. Bu nedenle bu elektronun serbest duruma geçebilmesi için bağlı elektronlara göre çok daha az bir enerji yeterlidir. Bu konuyu band yapısını düşünerek ele alırsak şekil 2.5 (b)'de şematik olarak görüldüğü gibi zayıf bağlı bu elektrondan kaynaklı, iletim bandının hemen altında yeni bir enerji seviyesi oluşur. Bu enerji seviyesine donör enerji seviyesi adı verilir. N tipi katkılanmış bir yarı iletken elektronca zengin olduğundan ana taşıyıcılar elektronlardır ve uyarılmış halde elektron sayısı, boşluk sayısından oldukça fazladır.



Şekil 2.5 : n tipi katkılama şematik anlatımı.

Son yörüngesinde, yarı iletkenin son yörüngesinden daha az elektron içeren bir elementle katkılanan yarı iletkenlere ise p-tipi yarı iletken denir. Örneğin son yörüngesinde dört elektron olan Si elementi değerlilik elektron sayısı üç olan bor (B) elementi ile katkılanması durumunda şekil 2.6 (a)'da görüldüğü gibi B atomunu, etrafındaki Si atomlarına bağlayan bağlarda bir elektron eksik kalır. Safsızlık atomuna zayıf bağlanan bu elektron boşluğu, komşu bağlarda bulunan bir elektron ile doldurulur ve elektron boşluğu safsızlık atomundan koparak serbest kalır. Bu konuyu bant yapısını düşünerek ele alırsak şekil 2.6 (b)'de şematik olarak görüldüğü gibi zayıf bağlı bu boşluktan kaynaklı, valans bandının hemen üstünde yeni bir enerji seviyesi oluşur. Bu enerji seviyesine akseptör enerji seviyesi adı verilir. P tipi katkılanmış bir yarı iletken boşlukça zengin olduğundan ana taşıyıcılar boşluklardır ve uyarılmış halde boşluk sayısı, elektron sayısından oldukça fazladır.



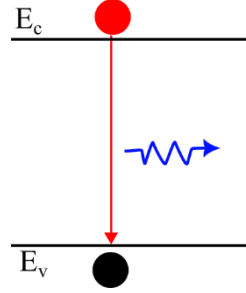
Şekil 2.6 : p tipi katkılama şematik anlatımı.

2.1.1 Yarı iletkenlerde rekombinasyon süreçleri ve taşıyıcı ömrü

Bir yarı iletkeni uygun şiddete sahip bir ışık kaynağı ile uyardığımızda, yarı iletkenin değerlik bandında bulunan elektronlar kazandıkları enerjiyi kullanarak iletim bandına geçebilir. İletim bandında bir süre kalan elektronların değerlik bandındaki bir boşluk ile birleşerek değerlik bandına geri dönmesine elektron-boşluk rekombinasyonu denmektedir. Yığınsal (bulk) haldeki yarı iletkenlerde elektron-boşluk rekombinasyon süreci ışımalı (radiative), auger ve Shockley-Read-Hall (SRH) olmak üzere üç farklı şekilde meydana gelebilmektedir.

2.1.1.1 Işımalı rekombinasyon süreci

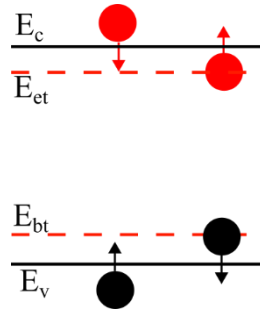
Bu süreçlerden birincisi ışımalı (radiative) rekombinasyon sürecidir. Şekil 2.7’de şematik olarak gösterilen bu süreçte, iletim bandındaki uyarılmış elektron direk değerlik bandına geçiş yapar ve boşluk ile birleşir bu süreç sonunda iletim ve değerlik seviyeleri arasındaki enerji farkına karşılık bir foton yayınlanır. GaAs gibi direk bant aralığına sahip yarı iletkenlerde baskın olan rekombinasyon mekanizmasıdır. Işık yayan diyotların (LED) yaydığı ışık, bir yarı iletken cihazdaki ışımalı rekombinasyonun en bariz örneğidir.



Şekil 2.7 : Işımalı rekombinasyon süreci.

2.1.1.2 Shockley-Read-Hall (SRH) rekombinasyon süreci

Shockley-Read-Hall (SRH) sürecinde ise şekil 2.8’de şematik olarak görüldüğü gibi yarı iletkenin kristal yapısında bulunan kusurlar ve düzensizliklerin oluşturduğu yeni boşluk ve elektron tuzak enerji seviyeleri (trap states) etkin rol oynar. Kusurlar tarafından oluşturulan bu tuzak enerji seviyeleri sayesinde yarı iletkenin mevcut enerji bant yapısı modifiye edilmiş olur ve elektron-boşluk çiftleri bu tuzak enerji seviyelerini kullanarak ışıma yapmadan birleşebilirler. Enerji farkı ise madde içindeki fononlar aracılığı ile örgü titreşimlerine yani termal enerjiye dönüştürülür. Aynı zamanda, yarı iletkenin ön ve arka yüzey atomları iç kısımlarındaki diğer atomlar ile aynı bağ yapısına sahip değildir. Yüzeydeki atomların komşu bağlarında eksiklik vardır ve bu eksiklik yarı iletkenin yüzeyinde bağ kusurlarının oluşmasına neden olur. Bağ kusurlarının yoğunluğu nedeniyle yığınsal yarı iletkenlerin yüzeye yakın kısımlarında SRH rekombinasyon süreci daha baskın olarak gerçekleşir (Goudon ve Miljanovi’c, 2007).

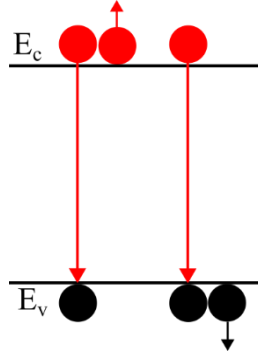


Şekil 2.8 : SRH rekombinasyon süreci.

2.1.1.3 Auger rekombinasyon süreci

Üçüncü elektron-boşluk rekombinasyon süreci ise Auger’dir. Işımasız bir süreç olarak nitelenen Auger rekombinasyon süreci gerçekte ışımalı rekombinasyona benzer bir şekilde gerçekleşir. Ancak enerji farkının bir foton olarak yayınlanması

yerine başka bir yük taşıyıcıya (elektron ya da boşluk) aktarılması söz konusudur. Bu yük taşıyıcı ise daha sonra termal olarak eski enerji seviyesine geri dönmektedir. Auger rekombinasyon süreci genellikle yüksek katkılanma oranına sahip yarı iletkenlerde görülmektedir.



Şekil 2.9 : Auger rekombinasyon süreci.

Bu bilgiler ışığında, yığınsal yarı iletkenlerin rekombinasyon yaşam ömrü (τ_b) eşitlik (2.1)'de ki gibi ifade edilmektedir (Weiss ve diğerleri, 2019).

$$\frac{1}{\tau_b} = \frac{1}{\tau_{Rad}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{Aug}} \quad (2.1)$$

Burada τ_{Rad} , τ_{SRH} ve τ_{Aug} sırasıyla ışımalı, Shockley-ReadHall ve Auger rekombinasyon ömürlerini ifade etmektedir. Bir yarı iletkendeki uyarılan elektronun iletim bandında kalma süresi ya da elektronun-boşluk rekombinasyon yaşam ömrü (electron-hole recombination lifetime), bu yarı iletken ile tasarlanacak optoelektronik aygıtın verimliliği için önemli bir parametredir.

2.1.1.4 Yüzey rekombinasyonları

Nano yapıları yarı iletkenlerde yük taşıyıcıların difüzyon uzunluğu parçacık boyutu ile kıyaslanabilir olduğunda yüzey rekombinasyonlarının etkisi (surface recombination) ortaya çıkmaya başlar. Nano ölçekteki yarı iletken yüzeylerin boyutlarına bağlı olarak oluşan bu etki, yarı iletken içindeki yük taşıyıcıların oldukça küçük bir hacim içinde sınırlandırılmasından kaynaklanmaktadır. Kuantum sınırlama etkisinin bir sonucu olarak yarı iletken içinde yük taşıyıcıları tuzaklayan ve yeni elektron-boşluk birleşim merkezleri gibi davranan alt enerji seviyeleri oluşur. Bu yeni alt enerji seviyeleri elektron-boşluk rekombinasyon sürecinin kolaylaşmasını ve taşıyıcı ömrünün kısalmasını sağlayabilir. Alt enerji seviyelerinin oluşumunda yarı iletken nano yüzeyin yüzey/hacim oranı (surface-to-volume ratio) belirleyici rol oynar.

Yüzey/hacim oranı azaldıkça enerji seviyelerinin yoğunluğu artar ve yüzey rekombinasyonlarının etkisi daha belirginleşir. Bu durumda nano yapıları yarı iletkenler de etkin taşıyıcı ömrü (τ_{Etkin})

Eşitlik 2.2' de ki gibi yazılabilir.

$$\frac{1}{\tau_{etkin}} = \frac{1}{\tau_b} + \frac{1}{\tau_s} \quad (2.2)$$

Burada τ_s yüzey rekombinasyon ömrünü ifade etmektedir. Yüzey rekombinasyon oranı yarı iletken yüzeyin kalınlığı (d) ve yüzey rekombinasyon hızına (S) bağlı olarak değişir. Bu ilişki ise eşitlik 2.3'de verilmiştir (Zhao ve diğerleri, 2014a). Eşitlikte de görüldüğü gibi yarı iletken yüzeyin kalınlığı azaldıkça etkin taşıyıcı yaşam ömrü kısalır (Zhao ve diğerleri, 2014b).

$$\frac{1}{\tau_s} = \frac{2S}{d} \quad (2.3)$$

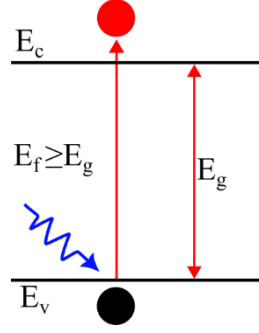
2.1.2 Yarı iletkenlerin optik özellikleri

2.1.2.1 Absorbsiyon

Işık bir yarı iletkenle etkileştiğinde, ışık ile yarı iletken arasında enerji alışverişi gerçekleşir. Işığın bir kısmı yüzeyden geri yansır, bir kısmı kırılarak yarı iletken içerisinde ilerler. Kırılan ve yarı iletken içerisinde ilerlemeye devam eden ışık ilerlerken enerji kaybına uğrar. Bu enerji kaybı ışığın absorpsiyonu ile açıklanır. Işığın yarı iletken içerisinde ne kadar emileceği yarı iletkenin soğurma katsayısına (α) ve kalınlığına (l) eşitlik 2.4 ile bağlıdır.

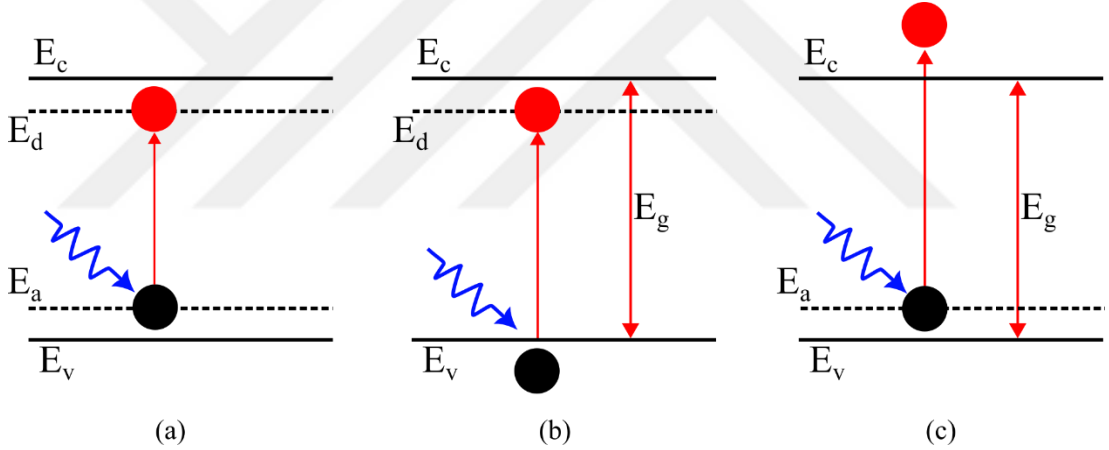
$$I_t = I_i e^{-\alpha l} \quad (2.4)$$

Burada I_t geçen ışığın şiddeti, I_i gelen ışığın şiddetidir. Işığın soğurulup soğurulmayacağı ise yarı iletkenin bant boşluğuna ve gelen ışığın dalga boyuna bağlıdır. Yarı iletken ile etkileşime giren fotonun enerjisi bant aralığından büyük veya eşit ise şekil 10' da görüldüğü gibi enerjisi değerlik bandındaki elektronlar tarafından emilir. Fotondan kazandığı bu enerji ile değerlik bandındaki elektron iletkenlik bandına yani uyarılmış duruma geçer. Bu geçiş sonucu iletkenlik bandında bir elektron ve değerlik bandında bir boşluk olmak üzere bir elektron boşluk çifti oluşur.



Şekil 2.10 : Elektronun ışık ile uyarılması.

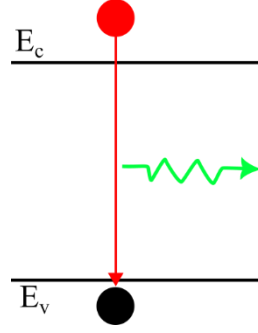
Yarı iletkenler saf bile olsalar pratikte donör ve akseptör gibi davranan safsızlıklar içerebilirler. Bilerek katkılanmış veya safsızlık içeren yarı iletkenlerde soğurma safsızlık atomlarının elektronları tarafından da gerçekleşebilir. Bu durumda şekil 2.11 (a)'da görüldüğü gibi donör-akseptör enerji seviyeleri arasında, 2.11 (b)'de görülen valans bandı-donör enerji seviyesi arasında veya 2.11 (c)' de gösterilen akseptör-iletim bandı enerji seviyesi arasında geçişler olabilir.



Şekil 2.11 : Safsızlık içeren yarı iletkenlerde absorpsiyon.

2.1.2.2 Kendiliğinden emisyon

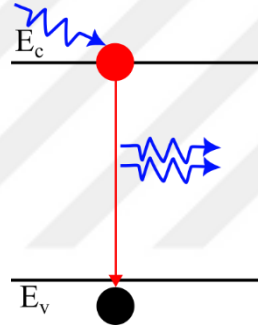
Denge koşullarında yarı iletkenlerin değerlik bandının tamamen dolu, iletkenlik bandının ise boş olduğu kabul edilir. Foton soğurulduktan sonra, daha önce bahsedildiği gibi denge koşullarının tersine iletkenlik bandında bir elektron ve değerlik bandında bir boşluk olmak üzere bir elektron boşluk çifti oluşur. Denge koşullarının tekrar oluşması için elektron boşluk çifti tekrar birleşir ve elektronun sahip olduğu fazla enerji şekil 2.12'de görüldüğü gibi foton olarak yayınır.



Şekil 2.12 : Kendiliğinden emisyon.

2.1.2.3 Uyarılmış emisyon

Yarı iletken ile etkileşen fotonun enerjisi, daha önce uyarılmış bir elektron tarafından soğurulabilir. Bu durumda fotonun enerjisini soğuran uyarılmış durumdaki elektron şekil 2.13’ de görüldüğü gibi, soğurduğu fotonun enerjisine eşit bir foton yayarak temel enerji seviyesine geçiş yapar.



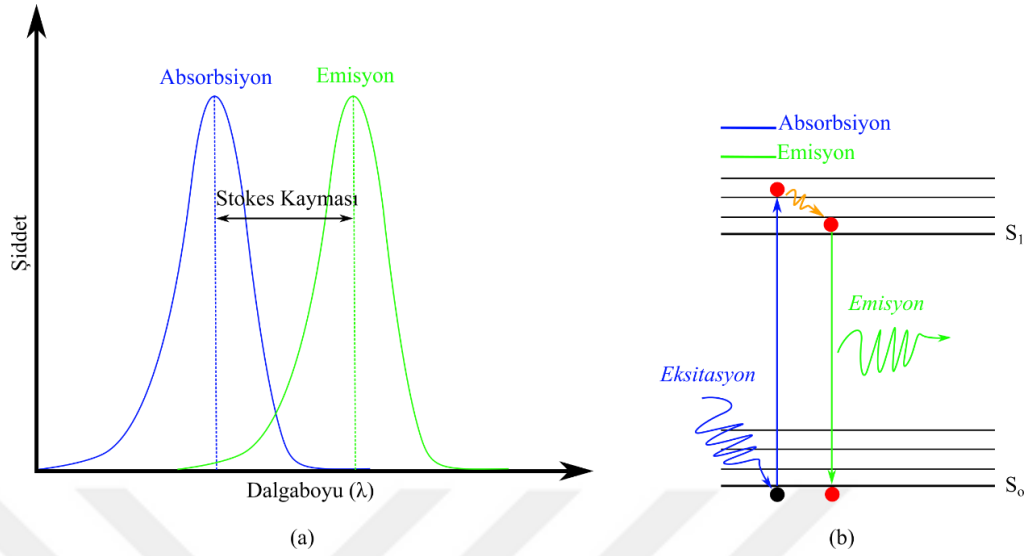
Şekil 2.13 : Uyarılmış emisyon.

2.1.2.4 Fotoluminesans

Şu ana kadar anlatılan yarı iletkenlerin ışık ile uyarılması sonucu bir ışıma yapması olayına fotoluminesans denir. Fotoluminesans, floresan ışıma ve fosforesans ışıma olmak üzere iki yolla gerçekleşir.

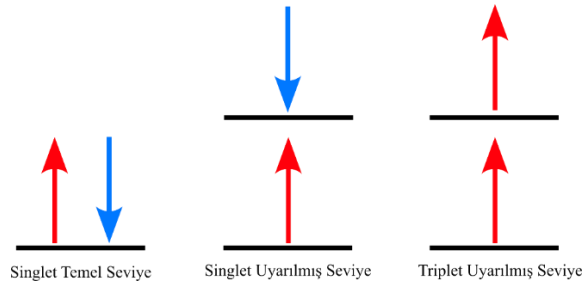
Uyarıcı fotonların enerjisinin emilmesiyle temel durumdaki elektronun, şekil 2.14’de görüldüğü gibi uyarılmış singlet enerji seviyesine yükselmesi, uyarılmış durumdaki elektronun daha düşük enerji seviyesine titreşimsel olarak gevşemesi, son olarak, daha uzun dalga boylu bir foton emisyonu ile elektronun temel durumuna geri dönüşü ile floresan ışıma oluşur. Uyarılmış durumda titreşimsel gevşemeden dolayı bir miktar enerji kaybı gerçekleştiği için floresan ışımının enerjisi, absorblanan enerjiden daha düşük enerjiye sahiptir. Bu nedenle floresan yayılım, uyarım dalga boyundan daha uzun dalga boylarında gerçekleşir. Bu olgu ilk olarak Sir. G. G.

Stokes tarafından 1852 yılında gözlemlenmiştir ve Stokes kayması olarak adlandırılır (Sauer ve diğerleri, 2011).

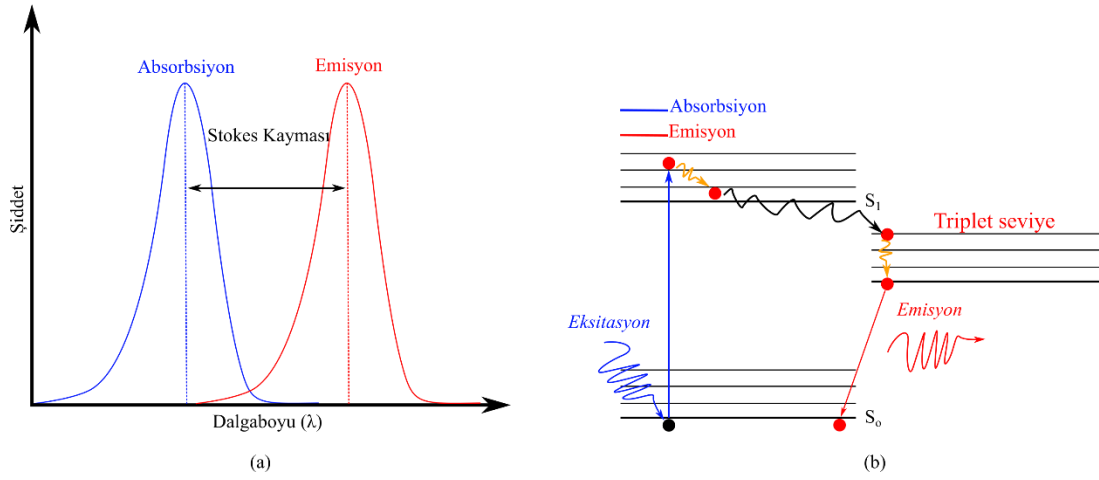


Şekil 2.14 : (a) Floresan ışımda stokes kayması, (b) Floresan ışımının şematik anlatımı.

Elektronlar, "yukarı dönüş" veya "aşağı dönüş" olarak adlandırılan iki olası şekilde ifade edilen spin $\frac{1}{2}$ 'ye sahiptir. Fosforesans ışımda uyarılan elektronun spin yönü değişmez, ancak şekil 2.15'de görüldüğü gibi elektronun uyarılırken spin yönünün değiştiği geçişlerde mümkündür. Bu durumda, uyarılmış seviyedeki (S_1) elektron temel düzeye dönmek yerine spin değiştirir ve şekil 2.16 (b)'de görüldüğü gibi sistemler arası geçiş (inter system crossing) yaparak triplet düzeye geçer. Bu triplet düzeyden temel seviyeye ışıma yaparak geçiş yapar. Bu ışıma "fosforesans" ışıma adı verilir. Bu süreç ile elektron sistemler arası geçiş yaptığı için temel seviyeye dönmesi daha uzun sürer ve daha fazla enerji kaybeder (Nagashima ve Velan, 2013). Bu nedenle şekil 2.16 (a)'da görüldüğü gibi fosforesans ışımının Stokes kayması daha fazladır ve yaşam ömrü daha uzundur.



Şekil 2.15 : Singlet ve triplet elektron geçişleri.



Şekil 2.16 : (a) Fosforesan ışımda stokes kayması, (b) Fosforesan ışımının şematik anlatımı.

Elektronun uyarılmış enerji seviyesinde kalma süresi yaşam ömrü olarak adlandırılır. Bu değerin ölçülmesiyle yarı iletken performansı hakkında veriler elde edilebilir.

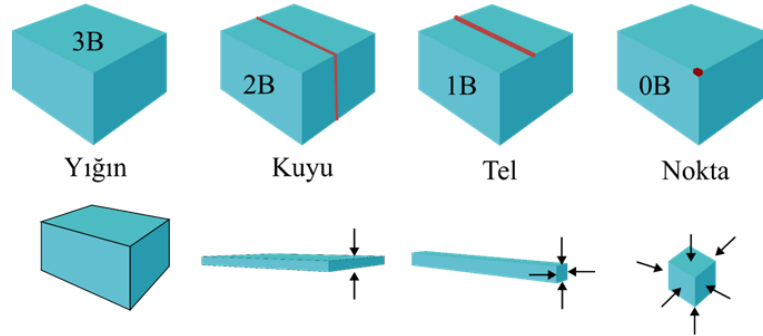
2.1.3 Yarı iletken nano yapılar

Nano teknolojinin gelişimi ve bu konuda yapılan çalışmalar sonucunda artık günlük yaşantımızda kullandığımız birçok cihaz nano boyuta dayanan teknolojiler içermektedir. Örneğin transistörleri arasındaki mesafe 7 nm olan bilgisayar işlemcileri günlük yaşantımızda çoktan yerini aldı. Nano boyutta değişen mekanik optik elektronik özellikler ve bu özelliklerin nano boyut kontrolü ile kontrol edilebilmesi nano teknoloji çalışmalarını çok popüler hale getirmiştir. Nano yapıları bir malzeme üretimi ile sadece yüksek yüzey alanlı, küçük boyutlu bir madde üretilmesinin yanında malzemenin elektronik yapısı da yığınsal haline göre değişmektedir.

Nano boyuta indirgenen malzemelerde elektronlar şekil 2.17’de görüldüğü gibi sıfır, bir, iki veya üç boyutta sınırlanırlar (Tiwari ve diğerleri, 2012). Elektronların işgal edebilecekleri enerji seviyelerin kesikli yapısı daha da belirginleşir. Bu değişim kuantum sınırlama etkisi ile açıklanmaktadır. Kuantum sınırlama etkisi, yarı iletken malzeme farklı boyutlarda boyutları yığın haldeki yarı iletkenin Bohr uyarım yarıçapının büyüklüğüne yakın veya küçük olduğu zaman ortaya çıkar. Bohr uyarım yarıçapı elektron boşluk çiftinin arasındaki mesafedir. Bohr yarıçapı eşitlik 2.5 ile formüle edilir (Gaponenko ve Demir, 2018).

$$a_0 = \frac{\hbar^2 \epsilon}{e^2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (2.5)$$

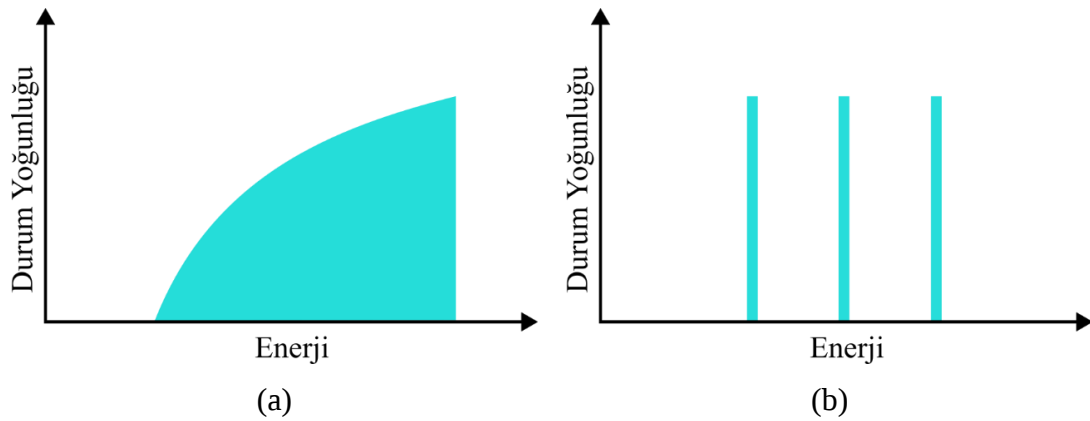
Burada e elektronun yükü ϵ ise yarı iletkenin dielektrik katsayısıdır.



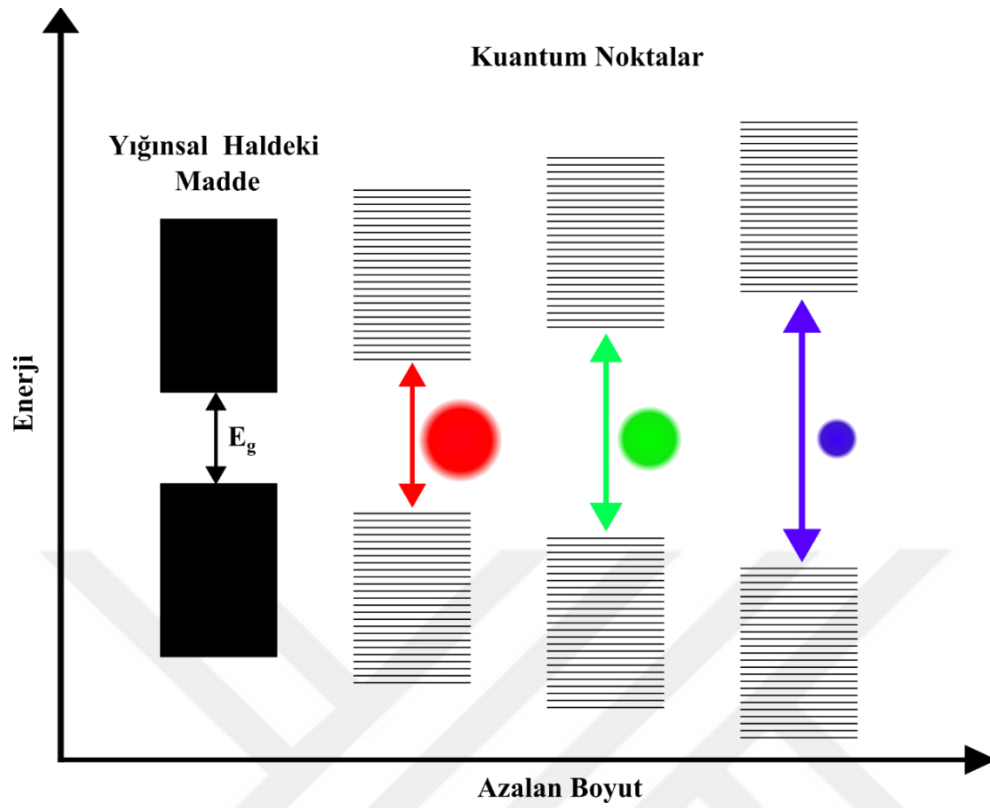
Şekil 2.17 : Farklı yönlerden sınırlandırılan nano malzemelerin şematik gösterimi.

2.1.3.1 Sıfır boyutlu nano yapılar

Sıfır boyutlu nano yapılar, kuantum noktalar gibi her yönde (x, y, z) nano boyutta olan malzemelerdir. Yığinsal bir yarıiletkenin enerji seviyesi şekil 2.18 (a)' da görüldüğü gibi sürekli, ancak yarı iletkenler sıfır boyutuna indirgendiğinde şekil 2.18 (b)' de görülen kesikli özel enerji değerlerine sahip olabilirler. Kuantum noktalar en çok bilinen sıfır boyutlu yapılardır. Özel enerji seviyelerinin oluşması şekil 2.19' da görüldüğü gibi temel ve uyarılmış enerji seviyelerinin boyuta bağlı ayrışmasına neden olur. Sonuç olarak aynı madde ile boyuta bağlı olarak farklı dalga boyunda ışımlar elde edilebilir. Bu özellikleri ile oldukça popüler olan kuantum noktalar günümüzde görüntüleme uygulamalarında, biyosensör uygulamalarında, güneş pili uygulamalarında kullanılmaktadır.



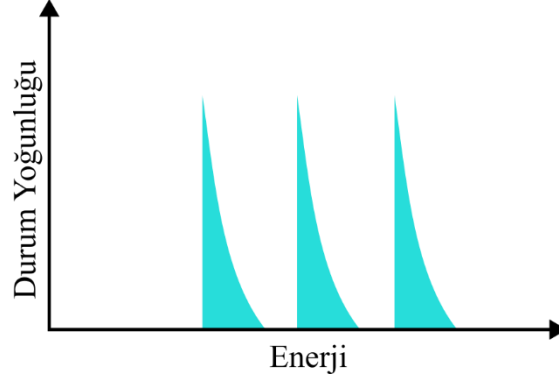
Şekil 2.18 : (a) Yığinsal yarı iletkenlerin, (b) Sıfır boyutlu nano yapıların durum yoğunluğu.



Şekil 2.19 : Kuantum noktalar boyuta bağlı ışıma dalga boyunun değişimi.

2.1.3.2 Tek boyutlu nano yapılar

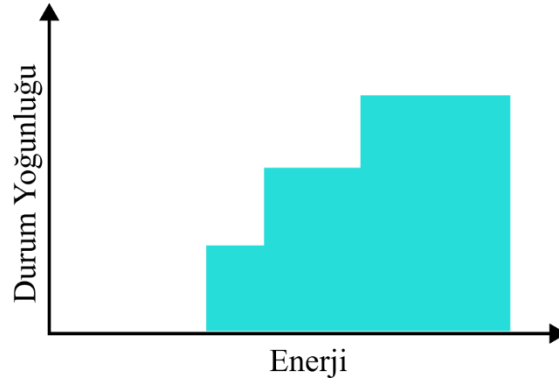
Nano çubuk, nanotel, nanofiber ve nanotüp gibi iki yönde nano boyutta olan ve tek yönde uzayan yapılardır. Tek boyutlu bu yapıların yük taşıyıcılarının durum yoğunluğu şekil 2.21’ de gösterildiği gibi enerjinin karekökü ile ters orantılıdır. Karbon nanotüpler bu kategorideki en popüler nano yapılardır. İyi elektrik iletkenliği, yüksek Young’s modulus gibi özellikleri sayesinde karbon nano tüplerinin kompozit malzeme üretimi, sensör ve nano elektronik uygulamaları gibi yaygın kullanım alanları vardır. Nano fiberlerde birçok organik ve inorganik malzemelerin fiber olarak üretilmesi sonucu son zamanların oldukça popüler nano yapılarından birisi olmuştur. Yapay doku uygulamaları, kontrollü ilaç salınımı, filtrasyon uygulamaları, Lityum pil uygulamaları gibi çeşitli uygulama sahalarında kullanılmaktadır.



Şekil 2.20 : Tek boyutlu nano yapıların durum yoğunluğu.

2.1.3.3 İki boyutlu nano yapılar

Nanometre kalınlığındaki nano filmler, kaplamalar ve tabakalar gibi tek yönde nano boyutta olup, iki yönde (boyutta) uzayan yapılardır. Bu yapılarda durum yoğunluğu şekil 2.22’de görüldüğü gibi basamak şeklindedir. Grafen yapılar en popüler iki boyutlu yapılardır. Pil uygulamalarında hem kapasiteyi arttırmak hemde şarj süresini kısaltmak için kullanıldığından günümüzde en fazla çalışılan iki boyutlu nano yapılardan birisidir. İki boyutlu nano yapıların en yaygın kullanım alanları arasında elektrokromik cihaz uygulamaları, termoelektrik uygulamalar ve süper katalizörler gibi farklı uygulama alanları vardır.



Şekil 2.21 : İki boyutlu nano yapıların durum yoğunluğu.

2.1.3.4 Üç boyutlu nano yapılar

Gözenekli yapılar, nano piramit, nano koni, nano küp, nano partiküller gibi üç boyutta da sınırlanmamış malzemelerdir. 0B, 1B, 2B nano yapıların tekrarlarıyla veya bir araya gelmeleriyle oluşturulabilirler veya yığinsal malzemelerin farklı yöntemlerle şekillendirilmesi ile oluşturulabilirler.

2.1.4 Nano yapılı malzemelerin üretimi

Nano yapıların oluşturulma süreçlerini aşağıdan yukarıya veya yukarıdan aşağıya olmak üzere iki ana başlık altında toplayabiliriz.

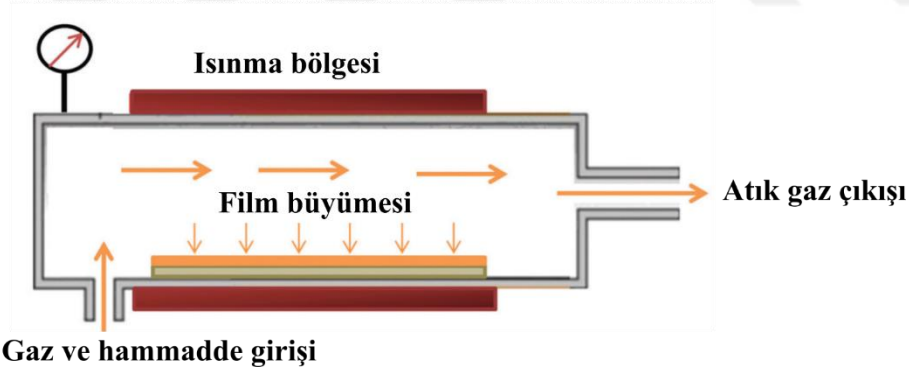
2.1.4.1 Aşağıdan yukarıya üretim yöntemleri

Atom veya moleküllerden başlanarak nano yapı oluşturulur. Kimyasal buhar biriktirme, moleküler ışın epitaksisi ve ıslak kimyasal yöntemler bu başlık altında sayılabilir.

Kimyasal buhar biriktirme

Kimyasal buhar biriktirme (CVD) yönteminde hammaddeler taşıyıcı gaz ile reaksiyon ortamına taşınır, bu hammaddelerin kimyasal reaksiyonu sonucu nano yapı bir alt taş üzerinde büyütülür.(Zhang ve diğerleri, 2016) Kimyasal reaksiyonun oluşması için gerekli enerji alt taşın ısıtılması ile sağlanır. Nano filmler, nano kaplamalar gibi iki boyutlu nano yapıların oluşturulması için yaygın kullanılmaktadır. Şekil 2.23'te bir CVD sistemi şematik olarak görülmektedir.

Basınç göstergesi

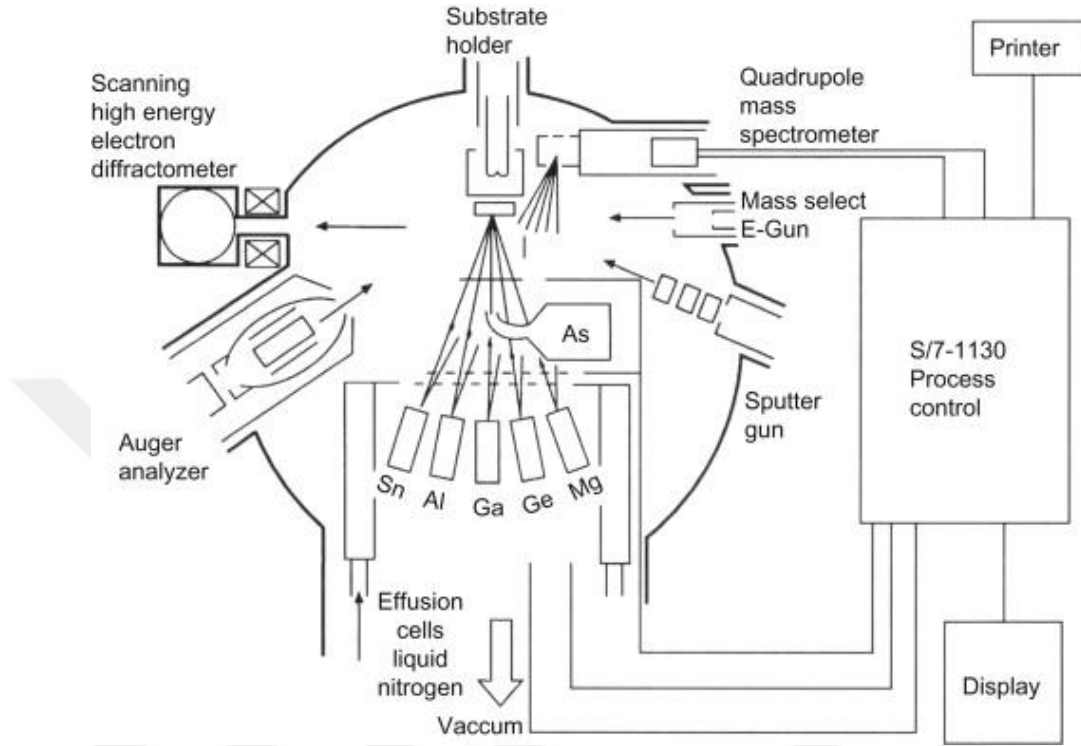


Şekil 2.22 : CVD sistemi şematik gösterimi (Zhang ve diğerleri, 2016)

Moleküler ışın epitaksi

Moleküler ışın epitaksi (MBE) yöntemi tek kristal ince filmlerin, kuantum kuyularının, süper örgülerin ve benzer yapıların büyütülmesi için kullanılmaktadır. Büyütülecek kaynak elementler knudsen hücreleri içerisinde süblimasyon yolu ile buharlaştırılırlar, gaz halindeki kaynak elementler hedef alt taş üzerinde yoğunlaşırlar. Büyütülen ürün bir bileşik ise reaksiyonlar alt taş üzerinde gerçekleşir ve nihai

bileşik oluşturulur. Bu işlemin gerçekleşmesi için gaz fazındaki atomların ortalama serbest yollarının yüksek olması gereklidir. Bu nedenle bu işlem yüksek vakum ortamında gerçekleştirilir. Yüksek veya ultra yüksek vakum ortamı ayrıca yüksek saflıkta üretim içinde gereklidir(Adachi ve Wasa, 2012).



Şekil 2.23 : Moleküler ışın epitaksisi şematik anlatımı (Adachi ve Wasa, 2012).

Islak kimyasal yöntemler

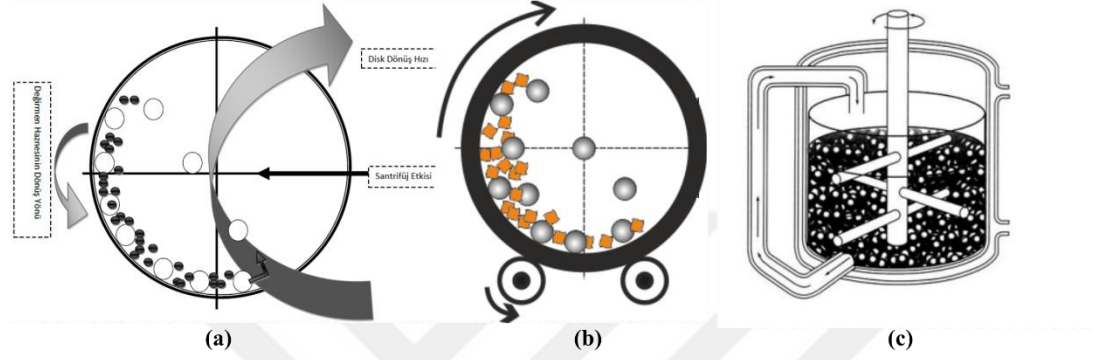
Bu yöntemlerde hammaddeler uygun çözelti içerisinde kimyasal reaksiyonlara girerek nihai nano malzemeyi oluşturur. Sol-jel, çöktürme, hidrotermal sentez yöntemleri en bilinen ıslak kimyasal tekniklerdir. Yatırım maliyeti görece düşük olduğu için farklı özelliklerdeki nano taneciklerin üretiminde sıklıkla tercih edilirler. Bu yöntemlerle nano küreler, nano çubuklar, nano plakalar gibi birçok farklı morfolojide ve kompozisyonda nano malzemeler üretilebilmektedir(Tiwari ve diğerleri, 2012).

2.1.4.2 Yukarıdan aşağı üretim yöntemleri

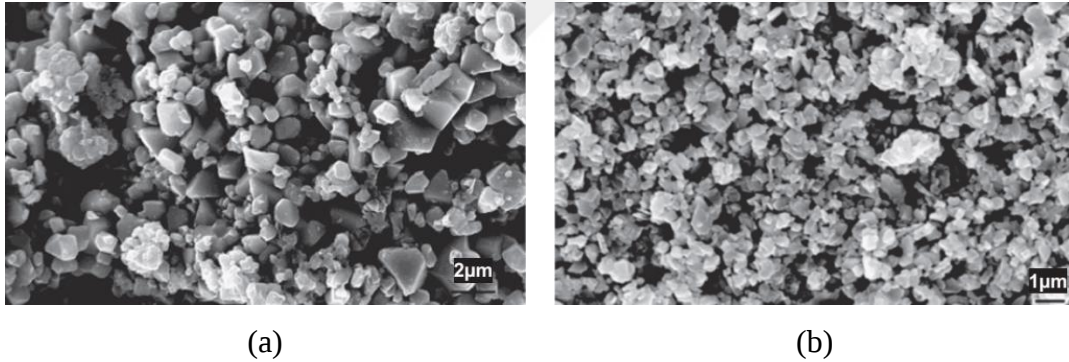
Yığınsal malzemenin kimyasal veya fiziksel yöntemlerden birisi ile işlenerek nano yapı oluşturulur. Yığın malzemenin yüzeyinden madde uzaklaştırılması yoluyla veya yığınsal bir parçanın bölünmesi yolu ile gerçekleştirilebilir. Öğütme, elektrokimyasal aşındırma, lazer ablasyonu, litografi en popüler yukarıdan aşağı üretim teknikleridir.

Öğütme

Yığınsal mikron boyutundaki bir madde mekanik olarak kırılarak nano taneciklere dönüştürülür. Şekil 2.25’de gösterilen geleneksel bilyeli değirmen, eksenel bilyeli değirmen ve atritör değirmen gibi farklı gereçlerle öğütme işlemi gerçekleştirilebilir. Şekil 2.24’ te eksenel değirmen ile mikron boyutlu CoFe_2O_4 taneciklerin 4 saatlik öğütme sonrasında elde edilmiş ortalama boyutu 200 nm olan CoFe_2O_4 tanecikler görülmektedir (Yünger ve Özel, 2013).



Şekil 2.24 : Farklı öğütme yöntemleri (a) eksenel değirmen, (b) geleneksel değirmen, (c) atritör değirmen (Baláz, 2008).



Şekil 2.25 : Öğütülmeden önce, (b) Eksenel değirmen ile 4 saatlik öğütme sonrasında elde edilmiş CoFe_2O_4 tanecikler (Yünger ve Özel, 2013).

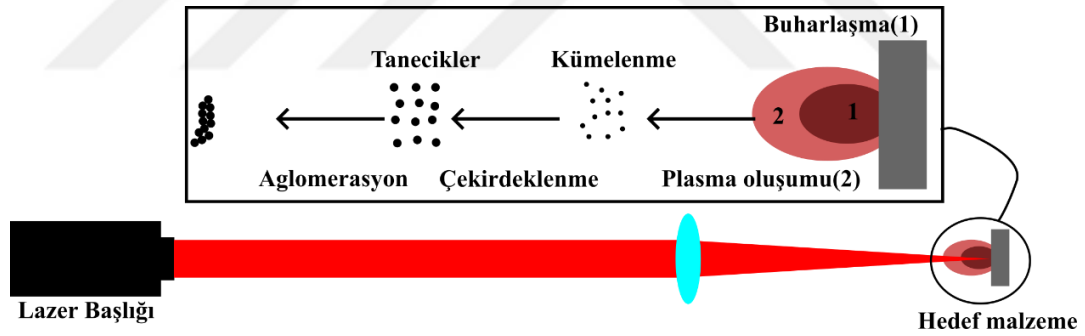
Litografi

Litografi, bir şablon oluşturularak katı bir yüzeyin bu şablon ile istenilen şeklin oluşturulmasıdır. Uzun yıllardır entegre devrelerin şekillendirilmesi bu yöntem ile yapılmıştır. Ancak günümüzde nano teknolojinin gelişmesi ile birlikte nano yapıların çeşitli yüzeylerde oluşturulması içinde kullanılmaya başlanmıştır. Bu işlem için öncelikle yarı iletken malzeme yüzeyinde foto-duyarlı bir film tabakası oluşturulur. Daha sonra bu tabaka üzerine maskeleme yapılır ve maskeleme sonucu foto-duyarlı kaplama ışığa maruz bırakılır. Daha sonra ışına maruz bırakılan kaplama özel bir

çözültide dağılır. Dağlama sonrası maskeleme ile oluşturulması istenen şekil yarı iletken yüzeyinde oluşturulur.(Nogueras, 2020) Fotolitografi, X-ışını litografisi, elektron-demeti litografisi gibi dolaylı yöntemlerin yanında son zamanlarda taramalı prob mikroskopi, atomik kuvvet mikroskopi veya kontakt baskı gibi doğrudan yöntemlerde kullanılmaya başlanmıştır(Thomas ve diğerleri, 2019).

Lazer ablasyonu

Lazer ablasyonu ile lazer ışığı katı bir yüzeye odaklanarak bu yüzeyden parça koparılması yolu ile nano tanecikler üretilir. Şematik olarak şekil 2.27’de görüldüğü gibi lazer ışığı numune yüzeyine odaklandığında, odak noktasının sıcaklığı artmaya başlar ve numune buharlaşmaya başlar. Buharlaşmış parçacıklar ve ortamda bulunan parçacıkların lazer ışığı ile etkileşimi sonucu plazma bulutu oluşur. Lazer enerjisi ile koparılan tanecikler plazma bulutundan uzaklaştıktan sonra ani bir soğuma ile buhar fazında çekirdeklenerek nano tanecikleri oluştururlar. Bu işlem sıvı içerisinde de gerçekleştirilebilir bu durumda nano tanecikler sıvı içerisinde oluşur. Bu yöntem ile kuantum noktalar, metal oksit nano tanecikler, nano karbonlar üretilebilir(Stafe, Marcu ve diğerleri, 2014).

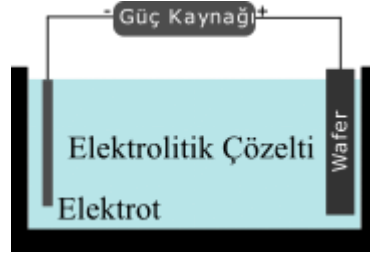


Şekil 2.26 : Lazer ablasyonu şematik anlatımı.

Elektrokimyasal aşındırma işlemi

Şu ana kadar incelediğimiz yukarıdan aşağı ve aşağıdan yukarı yöntemlerle çok farklı nano yapıları üretmek mümkündür. Ancak bu yöntemlerin bir kısmı yüksek yatırım maliyetleri gerektirdiğinden sadece aşırı hassasiyet gerektiren uygulamalarda kullanılmaları mümkündür. Öğütme veya ıslak kimyasal yöntemler gibi görece yatırım maliyetleri daha uygun olan yöntemler ise nano boyutta GaAs üretilmesi için uygun değildir. Elektrokimyasal aşındırma yöntemi düşük ilk yatırım maliyeti, basit üretim süreci ile GaAs yarı iletkenleri üzerinde üç boyutlu nano yapılar oluşturulması

için iyi bir alternatiftir. Gözenekli yarı iletken yapıların oluşturulması için sıklıkla tercih edilmesine rağmen, nano koni, nano piramit gibi farklı mikro ve nano yapıların oluşturulması içinde kullanılmaktadır (Acikgoz ve diğerleri, 2012b; 2017). Şekil 2.28’de görüldüğü gibi elektrokimyasal aşındırma yöntemi için bir reaksiyon hücresi ve güç kaynağı yeterlidir.

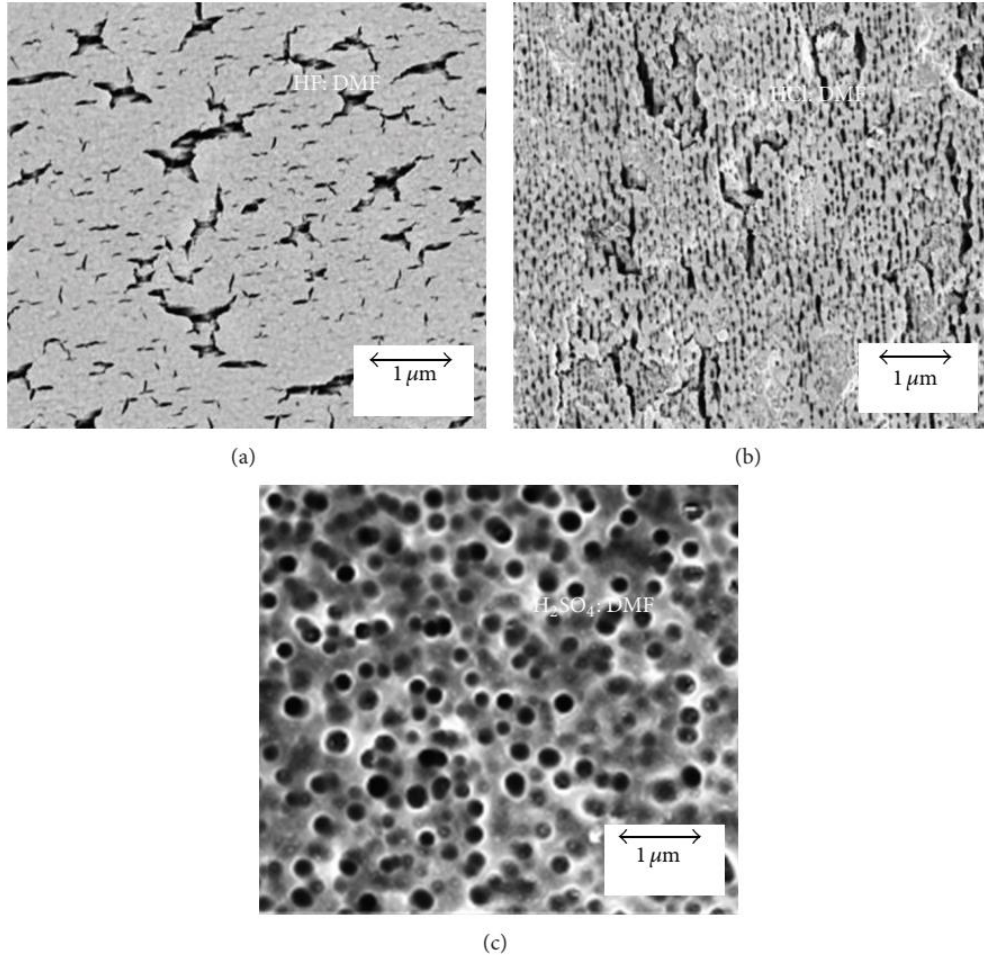


Şekil 2.27 : Elektrokimyasal aşındırma işlemi.

Elektrokimyasal aşındırma işlemi yığınsal bir malzemenin yüzeyinden kimyasal olarak parça koparılması prensibine dayanmaktadır. Katı bir malzemeden parça koparmak için aslında atomik/moleküler bağların koparılması gereklidir. Üzerinden akım geçirilen yarı iletken üzerinde elektron boşluk çiftleri oluşur. Yarı iletken yüzeyinde boşluk yoğunluğunun artması aslında yarı iletken yüzeyinde daha fazla gevşek bağlı atomların olmasına yol açar. Bu gevşek bağlı atomlar elektrolitik çözelti içerisindeki nükleofilik moleküller ile reaksiyona girerek çözünür. Yarı iletkenin içerisindeki elektron boşluk çiftlerinin sayısının artırılması için numune işlem sırasında aydınlatılabilir. Bu şekilde aydınlatılarak yapılan elektrokimyasal aşındırma işlemine aydınlatmalı elektrokimyasal aşındırma işlemi denilir. Aydınlatma numunenin çözünmenin gerçekleştiği yüzünden veya arkasından yapılabilir. Ön yüzden yapılan aydınlatma yarı iletkenin elektrolitik çözelti içerisinde aşınmasını hızlandırma amaçlı yapılır. Arka yüzden yapılan aydınlatma ise numunenin çözünme gerçekleşmeyen kısımlarında elektron boşluk çiftleri oluşturacaktır, boşluklar çözünmenin gerçekleştiği ön yüze doğru ilerleyerek bu bölgelerin daha fazla aşınmasına neden olurlar. Arka yüzden aydınlatma özellikle poroz yüzeylerin derinleştirilmesi için kullanılmaktadır. Arka yüzden aydınlatmanın işe yaraması için boşlukların yüzeye ilerlemesi gereklidir bu nedenle, düşük boşluk difüzyon katsayısına sahip 3-5 yarı iletkenlerinde arka yüzden aydınlatma uygun değildir.

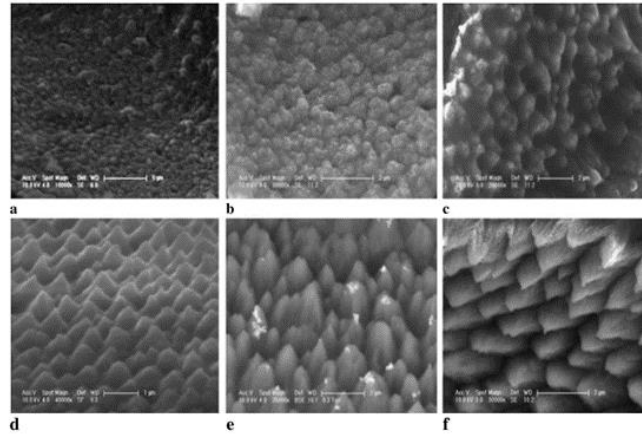
Elektrolitik çözelti tipi, akım şiddeti, aydınlatma kaynağı gibi parametreler oluşturulan yüzey morfolojisi üzerinde etkilidir. Örneğin Taib ve arkadaşları farklı çözeltiler içerisinde n-GaAs yarı iletkenini $25\text{mA}/\text{cm}^2$ akım yoğunluğunda 10 dakika

aşındırarak şekil 2.29’ da görülen farklı tiplerde gözenek yapıları elde etmişlerdir (Taib ve diğerleri, 2014).



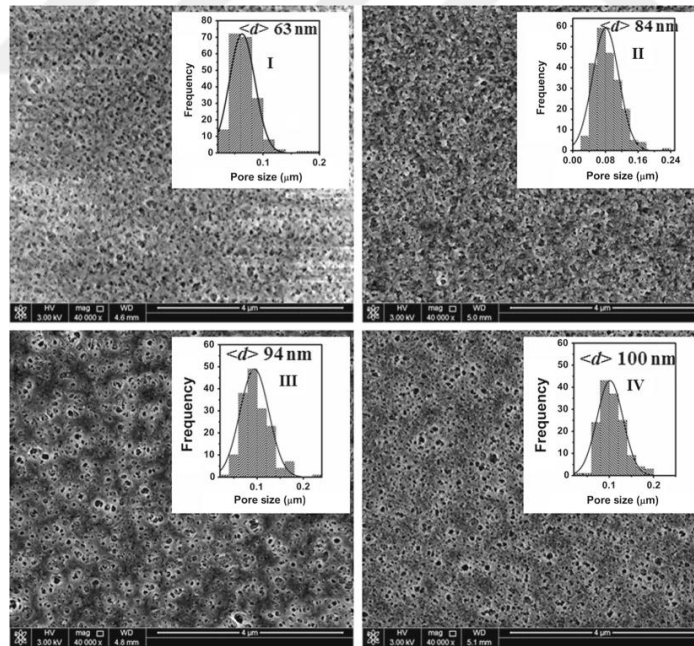
Şekil 2.28 : Farklı elektrolitik sıvılar içerisinde aşındırılmış n-GaAs. (a) HF: Dimetilformamit (DMF) (1:3), (b) HCl:DMF (1:3), (c) H₂SO₄:DMF (1:3) (Md Taib ve diğerleri, 2014).

Açıkgöz ve arkadaşları ise farklı aydınlatma kaynakları kullanarak aşındırılan HF:ethanol içerisinde 100 mA/cm² akım yoğunluğu ile 30 dakika aşındırılan Si yarı iletkenlerinde elde ettikleri farklı yüzey morfolojileri şekil 2.30’ da görülmektedir (Sabriye Acikgoz ve diğerleri, 2012).



Şekil 2.29 : (a)beyaz LED (b) mavi LED(c) CW HeNe laser (633 nm), (d) pulsed hydrogen laser (337 nm), (e) pulsed diode laser (405 nm), and (f) pulsed diode laser (467 nm) (Acikgoz ve diğerleri, 2012)

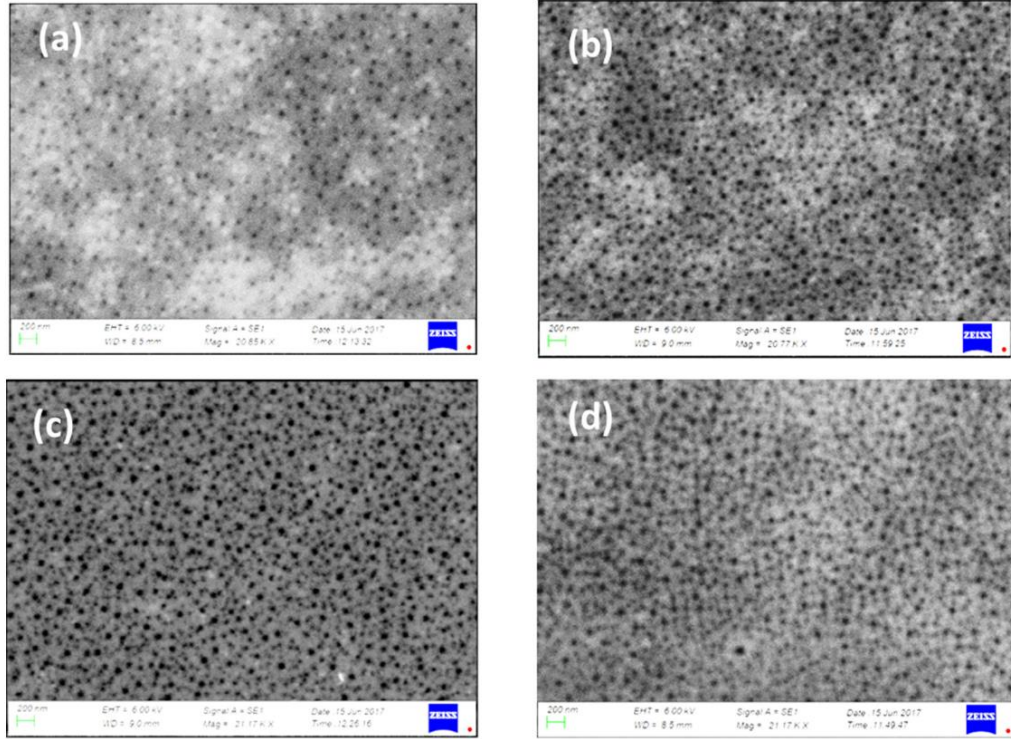
Akım şiddeti de elektrokimyasal aşındırma sonucu oluşturulan yapı üzerinde etkilidir. Das ve Sarkar 1:1 HF ethanol çözeltisi içerisinde n- Si yarı iletkenini farklı akım şiddetlerinde 30 dakika aşındırılması sonucu şekil 2.31’de görüldüğü gibi gözenek boyutunun aşındırma şiddeti ile arttığını gözlemlemişlerdir (Das ve Sarkar, 2016).



Şekil 2.30 : Farklı akım şiddetleri ile üretilmiş gözenekli silikon yapılar (Das ve Sarkar, 2016).

Aşındırma süresi, elektrokimyasal aşındırma yöntemi ile şekillendirilen yarı iletkenlerin yüzey morfolojisine etki eden bir diğer parametredir. Kopani ve arkadaşları n-Si yarı iletkenlerini 50 mA/cm^2 akım şiddeti ile farklı sürelerde

aşındırarak aşındırma süresinin oluşan yapıya etkisini incelemişlerdir (Kopani ve diğerleri, 2020). Şekil 2.32 de görüldüğü gibi por çapının 36 nm den 48 nm çıktığını ve por yoğunluğunun arttığını gözlemlemişlerdir.



Şekil 2.31 : Farklı sürelerde aşındırılan (a) 5 dk, (b) 7,5 dk, (c) 10 dk, (d)15 dk (Kopani ve diğerleri, 2020)

Görüldüğü gibi elektrokimyasal aşındırma parametrelerinin değişimi, aşındırılan yarı iletkenin yapısını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle bu çalışmada n-tipi ve p-tipi GaAs yüzeyi aşındırılarak aşınma parametrelerinin yüzey morfolojisine etkisi detaylıca incelenmiştir. Ayrıca elektrokimyasal aşınma sonrasında elde edilen üç boyutlu yapıların ışına özellikleri de araştırılmıştır.



3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 Malzeme

3.1.1 Kullanılan kimyasal maddeler

Elektrokimyasal aşındırma işlemi için MTI firmasından satın alınan n ve p tipi GaAs hazır plakalar kullanılmıştır. Si katkılı (100) n-tipi GaAs plakalar, 0.35mm kalınlığındadır ve öz direnci $(1,01-1,90) \times 10^{-3}$ ohm.cm' dir. Zn katkılı, p-tipi, 0.35mm kalınlığındaki, GaAs plakaların öz direnci $(1,64-1,88) \times 10^{-3}$ ohm.cm dir. Tek yönden parlatılmış n ve p tipi 2inç çaplı dairesel plakalar, 5×5 mm boyutunda kesilerek kullanılmıştır. Anot ve katot uçlarında 0,1 mm kalınlığında 5×5 mm boyutlarında %99,99 saflığa sahip Alfa Aesar firmasından temin edilen platin levhalar kullanılmıştır. Elektrolitik çözeltide, Merck marka %48' lik HF ve sigma aldrich %37 HCl, %99,9 saflığında Merck marka ethanol (C_2H_5OH) kullanılmıştır.

Aşındırılan yarı iletken yüzeylere Sigma Aldrich'ten temin edilen %99,5 saflığındaki polycyclic aromatic hydrocarbon (perylene, $C_{20}H_{12}$) boya molekülleri bağlanmıştır. Boya molekülleri Panreac firmasından satın alınan %99,9 saflıkta Methanol (CH_3OH) içerisinde çözülmüştür. Boya moleküllerinin GaAs yüzeyine bağlanabilmesi için ABCR firmasından satın alınan 3-Aminopropyltriethoxysilane (APTES) molekülleri yüzey aktifleştirici olarak kullanılmıştır.

3.1.2 Çift hücreli elektrokimyasal aşındırma işleminde kullanılan cihazlar

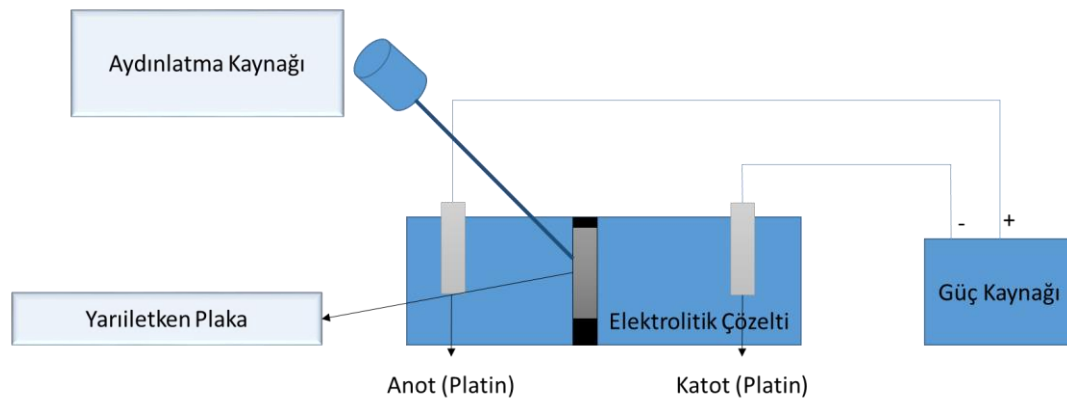
Elektrokimyasal aşındırma işlemi için el yapımı bir düzenek oluşturulmuştur. Bu amaçla numune üzerinden akımın geçmesini sağlayan potansiyel fark AATech APS-3030DD yüksek hassasiyetli ayarlı DC Güç kaynağı tarafından sağlanmıştır. Güç kaynağının ürettiği akım miktarı Fluke-179 True RMS multimetre ile ölçülerek gerekli akım şiddeti ayarlanmıştır. Aşındırma işlemi sırasında yarı iletkenlerin yüzeyini aydınlatmak için 70W halojen, 8W LED lambalar kullanılmıştır. Monokromatik ve koherent ışık kaynağı olarak Picoquant PLD 800D lazer sürücüyeye bağlı olarak çalışan Picoquant LDH-DC-470, 470 nm piko saniye lazer ve LDH-D-C-405 405 nm piko saniye lazer kullanılmıştır. Üretilen GaAs yüzeylerin fiziksel ve

kimyasal analizleri taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir (The Philips XL30 ESEMFEED/EDAX system). Yüzeyde oluşan yapıların kimyasal analizi Thermo Scientific K-Alpha X-ray Fotoelektron Spektrometresi (XPS) ile yapılmıştır. Numunelerin foto ışınım spektrumları PTI (Photon Technology International) Quanta Master 30 fosforesans/ floresans spektrometresi tarafından tespit edilmiştir. Yarı iletken yüzeylerin floresan yaşam ömrü ölçümleri el yapımı konfokal floresan yaşam ömrü görüntüleme mikroskobu ile yapılmıştır.

3.2 Metot

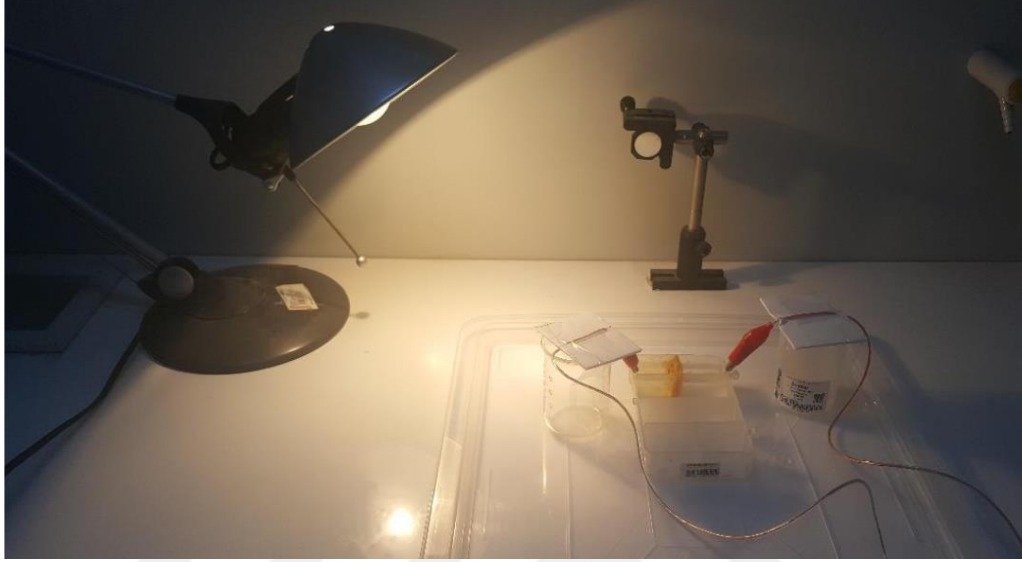
3.2.1 GaAs yarı iletkenleri üzerinde üç boyutlu mikro ve nano yüzeylerin oluşturulması

Üç boyutlu mikro ve nano yüzeyler, çift hücreli elektrokimyasal aşındırma metodu ile hazırlanmıştır. Çift hücreli elektrokimyasal aşındırma metodunda yarı iletken plakalar şekil 3.1’de görüldüğü gibi iki eş hücrenin arasına yerleştirilir. İki hücrede eşit derişimde ve miktarda elektrolitik sıvı içerir. Akım kaynağının hem anot hem de katot ucunda eş platin levhalar tutturulur. İki hücredeki elektrolitik çözeltiler birbirinden izole edilerek sadece yarı iletken plakanın yüzeyi ile temas etmeleri sağlanır. Numune üzerinden akım geçirilerek elektro-kimyasal aşındırma işlemi başlatılır. Aşındırma işlemi temelde yarı iletken maddenin numune yüzeyinden kopararak elektrolitik sıvıya transferidir. Numune yüzeyinin aydınlatılması ve yarı iletken plaka üzerinden elektrik akımı geçirilmesi, numune yüzeyinde elektron-boşluk çiftleri yaratarak bağların daha kolay kopmasını sağlar.



Şekil 3.1 : Elektrokimyasal aşındırma şematik gösterimi.

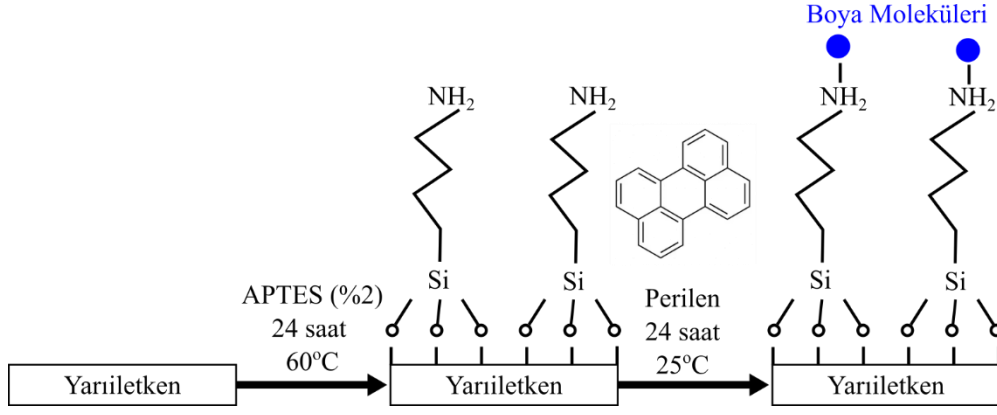
Aşındırılan yarı iletkenlerin yüzey morfolojisi; akım miktarı, aşındırma süresi, asit çözeltisinin konsantrasyonu, aydınlatma kaynağının özellikleri gibi değişkenlere doğrudan bağlıdır. Çalışma kapsamında her bir parametrenin yüzey morfolojisine etkisi araştırılmıştır. Bu nedenle tek bir parametre değiştirilip diğer değişkenler sabit tutularak deneyler şekil 3.2’ de gösterilen düzenek kurularak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2 : Çift hücreli elektrokimyasal aşındırma işlemi için kurulan düzenek.

3.2.2 Aşındırılan GaAs yüzeylere boya moleküllerinin bağlanması

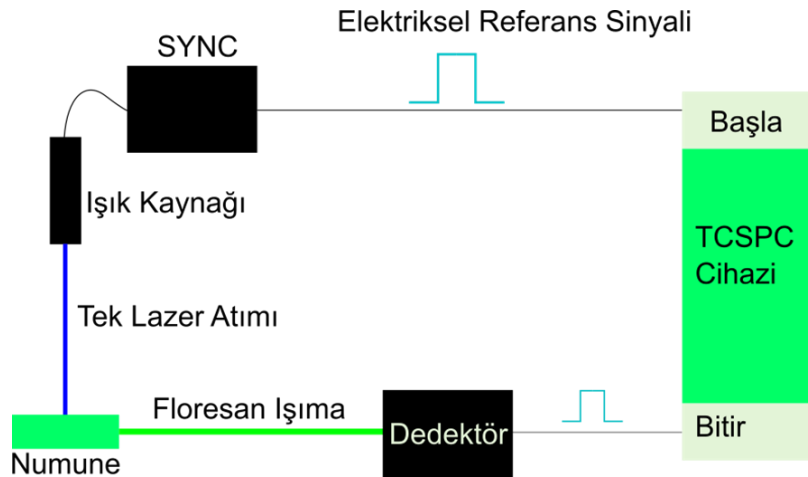
HF asit çözeltisi içinde aşındırılan GaAs yüzeylerin üzerine polycyclic aromatik hidrokarbon (Perylene $C_{20}H_{12}$) boya molekülleri kimyasal olarak yerleştirilmiştir. Boya moleküllerinin elektrokimyasal aşındırma işlemi ile üretilen yarı iletken nano yüzeyler üzerine kimyasal olarak bağlamak için aminotrietoksilan (APTES) molekülü kullanılmıştır ve şekil 3.3 ’de özetlenen işlemler sırasıyla uygulanmıştır. Aşındırma işleminden sonra öncelikle plakalar hacimce %2’ lik APTES/Toluen çözeltisi içerisinde 24 saat $60^{\circ}C$ ’de bekletilmiştir. Bu işlemin ardından yüzeye tutunmayan APTES moleküllerinin uzaklaştırılması için toluen ile yıkanmış ve $110^{\circ}C$ ’de 30 dakika kurutulmuştur. Daha sonra numuneler boya çözeltisi içerisinde 24 saat bekletilmiştir. Bağlanmamış boya moleküllerinin uzaklaştırılması için plakalar toluen ile yıkanmış ve 12 saat oda sıcaklığında kurutulmuştur.



Şekil 3.3 : Perilen boya moleküllerinin aşındırılan yüzeylere bağlanması.

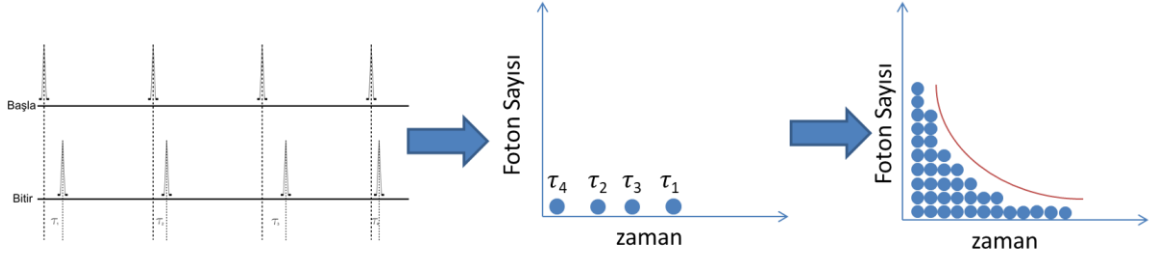
3.2.3 Floresan yaşam ömrü ölçümleri

GaAs yarı iletken yüzeyindeki floresan yaşam ömrü ölçümleri zaman uyumlu tek foton sayma tekniği (Time-correlated single photon counting, TCSPC) ile belirlenmiştir. Şekil 3.4'te şematik olarak açıklanan bu tekniğin ana prensibi numunenin darbeli lazer ile uyarılma anı ile numunenin ışıma yaptığı an arasındaki zaman farkını ölçmektir. Lazer başlığından atım yapıldığı anda lazer sürücüsü, ana donanım başlatıcı bir elektriksel sinyal gönderir, bu sinyal ana donanım ulaştığı anda yaşam ömrü ölçümü başlar. Numune üzerinde oluşan floresan ışıma dedektöre ulaştığı anda bir bitir sinyali dedektör tarafından ana donanım gönderilir. Lazer sürücüsü-ana donanım arasındaki kablonun uzunluğu ile lazer ışığının aldığı yolun toplamı, floresan ışımanın aldığı yol ve dedektör-ana donanım arasındaki kablonun uzunluğunun toplamına eşit olması durumunda, her bir başla bitir sinyalinin arasında kalan zaman floresan yaşam ömrüdür.



Şekil 3.4 : TCSPC tekniği şematik anlatımı.

Bu yolla art arda birçok ölçüm yapılır her bir gecikme zamanının istatistiksel olarak toplanması ile şekil 3.5’ te görüldüğü gibi yaşam ömrü eğrisi elde edilir.



Şekil 3.5 : Yaşam ömrü eğrisinin birçok ölçümle oluşumu.

Elde edilen üstel fonksiyonlar şeklindeki yaşam ömrü eğrileri symphotime (Picoquant) programı yardımı ile fit edilerek floresan yaşam ömrü parametreleri belirlenir. Bir elektronun uyarılmış enerji seviyesinden temel enerji seviyesine dönmesi sonucunda oluşan ışımanın şiddeti eşitlik 3.1’ de verildiği gibi floresan yaşam ömrüne bağlı olarak değişmektedir.

$$I(t) = A_o \exp (t/\tau_o) \quad (3.1)$$

Işıma şiddeti eğrileri floresan maddelerin önemli bir kısmında şekil 3.6’ da görüldüğü gibi üstel olarak çok hızlı azalan fonksiyonlar olduğundan floresan yaşam ömrü hesaplanırken ışıma eğrileri iki ya da daha fazla kısma ayrılarak analiz edilmektedir. Bu nedenle, floresan ışıma şiddetinin floresan yaşam ömrüne bağlı değişimini eşitlik 3.2’ de olduğu gibi çoklu-üstel (multi-exponential) bir model ile ifade etmek daha doğrudur.

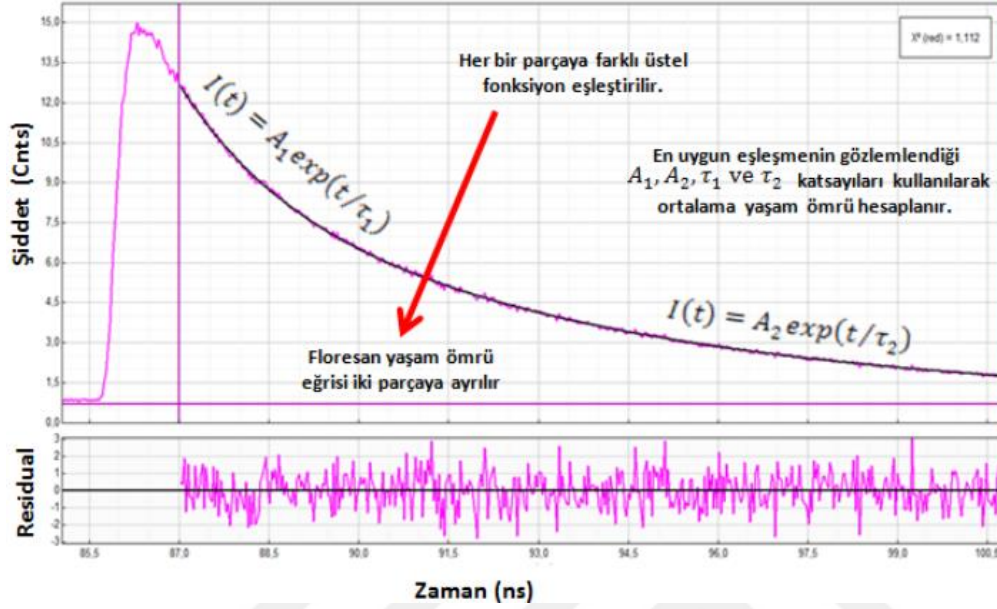
$$I(t) = \sum_{i=0}^n A_i \exp \left(\frac{t}{\tau_i} \right) \quad (3.2)$$

Çoklu-üstel uydurma modeli kullanılarak yapılan analizler de ışıma şiddeti ağırlıklı ve genlik ağırlıklı olmak üzere iki farklı ortalama yaşam ömrü hesaplanır. Işıma şiddeti ağırlıklı (intensity-weighted) ortalama yarılanma ömrü eşitlik 3.3’te görüldüğü gibi hesaplanır.

$$\langle \tau \rangle = \frac{\sum_i I_i \tau_i^2}{\sum_j I_j \tau_j} \quad (3.3)$$

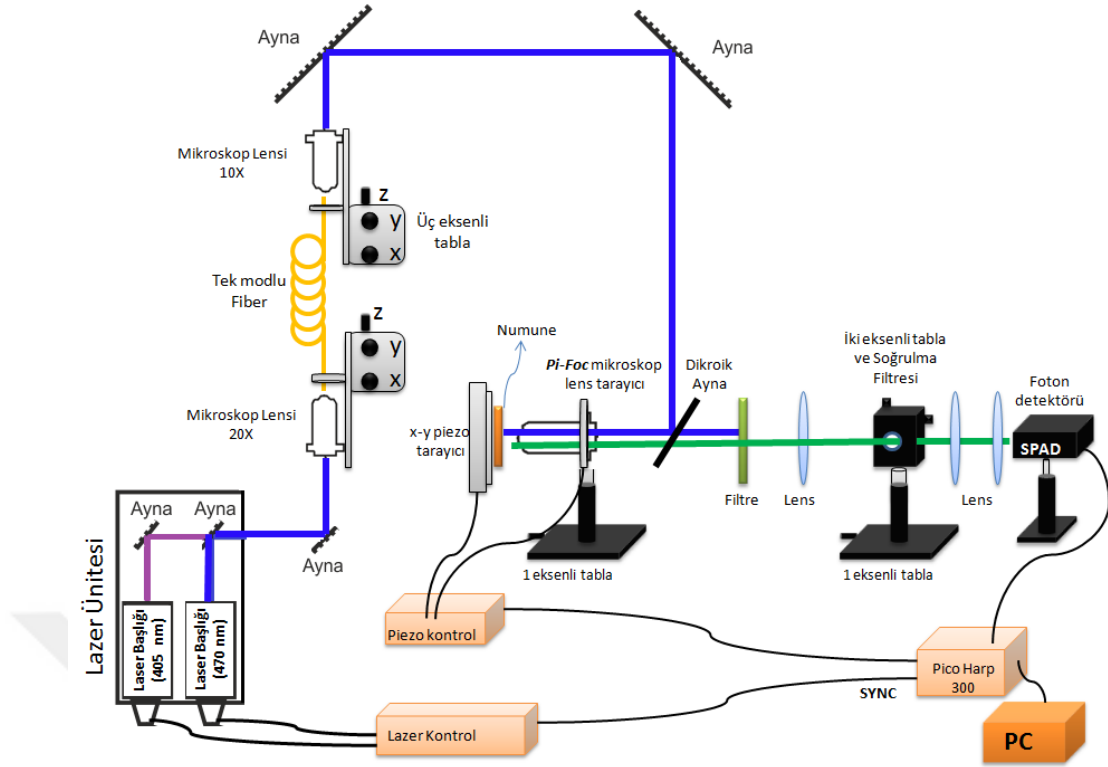
Genlik ağırlıklı (amplitude weighed) ortalama yarılanma ömrü ise eşitlik 3.4'te görüldüğü gibi hesaplanır.

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_i I_i \tau_i}{\sum_i I_i} \quad (3.4)$$



Şekil 3.6 : Yaşam ömrü eğrisinin çift üstel fonksiyon ile analiz edilmesi.

FLIM, aracılığıyla çoklu noktalardan alınan verilerin birleştirilmesi ile ışıma şiddetine ve parçacık yaşam ömrüne bağlı iki boyutlu yüzey haritaları elde edilir. Bu ölçümlerin gerçekleştirilmesi için kullanılan el yapımı FLIM sistemi şekil 3.7'de şematik olarak görülmektedir.



Şekil 3.7 : El yapımı FLIM sistemi şematik gösterimi.

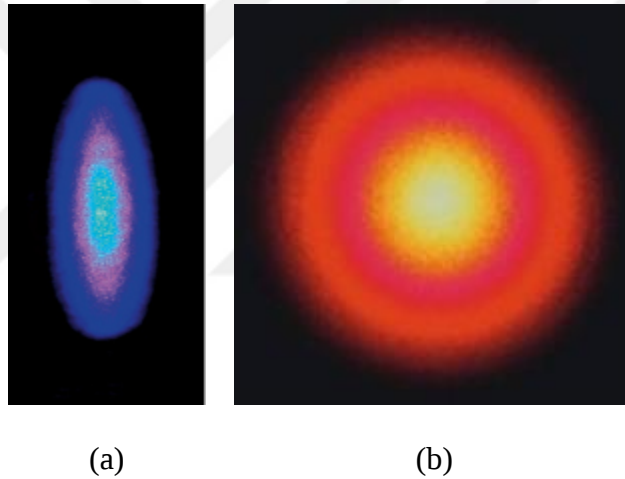
Zaman uyumlu tek foton sayma yönteminde Floresan numunenin uyarılma zamanı ile açığa çıkan fotonun detektöre ulaşma zamanı arasındaki fark pek çok kez tekrarlanarak ölçülür ve veri biriktirilerek istatistiksel olarak yaşam ömrü eğrisi elde edilir. Bu nedenle darbeli ışık kaynağı kullanılmalıdır. Bu amaç ile 470 ve 405 nm dalga boyunda ışık verebilen iki adet lazer başlığı (Picoquant, LDH-D-C-470, Picoquant, LDH-D-C-405) kullanılmıştır. Bu lazerlerin özellikleri çizelge 3.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 3.1 : FLIM sisteminde kullanılan lazerlerin özellikleri.

Dalga boyu (± 10) [nm]	Atım hızı (FWHM) [ps]	Maksimum tekrarlama frekansı [MHz]	Yüksek ortalama güç [mW]	Düşük ortalama güç[mW]	Sürekli modda güç [mW]
470 nm	< 70	40	4.0	0.8	60
405 nm	< 50	40	3.0	1.0	50

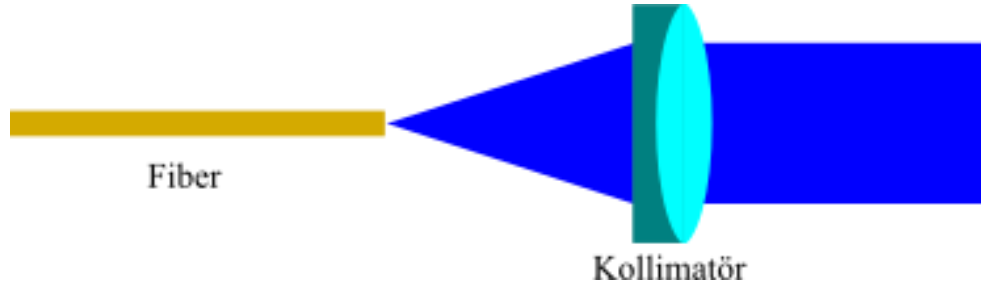
Bu lazerlerin çalışma frekansı, enerjisi gibi özellikleri bir lazer kontrol ünitesi (Piqoquant PDL 800-D) ile sağlanmaktadır. Ayrıca lazer kontrol ünitesinde yer alan bir SYNC çıkışı ile her lazer darbesine karşılık bir elektriksel referans sinyali oluşturulur ve ana kontrol ünitesine iletilir ve yaşam ömrü ölçümü başlatılır.

Bu lazer başlıklarından çıkan ışık şekil 3.8 (a)' da görüldüğü gibi $1,5 \times 3,5$ mm boyutlarında eliptik şekillidir. Işık demeti odaklanmadan önce optik sistem içindeki çok sayıda filtre, ayna ve lensten geçer. Bu geçişlerden sonra numune yüzeyinde düzgün bir odak oluşturabilmesi için ışık demeti dairesel formda olmalıdır. Ayrıca numune yüzeyine odaklandığında daha küçük bir nokta elde edilmesi ve bu nokta üzerinde daha eşit bir şiddet dağılımı olması için lazer ışığı dairesel şekilli olmalıdır. Şekil 3.8 (b) 'deki gibi dairesel bir şekil alması için lazer başlığından çıkan ışık tek modlu fiberden (Thorlabs, P1 405 BFC-1) geçirilmiştir.



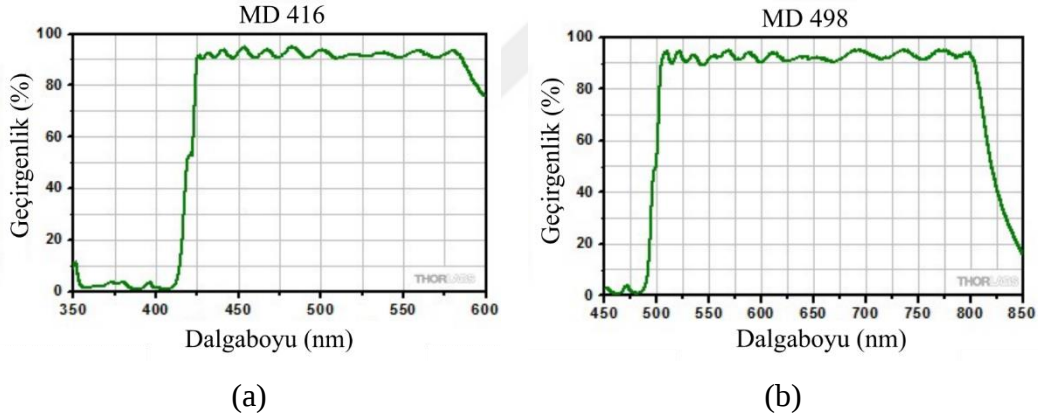
Şekil 3.8 : (a)Lazer başlığından çıkan eliptik şekilli lazer ışını. (b) tek modlu fiberden geçirildikten sonra lazer ışını.

Tek modlu fiber vasıtasıyla küresel hale getirilmiş lazer ışını kolimatör (Thorlabs, PAF-X-11-PC-A) ile şekil 3.9'da görüldüğü gibi hizalanarak mikroskop sistemi içerisinde aynalar aracılığı ile yönlendirilir ve iki renkli (dichroic) aynadan yansıtılarak ve 100 X (Nikon, C60 L Plan M:100X, WD:6.5mm, NA:0.70) mikroskop objektifi yardımı ile lazer ışını numune üzerine odaklanır.



Şekil 3.9 : Tek modlu fiberden geçirilen lazer ışığının hizalanması.

İki renkli ayna belirli dalga boylarındaki ışık için geçirgen, belirli dalga boylarındaki ışık için ise yansıtıcıdır. Bu sayede lazer ışığı ile 45° açı yapacak şekilde konumlandırıldığında gelen lazer ışığını numune yönünde yansıtır fakat numune yönünden gelen luminesans ışımının geçerek dedektöre ulaşmasını ve aynı zamanda numune yüzeyinden yansıyan lazer ışığının filtre edilmesini sağlar. Bu amaçla bu sistemde kullanılan ışık kaynaklarına uygun olan iki renkli aynalar kullanılmıştır (Thorlabs, MD 416, MD 498). Bu aynaların geçirgenlik ve yansıtma eğrileri şekil 3.10'da görülmektedir.

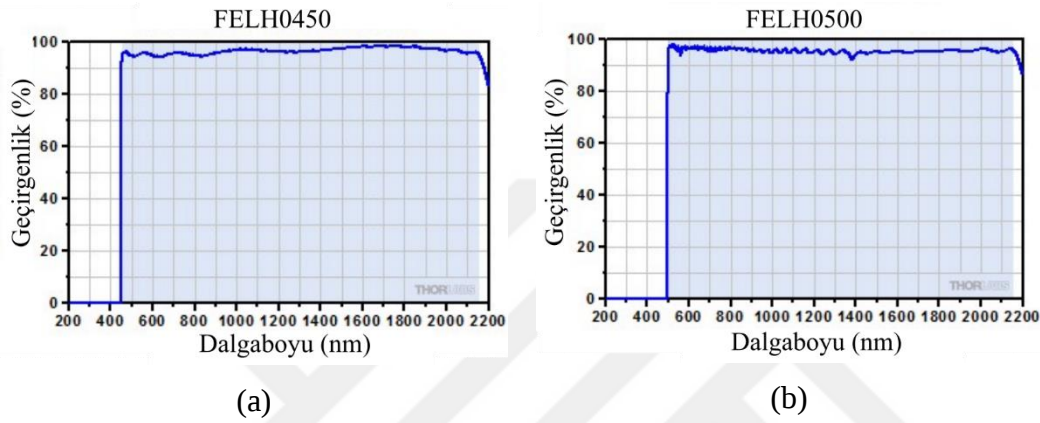


Şekil 3.10 : (a) 405 nm dalga boyundaki lazer için kullanılan, (b) 470 nm dalga boyundaki lazer için kullanılan iki renkli aynaların yansıtma ve geçirgenlik eğrileri.

Numune üzerinde tarama yapılarak görüntü oluşturulması için iki boyutta (X, Y) hareket edebilen bir piezo tabla kullanılmıştır (PI, P-733.2CD). Uygulanan gerilim değerlerine bağlı olarak piezo elektrik malzemenin boyutları artıp azalabilir. Böylece piezo tabla üzerine yerleştirilen numunenin konumu piezo tablaya uygulanan gerilime bağlı olarak kontrollü bir şekilde değiştirilebilir. 3. Eksende hareketin sağlanması için bir piezo odaklayıcı (PI, P721CDA) kullanılmıştır. Lazer ışığının numune üzerine odaklanmasını sağlayan mikroskop objektifi piezo odaklayıcı üzerine yerleştirilerek odak noktasının z ekseninde değiştirilebilmesi sağlanmıştır.

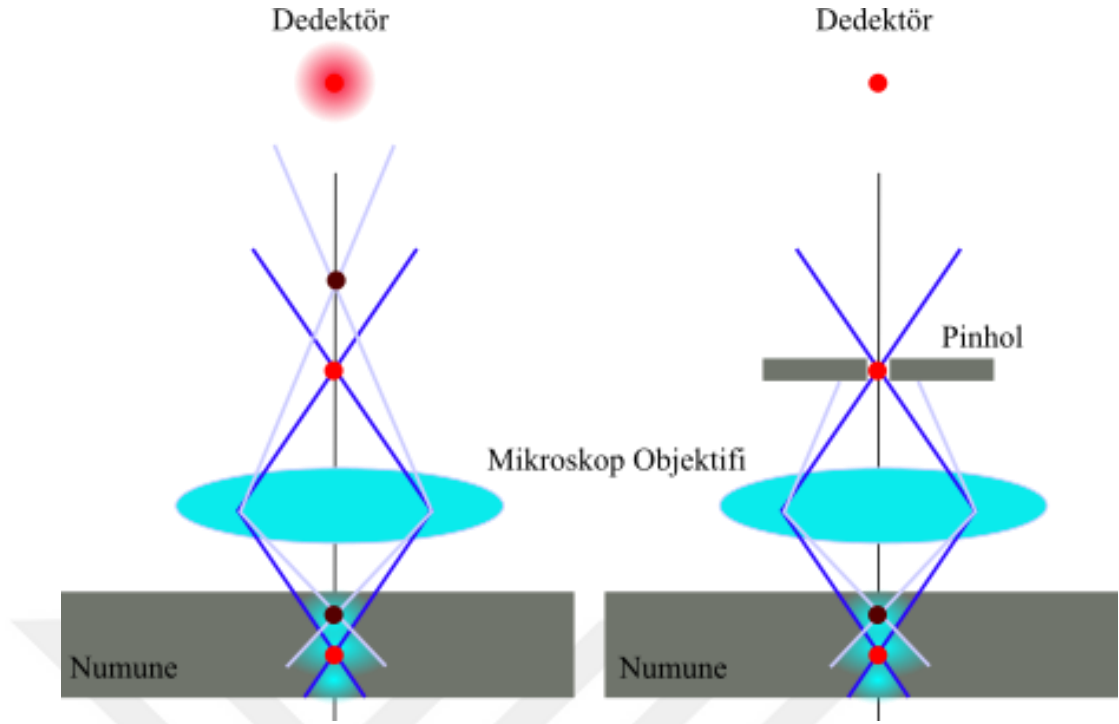
Bilgisayardan verilen pozisyon komutları bir piezo kontrolör (PI, E-727.3CDA) ile işlenerek piezo tablaların numuneyi doğru pozisyona getirmesi sağlanmıştır.

Numune yüzeyinde oluşan ışıma dikroik aynadan geçtikten sonra artık lazer ışıklarının dedektöre ulaşmamasını sağlamak için kısa dalga boyundaki ışığın geçmesini engelleyen, uzun dalga boyuna sahip ışığı geçiren filtreler kullanılmıştır. Kullanılan filtreler kullanılan ışık kaynağının türüne göre şekil 3.11’de görülen geçirim grafikleri incelenerek seçilmiştir (Thorlabs, FELH0450, FELH0500).



Şekil 3.11 : (a) 405 nm lazer için (b) 470 nm lazer için kullanılan artık lazer ışığının dedektöre ulaşmasını engelleyen farklı filtrelerin geçirim grafikleri.

Floresan numune lazer ışığına maruz bırakıldığı zaman, numunenin yüzeyinde farklı odak düzlemlerinde ışıma oluşacaktır. Sadece gerçek odak düzleminde gelen ışımının dedektöre ulaşmasını sağlamak oluşacak görüntünün çözünürlüğünü arttıracaktır. Pinhole, görüntünün bulanıklaşmasına neden olan odak dışından gelen bütün ışığı elimine ederek daha keskin bir görüntü elde edilmesinin yanında odak düzleminin z eksenini boyunca değiştirilerek farklı odak derinliklerinden görüntü alınmasına da imkân sağlar. Bu nedenlerle şekil 3.12’de görüldüğü gibi lensin tam odak noktasına doğru boyutta bir soğrulma pinhole yerleştirilmiştir.



Şekil 3.12 : Pinhol şematik gösterimi.

Pinhole çapı aşırı büyük olursa konfokal etki azalarak görüntü bulanıklaşacaktır. Pinhole çapının aşırı küçük olması ise dedektöre yetersiz sinyal gitmesine neden olacağından kumlu bir görüntü elde edilecektir. Pinhole çapı objektif büyütmesi ve objektif çözünürlüğü ile aşağıdaki bağıntı ile bağlı olan Airy Birimi ile belirlenir. 1 Airy Birimi (AB) ise objektif çözünürlüğünün, objektif büyütmesi ile çarpılarak belirlenir. İdeal pinhole çapı ise 0.25 AB- 1 AB arasında olmalıdır. Mikroskop çözünürlüğü (R) ise eşitlik 3.1' de gösterildiği gibi ışığın dalga boyuna ve kullanılan mikroskobun nümerik açıklığına (NA) bağlıdır.

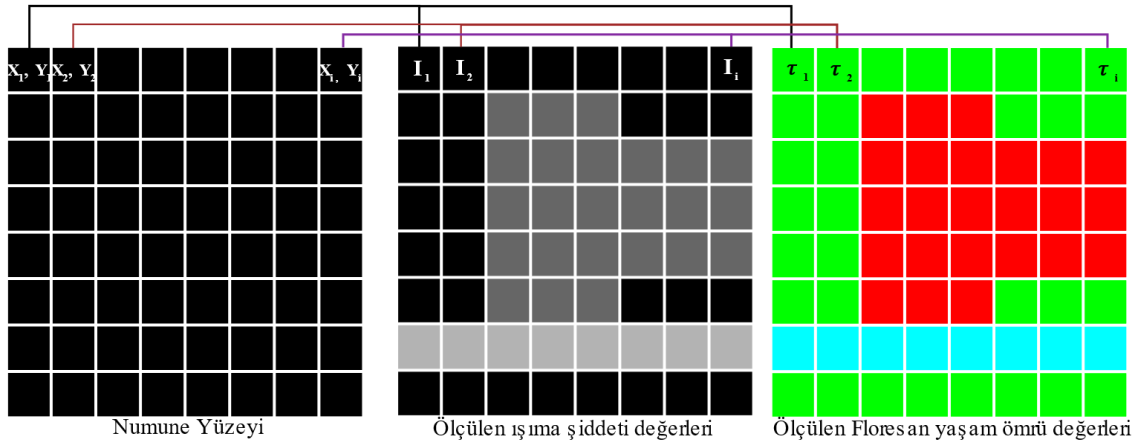
$$R = \frac{0.61\lambda}{NA} \quad (3.5)$$

Bu sistemde kullanılan 100X büyütmeli, 0.7 nümerik açıklığa sahip mikroskop objektifi ile 470 nm dalga boyuna sahip lazer ile yaklaşık 409,5 nm çözünürlük, 405 nm dalga boyundaki lazer ile ise 352,9nm çözünürlük elde edilebilmektedir. Bu durumda ideal pinhole çapı 470 nm lazer kullanılırken ideal pinhol çapı 10,2-40,9 mikron arasında, 405 nm lazer kullanılırken 8,8-35,3 mikron arasında olmalıdır. Bu nedenle 25µm çapında pinhol kullanılmıştır.

Numuneden gelen ışınma foton dedektörü ile tespit edilir ve elektriksel sinyale dönüştürülür. Böylece lazer atımı ile iletilen SYNC sinyalinin başlattığı yaşam ömrü

ölçüm süreci dedektörden gelen sinyal ile sonlanır. Aynı işlem piko saniyelik zaman aralıklarıyla gelen her bir lazer darbesi için tekrarlanarak, her birinde ölçülen zaman farklı kaydedilir. Elde edilen veriler toplanır ve istatistiksel floresan yaşam ömrü histogramı oluşturulur. Tek foton sayma detektörü olarak PMT (Photomultiplier Tube, MCP (Micro Channel Plate), SPAD (Single Photon Avalanche Diode) ve Hybrid PMT detektörleri kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında 400- 1100nm dalga boyları aralığındaki fotonları algılayan SPAD (MPD, PDM) detektörü kullanılmıştır.

Floresan mikroskopun yaptığı ölçümleri, lazer kontrol ve piezo kontrol cihazları ile eş güdümlü olarak çalışarak son kullanıcıya verileri ileten ve son kullanıcı ile diğer cihazlar arasındaki iletişimlerini sağlayan bir ana donanım (Picoquant, picoharp 300) ve bilgisayar üzerinden kullanıcı kontrolünü sağlayan bir yazılım (Picoquant, symphotime 64) ile yaşam ömrü ölçümleri yapılarak FLIM görüntüleri oluşturulur. Şekil 3.13’ de görüldüğü gibi FLIM görüntüsü oluşturulacak bölgede bulunan her bir X,Y konumuna karşılık olarak dijital ortamda bir piksel atanır. Lazer odağı piezo konumlayıcı tarafından bütün X, Y konumlarına getirilerek bu noktalarda zaman uyumlu tek foton sayma tekniği ile floresan yaşam ömrü ve floresan şiddeti ölçülerek her X,Y konumuna atanan piksele kaydedilir. Böylece her bir piksele karşılık gelen yaşam ömrü ve şiddet değerleri kullanılarak 2 boyutlu FLIM görüntüsü oluşturulur.



Şekil 3.13 : FLIM görüntüsünün oluşturulması.

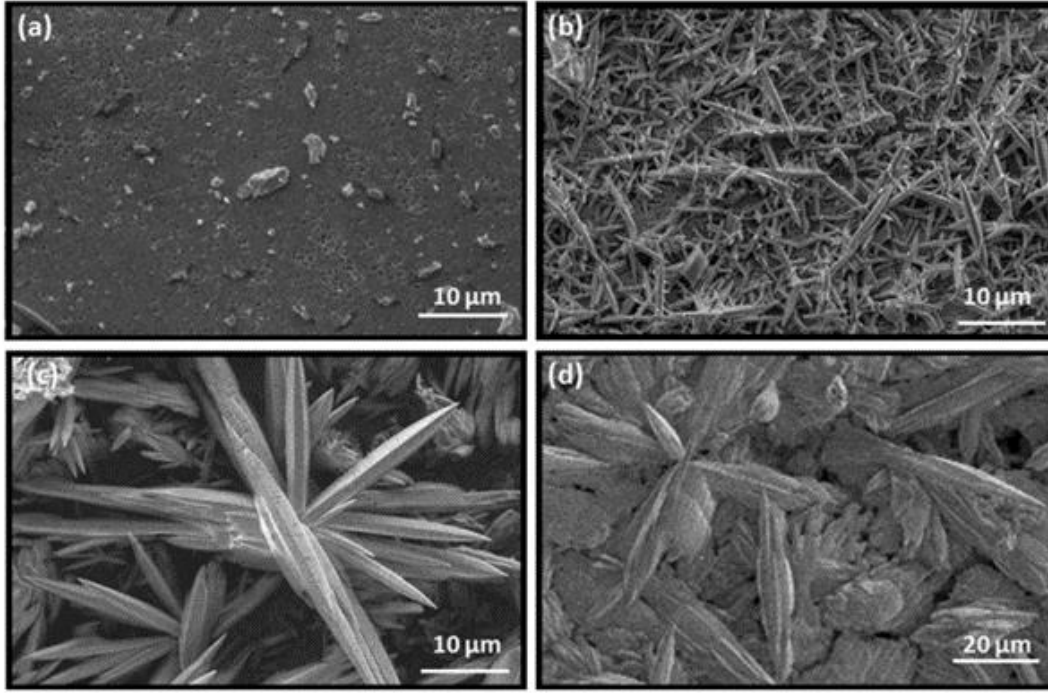
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 n-GaAs Yarı İletkenlerin HF: Etanol Çözeltisi İçerisinde Elektrokimyasal Aşındırma İşlemi

Elektrokimyasal aşındırma parametrelerinin n-tipi GaAs yarı iletkenleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla ilk olarak HF: Etanol çözeltisi içerisinde aşındırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Akım yoğunluğunun, aşındırma süresinin, aydınlatma kaynağının ve elektrolitik çözelti derişiminin aşınmış GaAs yüzey yapısına etkisi incelenmiştir.

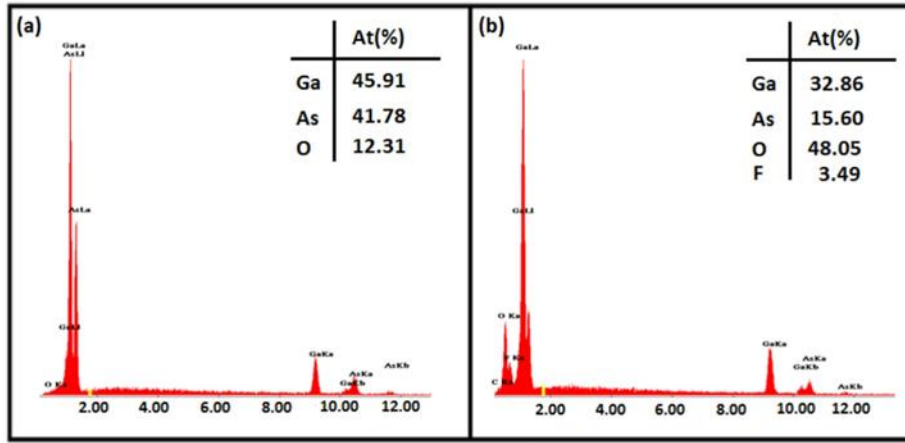
4.1.1 Akım yoğunluğunun etkisi

Akım yoğunluğunun oluşacak yüzey yapısına etkisinin araştırılması amacıyla 5, 10, 20 ve 30 mA/cm² olmak üzere dört farklı akım yoğunluğunda diğer parametreler sabit tutularak deneyler gerçekleştirilmiştir. Bütün numuneler halojen lamba ile katot yönünden aydınlatılmıştır, elektrolitik çözelti olarak hacimce 1:3 oranında HF: Etanol kullanılmıştır ve 1 dk aşındırma gerçekleştirilmiştir. Aşındırma işlemi gerçekleştirilen numunelerin ikincil elektron SEM görüntüleri şekil 4.1' de görülmektedir. Aşındırma işleminin sonucunda numune yüzeyinde altıgen prizmalar şeklinde çubuklar oluşmuştur. Uygulanan akım yoğunluğu, oluşan altıgen çubuk yapıların boyutu ve miktarı üzerinde etkilidir. 5 mA/cm²' lik düşük akım yoğunluğunda altıgen çubukların yoğunluğunun çok küçük olduğu görülmektedir. Uygulanan akım yoğunluğu 10 mA/cm²' ye çıkarıldığında çubuklar daha düzgün yüzlü ve keskin kenarlı altıgen çubuklar oluşmuştur. Bu çubukların ortalama çapı ve uzunluğu sırasıyla yaklaşık 0,5 µm ve 5 µm' dir. Akım yoğunluğu 20 mA/cm²' ye çıkarıldığında üretilen prizmaların ortalama boyutları artmıştır ve bu prizmalar birbiriyle bağlantılı bir yapı oluşturmuştur. 30 mA/cm²' lik akım yoğunluğu uygulandığında ise altıgen çubuk yapıların neredeyse kaybolmaya başladığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.1 : (a) 5, (b) 10, (c) 20 ve (d) 30 mA/cm² akım yoğunluklarında aşındırılan n-GaAs yüzeylerin SEM fotoğrafları.

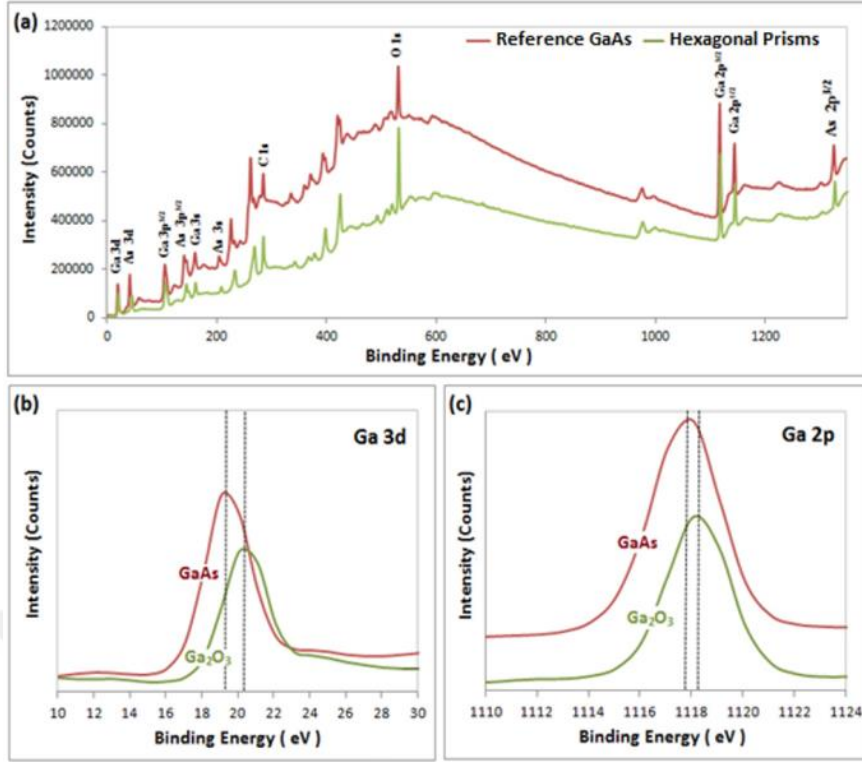
Aşındırma işlemi sonucunda yüzeyde oluşan altıgen çubuk yapıların kimyasal bileşiminin tespiti için EDS ve XPS analizleri gerçekleştirilmiştir. Numune yüzeyinde çubuk yapılar üzerinden ve elektrokimyasal anodizasyon işlemine tabi tutulmamış referans GaAs yüzeyi üzerinden alınan EDS spektrumları şekil 4.2’de verilmiştir. Saf GaAs numuneden alınan EDS analizi sonucu çıkan atomca Ga/As oranı stokiyometrik GaAs oranının çok yakın olduğu görülmektedir. Sonuçlarda görülen atomca %12 oksijen, yüzey oksitlenmesinden kaynaklanmaktadır. İşlenmiş GaAs yüzeyinde yapılan EDS analizi sonucunda Ga, As ve oksijenin yanı sıra F atomlarına da rastlanmıştır. Ayrıca Ga/As atomik oranının bozulduğu Galyum ve Oksijen açısından daha zengin bir yüzeyin oluştuğu açıkça görülmektedir. Altıgen çubuklar üzerinde yapılan EDS analizlerinde O/Ga oranı atomik olarak 1,5 olarak ölçülmüştür. Bu oran yüzeyde oluşan hegzagonal çubuksu yapıların Ga₂O₃ olduğunu göstermektedir. Bu savı daha güçlü desteklemek için X ışınları-fotoelektron spektroskopisi analizleri de gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.2 : (a)İşlem görmemiş GaAs EDS analizi , (b)çubuksu hegzagonal yapıların üzerinden alınan nokta EDS analizi.

Hekzagonal çubuk yapıların içerdiği elementleri daha net görebilmek amacıyla 0 - 1350 eV enerji aralığında X ışınları fotoelektron spektroskopisi (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) taraması yapılmıştır. Kaynak olarak Al K_{α} kullanılmıştır. Referans GaAs yüzeyinden ve hekzagonal çubuk yapılar içeren numune yüzeyinden alınan XPS spektrumları şekil 4.3’de kıyaslanmıştır. Şekil 4.3 (a)’da görülen GaAs ve hekzagonal prizma yapıların geniş araştırma spektrumunda iki numunede de Ga, As, C ve O pikleri tespit edilmiştir. Referans GaAs numunesi için 19,3, 41,2, 105,0, 140,1, 160,2, 205,0, 1117,7, 1144,7, 1326,0, 531,2 ve 284,6 eV’ de bulunan pikler sırasıyla Ga 3d, As 3d, Ga 3p_{3/2}, As 3p^{3/2}, Ga 3s, As 3s, Ga 2p^{3/2}, Ga 2p^{1/2}, As 2p^{3/2}, O 1s ve C 1s ile örtüşmektedir. C pikleri numunelerin havaya maruz kaldığı için oluşan kirlenmeden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Şekil 4.3 (b)’de görülen Ga3d ve şekil 4.3 (c)’ de görülen Ga2p^{2/3} pikleri daha detaylı incelendiğinde Ga3d bağlanma enerjisinin 19,3 eV ve Ga2p^{2/3} bağlanma enerjisinin ise 1117,7 eV olduğu görülmektedir. Bu değerler referans numunesinde Ga atomunun GaAs yarı iletkenine bağlı olduğunu açıkça göstermektedir (Cossu ve diğerleri 1992; Iwami ve diğerleri, 1987). Altıgen mikro yapılardan alınan XPS verileri, literatürde (Epp ve Dillard, 1989; Mizokawave diğerleri, 1978) bulunan Ga₂O₃’ in kimyasal bağlanma yapısına karşılık gelen 20,3 ve 1118,2 eV’ da Ga 3d ve Ga 2p_{3/2} bağlanma enerjisi tepe noktaları ile örtüşmektedir. XPS sonuçları EDS sonuçlarını destekler şekilde numune yüzeyinde görülen hekzagonal mikroyapıların Ga₂O₃ olduğunu göstermektedir.

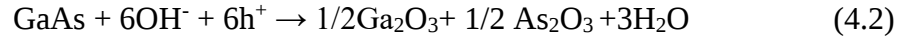


Şekil 4.3 : Referans GaAs numunelerin ve hekzagonal prizmaların XPS spektrumları (a)genel spektrum, (b) Ga3d, (c) Ga2p çekirdek seviye spektrumları.

XPS ve EDS analizleri yüzeyde oluşan hekzagonal çubuksu yapıların Ga_2O_3 olduğunu göstermiştir. GaAs plakalar HF asit çözeltisine daldırıldığında, literatürde bahsedildiği gibi ilk olarak ayrışmamış HF tarafından, kimyasal olarak aşındırılır (Bioud ve diğerleri, 2016). Bu adımda, eşitlik 4.1’de görüldüğü gibi GaAs plakaların yüzey bağları kırılır ve serbest kalan atomlar Ga–F ve As–H bağları oluşturur. Bu aşamada kimyasal aşındırma hızı, yarı iletkenin yüzey atomlarının değerlik bandındaki deşik konsantrasyonundan etkilenmez.

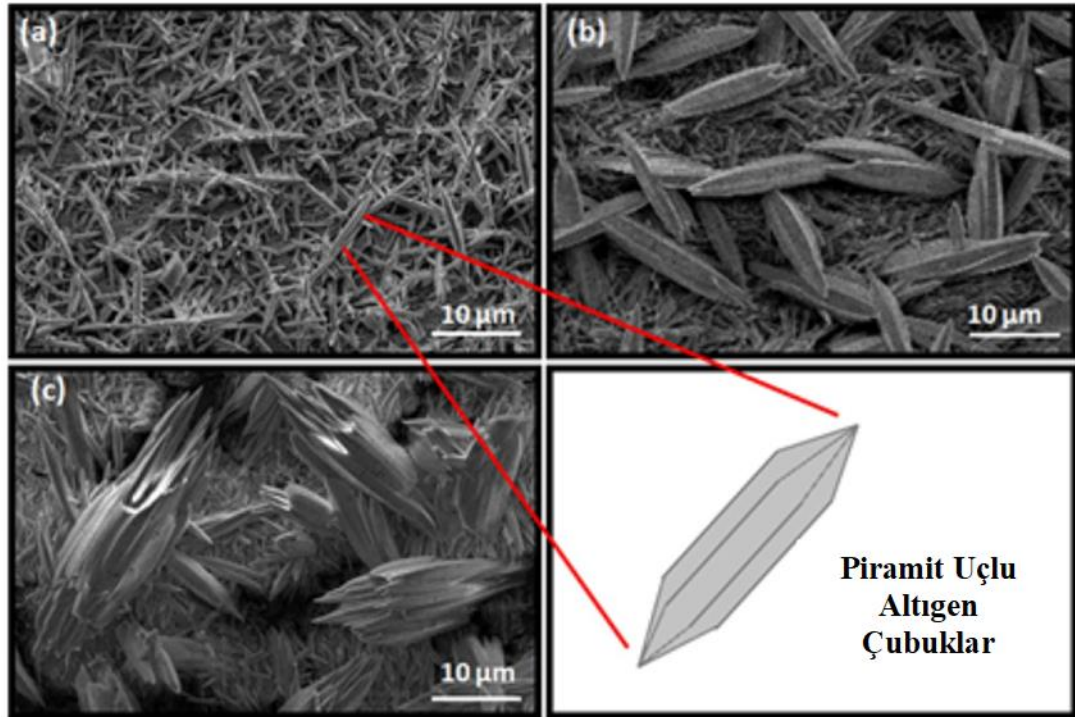


İkinci adımda, anodik çözünme gerçekleşir ve oksit molekülleri oluşur. Yüzeyde bir oksit tabakası oluştuğunda kimyasal aşındırma durur. Bu çalışmada etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) oksitleyici ajan olarak davranmıştır. Etanol, doymuş bir karbon atomuna bağlı en az bir fonksiyonel hidroksil grubu (OH^-) taşıyan organik bir bileşiktir. Elektrolit çözeltisinde bulunan bu hidroksil grupları GaAs ile reaksiyona girerek Ga_2O_3 ve As_2O_3 oluşturur. Bu adımda anodik çözünmenin oluşum hızı, yüzey deşiği konsantrasyonuna bağlıdır. Bir GaAs bileşiğinin çözülmesi için en az altı delik gerekir. Bu oksit oluşumunun genel reaksiyonu eşitlik 4.2’de görülmektedir.



4.1.2 Aşındırma süresinin etkisi

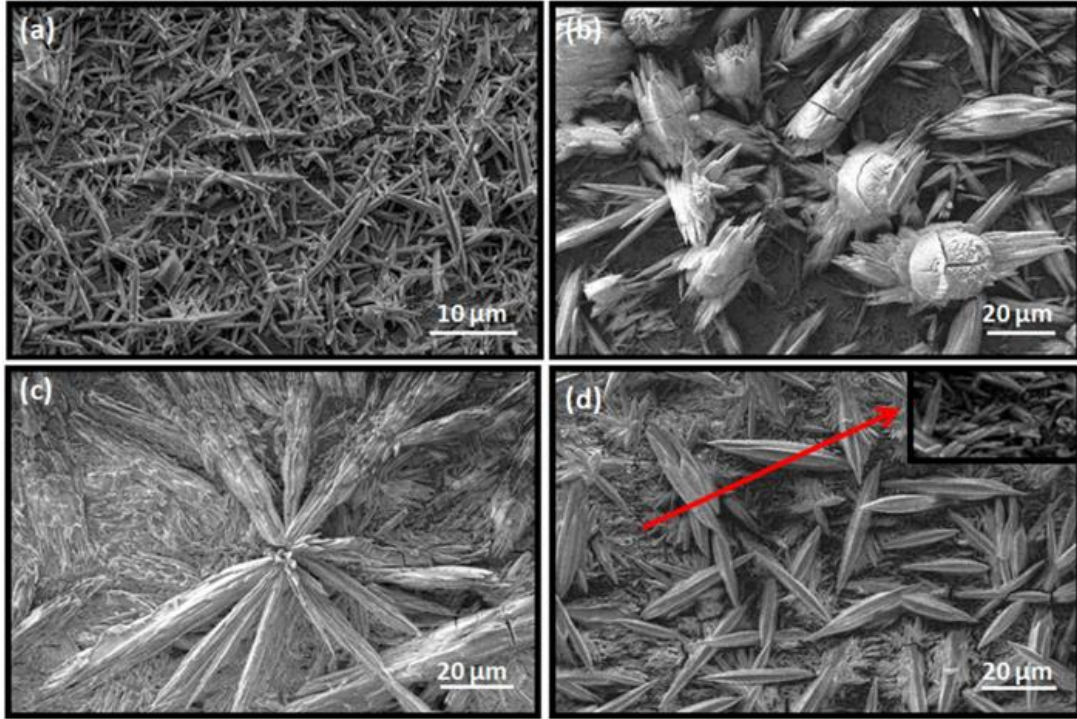
Elektrokimyasal aşındırma süresinin yapı üzerindeki etkisini incelemek amacı ile 1, 2 ve 3 dk olmak üzere üç farklı anodizasyon süresi için deneyler gerçekleştirilmiştir. Bütün numuneler halojen lamba ile katot yönünden aydınlatılmıştır. Elektrolitik çözelti olarak hacimce 1:3 oranında HF: Etanol kullanılmıştır ve 10 mA/cm^2 akım yoğunluğunda aşındırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Anodizasyonu gerçekleştirilen numunelerin SEM görüntüleri şekil 4.4’de verilmiştir. Aşındırma süresi arttıkça altıgen çubukların boyutu artmaya başlamıştır. Bununla birlikte aşındırma süresi 3 dakikaya ulaştığında çubuk yapılar bozulmaya başlamıştır. Ayrıca anodizasyon süresinin artması numune yüzeyinde oluşan çubuk yapıların miktarının da artmasına neden olmaktadır. Anodizasyon süresinin 2 dk olduğu numunede, üretilen numunenin en üst katmanında yaklaşık eni $4 \mu\text{m}$ ve boyu $20 \mu\text{m}$ olan çubuklar bulunurken en alt katman yaklaşık eni $0,5 \mu\text{m}$ ve boyu $4 \mu\text{m}$ olan daha küçük çubuklar ile tamamen kaplanmıştır.



Şekil 4.4 : Farklı sürelerde aşındırılan n-GaAs yüzeylerin SEM resimleri (a) 1, (b) 2, (c) 3 dk.

4.1.3 Aydınlatma kaynağının etkisi

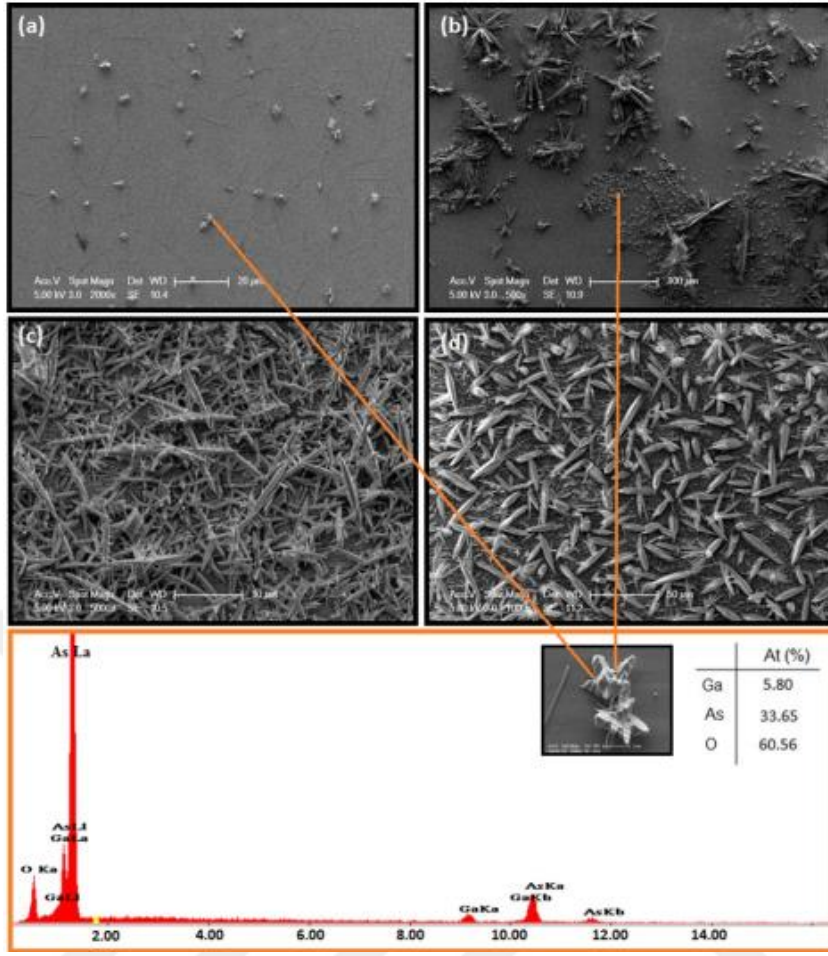
Elektrokimyasal aşındırma işleminde farklı aydınlatma kaynaklarının kullanımının GaAs morfolojisi üzerindeki etkisi, halojen lamba, mavi LED, sürekli ve darbeli mod 470 nm diyot lazerler gibi farklı ışık kaynakları kullanılarak da analiz edilmiştir. Her bir numune katot yönünden aydınlatılmıştır. Elektrolitik çözelti olarak hacimce 1:3 oranında HF: Etanol kullanılmıştır ve 10 mA/cm² akım yoğunluğunda 1dk anodizasyon gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal aşındırma sonucunda elde edilen yapılar şekil 4.5’de görülmektedir. GaAs yüzeyi bir halojen lamba ile aydınlatıldığında şekil 4.5 (a)’ da görüldüğü gibi 5 µm uzunluğunda altıgen prizmalar oluşmuştur. GaAs yarı iletkeni mavi bir LED aydınlatması altında aşındırıldığında ise şekil 4.5 (b)’ de farklı boyutlardaki düzensiz mikro yapılar oluşmuştur. Sürekli mod mavi (470 nm) lazer altında aşındırma yapıldığında şekil 4.5 (c)’ de yüzeyde sürekli bir yüzey dizisi ve düzenli yapıların oluşmadığı gözlemlenmiştir. Lazerin çalışma modunun etkisi de 470 nm darbeli lazer ile (80 MHz ve 70 ps) aydınlatma altında aşındırma yapılarak gözlemlenmiştir. Tek renkli, koherent ve darbeli bir ışık kaynağı kullanmak, GaAs plakaların yüzeyinde nanometre ölçekli altıgen prizmaların oluşmasına yol açmıştır.



Şekil 4.5 : (a) halojen lamba, (b) mavi LED, (c) sürekli modda 470nm lazer (d) darbeli modda 470 nm lazer olmak üzere farklı aydınlatma kaynakları kullanılarak aşındırılan GaAs yüzeylerin SEM fotoğrafları.

4.1.4 Asit konsantrasyonunun etkisi

Elektrokimyasal aşındırma işlemine asit konsantrasyonunun etkisinin incelenmesi amacı ile 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 HF: etanol içeren farklı elektrolit çözeltiler içerisinde aşındırma gerçekleştirilmiştir. Bütün numuneler halojen lamba ile katot yönünden aydınlatılmıştır. Numuneler üzerinde $10\text{mA}/\text{cm}^2$ akım yoğunluğunda 1 dk süreyle aşındırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Aşındırılan numunelerin SEM fotoğrafları şekil 4.6 'da görülmektedir. HF konsantrasyonunun değişimi oluşan yüzey morfolojisini etkilemektedir. Yüksek HF oranı altıgen Ga_2O_3 oluşumuna izin vermemiştir. Yüzeyde yıldız benzeri şekle sahip yeni oluşumlar görülmektedir. Bu oluşumların kimyasal bileşenlerini inceleyebilmek için yapılan EDS analizi sonucu şekil 4.6(e)' de görülmektedir. Bu kristal yapıların içerisinde Ga, As ve O atomlarına rastlanılmıştır. As/ O atomik oranı bu yapıların As_2O_3 kristalleri olabileceğini göstermektedir. Şekil 4.6(c) ve (d)'de görüldüğü gibi, HF konsantrasyonu düştükçe dolayısı ile elektrolitik çözelti içerisindeki oksitleyici ajan konsantrasyonu (etanol) arttıkça altıgen çubuk yapılar artarak yüzeyi tamamen kaplamıştır.



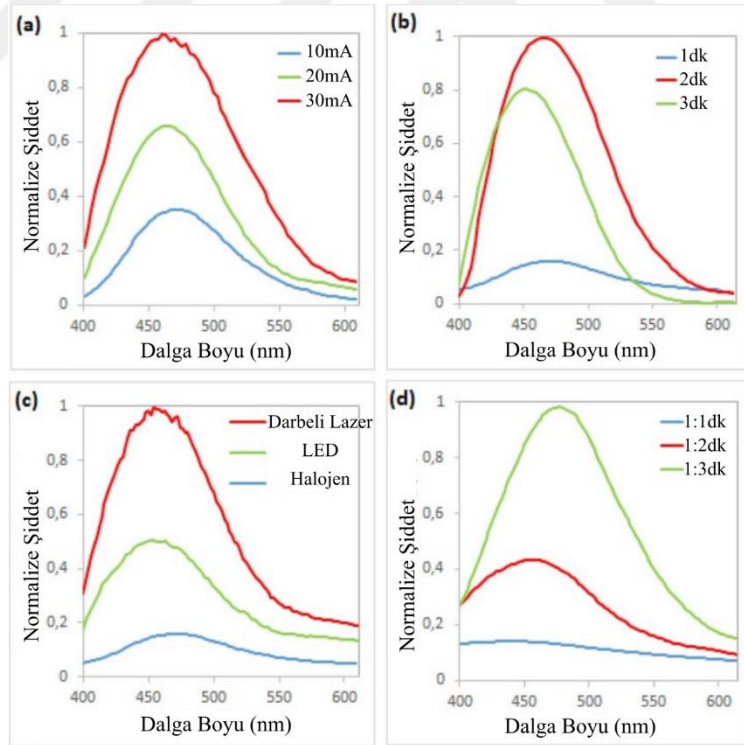
Şekil 4.6 : Farklı derişimlerde asit içeren çözeltiler içerisinde aşındırılan GaAs yüzeylerin SEM resimleri HF: Etanol(a) 1:1, (b) 1:2, (c) 1:3 (d) 1:4.

4.1.5 HF- Etanol çözeltisi içerisinde aşındırılan n-GaAs numunelerin foto ışıma özelliklerinin belirlenmesi

HF- Etanol Çözeltisi içerisinde aşındırılan numunelerin foto ışıma özellikleri bir floresans spektrometresi (PTI, Quanta Master 300) kullanılarak analiz edilmiştir. Bütün numunelere ait foto ışıma spektrumları şekil 4.7’ de özetlenmiştir. Şekil 4.7(a)’ da görülen farklı akım yoğunluklarında üretilen numunelerin foto ışıma spektrumları incelendiğinde altıgen çubuk yapıları içeren bütün numunelerde 470 nm tepe noktası olan geniş bantlı bir mavi ışıma gözlemlenmiştir. Işıma şiddeti altıgen prizma çubukların yoğunluğunun artışı ile doğru orantılı olarak artmıştır. Ga_2O_3 yapıların geniş bant aralığına sahip bir mavi ışıma yaptığı literatürde farklı kaynaklarda da bahsedilmiştir (Jangir ve diğerleri, 2016; Pozina, Forsberg, Kaliteevski ve Hemmingsson, 2017; Sun ve diğerleri, 2017; S. Y. Zhang ve diğerleri, 2007). Bu ışımanın kaynağı, Ga_2O_3 yapıların, donör ve akseptör gibi davranan oksijen (O) ve galyum (Ga) kusurlarını içermesidir. Galyum ve oksijen kusurları

Ga_2O_3 bant yapısında ara enerji seviyeleri oluşturarak geniş bant aralığına (4.8eV) sahip Ga_2O_3 yarı iletkeninin görünür bölgede ışınım yapmasını sağlar (Binet ve Gourier, 1998; Tseng, Ho ve Tien, 2010). Görünür bölgedeki ışınım karakteristiği, GaAs üzerinde büyütülmüş bu Ga_2O_3 yapıların gelecekteki optoelektronik cihaz uygulamaları için önemli potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

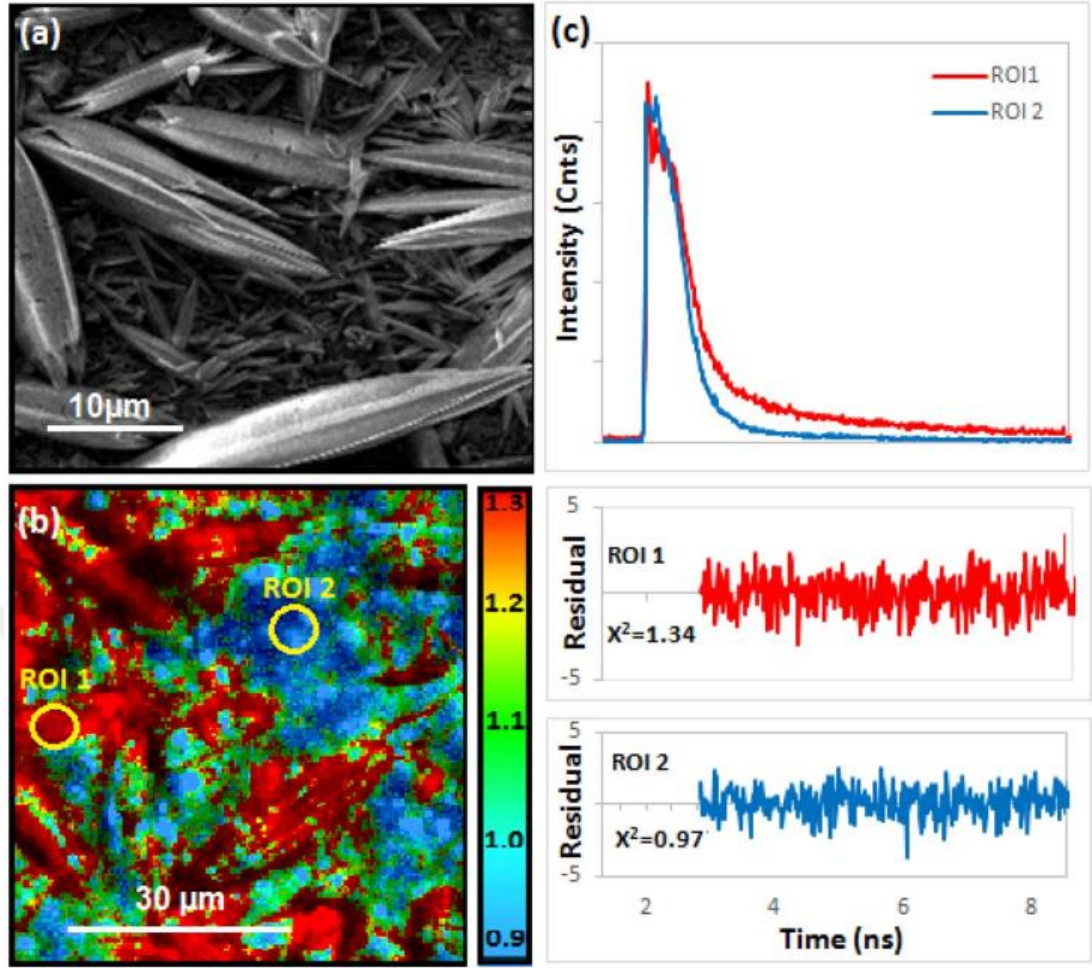
Aşındırma zamanı değiştirilerek üretilen numunelerin PL sonuçları incelendiğinde, oluşan altıgen yapıların boyutlarına bağlı olarak ışınım dalga boyunda da farklılık gözlemlenmiştir. Örneğin 3 dakika aşındırılan numunelerin ışınım şiddeti azalırken ışınım dalga boyu kısalmıştır. Aşındırma süresinin uzaması Ga_2O_3 yapıların boyutunun artmasına ve Ga ve O boşluk kusurlarının yoğunluğunun azalmasına neden olur. Boşluk kusurlarının yoğunluğunun azalması diğer bir deyişle donör akseptör çiftlerinin sayısının azalması yeniden birleşen elektron-boşluk çiftlerinin ortalama ayrışmalarının daha fazla olmasına yol açar. Bu durum daha yüksek enerjili bir ışınım ile sonuçlanır dolayısı ile fotoluminesans spektrumları mavi bölgeye kaymıştır.



Şekil 4.7 : Foto ışınım spektrumları değişimleri (a) akıma bağlı, (b) zamana bağlı, (c) aydınlatma kaynağına bağlı (d) asit konsantrasyonuna bağlı değişimler.

4.1.6 HF- Etanol çözeltisi içerisinde aşındırılan n-GaAs numunelerin FLIM analizi sonuçları

Floresan yaşam ömrü görüntüleme mikroskobu (FLIM), taşıyıcı rekombinasyon ömrünün nano yapılı yarı iletkenin yüzey morfolojisine bağlı değişimini incelemek için güçlü bir araçtır. Bu nedenle aşındırma işlemi sonrasında GaAs yarı iletkenleri üzerinde büyüyen Ga_2O_3 yapıların FLIM analizleri yapılmıştır. Yüzeyinde farklı boyutlarda hekzagonal çubuk içeren bir numunenin SEM resmi şekil 4.8 (a)'da verilmiştir. Aynı numune yüzeyinden elde edilen floresan yaşam ömrü değişimine bağlı FLIM görüntüsü ise şekil 4.8 (b)'de verilmiştir. Burada maviden kırmızıya doğru değişen renk skalası floresan yaşam ömrü değişimini göstermektedir. Küçük çubukların olduğu bölgede yaşam ömrünün yaklaşık 0,6 ns olarak ölçülürken, büyük hekzagonal çubukların üzerinde yaşam ömrünün yaklaşık olarak 1,3 ns olduğu görülmektedir. Hekzagonal çubukların boyutunun küçülmesi elektron-boşluk birleşim süresinin kısılmasına ve daha kısa sürede foton yayımlanmasına neden olmuştur. Şekil 4.8 (b)' de verilen FLIM resminde ROI 1 ve ROI 2 olarak işaretlenen iki farklı bölgede analiz yapılmıştır. Bu bölgelerden alınan ortalama yaşam ömrü eğrileri şekil 4.8 (c)' de verilmiştir. ROI 1 bölgesi daha büyük hekzagonal çubukların üzerindeki kırmızı kısımda seçilmiş, ROI 2 ise küçük çubukların olduğu mavi bölgelerden seçilmiştir. Bu eğrilere ait yaşam ömrü parametreleri ise çizelge 4.1'de özetlenmiştir. Boyuta bağlı floresan yaşam ömründeki bu farklılıklar taşıyıcının küçük bir hacimde sınırlanmasından veya diğer yüzey kusurlarından kaynaklanabilir. Yüzey kusurları tuzak enerji seviyelerinin oluşmasına ve bu seviyelerin yeni elektron boşluk rekombinasyon bölgeleri gibi davranmasına yol açar. Tane boyutunun küçülmesi uyarılmış taşıyıcının daha küçük bir hacimde hapsolmesine neden olur. Ayrıca azalan tane boyutu ile birlikte yüzey alanı artar ve dolayısı ile yüzey kusurlarının sayısı da artar. Yüzey kusurlarının yarı iletken içinde yük taşıyıcıları tuzaklayan ve yeni elektron-boşluk birleşim merkezleri gibi davranan alt enerji seviyeleri oluşmasına neden olduğundan daha önce “yüzey rekombinasyonları” başlığında bahsedilmişti. Yarı iletken yüzeyin kalınlığı azaldıkça yüzey kusurlarının artışı ile tuzak enerji seviyelerinin yoğunluğu da artacağından etkin taşıyıcı yaşam ömrü de kısalmıştır.



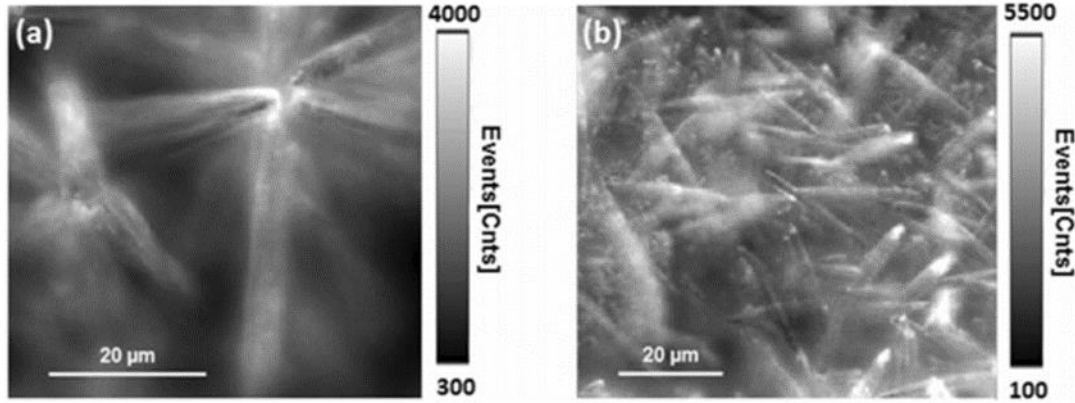
Şekil 4.8 : (a) Yüzeyin SEM resmi (b) aynı numune yüzeyinden elde edilen FLIM resmi (c) Farklı ROI 1 ve ROI 2 bölgelerinden alınan yaşam ömrü eğrileri.

Çizelge 4.1 : ROI 1 ve ROI 2 bölgelerine ait yaşam ömrü ölçüm sonuçları ve fitting parametreleri.

	A_1 (kCnts)	τ_1 (ns)	A_2 (kCnts)	τ_2 (ns)	$\langle \tau \rangle$ (ns)	X^2
ROI 1	0,252	2,968	0,430	0,394	1,340	1,339
ROI 2	0,075	2,119	0,369	0,307	0,614	0,973

Farklı GaAs yüzeylerinden alınan ışımaya şiddetine bağlı FLIM resimleri şekil 4.9’da verilmiştir. Şekil 4.9 (a) ve (b)’ de GaAs yüzeyinde oluşan hekzagonal çubuklar açıkça görülmektedir. Floresan ömrü görüntüleme mikroskobu (FLIM) kullanılarak ışımaya şiddetin bağlı görüntülerde elde edilerek mikroskobik düzeyde ışımaya şiddetinin değişimi gözlemlenebilir. Bu amaçla farklı boyutlardaki Ga_2O_3 prizmaların şiddet görüntüleri incelenmiştir. Şekil 4.9’ da görülen şiddet görüntüleri incelendiğinde ilk olarak piramidal uçlardan gelen parlak ışımaya dikkati çekmektedir. Ayrıca iki fotoğraf karşılaştırıldığında boyutu daha küçük olan numunenin ışımalarının daha şiddetli olduğu görülmektedir. Işıma şiddetindeki boyuta bağlı bu farklılıklar, floresan yaşam

ömüründeki boyuta bağlı değişime benzer şekilde, yüzey kusurlarının elektron boşluk rekombinasyon hızını artırması kaynaklıdır.



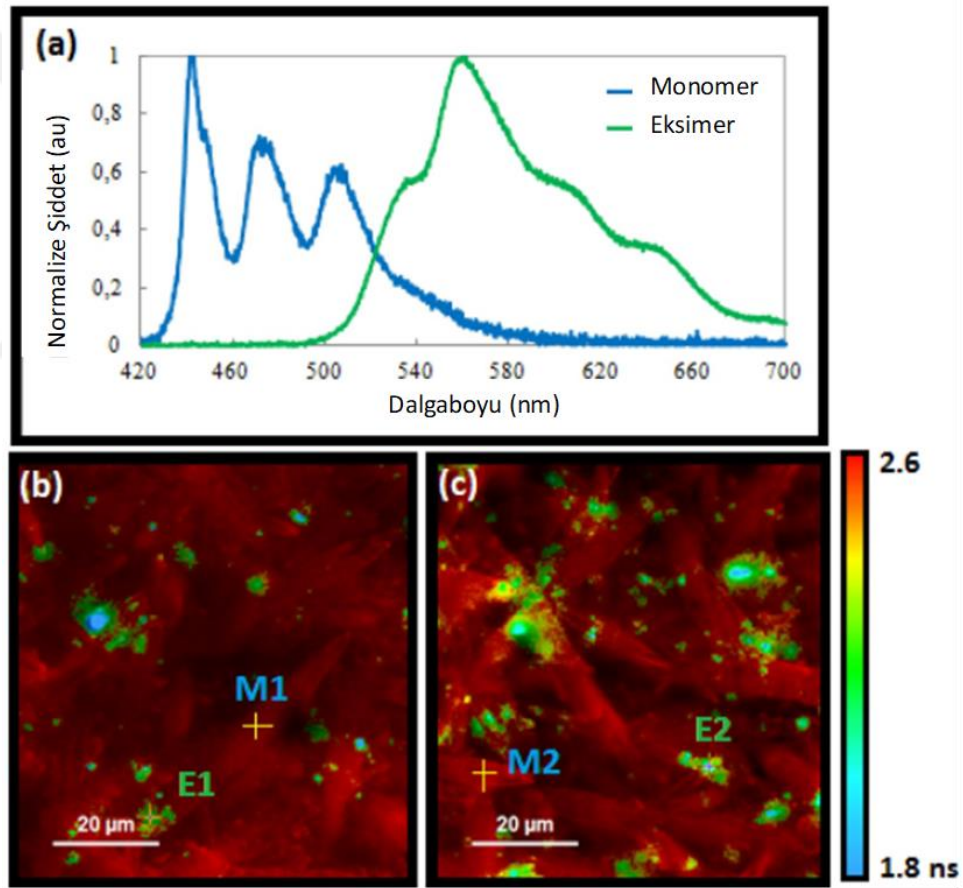
Şekil 4.9 : Farklı boyuttaki numunelerden alınan şiddete bağlı FLIM görüntüleri.

4.1.7 Perilen bağlanan numunelerin FLIM analizleri

Organik perilen ($C_{20}H_{12}$) boya molekülleri GaAs yüzeyinde oluşan Ga_2O_3 çubuk yapılarına bağlanmıştır ve bu yapılar ile organik boya molekülleri arasındaki etkileşim FLIM tekniği kullanılarak incelenmiştir. Perilen moleküllerinin ışıma karakteristiği paketlenme yoğunluklarından etkilenir. Perilen molekülleri içlerinde bulundukları çözeltinin derişimine göre izole α perilen monomerleri veya topaklanmış β perilen dimerleri şeklinde kristalize olabilirler (Daimon ve Nihei, 2013a; Mizuguchi ve Tojo, 2002). İzole α perilen monomerleri, şekil 4.10 (a)'da görüldüğü gibi mavi bir ışıma yaparken β perilen dimerleri eksimer adı verilen bir kırmızı ışıma yaparlar. İzole perilen molekülleri için HOMO ve LUMO enerji seviyeleri sırasıyla -5.3eV ve -2.5 eV 'da bulunur (Daimon ve Nihei, 2013b). İzole perilen moleküllerinin topaklanarak eksimer kristallerinin oluşturması sonucu ve uyarılmış durumda meydana gelen gevşeme süreci nedeniyle, perilen eksimer molekülünün LUMO enerji seviyesi yaklaşık 0.23 eV daha düşük enerji değerine doğru kayar (Furube ve diğerleri, 2006). Bu şekilde, daraltılmış HOMO-LUMO bant aralığı, şekil 4.11'de görüldüğü gibi izole edilmiş bir perilenin monomer emisyonuna göre, eksimer emisyonunun önemli ölçüde kırmızıya kaymasına yol açar.

Serbest uzayda perilen boya moleküllerinin monomer ve eksimer emisyonunun floresans ömürleri daha önce sırasıyla 4.133 ve 12.210 ns olarak ölçülmüştür (Acikgoz ve diğerleri, 2012b). Eksimer kristallerin birbirleriyle olan etkileşimlerinden dolayı elektron-boşluk rekombinasyonu yavaşlamaktadır ve

floresan yaşam ömrü uzamaktadır. Tablo 2’ de açıkça görüldüğü gibi Ga_2O_3 akseptör gibi davranıp ışısız rekombinasyon oranını artırarak boya moleküllerinin floresan yaşam ömürlerini kısaltmıştır. Burada M1 ve M2 monomer ışımaların geldiği noktaları, E1 ve E2 eksimer ışımaların geldiği noktaları göstermektedir. 8 μm (M1) ve 5 μm (M2) boyutlarındaki farklı hekzagonal prizmalara bağlanan izole monomer moleküllerinin floresan yaşam ömrü süreleri sırasıyla 3.605 ve 3.266 ns olarak hesaplanmıştır. Eksimer moleküllerin, ışısız rekombinasyon oranı büyük ölçüde artmıştır ve eksimer kompleksinin floresans ömrü, 12.210 ns’ den 2.683 ns’ ye düşmüştür. Ayrıca ortamda bulunan akseptör türün boyutunun azalması, floresan yaşam ömrünü azalttığı için 1 μm tanelerden ölçülen eksimer yaşam ömrü 2.160 ns olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.10 : (a), Perilen molekülünün monomer ve eksimer ışım spektrumları (b) ve (c) perilen ile boyanan farklı boyuttaki hekzagonal çubukların FLIM resimleri.

Altıgen prizmalara bağlanan perilen boya moleküllerinin floresan yaşam ömrünün daha kısa olmasının nedeni boyanın LUMO enerji seviyesinden, yarı iletken malzemenin iletim bandı enerji seviyesine elektron transferinden kaynaklı ışısız rekombinasyonlardır. Yarı iletken bir malzemeye yakın konumlanan bir boya

molekölü dışarıdan bir ışık kaynağı ile uyarıldığı zaman uyarılmış enerji seviyesine çıkan elektronlar ışımasız geçişlerle yakında bulunan yarı iletkenin iletim bandına geçebilir. Boya molekülünün temel enerji seviyesinde (HOMO) bulunan elektronlar uyarılmış enerji seviyesine (LUMO) çıktığında, yakınında bulunan yarı iletken bir malzemenin iletim bandına ışına yapmadan kolayca geçebilir. Foton kaynaklı elektron transferi (Photoinduced Electron Transfer) olarak bilinen bu ışımasız geçiş floresan molekülün floresan yaşam ömrünün kısılmasına neden olur. Bu geçişlerden kaynaklı elektron transfer oranı k_{ET} eşitlik 4.3 ile ifade edilir (Marcus ve Sutin, 1985).

$$k_{ET} = A \exp \left[-\frac{(\Delta G^o + \lambda)^2}{4\lambda k_B T} \right] \quad (4.3)$$

Burada ΔG^o serbest enerji değişimini, λ yeniden düzenlenme enerjisini, k_B Boltzmann sabiti ve T sıcaklıktır. ΔG^o Eşitlik 4.4’de görüldüğü gibi Rehm-Weller denklemi ile floresan molekülün yükseltgenme potansiyeli ve bu moleküllerin yakınında bulunan yarı iletken malzemenin indirgenme potansiyeli arasındaki fark olarak tanımlanabilir (Rehm ve Weller, 1970).

$$\Delta G^o = e[E_{oxi}(D) - E_{red}(A)] - \Delta E^* \quad (4.4)$$

e elektron yükünü, $E_{oxi}(D)$ floresan molekülün yükseltgenme potansiyelini, $E_{red}(A)$ yarı iletken malzemenin indirgenme potansiyeli ve ΔE^* floresan molekülün HOMO ve LUMO enerji seviyeleri arasındaki farktır. Yarı iletken malzemenin iletim bandı enerji seviyesi boya molekülünün LUMO seviyesinden daha düşükse, boya molekülünün LUMO seviyesinde bulunan elektronlar yarı iletkenin iletim bandına “ileri elektron transferi” ile geçebilirler. Enerji seviyelerinin tam tersi olması durumunda yani yarı iletkenin iletim bandı enerji seviyesinin boya molekülünün uyarılmış enerji seviyesinden daha yüksek olması durumunda, yarı iletkenin iletim bandından boya molekülünün LUMO seviyesine geri elektron transferi gerçekleşir.

Bu elektron transfer oranları floresan yaşam ömrü hesaplanarak eşitlik 4.5’teki gibi hesaplanır (Acikgoz ve diğerleri, 2014, 2017; Akin ve diğerleri, 2016).

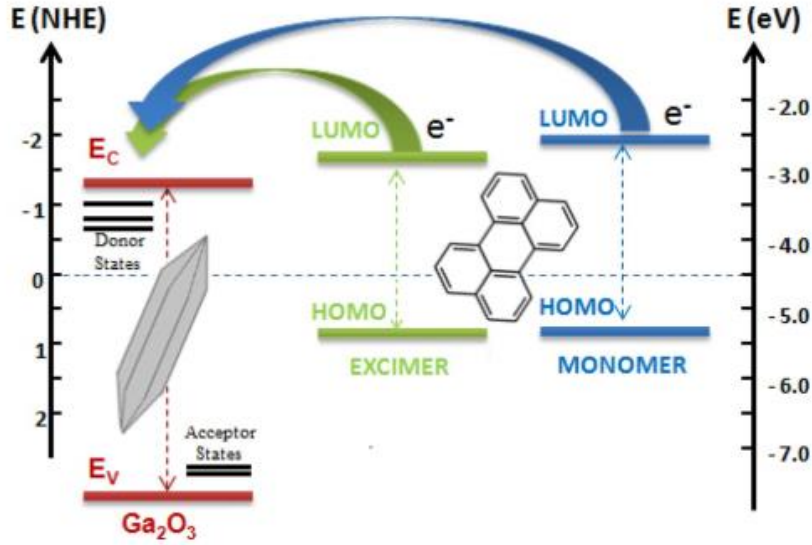
$$k_{ET} = \frac{1}{\tau_{boya+nano\ yapı}} + \frac{1}{\tau_{boya}} \quad (4.5)$$

Bu bilgiler ışığında yapılan floresan yaşam ömrü ölçümleri sonucunda eşitlik 4.5’e göre hesaplanan elektron transfer oranları çizelge 4.2’ de verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Perilen bağlanan Ga₂O₃ prizmaların farklı noktalarından alınan floresan yaşam ömrü değerleri ve bu noktalar için hesaplanan Ga₂O₃- perilen boya molekülleri arasındaki elektron transferi oranları (k_{ET}).

	A ₁ (kCnts)	τ_1 (ns)	A ₂ (kCnts)	τ_2 (ns)	A ₃ (kCnts)	τ_3 (ns)	$\langle\tau\rangle$ (ns)	k_{ET} (sn) ⁻¹
M1	22,520	4,320	19,1	1,238	7,930	0,421	3,605	$3,5 \times 10^7$
M2	17,920	3,988	17,7	1,142	8,51	0,348	3,266	$6,4 \times 10^7$
E1	16,310	3,364	19,060	0,954	10,070	0,238	2,683	$29,1 \times 10^7$
E2	14,600	3,003	26,340	0,790	20,230	0,215	2,160	$38,1 \times 10^7$

Perilen bağlanan Ga₂O₃ numunelerde de şekil 4.11’de şematik olarak gösterilen bu tip bir elektron transferi söz konusudur. Daha önce bahsedildiği gibi perilen molekülünün HOMO ve LUMO seviyeleri -5,3eV ve -2,5 eV ‘dur. Ga₂O₃ yarı iletkeninin valans ve iletim bant seviyelerinin ise -8,04 ve -3,18eV olduğu literatürde bahsedilmektedir (Sun ve diğerleri, 2017). Perilen moleküllerinin daha yüksek olan LUMO enerji seviyesinden Ga₂O₃ yarı iletkeninin iletim bandına bir ileri yönlü elektron transferi mümkündür. Floresan boya molekülünün yükseltgenme potansiyeli ile, yarı iletken malzemenin indirgenme potansiyeli arasındaki fark arttıkça serbest enerji değişimi dolayısı ile bu sürecin itici gücü artar. GaAs yüzeyinde büyüyen Ga₂O₃ hekzagonal prizmaların boyutu küçüldükçe artan yüzey alanı nedeniyle oksijen boşluğu gibi yüzey kusurlarının sayısı da artar. Bu yüzey kusurlarının Ga₂O₃ yarı iletkenin iletim bandının hemen altında donör enerji seviyelerinin oluşmasına neden olduğundan daha öncede bahsedilmiştir. Bu nedenle tane boyutu düştükçe artan donör enerji seviyesi sayısı ile elektron geçişi oranı da yükselmiştir. Eksimer ışımanın LUMO enerji seviyesi 0.23eV daha düşük olmasına rağmen, eksimer ışıma çok küçük boyutlu tanelerin bir araya geldiği noktalarda olduğu için elektron transfer oranı çok daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 4.11 : Perilen molekülleri ve Ga_2O_3 yarı iletkeni arasındaki elektron transferlerinin şematik gösterimi.

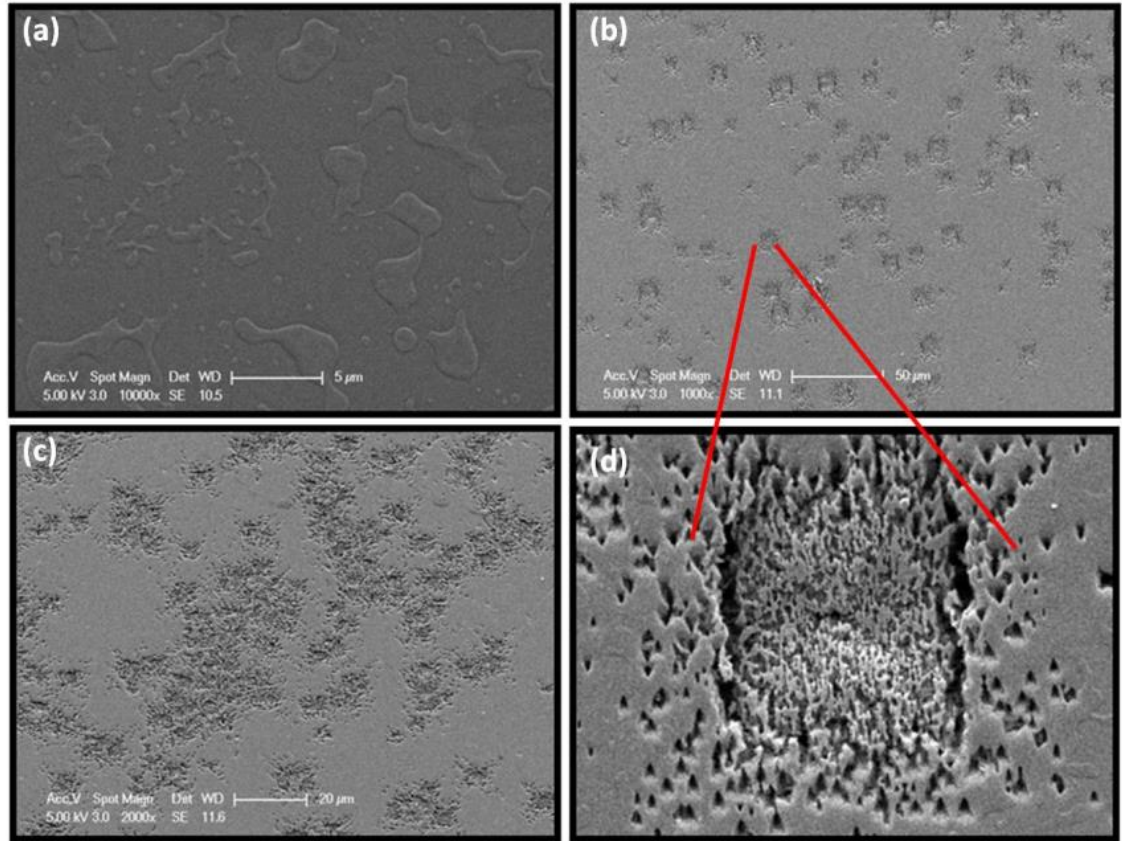
4.2 n-GaAs Yarı İletkenlerin HCl: Ethanol Çözeltisi İçerisinde Elektrokimyasal Aşındırma İşlemi

Elektrokimyasal aşındırma parametrelerinin n-tipi GaAs yarı iletkenleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla HCl: Ethanol çözeltisi içerisinde aşındırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Akım yoğunluğunun, aşındırma süresinin, aydınlatma kaynağının ve elektrolitik çözelti derişiminin aşınmış GaAs yüzey yapısına etkisi incelenmiştir.

4.2.1 Akım yoğunluğunun etkisi

Farklı akım yoğunluklarının aşındırılan n-GaAs yüzeyler üzerindeki etkisini incelemek amacı ile 10, 20 ve 30 mA/cm^2 akım şiddetleri kullanılarak 1dk süre ile elektrokimyasal aşındırma işlemi, ilk olarak hacimce 1:3, HCl: Etanol ortamında, numune yüzeyleri halojen lamba ile aydınlatılarak, gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.12’de numunelerin ikincil elektron taramalı elektron mikroskobu görüntülerinde de görülebileceği gibi, 10 mA/cm^2 akım yoğunluğu ile aşındırma işlemi gerçekleştirilen GaAs numunelerin yüzeyinde herhangi bir yapı oluşmamıştır. 20 mA/cm^2 akım yoğunluğu ile aşındırma işlemi gerçekleştirildiğinde numune yüzeyinde gözenekli bir yapının oluşmaya başladığı açıkça görülmektedir. Şekil 4.12 (d)’ de gözenekli bölgelerin büyütülmüş ikincil elektron görüntüsü görülmektedir. Numune yüzeyinde

kare şeklinde gözeneklerin yoğunlaştığı bölgeler ve bu bölgelerin etrafında üçgen şekilli gözeneklerin oluştuğu görülmektedir. Akım şiddeti 30 mA/cm^2 ’ye çıkartıldığında ise gözenekli daha sürekli ve homojen bir yapıya dönüşmüştür. Gözeneklerin boyutu Image J programı (Birleşik Devletler ulusal sağlık enstitüsü) ile belirlenmiştir. Bu program resim üzerinde yer alan mikron barın piksel boyutunu referans alarak farklı noktalarda boyut ölçümü yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu ölçümlere göre 20 mA/cm^2 akım yoğunluğu uygulanarak aşındırılan GaAs numunelerde oluşan üçgen gözeneklerin bir kenarının uzunluğu 300 nm bulunmuştur. Akım yoğunluğu 30 mA/cm^2 ’ye çıktığında ise gözeneklerin kenar uzunluğu 400 nm ’ye yükselmiştir.

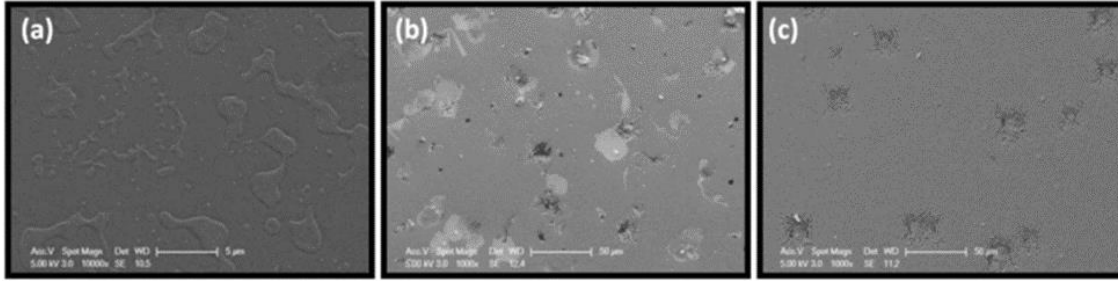


Şekil 4.12 : Farklı akım yoğunluklarında aşındırılan GaAs yüzeylerin SEM resimleri (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mA/cm^2 (d) çekirdeklenme bölgelerinin büyütülmüş görüntüsü.

4.2.2 Aşındırma süresinin etkisi

Elektrokimyasal aşındırma süresinin, oluşan yüzey yapısı üzerindeki etkisini incelenmek amacı ile hacimce 1:3 oranında HCl: Etanol elektrolit çözelti içerisinde 10 mA/cm^2 akım yoğunluğu kullanılarak 1, 2, 3 dakika boyunca elektrokimyasal

aşındırma yapılmıştır. Üretilen yüzeylerin ikincil elektron SEM görüntüleri şekil 4.13'te verilmiştir. 1dk aşındırma yapılan numunelerde herhangi bir yapının oluşmadığına daha önce bölüm 4.2.1 'de değinilmişti. Aşınma süresi 2 dakikaya çıkartıldığında ise numune üzerinde gözenek oluşumlarının başladığı şekil 4 (b)' de görülmektedir. Aşındırma süresi 3 dakikaya çıkartıldığında ise şekil 4 (c)' de görüldüğü gibi çekirdeklenme bölgelerinin sayısı ve yoğunluğu artmıştır fakat sürekli ve homojen bir gözenekli yapı gözlemlenememiştir. Elde edilen sonuçlara göre anodizasyon süresi yüzeyde oluşan gözenekli bölgelerin miktarı ile doğrudan orantılıdır. Sürenin uzaması gözeneklerin sayısını arttırmış olsa da numune yüzeyinde homojen ve sürekli bir gözenekli yapı elde edilememiştir.

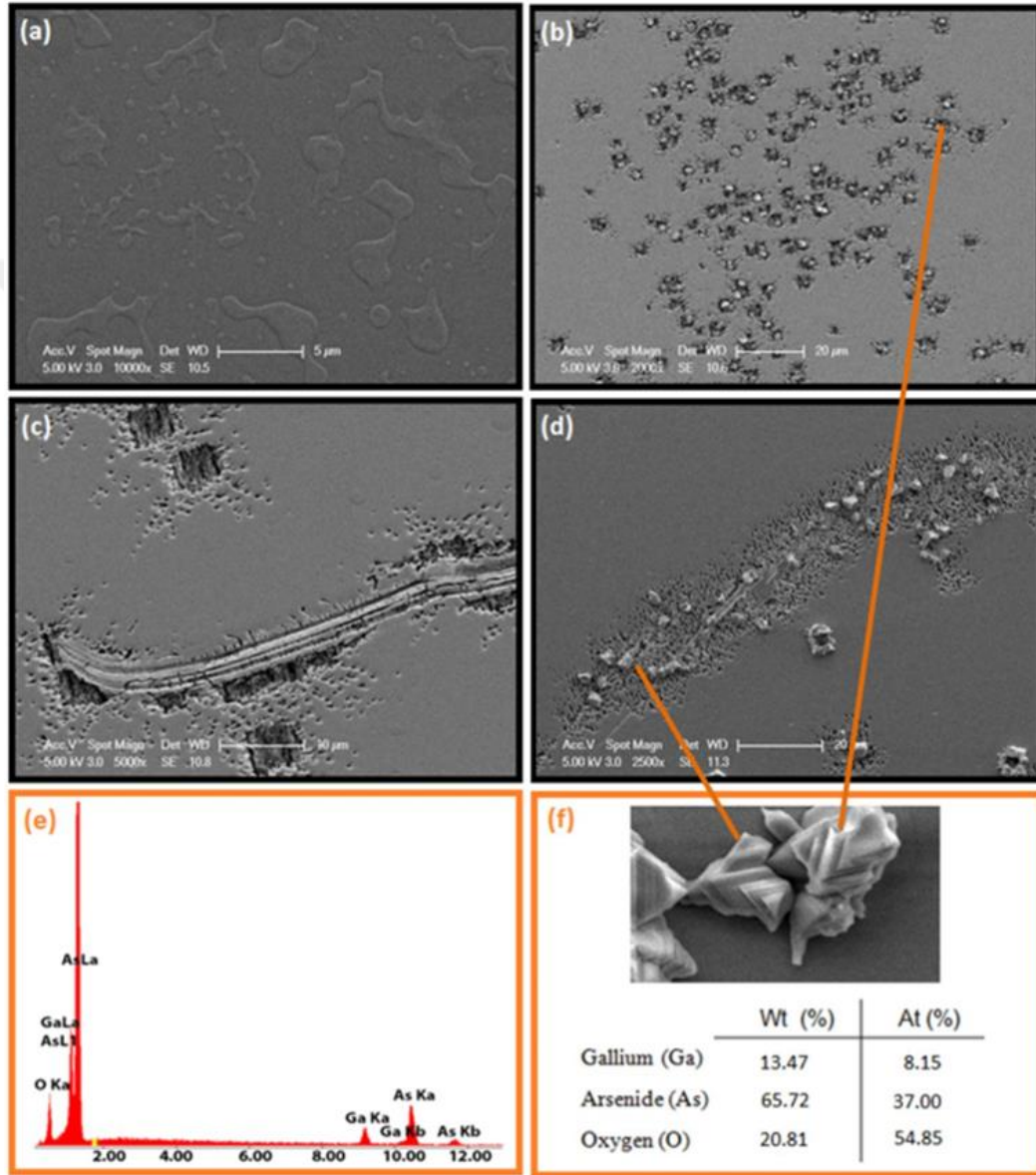


Şekil 4.13 : Farklı sürelerde aşındırılan GaAs yüzeylerin SEM resimleri (a) 1, (b) 2, (c) 3 dk.

4.2.3 Aydınlatma kaynağının etkisi

HCl: Etanol içerisinde yapılan elektrokimyasal aşındırma işlemi sonucunda oluşturulan GaAs yüzey morfolojisine, aydınlatma kaynağının etkisinin incelenmesi amacıyla katot yönünden farklı ışık kaynakları ile 10 mA/cm^2 akım yoğunluğunda, 1:3 oranında HCl: Etanol elektrolit çözeltisi içerisinde 1dk elektrokimyasal aşındırma yapılmıştır. Aydınlatma kaynağı olarak halojen lamba, LED, 470nm lazer, 405nm lazer kullanılmıştır. Aydınlatma kaynağı olarak halojen ampul kullanıldığında numune yüzeyinde herhangi bir yapı oluşmadığı şekil 4.13 (a)' da görülmektedir. LED ışık kaynağı kullanıldığında şekil 4.13 (b)' de görüldüğü gibi, yüzeyde gözenekli bir yapı oluşmuş ve gözeneklerin yoğunlaştığı bölgelerin orta kısımlarında tetrahedral yapılar oluşmuştur. Bu yapılar üzerinde EDS analizleri yapılmıştır. Elde edilen EDS spektrumu şekil 4.13 (e)'de ve elementel analiz sonuçları ise şekil 4.13 (f)'de görülmektedir. EDS sonuçlarında görüldüğü gibi kristal yapılar üzerinde Galyum oranı oldukça düşüktür, oksijen miktarı atomik olarak %54,85 ve As oranı %37,00 olarak belirlenmiştir. Bu durum daha önce gözlemlenen tetrahedral

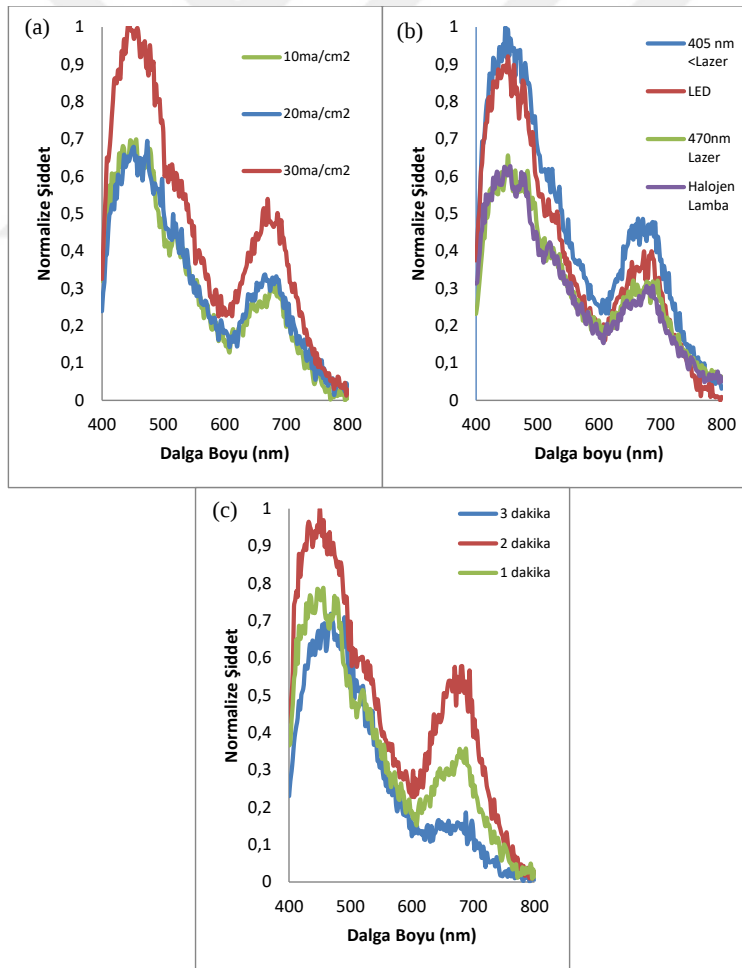
yapılardaki gibi oluşan bu kristallerin As_2O_3 olduğunu göstermektedir. Aydınlatma kaynağı olarak 470nm lazer kullanıldığında bütün numune yüzeyinde şekil 4.13 (c)' de görüldüğü gibi çiziksi yapılar oluşmuş ve bu yapıların etrafında üçgen gözenekler yoğunlaşmıştır. Şekil 4.13 (d)' de incelendiğinde, benzer yapıların 405 nm dalga boyuna sahip lazer kullanıldığında da oluştuğu görülür. Ayrıca 405 nm lazer ile hazırlanan numune yüzeyinde de As_2O_3 kristal yapılarının oluştuğu görülmektedir.



Şekil 4.14 : (a) Halojen lamba, (b) beyaz LED, (c) 470 nm ve (d) 405 nm darbeli lazer ile aydınlatılarak hazırlanan GaAs numunelerin SEM görüntüleri. (e) Kristaller üzerinden alınan EDS spektrumu (f) elementlerin atomik yüzde oranları.

4.2.4 HCl- Etanol çözeltisi içerisinde aşındırılan n-GaAs numunelerin foto ışıma özelliklerinin belirlenmesi

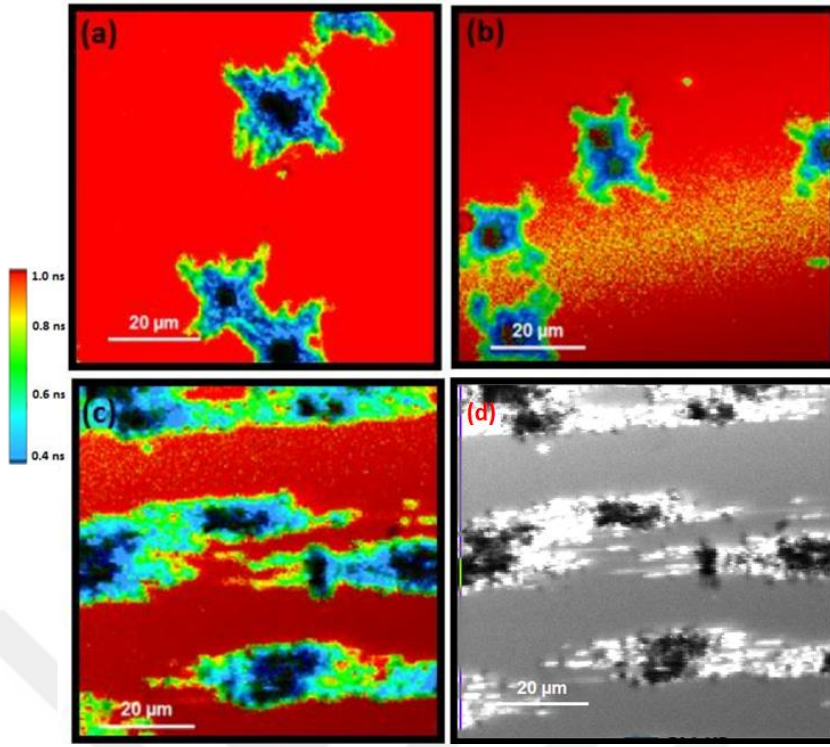
HCl-Etanol çözeltisi içerisinde aşındırılan n-GaAs numunelerin foto ışıma özellikleri bir floresan spektrometresi (PTI, Quanta Master 300) kullanılarak analiz edilmiştir. HCl-Etanol çözeltisi içerisinde hazırlanan numunelere ait foto ışıma spektrumları şekil 4.15’ de gösterilmiştir. Aşındırılan numuneler, görünür bölge boyunca birisi 470nm civarında diğeri de 680 nm civarında olmak üzere iki pikli bir ışıma yapmaktadır. Bu ışımının şiddeti numune yüzeyinde görülen porların yoğunluğu ile artmaktadır. GaAs saf halde 1.42eV bant boşluğuna uygun olarak görünür bölge dışında 870nm civarında ışıma yapar. Literatüre uygun şekilde elde edilen poroz GaAs yüzeylerin ışıması görünür bölgeye kaymıştır ve neredeyse tüm görünür bölge boyunca süreklilik göstermiştir (Christine M Finnie ve Bohn, 1999; Goryachev ve Sreseli, 1997; Lockwood ve diğerleri, 1999; Schmuki ve diğerleri, 1996a).



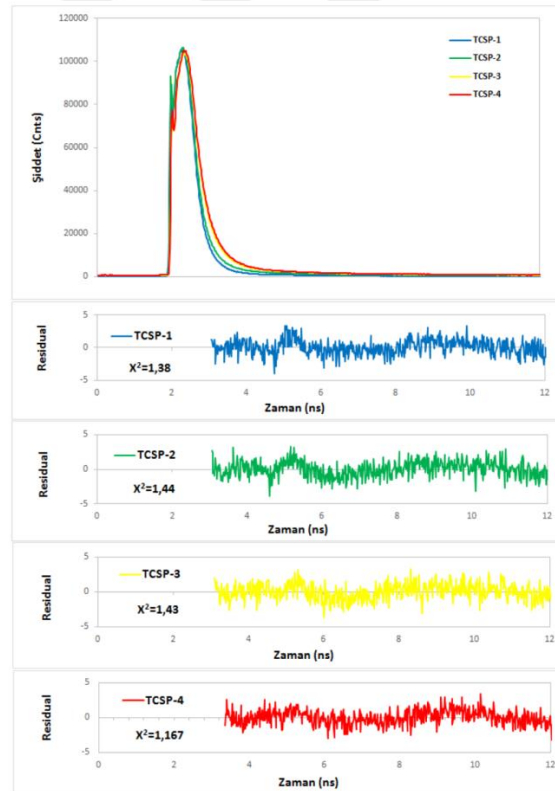
Şekil 4.15 : HCl-Etanol ortamında üretilen GaAs numunelerin ışıma spektrumlarının (a) akım şiddetine göre, (b) aşındırma süresine göre, (c) aydınlatma kaynağına göre değişimleri.

4.2.5 HCl- Etanol çözeltisi içerisinde aşındırılan n-GaAs numunelerin FLIM analizi sonuçları

HCl-Etanol ortamı içerisinde elektrokimyasal olarak aşındırılan numunelerin yüzeyinde üçgen şeklinde deliklerin açıldığı SEM analizi ile saptanmıştı. HCl-Etanol içinde hazırlanan üç farklı numunenin FLIM görüntüsü şekil 4.16' da verilmiştir. FLIM görüntülerinde üçgen deliklerin çekirdeklendikleri bölgelerde ışıma yaşam ömründe farklılıklar tespit edilmiştir. Numune yüzeyindeki düz kısımlarda yaşam ömrü yaklaşık 0,9 ns iken deliklerin yoğunlaştığı bölgelerde yaşam ömrü kademeli olarak 0,4 ns' ye kadar düşmüştür. Şekil 4.16 (b)'de verilen FLIM resmi, 470 nm darbeli lazer ile aydınlatılan numuneye aittir. Bu numunenin şekil 4.14 (b)'de verilen SEM resminde numune yüzeyinde bazı gözeneklerin çizgisel olarak yoğunlaştığı görülmekteydi. Şekil 4.16 (b)'de delikler arasından geçen sarı bölgenin bu yoğunlaşmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Aşınmış olan bu bölgede yaşam ömrü yaklaşık 0,7 ns'dir. Numune yüzeyindeki aşınmanın elektron boşluk birleşim süresinin ksalmasına neden olduğu görülmektedir. FLIM resminde farklı renklerde görünen bölgelerden (mavi, yeşil, sarı ve kırmızı) alınan tek nokta yaşam ömrü eğrileri ise şekil 4.17'de verilmiştir. Tek nokta ölçümlerine ait yaşam ömrü parametreleri ise çizelge 4.3'de özetlenmiştir. Daha öncede bahsedildiği gibi yüzey kusurlarının artışı ile bant altı tuzak enerji seviyelerinin yoğunluğu da artacağından daha fazla elektron-boşluk çiftleri bu tuzak enerji seviyelerini kullanarak birleşir. Bu nedenle gözenekli yapının yoğunluğu arttıkça floresan yaşam ömrü kısalmıştır. Şekil 4.16 (d)' de gözenekli numunelerden alınan şiddet görüntüsü verilmiştir. Gözenekli bölgelerde ışıma şiddetinin arttığı açıkça görülmektedir. Elektron-boşluk rekombinasyon hızının artışı ile floresan ışıma şiddeti de artmıştır.



Şekil 4.16 : HCl- Etanol çözeltisi içinde hazırlanan yüzeylerden alınan yaşam ömrüne bağlı FLIM görüntüleri.



Şekil 4.17 : FLIM resimlerinde farklı renkte görünen bölgelerden (mavi, yeşil, sarı ve kırmızı) alınan tek nokta yaşam ömrü eğrileri.

Çizelge 4.3 : Şekil 4.16’da görülen FLIM resimlerinde farklı renkteki bölgelerden (mavi, yeşil, sarı ve kırmızı) alınan tek nokta ölçümleri için hesaplanan yaşam ömrü parametreleri.

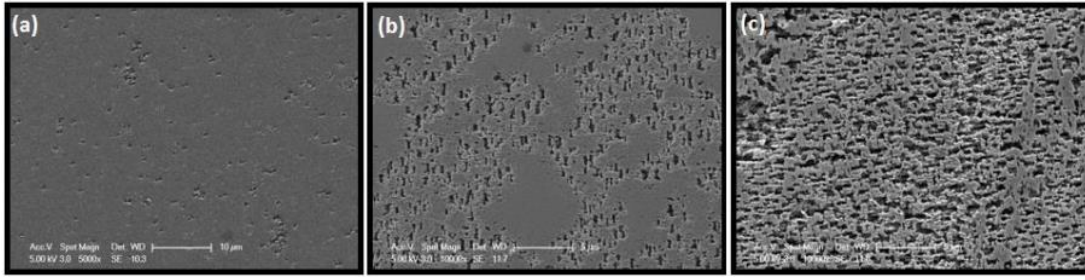
n- GaAs	A ₁ (kCnts)	τ_1 (ns)	A ₂ (kCnts)	τ_2 (ns)	$\langle\tau\rangle$ (ns)	X^2
TCSP 1	12,081	0,303	1,38	2,198	1,1621	1,38
TCSP 2	2,618	2,558	14,418	0,334	1,628	1,44
TCSP 3	3,596	2,61	18,441	0,378	1,660	1,43
TCSP 4	1,406	2,698	4,816	0,409	1,916	1,167

4.3 n-GaAs Yarı İletkenlerin HCl: Saf Su Çözeltisi İçerisinde Elektrokimyasal Aşındırma İşlemi

Elektrokimyasal aşındırma parametrelerinin n-tipi GaAs yarı iletkenleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla HCl: Saf su çözeltisi içerisinde aşındırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Akım yoğunluğunun, aşındırma süresinin, aydınlatma kaynağının ve elektrolitik çözelti derişiminin aşınmış GaAs yüzey yapısına etkisi incelenmiştir.

4.3.1 Akım yoğunluğunun etkisi

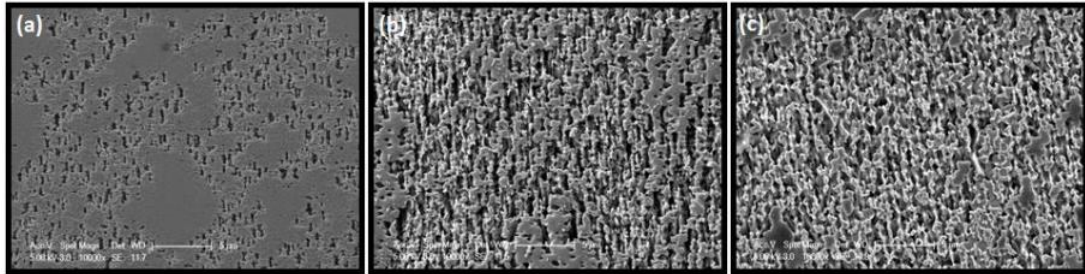
Farklı akım yoğunluklarında hacimce 1:2 oranında hidroklorik asit ve saf su karışımı olan elektrolit çözeltisi içinde hazırlanan yüzeylerin SEM resimleri şekil 4.18’de verilmiştir. Aşındırma işlemi sırasında numuneler halojen lamba ile aydınlatılmış ve anodizasyon süreleri 1 dk olarak ayarlanmıştır. 10 mA/cm² akım yoğunluğu ile aşındırılan numunelerin yüzeyinde şekil 4.18 (a)’da görüldüğü gibi birbirinden ayrık bir şekilde konumlanmış üçgen gözenekler oluşmuştur. Bu gözenekler ayrık konumlanmalarına rağmen numune yüzeyi boyunca süreklilik göstermektedir. Etanol kullanılan çözeltide olduğu gibi üçgen gözeneklerin bir bölgede yoğunlaşması söz konusu değildir. Akım yoğunluğunun 20 mA/cm² çıkarılması ile bu gözeneklerin sayısı önemli ölçüde artmıştır. Gözenek sayısı artarken bu üçgen gözenekler birleşerek daha büyük porlar oluşturmalarına rağmen numune yüzeyi boyunca homojen sürekli bir poroz yapı oluşmamıştır. 30 mA/cm² akım yoğunluğunda hazırlanan numunelerin yüzeyinde ise şekil 4.18(c)’de görüldüğü gibi birleşen üçgen porlardan oluşan homojen bir yüzey oluşmuştur.



Şekil 4.18 : HCl:Saf su elektrolit çözeltisi içerisinde (a) 10, (b) 20 ve (c) 30 mA/cm² akım yoğunluklarında hazırlanan yüzeylerin SEM resimleri.

4.3.2 Aşındırma süresinin etkisi

HCl- Saf su ortamında gerçekleştirilen aşındırma işleminde, aşındırma süresinin etkisi 1, 2 ve 3 dk olmak üzere üç farklı anodizasyon süresi uygulanarak 20 mA/cm² akım yoğunluğunda ve halojen lamba ile aydınlatılarak incelenmiştir. 20 mA/cm² akım yoğunluğunda 1dk aşındırılan numunelerde homojen sürekli bir poroz yapının oluşmadığından daha önce bahsedilmişti. Aşındırma süresinin arttırılması ile şekil 4.18’de açıkça görüldüğü gibi gözeneklerin miktarı artmıştır ve homojen gözenekli bir yüzey yapısı oluşmuştur. 3dk aşındırma sonucunda gözenekler birleşerek poroz bir ağ oluşturmuştur.

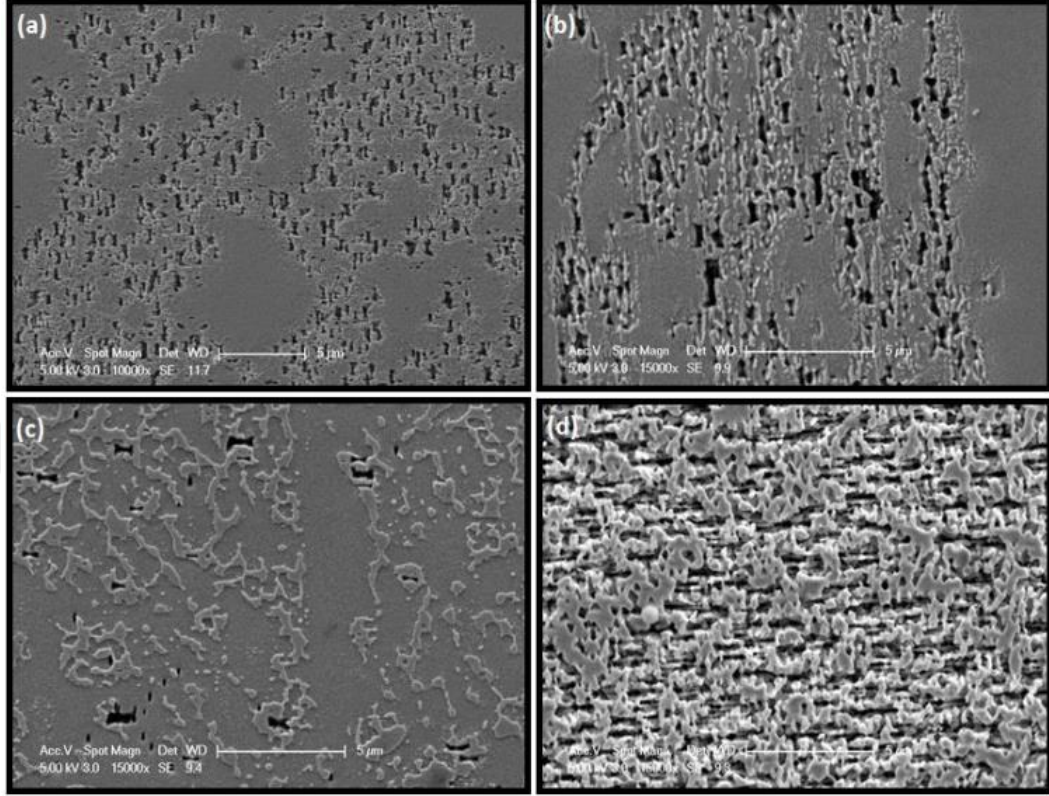


Şekil 4.19 : HCl: Saf su elektrolit çözeltisi içerisinde (a) 1, (b) 2 ve (c) 3 dk aşındırılarak hazırlanan yüzeylerin SEM resimleri.

4.3.3 Aydınlatma kaynağının etkisi

HCl ve saf su karışımı ile hazırlanan yüzeylerde aydınlatma kaynağının etkisini görmek üzere çalışmalar yapılmıştır. Halojen lamba, mavi LED ve 470 nm darbeli lazer ile yüzey aydınlatması yapılarak hazırlanan numunelerin SEM resimleri sırayla şekil 4.20 (a), (b) ve (c)’de verilmektedir. Aşındırma işlemi 20 mA/cm² akım yoğunluğunda 1dk yapılmıştır. Monokromatik bir ışık kaynağı olan Mavi LED kullanılması halinde numune yüzeyinde daha geniş ve düzenli gözeneklerin oluştuğu görülmektedir. Şiddeti 30 mW/cm² olan 470 nm darbeli lazer kullanılması halinde ise numune yüzeyinde oldukça az sayıda gözenek açılmıştır. Lazer şiddetinin süreç

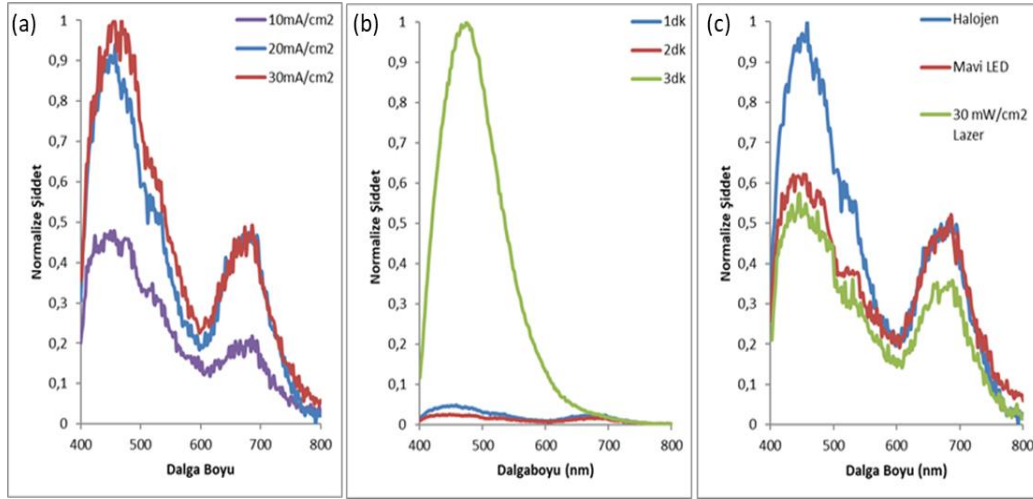
üzerindeki etkisini görmek için ise lazer şiddeti artırılarak 50 mW/cm^2 gücünde lazer kullanılarak aşındırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.20 (d)'de görüldüğü gibi lazer şiddetinin artması sonucunda homojen gözenekli bir yapı elde edilmiştir.



Şekil 4.20 : Farklı aydınlatma kaynakları kullanılarak üretilen GaAs numunelerin SEM görüntüleri. (a) Halojen lamba, (b) LED, (c) şiddeti 30 mW/cm^2 ve (d) 50 mW/cm^2 olan 470 nm darbeli lazer.

4.3.4 HCl- Saf su çözeltisi içerisinde aşındırılan n-GaAs numunelerin foto ışıma özelliklerinin belirlenmesi

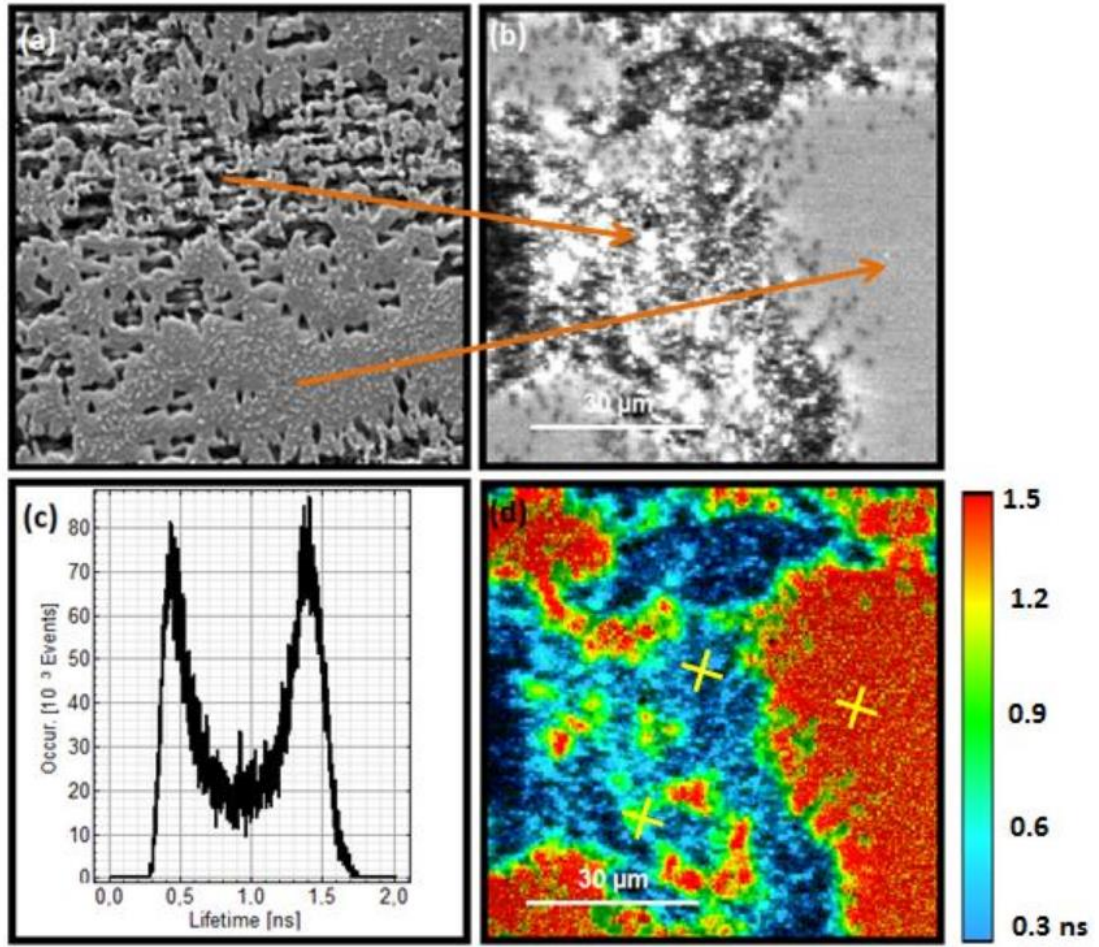
HCl- Saf su çözeltisi içerisinde hazırlanan numunelerde şekil 4.21' de görüleceği gibi görünür bölge boyunca birisi 470 nm civarında diğeri de 680 nm civarında olmak üzere iki pikli bir ışıma yapmaktadır. Işıma şiddeti numune yüzeyinde görülen porların yoğunluğu ile artmıştır. Daha önce de açıklandığı gibi GaAs saf halde 1.42 eV bant boşluğuna uygun olarak görünür bölge dışında 870 nm civarında ışıma yapar. Literatüre uygun şekilde elde edilen gözenekli GaAs yüzeylerin ışıması görünür bölgeye kaymıştır ve neredeyse tüm görünür bölge boyunca süreklilik göstermiştir (Finnie ve diğerleri, 1997; Lockwood ve diğerleri, 1999; Schmuki ve diğerleri, 1996).



Şekil 4.21 : HCl-Saf su ortamında üretilen GaAs numunelerin ışıma spektrumlarının (a) akım şiddetine göre, (b) aşındırma süresine göre, (c) aydınlatma kaynağına göre değişimleri.

4.3.5 HCl- Saf su çözeltisi içerisinde aşındırılan n-GaAs numunelerin FLIM analizi sonuçları

HCl- saf su çözeltisi içinde hazırlanan GaAs yüzeylerinde üçgen gözeneklerin numune yüzeyinde dağınık bir şekilde yayıldığı belirlenmişti. Bu numunelerin yüzeyinde de elektron boşluk birleşim yaşam ömrünü tespit etmek için, yüzey FLIM mikroskobu ile görüntülenmiştir. Elde edilen ışıma şiddetine ve yaşam ömrüne bağlı FLIM görüntüleri sırayla şekil 4.22 (b) ve (d)'de verilmiştir. FLIM resminde numune yüzeyinde üçgen gözeneklerin bulunduğu bölgeler ile düz olan bölgeler arasında yaşam ömrüne bağlı ciddi bir kontrast oluştuğu görülmektedir. Bu değişim şekil 4.22 (c)'de verilen yaşam ömrü histogramında da açıkça görülmektedir. Yaşam ömrü histogramı FLIM resmi üzerinde her bir yaşam ömrü değerinin kaç kez ölçüldüğünü grafiksel olarak bize göstermektedir. Histogram incelendiğinde 0,5 ve 1,5 olmak üzere iki farklı yaşam ömrü değerinin diğerlerine oranla daha fazla ölçüldüğü görülmektedir. Numune yüzeyinden FLIM görüntüsü yardımı ile belirlenen üç noktadan tek nokta yaşam ömrü ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümlere ait ışıma parametreleri çizelge 4.4'de özetlenmiştir. Numune üzerindeki düz kısımlarda ortalama yaşam ömrü 1,43 ns iken, üçgen gözeneklerin bulunduğu kısımlarda 0,47 ns olarak hesaplanmıştır. Bu değerler histogramda görülen maksimum değerler ile uyushmaktadır. Üçgen gözeneklerin olduğu kısımda elektron boşluk birleşim süresinin önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir.



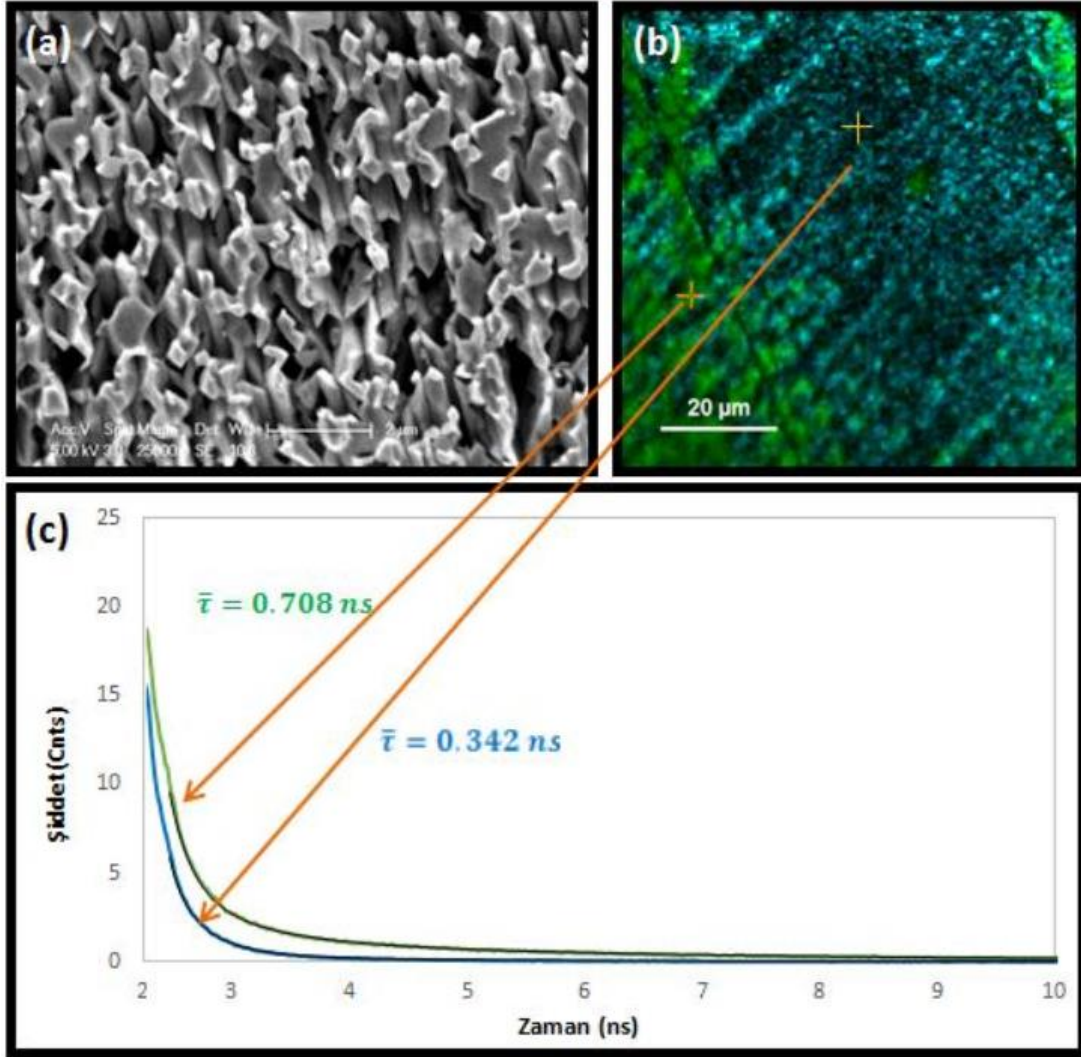
Şekil 4.22 : HCl- Saf su Çözeltisi içerisinde aşındırılan n-GaAs numunenin (a) SEM resmi (b) ışıma şiddetine bağlı FLIM resmi (c) yaşam ömrü histogramı ve (d) yaşam ömrüne bağlı FLIM resmi.

Çizelge 4.4 : Şekil 13’ de görülen FLIM resimlerinde farklı renkteki bölgelerden (mavi, yeşil ve kırmızı) alınan tek nokta ölçümleri için hesaplanan yaşam ömrü parametreleri.

n-GaAs	A_1 (kCnts)	τ_1 (ns)	A_2 (kCnts)	τ_2 (ns)	$\langle\tau\rangle$ (ns)	χ^2
TCSP ₁	0,897	3,600	1,946	0,414	2,979	1,038
TCSP ₂	1,329	2,845	4,540	0,371	2,084	1,179
TCSP ₃	0,213	1,600	1,382	0,300	0,886	1,157

Hidroklorik asit ve saf su çözeltisi kullanılan elektrokimyasal anodizasyon sürecinde akım yoğunluğu ve anodizasyon süresi gibi parametreler yardımıyla GaAs yüzeyinde tamamen gözenekli bir yüzey oluşturulmuştu. Şekil 4.23 (a)’da SEM resmi verilen gözenekli GaAs yüzey de FLIM mikroskobu ile görüntülenmiştir. Elde edilen yaşam ömrüne bağlı FLIM resmi şekil 23 (b)’de verilmiştir. Numune yüzeyinde seçilen iki

farklı noktada yaşam ömrü ölçülmüştür. İlgili ışıma eğrileri şekil 23 (c)'de görülmektedir. Ayrıca bu ölçümlere ait ışıma parametreleri da çizelge 4.5'de verilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre gözenekli olan numune yüzeyinde yaşam ömrü 0,342 ns değerine kadar düşmüştür. Daha önce de bahsedildiği gibi yarı iletken yüzeyindeki deformasyon arttıkça, elektron boşluk birleşim sürecinin kısaldığı görülmektedir.



Şekil 4.23 : (a) Seçilen gözenekli numunenin SEM resmi, (b) yaşam ömrüne bağlı FLIM resmi ve (c) farklı iki noktada alınan yaşam ömrü eğrisi.

Çizelge 4.5 : FLIM resminde seçilen farklı iki noktadan alınan tek nokta ölçümleri için hesaplanan yaşam ömrü parametreleri.

	A_1 (kCnts)	τ_1 (ns)	A_2 (kCnts)	τ_2 (ns)	A_3 (kCnts)	τ_3 (ns)	$\langle\tau\rangle$ (ns)	X^2
TCSP 1	1,328	3,170	3,090	0,590	5,530	0,180	2,078	1,110
TCSP 2	0,395	1,744	3,560	0,338	2,300	0,110	0,761	0,930

4.4 p-GaAs Yarı İletkenlerin HF: Ethanol Çözeltisi İçerisinde Elektrokimyasal Aşındırma İşlemi

Elektrokimyasal aşındırma parametrelerinin p-tipi GaAs yarı iletkenleri üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla HF: Ethanol çözeltisi içerisinde aşındırma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Akım yoğunluğunun, aşındırma süresinin, aydınlatma kaynağının ve elektrolitik çözelti derişiminin aşınmış GaAs yüzey yapısına etkisi incelenmiştir. Aşındırma işlemleri sonucunda yüzeyde As_2O_3 ve Ga_2O_3 kristalleri gözlemlenmiştir. Bu kristallerin altında ise gözenekli ve mikro yarıkların olduğu bir tabaka görülmüştür. Sonuç olarak şekil 4.24’ te şematik olarak gösterilen GaAs-gözenekli GaAs-Mikrokristaller/mikro çubuklardan oluşan 3 tabakalı bir yüzey elde edilmiştir. Mikrokristaller ve gözenekli GaAs tabaka birbirinden farklı özellikler gösterdiğinden gözenekli alanlardan elde edilen bulgular ile Mikrokristaller/mikro çubuklardan elde edilen veriler iki farklı alt başlıkta incelenecektir.



Şekil 4.24 : p-GaAs aşındırma işlemi sonucu oluşan yapının şematik anlatımı.

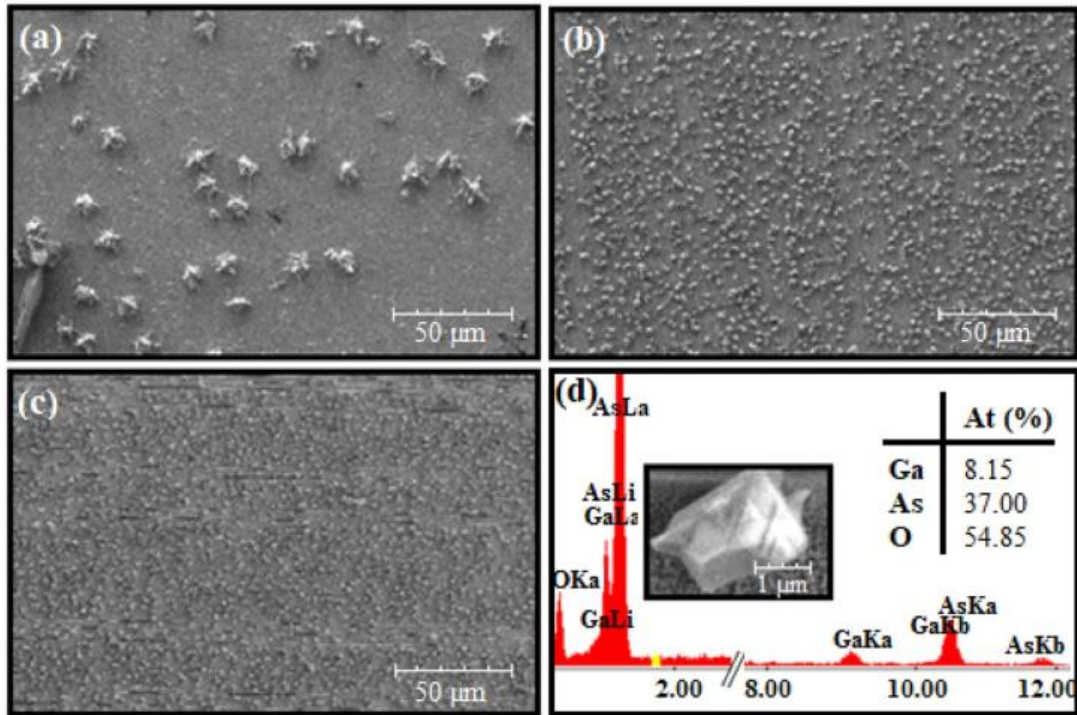
4.4.1 Mikrokristaller/ mikro çubuklar

4.4.1.1 Akım yoğunluğunun etkisi

Farklı akım yoğunlukları ile aşındırılan p-GaAs yarı iletkeninin yüzey değişimlerinin incelenmesi amacı ile 15, 30 ve 45 mA/cm² akım şiddetleri kullanılarak 1dk süre ile elektrokimyasal aşındırma işlemi, HF: Etanol ortamında, numune yüzeyleri halojen

lambda ile aydınlatılarak, gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.25’ de numunelerin ikincil elektron görüntülerinde de görülebileceği gibi, numune yüzeyinde homojen dağılmış mikrokristaller oluşmuştur. Mikrokristallerin boyutu imageJ programı ile ölçülmüştür. Akım şiddeti arttıkça mikro kristallerin boyutunun azaldığı görülmektedir. 15 mA/cm² akım şiddeti ile aşındırılan numunelerde kristal boyutu 4,2 µm iken 30 ve 45 mA/cm² ile üretilen numunelerin yüzeyinde oluşan kristallerin tane boyutu sırası ile 2,2 ve 1,6µm olarak ölçülmüştür. Artan akım şiddeti ile tane boyutu azalmasına rağmen oluşan kristallerin sayısı önemli derecede artmıştır ve bu kristaller bütün yüzeyi kaplamıştır.

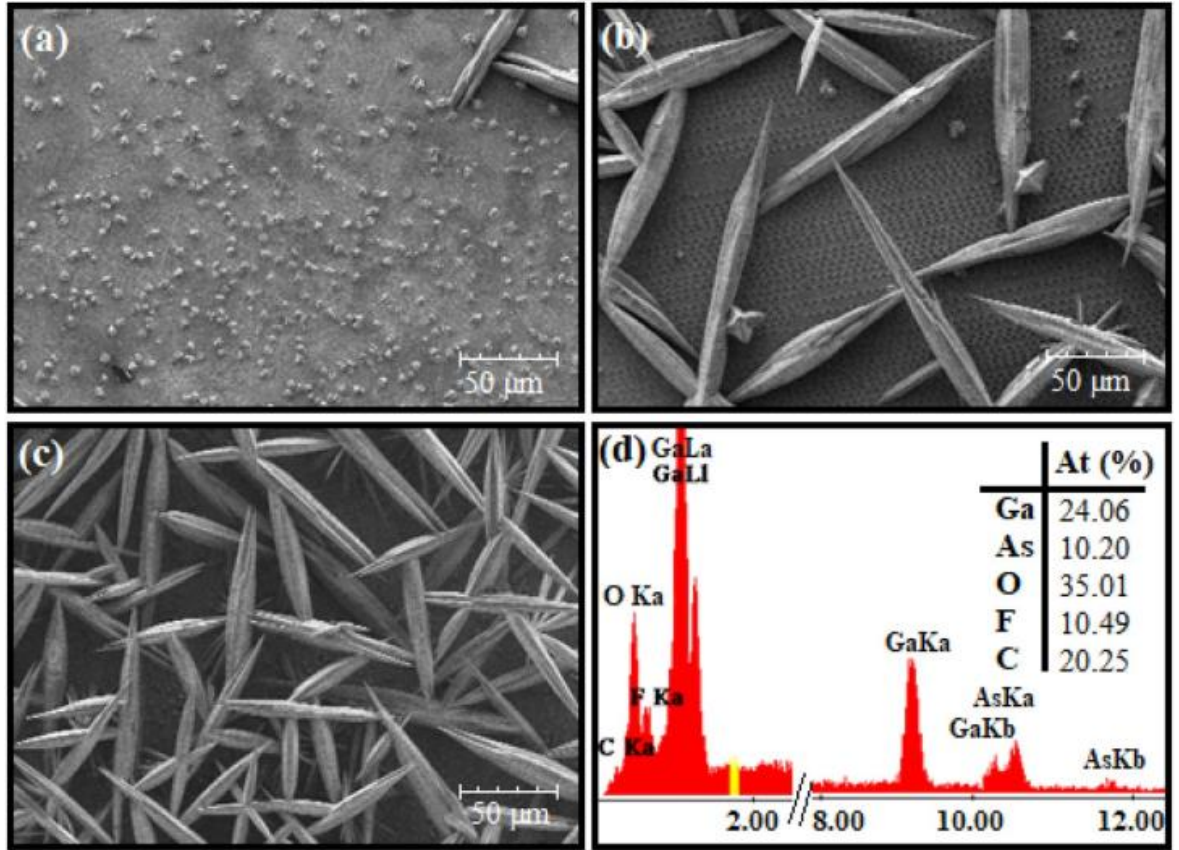
Yüzeyi kaplayan mikrokristallerin kimyasal bileşenlerinin ortaya çıkarılması için bu kristallerin üzerinde nokta EDS analizi yapılmıştır. Şekil 4.25 (d)’ de verilen EDS spektrumunda da görülebileceği gibi mikrokristaller çoğunlukla As ve O atomlarını içermektedir. Atomik olarak Arsenik, oksijen ve Galyum oranı sırasıyla %37,00, %54,85 ve %8,15 çıkmıştır. As atomlarının O atomlarına oranı 2/3 olması As₂O₃ stokiyometrik oranıyla uyumaktadır. Daha önce yapılan çalışmalarda da bu kristaller gözlemlenmiştir ve As₂O₃ olarak tanımlanmıştır (Lockwood ve diğerleri, 1999; Schmuki ve diğerleri, 1996a).



Şekil 4.25 : Farklı akım yoğunluklarında aşındırılan GaAs yüzeylerin SEM resimleri (a) 15, (b) 30 ve (c) 45 mA/cm² (d) yüzey kristallerinin EDX analiz sonucu.

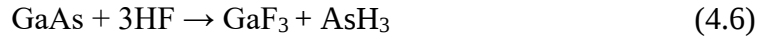
4.4.1.2 Aşındırma süresinin etkisi

Elektrokimyasal aşındırma süresinin, oluşan yüzey yapısı üzerindeki etkisini incelenmek amacı ile 2, 3 ve 4dk olmak üzere farklı sürelerde deneyler gerçekleştirilmiştir. Hacimce 1:3 oranında HF: Etanol elektrolit çözelti içerisinde üretilen GaAs numunelere sürenin etkisinin gözlemlenmesi amacıyla 15 mA/cm^2 akım yoğunluğu kullanılarak 2, 3, 4 dakika boyunca elektrokimyasal aşındırma yapılmıştır. Üretilen yüzeylerin SEM resimleri şekil 4.26'da verilmiştir. Bu resimlerden de görülebileceği gibi 3 dk aşındırma sonunda yüzeyde keskin uçlu altıgen şekilli mikro çubuklar oluşmuştur. Aşındırma süresi 4 dk' ya çıkarıldığında altıgen mikro-çubukların sayısı artmıştır. Şekil 4.26 (d)' de mikro çubukların EDS spektrumu verilmiştir. EDS analiz sonucuna göre Ga, As, O, F ve C atomları sırası ile atomik olarak %24,06, %10,20, %35,01, %10,49 ve %20,25 oranlarında bulunmaktadır. Ga/O oranının 2/3 olması mikro çubukların Ga_2O_3 olabileceğini göstermektedir. Aşındırma işlemi HF: etanol ortamında gerçekleştiği için bu işlem sonucunda yüzeyde bir miktar artık karbon kalmıştır.



Şekil 4.26 : Farklı sürelerde aşındırılan GaAs yüzeylerin SEM resimleri (a) 2, (b) 3, (c) 4 dk.

Aşındırma süresinin artışı yüzeyde oluşan mikrokristallerin yapısını hem kimyasal olarak, hemde morfolojik olarak değiştirmiştir. Bu dönüşüm daha önce bölüm 4.1.1’de değinildiği gibi GaAs ’in HF:C₂H₅OH çözeltisi içerisindeki elektrokimyasal çözünme mekanizması ile açıklanabilir. GaAs, eşzamanlı bir bağ değişim mekanizması yoluyla ayrışmamış HF tarafından kimyasal olarak aşındırılır (Bioud ve diğerleri, 2016). İlk olarak yüzeydeki Ga-As bağları aşağıdaki kimyasal reaksiyona göre (4.6) koparak Ga-F ve As-H bağları oluşur.



Sonraki adımda elementel As iki farklı yolla oluşur. Bu yollardan birisi AsH₃’in aşağıdaki tepkime ile (4.7) Arsenik ve Hidrojene dönüşmesidir.

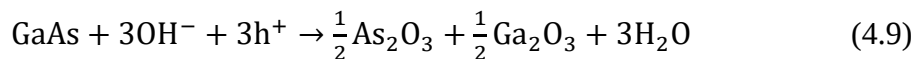


GaAs bileşiği pozitif yüklü 6 deşik ile birleşince GaAs elektronik yolla çözünerek Ga ve As oluşur (4.8).

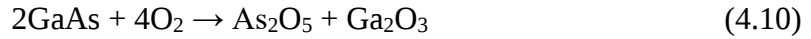


Galyumun elementel olarak serbest kalması için numune üzerinden akım geçirilerek numune yüzeyinde deşik yoğunluğunun artması gerekmektedir. Bu nedenle aşındırma işleminin erken döneminde numune yüzeyinde serbest Arsenik oranı Galyuma göre oldukça fazladır.

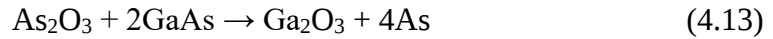
Üçüncü adımda oksit türleri oluşur (As₂O₃, Ga₂O₃). Aşındırma çözeltisi içerisinde HF ile birlikte bulunan etanol fonksiyonel hidroksit (OH⁻) gurubu içeren güçlü bir oksidasyon ajanıdır. Aşındırma işlemi sırasında GaAs ve Etanol tepkimeye (4.9) girerek Ga₂O₃ ve As₂O₃ oluşturur (Naddaf, 2017).



Tepkime (4.9)’a eş zamanlı olarak, GaAs ve As₂O₃ oksijenle tepkimeye girerek Ga₂O₃ ve As₂O₅ oluşturur (Feng ve diğerleri, 2015).

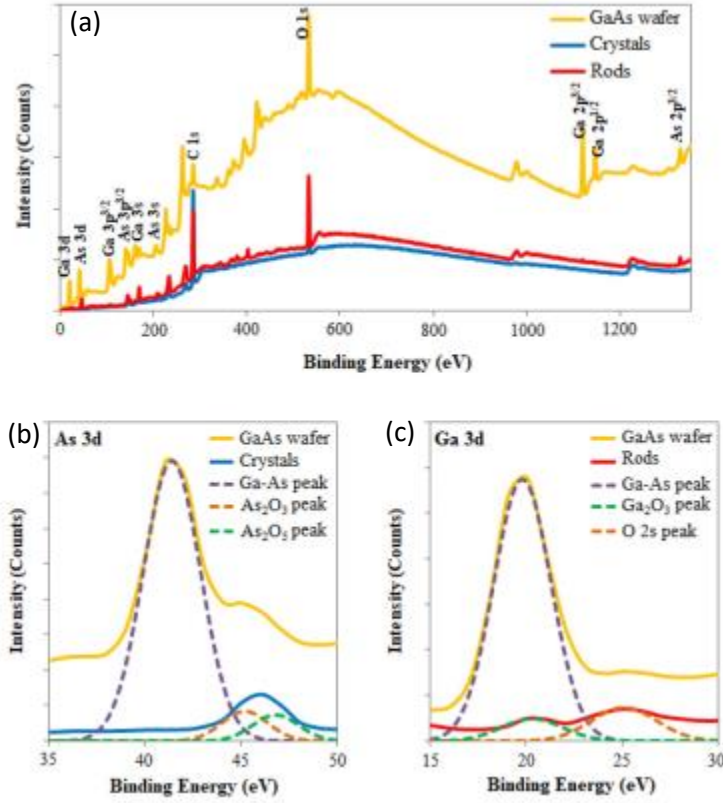


Oluşan arsenik oksitler kararsızdır ve (4.12) ve (4.13)'de gösterilen tepkimelerle Ga_2O_3 'e ve serbest As' e dönüşürler.



Bu nedenle aşındırma süresi arttıkça numune yüzeyinde oluşan As_2O_3 'ler daha kararlı yapıdaki Ga_2O_3 'e dönüşmektedir.

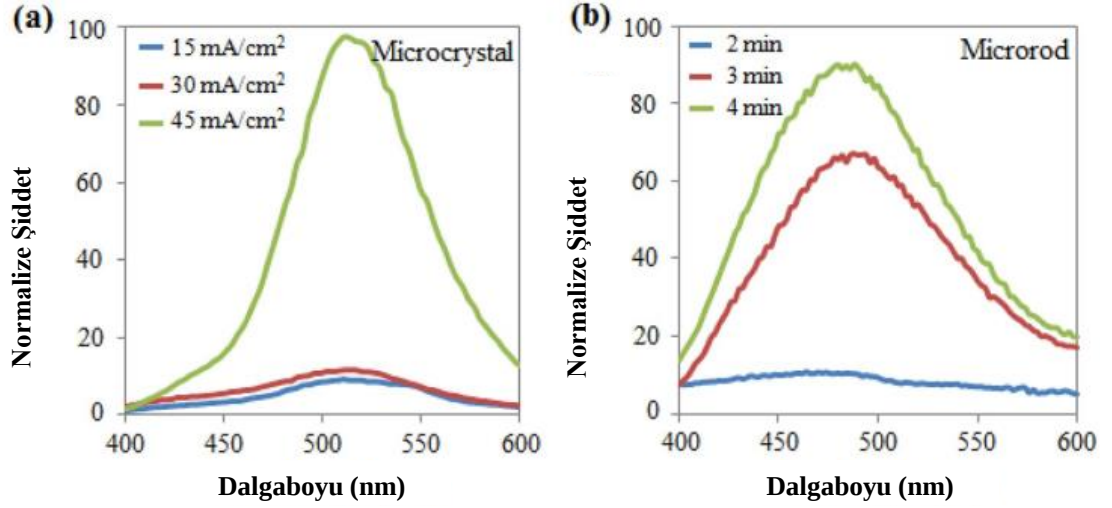
Bu kimyasal dönüşüm şekil 4.25 ve şekil 4.26'da EDS analizleri ile gösterilmiştir. Bu verileri desteklemek için EDS analizlerine ek olarak X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) analizleri de 0 -1350 eV enerji aralığında yapılmıştır. Kaynak olarak Al K α kullanılmıştır. İşlenmemiş GaAs, yüzeyi mikrokristallerle kaplanan ve mikro çubukla kaplanan bir numunelerin XPS analiz sonucu şekil 4.27'de görülmektedir. Üç yüzeyde de sadece Ga, As, O ve C elementleri algılanmıştır. Referans GaAs numunesi için tespit edilen bağlanma enerjisi değerleri, 19,3, 41,2, 105,0, 140,1, 160,2, 205,0, 1117,7, 1144,7, 1326,0, 531,2 ve 284,8 eV'dur. Bu değerler sırasıyla literatürde Ga 3d, As 3d, Ga 3p $_{3/2}$, As 3p $_{3/2}$, Ga 3 s, As 3 s, Ga 2p $_{3/2}$, Ga 2p $_{1/2}$, As 2p $_{3/2}$, O 1 s ve C 1 s, ile uyuşmaktadır. Karbon varlığının sebebi ethanol ortamında yapılan aşındırma işlemi sonucunda yüzeydeki hidrokarbon kontaminasyonudur. Mikro kristallerin yüzeyinden alınan ölçümlerde, şekil 4.27 (b)'de görülen As3d pikinin tepe noktasının konumunun ~ 46 eV'luk daha yüksek bağlanma enerjisine doğru kaydığı görülmektedir. Böyle bir kayma arsenik oksit türlerinin oluştuğunu göstermektedir. Mikro kristallerin As3d spektral çizgisi, As_2O_3 ve As_2O_5 gibi farklı arsenik oksit bileşiklerini temsil eden farklı bağlanma enerjilerinin spektral çizgilerinin toplamı olarak modellenabilir (Kulik, ve diğerleri, 2013; Bob, ve diğerleri, 2001). Bu durum mikrokristallerin Arsenik oksit türleri olduğunu göstermektedir. Şekil 4.27 (c)'de görülebileceği gibi, mikro çubukların Ga 3d spektral çizgisi, sırasıyla Ga_2O_3 (20.4 eV) ve O_2 'ye (24.8 eV) karşılık gelen iki pik oluşturmuştur (Huang ve diğerleri, 2018; Kim ve diğerleri, 2002). XPS analizleri mikro çubuklardan alınan EDS analizleriyle örtüşmüştür ve elde edilen bu mikrokristallerin Ga_2O_3 olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.27 : İşlenmemiş GaAs, yüzeyi mikrokristallerle kaplanan ve mikro çubukla kaplanan bir numunelerin XPS analiz sonucu (a), As3d piki (b) ve Ga3d piki(c).

4.4.1.3 Mikrokristallerin ve mikro çubukların foto ışıma özelliklerinin belirlenmesi

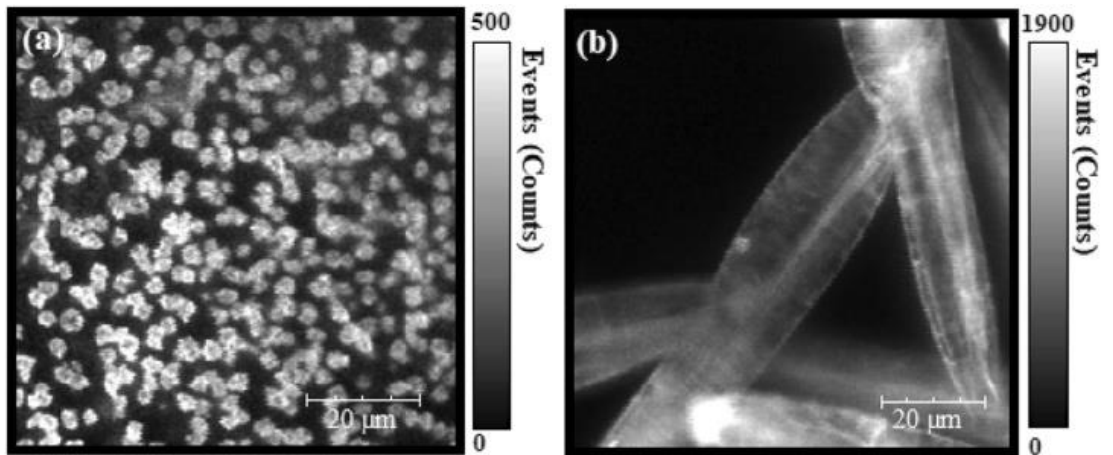
Üretilen numunelerin foto ışıma özellikleri bir floresan spektrometresi (PTI, Quanta Master 300) kullanılarak analiz edilmiştir. Hazırlanan numunelere ait foto ışıma spektrumları şekil 4.28’de özetlenmiştir. Şekil 4.28 (a)’da açıkça görülmektedir ki mikro kristaller 520 nm de pik yapan geniş bir ışıma spektrumuna sahiptir. Literatürde bu yeşil ışımanın As₂O₃ kristallerinden kaynaklandığı farklı kaynaklarda geçmektedir. (Finnie ve diğerleri, 1999; Lockwood ve diğerleri, 1999; Schmuki ve diğerleri, 1996). Numune yüzeyinde artan mikro kristal yoğunluğu ile birlikte ışıma şiddetinin önemli ölçüde artması literatür verileri ile örtüşmektedir ve bu ışımanın kaynağının numune yüzeyindeki As₂O₃ ile mikrokristaller olduğunu göstermektedir. Şekil 4.28 (b)’de foto ışıma spektrumlarının aşındırma süresinin artışı ile değişimi görülmektedir. Yaklaşık 480 nm de pik yapan geniş bantlı bu ışımanın şiddeti mikro çubukların sayısının artışıyla artmıştır. Daha öncede bahsedildiği gibi bu mavi ışıma Ga₂O₃ kristallerinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.28 : Aşındırılan P-GaAs numunelerin ışıma spektrumlarının (a) akım şiddetine göre, (b) aşındırma süresine göre değişimleri.

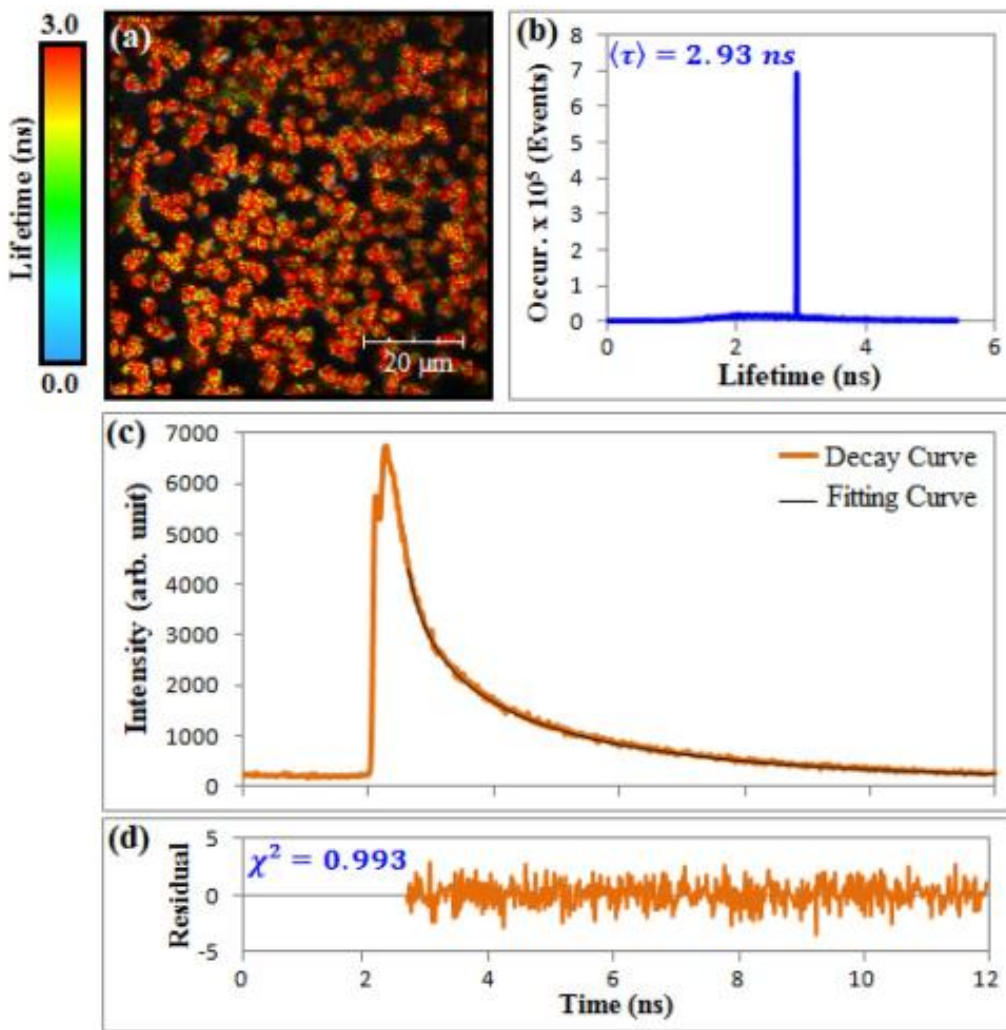
4.4.1.4 Mikrokristallerin ve mikro çubukların FLIM analizi sonuçları

Numune yüzeyinde büyütülmüş mikro kristallerin ve mikro çubukların ışıma şiddetine bağlı konfokal FLIM görüntüsü sırasıyla şekil 4.29 (a)'da ve şekil 4.29 (b)'de görülmektedir. Bu görüntülerden de anlaşılabileceği gibi numunelerden gelen şiddetli ışımlar GaAs yüzeyinde oluşan oksit yapılardan kaynaklanmaktadır. Şekil 4.29 (a) ve 4.29 (b)'de görüldüğü gibi As_2O_3 mikro kristallerin ve Ga_2O_3 mikro çubukların sivri uçlarında ışıma şiddeti artmıştır. Taşıyıcıların küçük bir hacimde hapsolmesi ve artan yüzey/ hacim oranı ile birlikte artan yüzey kusurları, bant altı enerji seviyelerinin sayısının artmasına neden olur. Bant altı yeni enerji seviyeleri rekombinasyon merkezleri gibi davranarak elektron-deşik rekombinasyon hızını artırır ve floresan yaşam ömrünün azalmasına ve ışıma şiddetinin artmasına neden olur.



Şekil 4.29 : (a) As_2O_3 ve (b) Ga_2O_3 şiddet temelli FLIM görüntüleri

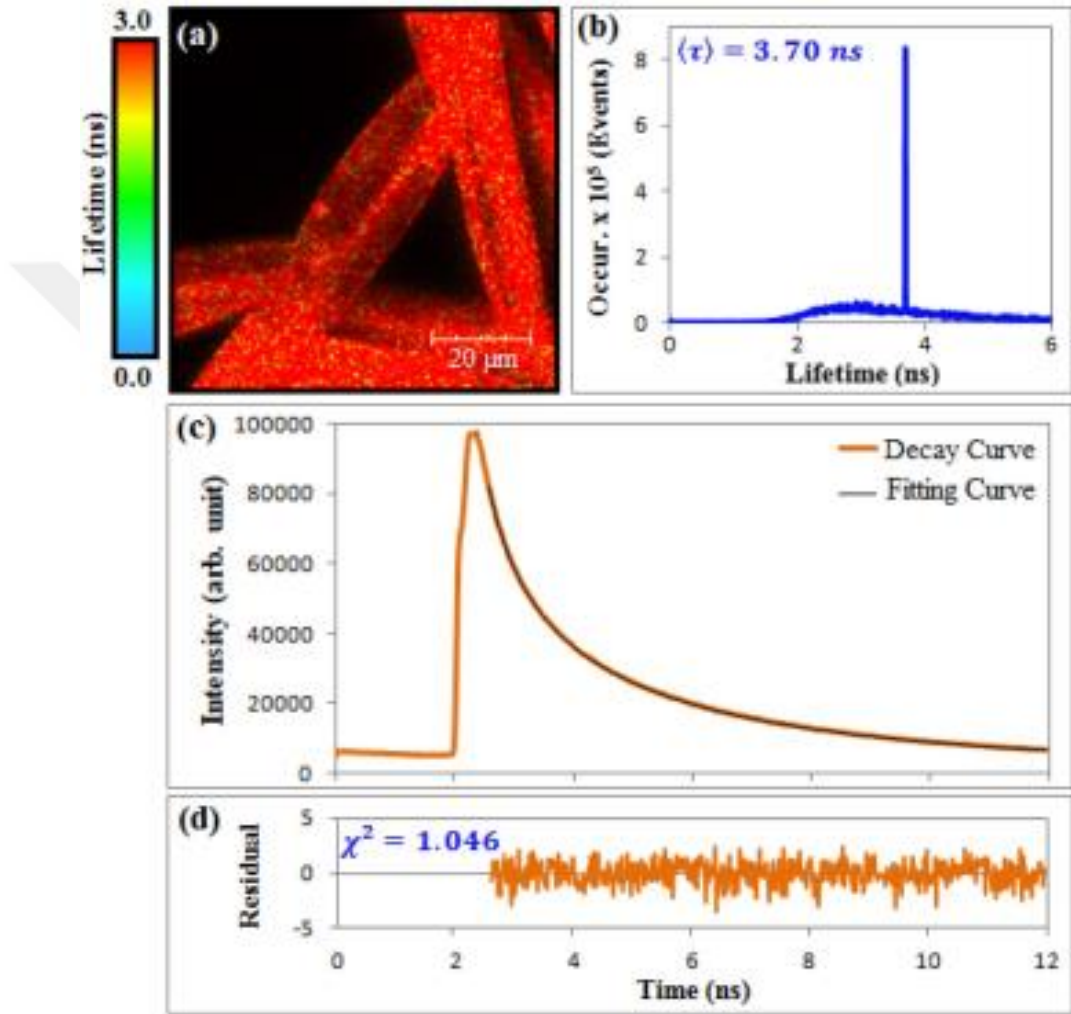
Mikrokristallerin FLIM ölçüm sonuçları şekil 4.31’ de görülmektedir. Ortalama floresan yaşam ömrü 2,93 ns olarak ölçülmüştür. Mikrokristallerin floresan yaşam ömrü görüntüsü incelendiğinde bu kristaller üzerinde yaşam ömründe 1 ns altında sapmalar olduğu görülmektedir. Daha öncede bahsedildiği gibi safsızlıklar, oksijen boşlukları gibi kusurlar, band boşluğunda tuzak noktaları oluşturarak, elektron-boşluk birleşmesini hızlandırırlar. Mikrokristallerin 2,9 ns ölçülen yaşam ömrü, yük taşıyıcıların kusurlar tarafından yakalanması için yeterince uzundur. Bu nedenle, yaşam ömründeki küçük değişimler, uyarılmış elektronların tuzak destekli rekombinasyonu ile açıklanabilir.



Şekil 4.30 : Mikrokristallerin FLIM ölçüm sonuçları (a) FLIM görüntüsü, (b) Floresan yaşam ömrü histogramı, (c) FLIM eğrisi.

Ga₂O₃ çubukların floresan yaşam ömrü görüntüsü şekil 4.31’ de görülmektedir. P-tipi GaAs numunelerinin aşındırılması sonucunda yaklaşık 18 μm çapında Ga₂O₃ mikro çubuklar oluşmuştur ve bu çubukların ortalama floresan yaşam ömrü 3,70

ölçülmüştür. N- tipi GaAs numuneler üzerinde oluşan yaklaşık 1μ çapındaki çubuklarda floresan yaşam ömrü 0,604 ns ve yaklaşık 5μ çapındaki mikro çubuklarda 1,340 ns olarak ölçülmüştü. Daha öncede Ga_2O_3 çubuk kristallerinin boyutunun floresan yaşam ömrünü doğrudan etkilediği anlatılmıştı. P-GaAs üzerinde oluşturulan büyük mikro-çubukların floresan yaşam ömrünün daha yüksek çıkması daha önce elde edilen bulguları destekler niteliktedir.



Şekil 4.31 : Şekil 10. Mikro-çubukların FLIM ölçüm sonuçları (a) FLIM görüntüsü, (b) Floresan yaşam ömrü histogramı, (c) FLIM eğrisi.

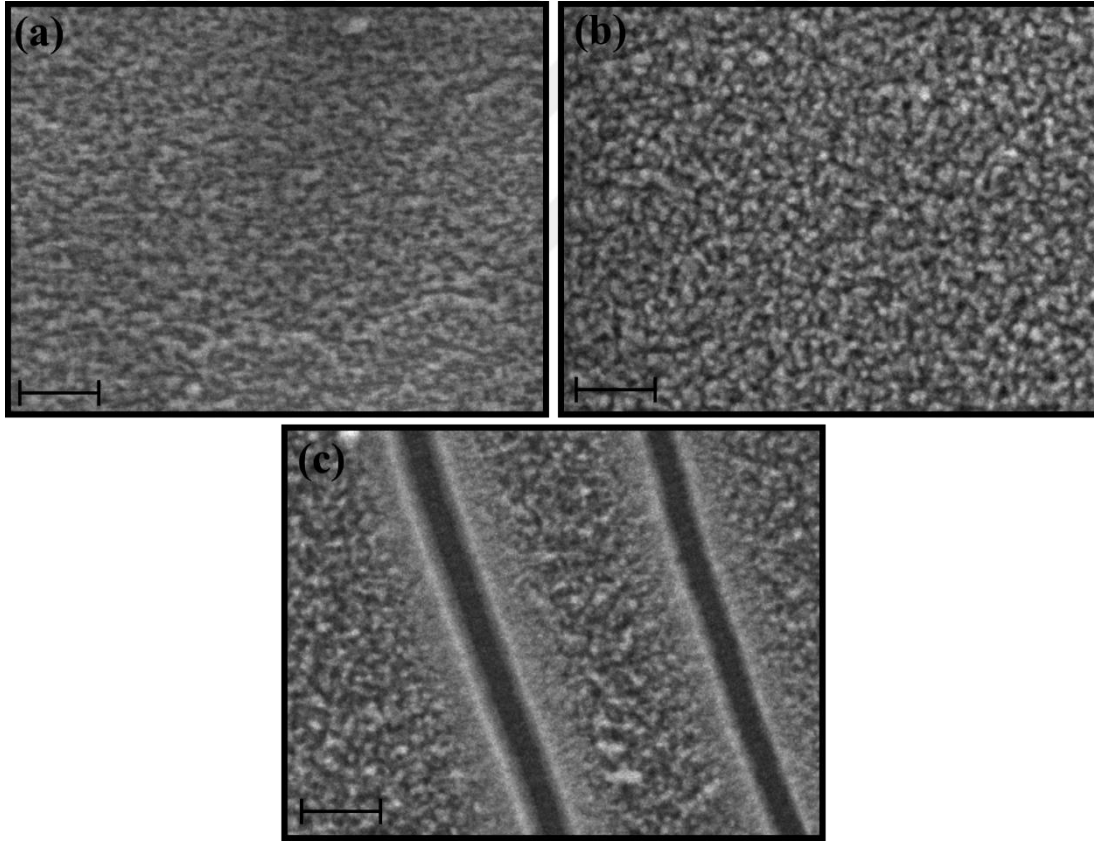
4.4.2 Gözenekli yapı

Bir yarı iletkenin elektrolitik çözelti ile etkileşime girerek çözünebilmesi için yarı iletken yüzeyinde yeterli miktarda pozitif yükün bulunması gerekmektedir. N-tipi yarı iletken malzemelerde baskın olan yük taşıyıcılar negatif yüklü elektronlardır. Bu tür yarı iletkenlerin anodik olarak çözünebilmesi için, yüzeydeki artı yüklü boşlukların sayısının çoğaltılması için yarı iletken yüzeyinin uygun bir ışık kaynağı

ile aydınlatılması gerekir. P-tipi yarı iletkenlerde ise çoğunluk yük taşıyıcılar boşluklar olduğu için, yüzey aydınlatması yapılmadan da elektrokimyasal aşındırma işlemi yapılabilir. Bu nedenle p-tipi GaAs' in karanlık ortamda da elektrokimyasal aşındırma işlemleri gerçekleştirilerek elde edilen bulgular aydınlık ortamda yapılan aşındırma sonuçları ile karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

4.4.2.1 Akım yoğunluğunun etkisi

İlk olarak p-tipi GaAs yarı iletken yüzeyler hacimce (1:3) oranında HF:Etanol elektrolitik çözelti içerisinde aşındırılmıştır. Karanlık bir ortamda 15, 30 ve 45 mA/cm² olmak üzere üç farklı akım yoğunluğunda numuneler hazırlanmıştır. Karanlık bir ortamda 1 dk. süre ile aşındırılan yüzeylerin SEM görüntüleri şekil 4.32'de görülmektedir.

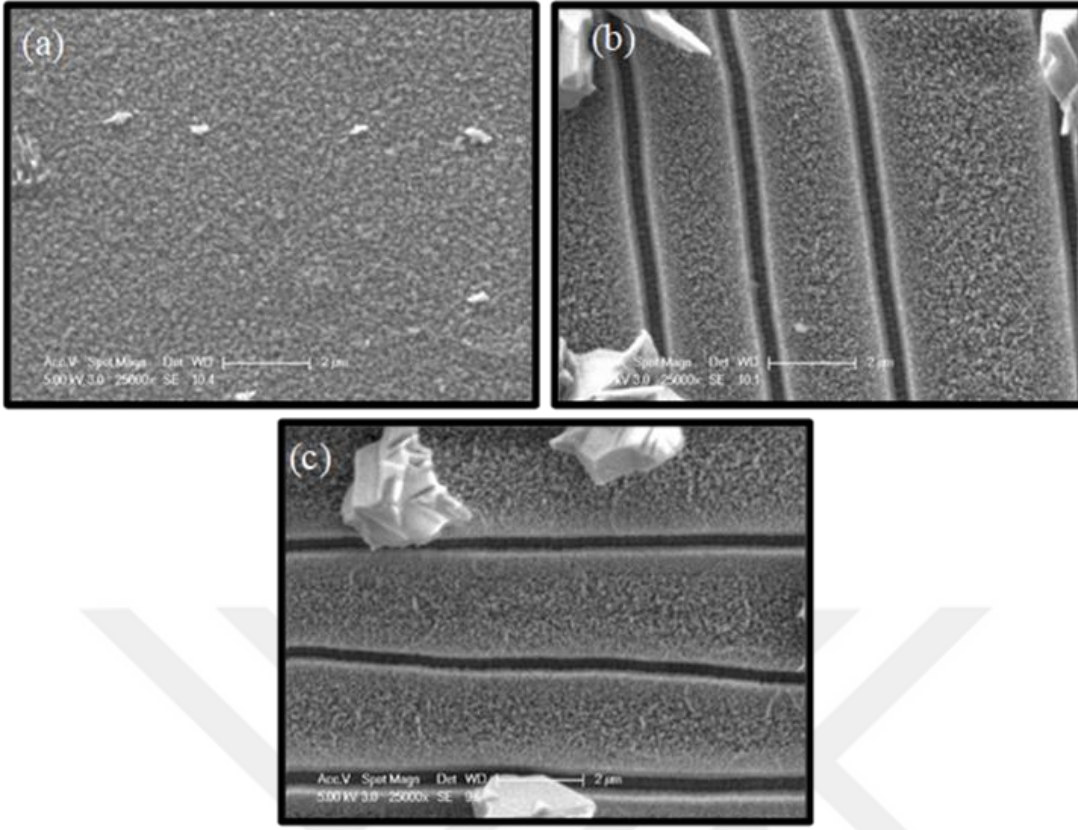


Şekil 4.32 : Karanlıkta (a) 15, (b) 30 ve (c) 45 mA/cm² akım yoğunluğunda aşındırılan yüzeylerin SEM görüntüleri, bütün görüntülerde ölçek 1 mikrondur.

Üzerinden 15 mA/cm² yoğunluğa sahip akım geçirilen GaAs yüzeyinde şekil 4.32 (a)'da görüldüğü gibi çok az miktarda çözünme olmuştur. Akım yoğunluğunun iki katına çıkması (30 mA/cm²) durumunda ise çözünme oranının biraz daha fazla olduğu söylenebilir. 45 mA/cm²'lik yüksek akım yoğunluğun ile aşındırma

gerçekleştirildiğinde ise şekil 4.32 (c)'de görüldüğü gibi GaAs plaka yüzeyinde birbirine paralel mikro yarıklar oluşmuştur. Yarıklar arasındaki mesafe, yarıkların derinliği ve genişliği Image J programı kullanılarak belirlenmiştir. Yarıklar arasındaki ortalama mesafe 2.3 μm , yarık derinliği 180 nm ve yarık genişliği 270 nm olarak ölçülmüştür. Beklenildiği gibi, p-tipi GaAs plaka yüzeyinde herhangi bir yüzey aydınlatılmasına gerek kalmadan elektrokimyasal aşındırma sağlanmış ve numune yüzeyinde homojen bir mikro yapı elde edilmiştir. Bu çalışmada (100) kristal yönelimine sahip p-GaAs plakalar kullanılmıştır. Düşük aktivasyon enerjileri nedeniyle, (100) düzlemindeki atomların yüzeyden ayrılma oranı diğer düzlemlerdeki atomların ayrılma oranından daha fazladır (Chen ve diğerleri, 2018). Weber ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada GaAs yüzeyinde açılan yarıkların birbirine paralel olması, yarı iletkenin (100) olan kristal yönelimi ile ilişkilendirilmiştir (Weber ve diğerleri, 1991). HF asit çözeltisi içinde aşındırdığımız GaAs yüzeyinde birbirine paralel şekilde yerleşmiş mikro yarıkların oluşumu literatür verileriyle de uyumludur.

Halojen lamba aydınlatması altında hacimce (1:3) oranında HF:Etanol elektrolitik çözelti içerisinde 15, 30 ve 45 mA/cm^2 olmak üzere üç farklı akım yoğunluğunda 1 dk aşındırılan numunelerin SEM görüntüleri şekil 4.33' de görülmektedir. 15 mA/cm^2 ' lik akım yoğunluğu ile üretilen numunelerde şekil 4.33 (a)' da görüldüğü gibi SEM resmine göre, GaAs yüzeyinde düzenli bir yapı oluşmamıştır. Akım yoğunluğunun 30 mA/cm^2 değerine çıkarılması sonrasında ise şekil 4.33 (b)' de görüldüğü gibi yüzeyde mikro yarıklar oluşmuştur. Halojen lamba ile yüzeyin aydınlatılması sonrasında daha düşük akım yoğunluğunda yüzeyde mikro yarıklar gözlemlenmiştir. Yarıklar arasındaki ortalama mesafe 2.0 μm , yarık derinliği 160 nm ve yarık genişliği 220 nm olarak ölçülmüştür. 45 mA/cm^2 'lik bir akım uygulandığında ise şekil 4.33 (c)' de görüldüğü gibi, benzer mikro yarıklar oluşmuştur. Yarıklar arasındaki mesafe aynı (2,0 μm) kalırken, yarık genişliği 175 nm'ye azalmış ve daha homojen bir yüzey elde edilmiştir. (100) kristal yönelimine sahip düzlemlerden atomların daha kolay kopması bu yönlerde mikro yarıkların oluşmasına neden olmuştur. Akım yoğunluğundaki artış anodik çözünmenin gerçekleştiği düzlemlerin sayısının artmasına ve dolayısıyla da daha homojen bir yüzey oluşmasına neden olmaktadır.

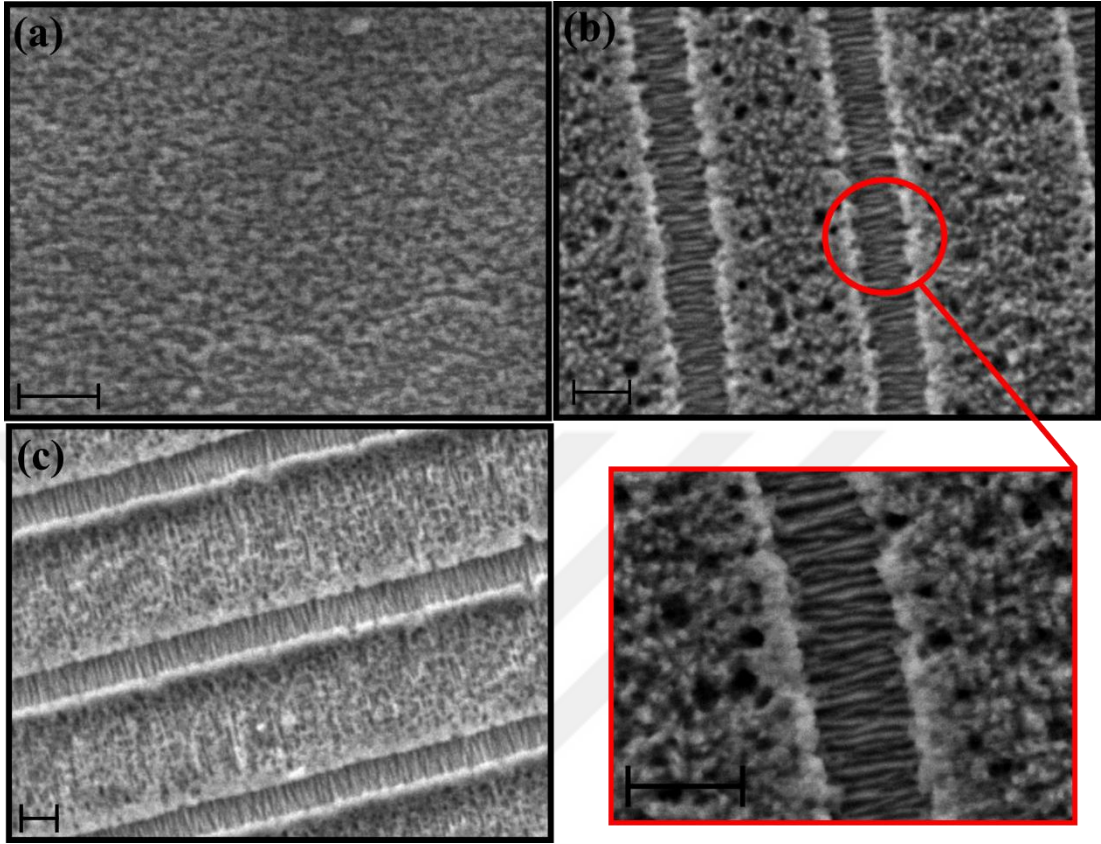


Şekil 4.33 : Halojen lamba aydınlatması ile farklı akım yoğunluklarında aşındırılan GaAs yüzeylerin yüksek büyütmeli SEM resimleri (a) 15, (b) 30 ve (c) 45 mA/cm².

4.4.2.2 Aşındırma süresinin etkisi

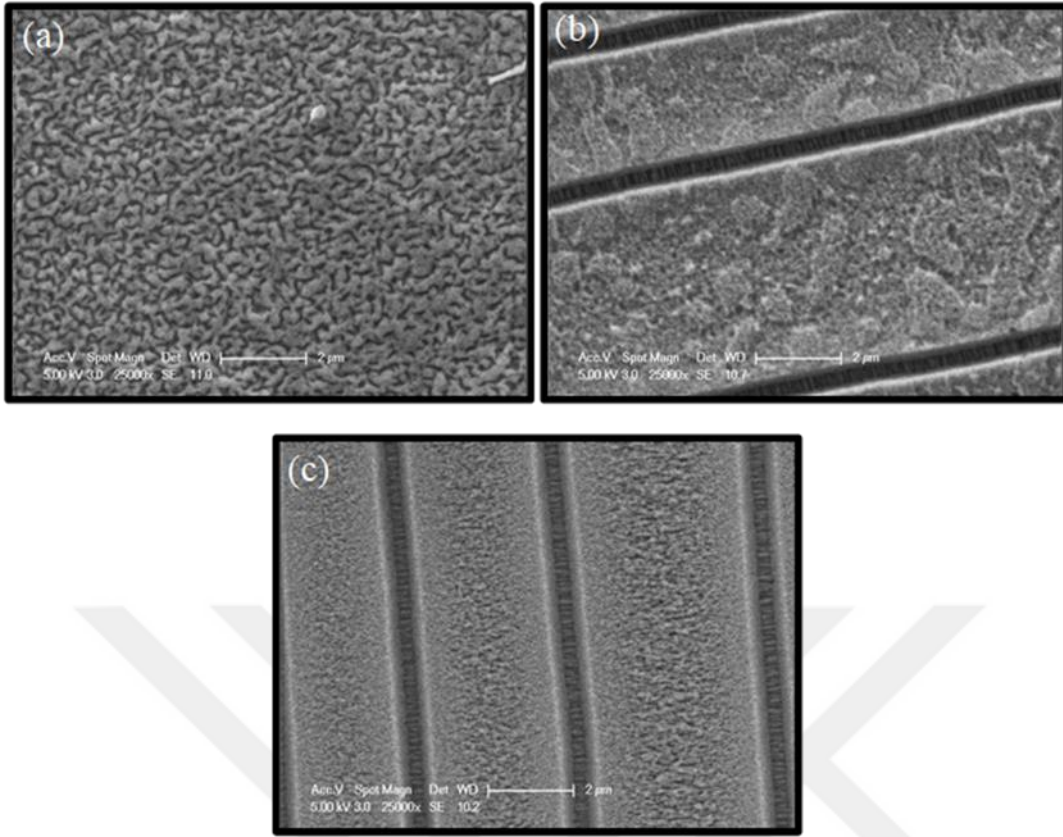
İlk olarak p-GaAs numuneler karanlık ortamda 1:3 oranında HF:Etanol çözeltisi içerisinde 15 mA/cm² akım yoğunluğu ile 1, 2 ve 3 dk aşındırılarak aşındırma süresinin üretilen GaAs yüzey üzerindeki etkisi incelenmiştir. 1dk aşındırılan numunelerin yüzeyinde mikro yarık oluşumunun gerçekleşmediğinden daha önce bahsedilmişti. GaAs yüzeyinin 2 dk. süre ile karanlık ortamda aşındırılması sonucunda ise şekil 4.34 (b)' de verilen SEM görüntüsünde de görüldüğü gibi yüzeyde mikro yarıklar oluşmuştur. Yarıkların genişliğinin 800 nm'ye arttığı açıkça görülmektedir. SEM resimleri kullanılarak, mikro yarıklar arasında kalan bölgenin kalınlığı (yarıkların derinliği) ise 70 nm olarak ölçülmüştür. Aynı zamanda mikro yarıkların zemininde mikro yarıklara dik olarak yönelen ve genişliği 40 nm olan nano yarıklar oluşmuştur. Aşındırma süresinin 3 dakika olması durumunda ise şekil 4.34 (c)' de görüldüğü gibi yüzeyden kopan atom miktarının artışı ile beraber mikro yarıkların genişliği de artmıştır ve yarıklar arasında kalan bölgenin kalınlığı da 30 nm'ye kadar azalmıştır. SEM görüntülerine göre yarıklar arasında kalan bölgenin genişliği 3,5 µm'dir. Bu numunenin şekil 4.34 (c)' de verilen SEM görüntüsünde de

acıka görüldüğü gibi, yarıklar arasındaki bölgelerin daha da aşındığı, nerdeyse yok olmaya başladığı ve yüzey morfolojisinin değiştiği görülmektedir. Mikro yarıkların yerini birbirine paralel olarak dizilmiş nano boyutta yarıklar almıştır.



Şekil 4.34 : Karanlık ortamda (a) 1, (b) 2 ve (c) 3 dk süreyle aşındırılan p-GaAs yarı iletkenlerinin SEM görüntüleri. Bütün görüntülerde ölçek 1 mikrondur.

Halojen lamba aydınlatması ile hacimce (1:3) oranında HF:Etanol elektrolitik çözelti içerisinde 15 mA/cm^2 akım yoğunluğunda 1, 2, 3, 4 dk aşındırılan numunelerin SEM görüntüleri şekil 4.35’de verilmiştir. Aşındırma süresinin 1 dk. olan numunenin yüzeyinde herhangi bir mikro yarık oluşumuna rastlanmadığından daha önce bahsedilmişti. Aşınma süresi 2 dk olan GaAs yüzeyinde de şekil 4.35 (a)’ da görüldüğü gibi herhangi bir mikro yarık oluşumuna rastlanmamıştır. Aşındırma süresinin 3 dk.’ ya çıktığında ise şekil 4.35 (b)’ de görüleceği gibi mikro yarıklar oluşmuştur. Yarıklar arası mesafe, yarık genişliği ve yarıkların derinliği sırasıyla $5 \mu\text{m}$, 330 nm ve 210 nm olarak ölçülmüştür. Elektrokimyasal aşındırma süresinin 4 dk. ’ya uzatılması halinde ise şekil 4.35 (d)’ ye göre yüzeyde benzer mikro yarıklar oluşmuştur. Ancak aşındırma süresindeki artış, yarıklar arasındaki mesafenin $3,2 \mu\text{m}$ ’ye kadar azalmasına neden olmuştur.

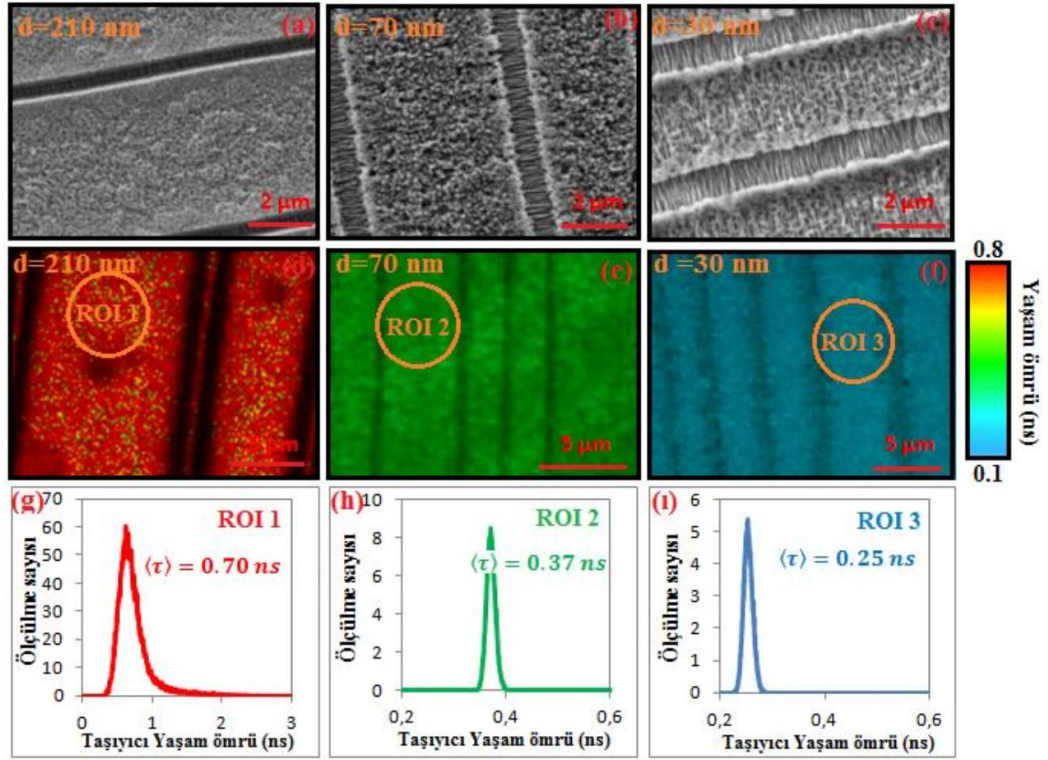


Şekil 4.35 : Farklı sürelerde aşındırılan GaAs yüzeylerin yüksek büyütmeli SEM resimleri (a) 2, (b) 3, (c) 4 dk.

4.4.2.3 Mikro yarıkların FLIM analizi sonuçları

FLIM analizleri yapılırken farklı yarık derinliğine sahip üç numune seçilmiştir. Şekil 4.36 (a), (b) ve (c)' de yarık derinliği 210, 70 ve 30 nm olan numunelerin SEM resimleri ve şekil 4.36(d), (e) ve (f)' de ise yaşam ömrüne bağlı FLIM resimleri verilmiştir. FLIM resimlerinde görülen renk kontrastı numune yüzeyindeki floresan yaşam ömrünü temsil etmektedir. Burada kullanılan FLIM resimleri için 0,1 ns turkuaz ve 0,8 ns kırmızı aralığında değişen renk skalası vardır. Numunelerin yüzeyinden alınan FLIM resimlerinden en kalın GaAs yüzeyinin ağırlıklı olarak kırmızı (şekil 4.36 (d)), orta kalınlığa sahip GaAs yüzeyinin yeşil (şekil 4.36 (e)) ve en ince GaAs yüzeyinin mavi (şekil 4.36 (f)) renklere sahip olduğu görülmektedir. İlgili renk skalasına göre farklı kalınlıklara sahip GaAs yüzeylerde ki floresan yaşam ömrünün kalınlığa bağlı olarak değişiklik gösterdiği söylenebilir. FLIM resimleri üzerindeki ağırlıklı floresan yaşam ömrünü belirlemek için yaşam ömrü histogramları kullanılmıştır. Bu histogramlar numune yüzeyinde hangi yaşam ömrü değerinin kaç kez ölçüldüğü özetleyen grafiklerdir. Kalınlığı 210 nm olan numune

yüzeyinden elde edilen histogramda şekil 4.36 (g)' de görüldüğü gibi tepe noktası yaklaşık olarak 0,70 ns' dir. Başka bir deyişle numune yüzeyinde hâkim olan taşıyıcı yaşam ömrü 0,70 ns' dir. Diğer numunelere ait histogramlar incelendiğinde ise, pik değerinin orta kalınlığa (70 nm) sahip numune yüzeyinde 0,37 ns (şekil 4.36 (h)) iken ince yüzeyde (30 nm) 0,25 ns (şekil 4.36 (i)) kadar düştüğü görülmektedir.



Şekil 4.36 : Farklı kalınlıktaki mikro yarıkların (a), (b) ve (c) SEM resimleri, (d), (e) ve (f) yaşam ömrüne bağlı FLIM resimleri ve (g), (h) ve (i) seçilen ROI bölgelerindeki yaşam ömrü histogramları.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Proje kapsamında, n ve p tipi galyum arsenik yüzeyleri üzerinde farklı karakterde üç boyutlu mikro ve nano yapılar çift hücreli elektrokimyasal aşındırma tekniği ile kullanılarak üretilmiştir. Akım yoğunluğu, aşındırma süresi, aydınlatma kaynağı türü, elektrolitik çözelti türü gibi elektrokimyasal aşındırma parametrelerinin elde edilen yüzey üzerindeki etkisi incelenmiştir. Aşındırma parametreleri değiştirilerek farklı morfolojideki mikro ve nano yapılar n ve p tipi GaAs yüzeyler üzerinde başarıyla oluşturulmuştur.

HF:Ethanol içerisinde aşındırılan n ve p tipi GaAs yüzeyler üzerinde farklı boyutlarda altıgen kesitli mikro ve nano çubuklar oluşturulmuştur. Yapılan XPS ve EDS analizleri bu yapıların Ga_2O_3 olduğunu göstermektedir. Ga_2O_3 bant aralığı 4,8 eV değerine sahip ultra geniş bant aralığına sahip bir yarı iletkenidir. Bu özelliği ile Ga_2O_3 yarı iletkeni güneş ışığını algılamayan 300 nm altı düşük dalga boyuna hassas fotodetektörlerin yapımında kullanılmaktadır. Ayrıca Ga_2O_3 oksit bir yarı iletken olduğu için oksidasyona karşı dirençlidir. Bu nedenle yüksek sıcaklık sinyal işleme, zorlu ortam elektronikleri ve kablosuz iletişim cihazları/devrelerinde tercih edilebilir olması Ga_2O_3 yarı iletken üretimini son dönemlerin popüler çalışma konusu haline getirmiştir (Higashiwaki, 2022; Liu ve Tang, 2023; Tsao ve diğerleri, 2018; Wu ve diğerleri, 2022). Bu oksit bileşiklerinin, elektrokimyasal aşındırma gibi yatırım maliyeti düşük bir süreçle oda koşullarında mikro ve nano boyutta üretilmesi dikkat çekici literatüre önemli katkı yapacak bir sonuçtur. Aşındırma parametreleri değiştirilerek Ga_2O_3 yapıların büyüme hızı ve boyut dağılımı kontrolü sağlanmıştır. Ga_2O_3 yapıların elektronik yapısı fotoluminesans spektroskopisi ile belirlenmiştir. Altıgen kesitli mikro ve nano çubuklar 470 nm’ de pik yapan geniş bantlı bir ışıma yapmıştır. 3B yapıların boyutunun küçülmesi ile birlikte yüzey rekombinasyonlarının baskınlaşması sonucu elektron-boşluk rekombinasyon hızı artmış olup floresan yaşam ömrü azalırken floresan şiddeti de yükselmiştir. Ayrıca GaAs yüzeyinde oluşan Ga_2O_3 çubuk yapılarına perilen boya molekülü bağlanmıştır ve bu yapılar ile organik boya molekülleri arasındaki etkileşim FLIM tekniği kullanılarak

incelenmiştir. Boya molekülleri ve Ga₂O₃ arasındaki boyuta bağlı elektron transferi oranları hesaplanmış daha küçük boyutlu Ga₂O₃ malzemelere elektron transferi oranı daha yüksek çıkmıştır. Literatür taramalarında Ga₂O₃ kristalleri üzerine boya bağlanarak bu kristallerle boya molekülleri arasındaki elektron transferi oranını inceleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle bu bulgular literatürde bir boşluğu dolduracaktır.

GaAs numuneler üzerinde As₂O₃ kristallerine de rastlanmıştır. Bu kristaller GaAs' in çözünmesi sırasında yüzeyde oluşmaktadır, aşındırma süresinin uzaması durumunda As₂O₃ kristalleri tekrar GaAs ile reaksiyona girerek eşitlik 5.1' de görüldüğü gibi Ga₂O₃'e dönüştüğü aşındırma süresi uzatılarak gösterilmiştir.



Numune üzerinden geçirilen akımın şiddetinin artırılması erken evrelerde daha fazla As oluşmasına neden olduğundan akım şiddetinin artırılması ile yüzeyde daha fazla As₂O₃ oluşmuştur. Aşındırma süresi arttığı zaman oluşan As₂O₃ kristalleri Ga₂O₃'e dönüşmüştür. Oluşturulan As₂O₃ kristallerinin ışıma özellikleri de incelenmiştir. Literatüre uygun olarak As₂O₃ kristallerinden kaynaklı 520 nm' de pik yapan geniş bantlı bir ışıma gözlemlenmiştir. Işıma şiddetinin As₂O₃ yoğunluğu ile artması bu ışımanın As₂O₃ kaynaklı olduğunu göstermiştir. As₂O₃ medikal uygulamalarda özellikle kanser tedavisinde kemoterapötik bir ajan olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle elektrokimyasal aşındırma sonucu As₂O₃ kristallerinin elektrokimyasal aşındırma gibi kurulumu basit ve düşük maliyetli bir yöntem ile üretilmesi dikkat çekici literatüre önemli katkı yapacak bir sonuçtur.

HCl-saf su ortamında aşındırılan n-GaAs numunelerde gözenekli bir yapı elde edilmiştir. Gözenekli yapının yoğunluğu akım şiddeti ve sürenin artışı ile birlikte artmıştır. Homojen bir gözenekli yapı elde edilmesi için halojen lamba aydınlatması ile 30 mA/cm² akım yoğunluğunda 1 dk veya 20 mA/cm² akım yoğunluğunda 2 dk aşındırma yapılması gerektiği ortaya çıkarılmıştır. 50 mW/cm² gücünde 470 nm darbeli lazer ile aydınlatılma yapıldığında ise 20 mA/cm² akım yoğunluğunda 1 dk aşındırma yapılması yeterli olmuştur. Gözenekli yapıların ışıma özellikleri incelenmiştir ve 470 nm ve 680 nm civarlarında iki tepeli bir ışıma gözlemlenmiştir. Bu iki tepeli ışımanın şiddeti gözenek yoğunluğu ile beraber artmıştır. FLIM analizleri gözenekli bölgelerde ışıma şiddetinin arttığını floresan yaşam ömrünün

azaldığını dolayısı ile elektron boşluk rekombinasyon hızının arttığını göstermiştir. Gözenekli GaAs yapılar nem sensörü, gaz sensörü, güneş paneli uygulamalarında yığın haldeki GaAs'e göre daha iyi performansla çalışmaktadır (Flamand ve Poortmans, 2005; Salehi ve diğerleri, 2006; Salehi, ve diğerleri, 2006). Alan emisyonu uygulamalarında da gözenekli GaAs yapıların performansı ilgi çekicidir (Ducroquet ve diğerleri, 1998; Tondare ve diğerleri, 2002). Ayrıca son dönemde gözenekli GaAs yapıların hidrofobik özellikleri de rapor edilmiştir (Naddaf, 2022). Bu açıdan bakıldığında yığın haldeki GaAs yarıiletkenini elektrokimyasal aşındırma gibi yatırım maliyeti düşük bir süreçle oda koşullarında gözenekli hale getirmek ve aşındırma koşullarının gözenek yapısına etkisinin incelenmesi, gözenekli bölgelerdeki elektron- boşluk rekombinasyon hızının belirlenmesi önemli sonuçlardır.

HF- Ethanol ortamında aydınlatılan p-GaAs yüzeyinde mikro yarıklar oluşturulmuştur. Aşındırma süresinin ve akım yoğunluğunun artışı sonucunda yüzeyde oluşan paralel mikro yarıkların birbirlerine olan uzaklığı ve derinliği azalmıştır. Aynı şekilde aşındırma sırasında yüzeyin aydınlatılması mikro yarıkların morfolojisini etkilemiştir. Mikro yarıklar FLIM mikroskobu ile görüntülenmiş ve aşındırılmış yarı iletken yüzeyindeki etkin rekombinasyon süreçleri incelenmiştir. Mikro yarıkların derinliği azaldıkça, yüzey rekombinasyonlarının etkisinin artması sonucunda etkin rekombinasyon yaşam ömrü değeri 0,25 ns' ye düşmüştür.



KAYNAKLAR

- Acikgoz, S., Yungevis, H., Özunal, E. ve Şahin, A. (2017). Low-cost, fast and easy production of germanium nanostructures and interfacial electron transfer dynamics of BODIPY–germanium nanostructure system. *Journal of Materials Science*, 52(22). doi:10.1007/s10853-017-1434-6
- Acikgoz, Sabriye, Bilen, B., Saygili, A. C., Aktas, G., Sanyal, A. ve Inci, M. N. (2012a). Wavelength and coherence effects on the growth mechanism of silicon nanopillars and their use in the modification of spontaneous lifetime emission of BODIPY dye molecules. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 108(4), 801-807. doi:10.1007/s00339-012-6972-9
- Acikgoz, Sabriye, Bilen, B., Saygili, A. C., Aktas, G., Sanyal, A. ve Inci, M. N. (2012b). Wavelength and coherence effects on the growth mechanism of silicon nanopillars and their use in the modification of spontaneous lifetime emission of BODIPY dye molecules. *Appl. Phys. A Mater.*, 108(4), 801. doi:10.1007/s00339-012-6972-9
- Acikgoz, Sabriye, Ulusu, Y., Akin, S., Sonmezoglu, S., Gokce, I. ve Inci, M. N. (2014). Photoinduced electron transfer mechanism between green fluorescent protein molecules and metal oxide nanoparticles. *Ceramics International*, 40(2), 2943-2951. doi:10.1016/J.CERAMINT.2013.10.017
- Acikgoz, Sabriye, Yungevis, H., Özunal, E. ve Şahin, A. (2017). Low-cost, fast and easy production of germanium nanostructures and interfacial electron transfer dynamics of BODIPY–germanium nanostructure system. *J. Mater. Sci.*, 52(22), 13149. doi:10.1007/s10853-017-1434-6
- Adachi, H. ve Wasa, K. (2012). Thin Films and Nanomaterials. *Handbook of Sputter Deposition Technology: Fundamentals and Applications for Functional Thin Films, Nano-Materials and MEMS: Second Edition*, 3-39. doi:10.1016/B978-1-4377-3483-6.00001-2
- Akin, S., Açıkgoz, S., Gülen, M., Akyürek, C. ve Sönmezoğlu, S. (2016). Investigation of the photoinduced electron injection processes for natural dye-sensitized solar cells: the impact of anchoring groups. *RSC Advances*, 6(88), 85125-85134. doi:10.1039/C6RA19653E
- Arita, Y. ve Sunohara, Y. (t.y.). *Formation and Properties of Porous Silicon Film*.
- Atwater, H. A., Kanemitsu, Y., Tanaka, H., Fukunishi, Y., Kushida, T. ve Min, K. S. (2000). Visible light emission from GaAs nanocrystals in films fabricated by sequential ion implantation. *APS*, 62(8), 5100-5108. doi:10.1103/PhysRevB.62.5100
- Baláz, P. (2008). Mechanochemistry in nanoscience and minerals engineering. *Mechanochemistry in Nanoscience and Minerals Engineering*, 1-413. doi:10.1007/978-3-540-74855-7/COVER
- Binet, L. ve Gourier, D. (1998). ORIGIN OF THE BLUE LUMINESCENCE OF β -Ga₂O₃. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 59(8), 1241-1249. doi:10.1016/S0022-3697(98)00047-X

- Bioud, Y. A., Boucherif, A., Belarouci, A., Paradis, E., Drouin, D. ve Arès, R. (2016). Chemical Composition of Nanoporous Layer Formed by Electrochemical Etching of p-Type GaAs. *Nanoscale Res. Lett.*, 11(1), 446. doi:10.1186/s11671-016-1642-z
- Canham, L. T. (1990). Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers. *Applied Physics Letters*, 57(10), 1046-1048. doi:10.1063/1.103561
- Chen, W., Liu, Y., Yang, L., Wu, J., Chen, Q., Zhao, Y., ... Du, X. (2018). Difference in anisotropic etching characteristics of alkaline and copper based acid solutions for single-crystalline Si. *Scientific Reports* 2018 8:1, 8(1), 1-8. doi:10.1038/s41598-018-21877-x
- Cossu, G., Ingo, G., Mattogno, G., ... G. P.-A. surface ve 1992, undefined. (t.y.). XPS investigation on vacuum thermal desorption of UV/ozone treated GaAs (100) surfaces. *Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/016943329290219N> adresinden erişildi.
- Daimon, T. ve Nihei, E. (2013a). Fabrication of a poly(3-octylthiophene-2,5-diyl) electrochemiluminescence device assisted by perylene. *Materials*, 6(5), 1704. doi:10.3390/ma6051704
- Daimon, T. ve Nihei, E. (2013b). Fabrication of a Poly(3-octylthiophene-2,5-diyl) Electrochemiluminescence Device Assisted by Perylene. *Materials* 2013, Vol. 6, Pages 1704-1717, 6(5), 1704-1717. doi:10.3390/MA6051704
- Das, M. ve Sarkar, D. (2016). Morphological and optical properties of n-type porous silicon: effect of etching current density. *Bull. Mater. Sci*, 39(7), 1671-1676. doi:10.1007/s12034-016-1332-6
- Ducroquet, F., Kropfeld, P., Yaradou, O. ve Vanoverschelde, A. (1998). Fabrication and emission characteristics of GaAs tip and wedge-shaped field emitter arrays by wet etching. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 16(2), 787-789. doi:10.1116/1.589905
- Epp, J. M. ve Dillard, J. G. (1989). Effect of Ion Bombardment on the Chemical Reactivity of Gallium Arsenide(100). *Chemistry of Materials*, 1(3), 325-330. doi:10.1021/CM00003A010
- Feng, Q., Li, F., Dai, B., Jia, Z., Xie, W., Xu, T., ... Hao, Y. (2015). The properties of gallium oxide thin film grown by pulsed laser deposition. *Appl. Surf. Sci.*, 359, 847. doi:10.1016/j.apsusc.2015.10.177
- Finnie, C. M., Li, X. ve Bohn, P. W. (1999). Production and evolution of composition, morphology, and luminescence of microcrystalline arsenic oxides produced during the anodic processing of (100) GaAs. *Journal of Applied Physics*, 86(9). doi:10.1063/1.371470
- Flamand, G. ve Poortmans, J. (2005). Porous GaAs as a possible antireflective coating and optical diffusor for III-V solar cells. *physica status solidi (a)*, 202(8), 1611-1615. doi:10.1002/PSSA.200461199
- Furube, A., Murai, M., Tamaki, Y., Watanabe, S. ve Katoh, R. (2006). Effect of aggregation on the excited-state electronic structure of perylene studied by transient absorption spectroscopy. *J. Phys. Chem. A*, 110(20), 6465. doi:10.1021/jp060649b
- Gaponenko, S. V. ve Demir, H. V. (2018). *Applied Nanophotonics*. *Applied Nanophotonics*. doi:10.1017/9781316535868

- Goryachev, D. N. ve Sreseli, O. M. (1997). *AMORPHOUS, GLASSY, AND POROUS SEMICONDUCTORS Photoluminescence of porous gallium arsenide*.
- Goudon, T. ve Miljanovi'c, V. (2007). ON THE SHOCKLEY-READ-HALL MODEL: GENERATION-RECOMBINATION IN SEMICONDUCTORS *. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 67(4), 1183-1201. doi:10.1137/060650751
- Higashiwaki, M. (2022). β -Ga₂O₃ material properties, growth technologies, and devices: a review. *AAPPS Bulletin*, 32(1). doi:10.1007/S43673-021-00033-0
- Hirschman, K. D., Tsybeskov, L., Duttagupta, S. P., Fauchet, P. M., Hirschman, K. D., Tsybeskov, L., ... Fauchet, P. M. (1996). Silicon-based visible light-emitting devices integrated into microelectronic circuits. *Natur*, 384(6607), 338-341. doi:10.1038/384338A0
- Hoffmann, H. J., Woodall, J. M. ve Chappell, T. I. (1981). Voltage-controlled photoetching of GaAs. *Applied Physics Letters*, 38(7), 564-566. doi:10.1063/1.92414
- Huang, C., Mu, W., Zhou, H., Zhu, Y., Xu, X., Jia, Z., ... Tao, X. (2018). Effect of OH – on chemical mechanical polishing of β -Ga₂O₃ (100) substrate using an alkaline slurry. *RSC Advances*, 8(12), 6544-6550. doi:10.1039/C7RA11570A
- Iwami, M., Watanabe, Y., Kato, H., Nakayama, M. ve Sano, N. (1987). Structure of GaAs-In_{0.2}Ga_{0.8}As heterojunction interface studied by electron spectroscopies: X-ray photoelectron spectroscopy, tunable electron energy loss spectroscopy and Auger electron spectroscopy. *Thin Solid Films*, 146(3), 291-297. doi:10.1016/0040-6090(87)90436-6
- Jangir, R., Porwal, S., Tiwari, P., Mondal, P., Rai, S. K., Srivastava, A. K., ... Ganguli, T. (2016). Correlation between surface modification and photoluminescence properties of β -Ga₂O₃ nanostructures. *AIP Advances*, 6(3), 35120. doi:10.1063/1.4944908/966358
- Kim, D. H., Yoo, S. H., Chung, T. M., An, K. S., Yoo, H. S. ve Kim, Y. (2002). Chemical Vapor Deposition of Ga₂O₃ Thin Films on Si Substrates. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 23(2), 225-228. doi:10.5012/BKCS.2002.23.2.225
- Kopani, M., Mikula, M., Kosnac, D., Kovac, J., Trnka, M., Gregus, J., ... Pincik, E. (2020). Effect of etching time in hydrofluoric acid on the structure and morphology of n-type porous silicon. doi:10.1016/j.apsusc.2020.147463
- Kulik, M., Kołodyńska, D., Żuk, J., A, F. K.-... P. P. ve 2013, undefined. (t.y.). Chemical Composition of Native Oxide Layers on Implanted and Thermally Annealed GaAs. *bibliotekanauki.pl*. <https://bibliotekanauki.pl/articles/1400486.pdf> adresinden erişildi.
- Liliental-Weber, Z., Claverie, A., Washburn, J., Smith, F. ve Calawa, R. (1991). Microstructure of annealed low-temperature-grown GaAs layers. *Applied Physics A Solids and Surfaces*, 53(2), 141-146. doi:10.1007/BF00323874/METRICS
- Liu, Z. ve Tang, W. (2023). A review of Ga₂O₃ deep-ultraviolet metal–semiconductor Schottky photodiodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 56(9), 093002. doi:10.1088/1361-6463/ACB6A5
- Lockwood, D. J., Schmuki, P., Labbé, H. J. ve Fraser, J. W. (1999). Optical properties of porous GaAs. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 4(2), 102-110. doi:10.1016/S1386-9477(98)00259-8

- Marcus, R. A. ve Sutin, N. (1985). Electron transfers in chemistry and biology. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Reviews on Bioenergetics*, 811(3), 265-322. doi:[https://doi.org/10.1016/0304-4173\(85\)90014-X](https://doi.org/10.1016/0304-4173(85)90014-X)
- Md Taib, M. I., Zainal, N. ve Hassan, Z. (2014). Improvement of porous GaAs (100) structure through electrochemical etching based on DMF solution. *Journal of Nanomaterials*, 2014. doi:10.1155/2014/294385
- Mizokawa, Y., Iwasaki, H., Nishitani, R. ve Nakamura, S. (1978). Esca studies of Ga, As, GaAs, Ga₂O₃, As₂O₃ and As₂O₅. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 14(2), 129-141. doi:10.1016/0368-2048(78)85061-0
- Mizuguchi, J. ve Tojo, K. (2002). Electronic structure of perylene pigments as viewed from the crystal structure and excitonic interactions. *Journal of Physical Chemistry B*, 106(4), 767-772. doi:10.1021/JP012909P
- Naddaf, M. (2017). Structural and optical properties of electrochemically etched p+-type GaAs surfaces: influence of HF presence in the etching electrolyte. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28(22), 16818-16825. doi:10.1007/s10854-017-7597-8
- Naddaf, M. (2022). Formation of superhydrophobic porous GaAs layer: effect of substrate doping type. *Bulletin of Materials Science*, 45(2), 1-7. doi:10.1007/S12034-021-02639-4/FIGURES/9
- Naddaf, M. ve Saloum, S. (2009). Nanostructuring-induced modification of optical properties of p-GaAs (1 0 0). *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 41(10), 1784-1788. doi:10.1016/j.physe.2009.06.086
- Nagashima, K. ve Velan, S. S. (2013). Understanding the singlet and triplet states in magnetic resonance. *Concepts in Magnetic Resonance Part A*, 42(5), 165-181. doi:10.1002/CMR.A.21282
- Nogueras, J. M. D. T. (2020). Nanofabrication. *Nanofabrication*. doi:10.1088/978-0-7503-2608-7
- Ostermayer, F. W. ve Kohl, P. A. (1981). Photoelectrochemical etching of p-GaAs. *Applied Physics Letters*, 39(1), 76-78. doi:10.1063/1.92522
- Pozina, G., Forsberg, M., Kaliteevski, M. A. ve Hemmingsson, C. (2017). Emission properties of Ga₂O₃ nano-flakes: effect of excitation density. *Scientific Reports* 2017 7:1, 7(1), 1-8. doi:10.1038/srep42132
- Rehm, D. ve Weller, A. (1970). Kinetics of Fluorescence Quenching by Electron and H-Atom Transfer. *Israel Journal of Chemistry*, 8(2), 259-271. doi:10.1002/IJCH.197000029
- Richter, A., Steiner, P., ... F. K.-I. E. D. ve 1991, undefined. (t.y.). Current-induced light emission from a porous silicon device. *ieeexplore.ieee.org*. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/116957/?casa_token=h3jWAmDsRrQAAAAA:vHedNArNGJ3dApftjsqLjlqj4JbpvUxv-x2kKQZ2TG228Z7B0tf8qJUeY1DgiRGPS1xPGS_YcW0 adresinden erişildi.
- Ritenour, A. J., Levinrad, S., Bradley, C., Cramer, R. C. ve Boettcher, S. W. (2013). Electrochemical nanostructuring of n -GaAs photoelectrodes. *ACS Nano*, 7(8), 6840-6849. doi:10.1021/NN4020104
- Saitoh, T., Matsubara, S. ve Minagawa, S. (1975). Effects of Illumination on Preferential Etching of N-Type GaAs in a CrO₃ - HF - AgNO₃ Solution. *Journal of The Electrochemical Society*, 122(5), 670-674. doi:10.1149/1.2134289/XML
- Salehi, A., Kalantari, D. J. ve Goshtasbi, A. (2006). Rapid response of Au/Porous-GaAs humidity sensor at room temperature. *Conference on Optoelectronic and*

- Microelectronic Materials and Devices, Proceedings, COMMAD*, 125-128. doi:10.1109/COMMAD.2006.4429896
- Salehi, A., Nikfarjam, A. ve Kalantari, D. J. (2006). Pd/porous-GaAs Schottky contact for hydrogen sensing application. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 113(1), 419-427. doi:10.1016/J.SNB.2005.03.064
- Sauer, M., Hofkens, J. ve Enderlein, J. (2011). Handbook of Fluorescence Spectroscopy and Imaging: From Single Molecules to Ensembles. *Handbook of Fluorescence Spectroscopy and Imaging: From Single Molecules to Ensembles*. doi:10.1002/9783527633500
- Schmuki, P., Lockwood, D. J., Labbé, H. J. ve Fraser, J. W. (1996a). Visible photoluminescence from porous GaAs. *Applied Physics Letters*, 69(11), 1620-1622. doi:10.1063/1.117050
- Schmuki, P., Lockwood, D. J., Labbé, H. J. ve Fraser, J. W. (1996b). Visible photoluminescence from porous GaAs. *Applied Physics Letters*, 69(11), 1620-1622. doi:10.1063/1.117050
- Seredin, P. v., Lenshin, A. S., Fedyukin, A. v., Goloshchapov, D. L., Lukin, A. N., Arsentyev, I. N. ve Zhabotinsky, A. v. (2018). Effect of Conditions of Electrochemical Etching on the Morphological, Structural, and Optical Properties of Porous Gallium Arsenide. *Semiconductors*, 52(9), 1163-1170. doi:10.1134/S1063782618090154
- Stafe, M., Marcu, A. ve Puscas, N. N. (2014). Pulsed Laser Ablation of Solids. Springer Series in Surface Sciences, 53. doi:10.1007/978-3-642-40978-3
- Sun, C., Deng, J., Kong, L., Chen, L., Shen, Z., Cao, Y., ... Wang, X. (2017). Structure and Photoluminescence Properties of β -Ga₂O₃ Nanofibres Synthesized via Electrospinning Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 275(1), 012046. doi:10.1088/1757-899X/275/1/012046
- Surdu-Bob, C. C., Saied, S. O. ve Sullivan, J. L. (2001). An X-ray photoelectron spectroscopy study of the oxides of GaAs. *Applied Surface Science*, 183(1-2), 126-136. doi:10.1016/S0169-4332(01)00583-9
- Thomas, S., Kalarikkal, N., Wu, J., Sakho, E. H. M. ve Oluwafemi, S. O. (2019). Nanomaterials for solar cell applications. *Nanomaterials for Solar Cell Applications*, 1-743. doi:10.1016/C2016-0-03432-0
- Tisone, G. C. ve Johnson, A. W. (1983). Laser-controlled etching of chromium-doped $\langle 100 \rangle$ GaAs. *Applied Physics Letters*, 42(6), 530-532. doi:10.1063/1.93994
- Tiwari, J. N., Tiwari, R. N. ve Kim, K. S. (2012). Zero-dimensional, one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional nanostructured materials for advanced electrochemical energy devices. *Progress in Materials Science*, 57(4), 724-803. doi:10.1016/J.PMATSCI.2011.08.003
- Tondare, V. N., Naddaf, M., Bhise, A. B., Bhoraskar, S. V., Joag, D. S., Mandale, A. B. ve Sainkar, S. R. (2002). Stability of field emission current from porous n-GaAs(110). *Applied Physics Letters*, 80(6), 1085-1087. doi:10.1063/1.1436535
- Tsao, J. Y., Chowdhury, S., Hollis, M. A., Jena, D., Johnson, N. M., Jones, K. A., ... Simmons, J. A. (2018). Ultrawide-Bandgap Semiconductors: Research Opportunities and Challenges. *Advanced Electronic Materials*, 4(1), 1600501. doi:10.1002/AELM.201600501
- Tseng, C.-Y., Ho, C.-H. ve Tien, L.-C. (2010). Thermoreflectance characterization of β -Ga₂O₃ thin-film nanostrips. *Optics Express*, Vol. 18, Issue 16, pp. 16360-16369, 18(16), 16360-16369. doi:10.1364/OE.18.016360

- Uhlir, A. (1956). Electrolytic Shaping of Germanium and Silicon. *Bell System Technical Journal*, 35(2), 333-347. doi:10.1002/J.1538-7305.1956.TB02385.X
- Weiss, T. P., Bissig, B., Feurer, T., Carron, R., Buecheler, S. ve Tiwari, A. N. (2019). Bulk and surface recombination properties in thin film semiconductors with different surface treatments from time-resolved photoluminescence measurements. *Scientific Reports* 2019 9:1, 9(1), 1-13. doi:10.1038/s41598-019-41716-x
- Wu, C., Wu, F., Ma, C., Li, S., Liu, A., Yang, X., ... Guo, D. (2022). A general strategy to ultrasensitive Ga₂O₃ based self-powered solar-blind photodetectors. *Materials Today Physics*, 23, 100643. doi:10.1016/J.MTPHYS.2022.100643
- Yünger, H. ve Ozel, E. (2013). Effect of the milling process on the properties of CoFe₂O₄ pigment. *Ceramics International*, 39(5), 5503-5511. doi:10.1016/J.CERAMINT.2012.12.062
- Zhang, Q., Sando, D. ve Nagarajan, V. (2016). Chemical route derived bismuth ferrite thin films and nanomaterials. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(19), 4092-4124. doi:10.1039/C6TC00243A
- Zhang, S. Y., Zhuang, H. Z., Xue, C. S., Li, B., Shen, J. ve Wang, D. (2007). Growth of β -Ga₂O₃ Nanorods and Photoluminescence Properties, 112.
- Zhao, X. H., Dinezza, M. J., Liu, S., Campbell, C. M., Zhao, Y. ve Zhang, Y. H. (2014a). Determination of CdTe bulk carrier lifetime and interface recombination velocity of CdTe/MgCdTe double heterostructures grown by molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters*, 105(25), 252101. doi:10.1063/1.4904993/13601351/252101_1_ACCEPTED_MANUSCRIPT.PDF

VESİKALIK FOTO

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Hasan YÜNGEVİŞ

Yüksek Lisans / Doktora Tezinden Üretilen Yayınlar, Sunumlar ve Patentler:

- Açıkgoz S., Yüngeviş H., 2020, Controllable growth of Ga₂O₃ hexagonal prism with pyramid end and monitoring size-dependent electron transfer process in perylene/ Ga₂O₃ conjugate system via FLIM, Applied Physics A (2020) 644, 126-138
- Açıkgoz S., Yüngeviş H., Controlled electrochemical growth of micro-scaled As₂O₃ and Ga₂O₃ oxide structures on p-type gallium arsenide, Applied Physics A (2022) 824, 128-139
- Açıkgoz S., Yüngeviş H., GaAs yarı iletken yüzeyinde mikro yarıkların üretilmesi ve FLIM tekniği ile yüzey karakterizasyonu, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi (2022), 11(3), 826-837