

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRONİK DEVRE UYGULAMALARI İÇİN
 β -Ga₂O₃ NANO KABLO ÜRETİLMESİ VE
KARAKTERİZASYONU**

DOKTORA TEZİ

Yavuz BAYAM

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Etem KÖKLÜKAYA

Haziran 2009

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRONİK DEVRE UYGULAMALARI İÇİN
β-Ga₂O₃ NANO KABLO ÜRETİLMESİ ve
KARAKTERİZASYONU**

DOKTORA TEZİ

Elektrik-Elektronik Yük. Müh. Yavuz BAYAM

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜH.

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

Bu tez 19.06.2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Hatem AKBULUT
Jüri Başkanı



Prof. Dr. Etem KÖKLÜKAYA
Üye



Doç. Dr. Erdal ÇELİK
Üye



Yrd. Doç. Dr. Gürsel Düzenli
Üye



Yrd. Doç. Dr. A. Turan ÖZCERİT
Üye

TEŞEKKÜR

Öncelikle doktora çalıőmam boyunca pek çok fedakarlığa katlanan, içine ve kariyerine ara vermek zorunda kalan, her noktada sınırsız desteğini hissettiğim sevgili eőim Birgöl Bayam'a; kendilerine ayırmam gereken zamanın büyük bölümünü akademik çalışmalarına ayırmak zorunda kaldığım çocuklarıma; maddi manevi desteklerini hep hissettiğimiz ailelerimize; çalıőmalarımı en iyi şekilde yapabilmem için bütün imkanları seferber eden ve bir hocadan ziyade her konuda konuşabileceğim bir büyüğüm olarak gördüğüm sayın tez danıőmanım Prof.Dr. Etem Köklükaya'ya; çok değerli hocalarım Prof.Dr. Hüseyin Ekiz ve Prof.Dr. Orhan Torkul'a; University of California Davis'teki tüm araştırma çalıőmalarımda beni yüreklendiren, yol gösteren, maddi ve manevi hiçbir fedakarlıktan kaçınmayarak bana bilimsel araştırma yapma zevkini kazandıran sayın hocam, ortak danıőmanım Associate Professor M.Saif İslam'a; mesafe olarak uzaklarda bulunsak ta her zaman yanımdalarmıő gibi hissettiğim, baőım sıkıőtıęında yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen kardeőim gibi olan arkadaşlarım M.Recep Bozkurt'a, M.Cemil Karacadağ'a, Ahmet Zengin'e; bilimsel araştırma ve düzenli çalışma mantığı kazanmamda büyük emeği olan, sorduğum en küçük şeyi dahi ciddiye alıp cevaplama zahmetine katlanan, uzun süreli bilimsel müzakerelerde kendisinden çok şey öğrendiğim çalışma arkadaşım Logeeswaran VJ'e ve diğer grup arkadaşlarıma; ismini hatırlayamadığım ama bu tezin hazırlanmasında emeği geçen herkese teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY.....	xiv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Amacı.....	3
1.2. Tezin Kapsamı.....	5
1.3. Tez Planı.....	6
BÖLÜM 2.	
MİNİYATÜRİZASYON VE NANOTEKNOLOJİ.....	8
2.1. Giriş.....	8
2.2. Nanoteknoloji.....	9
2.2.1. Moore Kanunu.....	13
2.3. Boyutla Değişen Özellikler.....	14
2.3.1. Termal özellikler.....	16
2.3.2. Mekanik özellikler.....	16
2.3.3. Optik özellikler.....	17
2.3.4. Elektriksel özellikler.....	17
2.3.5. Manyetik özellikler.....	18
2.3.6. Kimyasal özellikler.....	18

2.4. Nano Yapıların Üretilme Teknikleri.....	19
2.4.1. Aşağıdan yukarıya (Bottom-Up) üretim metodu.....	20
2.4.2. Yukarıdan aşağıya (Top-Down) üretim metodu.....	21
2.5. Nanoteknolojinin Uygulama Alanları.....	23
2.5.1. Malzeme ve imalat sektörü.....	23
2.5.2. Nano elektronik ve bilişim teknolojileri.....	24
2.5.3. Savunma sanayi.....	25
2.5.4. Çevre ve enerji.....	25
2.5.5. Sağlık sektörü.....	26
2.5.6. Tekstil.....	26
2.5.7. Ziraat ve biyoteknoloji.....	26
2.5.8. Havacılık ve uzay araştırmaları.....	27
2.6. Dünyada Nanoteknoloji.....	27

BÖLÜM 3.

METAL-OKSİT NANO KABLOLAR.....	30
3.1. Tek Boyutlu (1D) Metal-Oksit Sistemlerin Sentezlenmesi.....	30
3.1.1. Buhar faz malzeme üretimi.....	31
3.1.1.1. Buhar-sıvı-katı (VLS) mekanizması.....	31
3.1.1.2. Buhar-katı (VS) mekanizması.....	34
3.1.2. Solüsyon faz malzeme üretimi.....	34
3.1.2.1. Yüzey aktif madde yardımıyla büyüme.....	35
3.1.2.2. Sono kimyasal metod.....	35
3.1.2.3. Hidrotermal metod.....	35
3.2. 1D Metal-Oksit Nano Yapılardan Üretilmiş Eln Devre Elemanları	36
3.2.1. Alan etkili transistörler (FET)	36
3.2.1.1. Dikey elektronik devre elemanları.....	38
3.2.1.2. Lojik kapı devre elemanları.....	39
3.2.2. Optoelektronik cihazlar.....	40
3.2.2.1. Emiter, lazer ve dalga yönlendirici.....	40
3.2.2.2. LED.....	41
3.2.2.3. Polarizasyonla çalışan ışık dedektörü.....	42

3.2.2.4. Güneş pilleri.....	43
3.2.3. Rezonatör ve konsollar.....	45
3.2.3.1. Nano rezonatör.....	45
3.2.3.2. Kimyasal sensörler.....	46
BÖLÜM 4.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	51
4.1. Giriş.....	51
4.2. Gerçekleştirilen Deneyler.....	51
4.2.1. Deney düzeneği.....	51
4.2.2. Deney parametreleri.....	54
4.3. Kullanılan Karakterizasyon Metotları ve Araçları.....	59
4.3.1. Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Elec. Micr.-SEM) .	59
4.3.2. Enerji ayırıcı spektrometri (EDS)	60
4.3.3. Raman spektroskopisi.....	61
4.3.4 Alan emisyon.....	64
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	71
5.1. Giriş.....	71
5.2. Nano Boyutlu β -Ga ₂ O ₃ Yapıların Karakterizasyon Sonuçları.....	74
5.2.1. Raman spektrumu karakterizasyon sonuçları.....	74
5.2.2. Kimyasal bileşenlerin tespiti için EDS analiz sonuçları	75
5.2.3. Alan emisyon cihaz uygulaması.....	75
5.2.4. SEM karakterizasyon sonuçları.....	85
5.2.5. Ga ₂ O ₃ nano yapıların muhtemel oluşum aşamaları.....	92
BÖLÜM 6.	
TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	94
KAYNAKLAR.....	100
ÖZGEÇMİŞ.....	111

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

As	: Arsenik
Au	: Altın
C	: Karbon
Cr	: Krom
CuO	: Bakır Oksit
Ga	: Galyum
Ga ₂ O ₃	: Monoklinik Galyum Oksit
GaAs	: Galyum Arsenit
GaN	: Galyum Nitrat
GaN	: Galyum Nitrat
H ₂	: Hidrojen
In ₂ O ₃	: İndiyum Oksit
InP	: İndiyum Fosfat
MnO ₂	: Mangandioksit
MoSi ₂	: Molibdenyum Disilisayt
NiO	: Nikel Oksit
NO	: Azotmonoksit
NO ₂	: Azotdioksit
Si	: Silisyum
Si ₃ N ₄	: Silisyum Nitrür
SiC	: Silisyum Karbit
SiO ₂	: Silisyum Dioksit
SnO ₂	: Kalay Oksit
ZnO	: Çinko Oksit
β-Ga ₂ O ₃	: Monoklinik Galyum Oksit

1D	: 1 Boyutlu (1 Dimensional)
AAO	: Anodik Alüminyum Oksit
AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu (Atomic Force Microscope)
CCD	: Şarj Çiftleştirilmiş Cihaz (Charge Coupled Device)
CMOS	: Tamamlayıcı Metal-oksit Yarıiletken (Complimentary Metal Oxide Semiconductor)
CNT	: Karbon Nano Tüp (Carbon Nano Tubes)
CRT	: Katot Işın Tüpü (Cathode Ray Tube)
CVD	: Kimyasal Buhar Depozitleme (Chemical Vapor Deposition)
EDS	: Enerji Ayırıcı Spektrometri (Energy Dispersive Spectrometry)
EL	: Sıkışabilir Tabakanın Kalınlığı
EPMA	: Elektron Prob Mikro Analiz Edici (Electron Probe Micro Analyzer)
eV	: Elektron Volt
fcc	: Yüzey Merkezli Kübik (Face-Centred Cubic)
FEF	: Alan Güçlendirme Katsayısı (Field Enhancement Factor)
FET	: Alan Etki Transistör (Field Effect Transistor)
FN	: Fowler-Nordheim
GHz.	: Giga Hertz
IR	: İnfrared
kB	: Kilobyte
kV	: Kilo Volt
LaB6	: Lantanyum Heksaborid (Lantanium Hexaboride)
LCD	: Likit Kristal Monitör (Liquid Crystal Display)
LED	: Işık Yayan Diyot (Light Emitting Diode))
MBE	: Moleküler Demet Kaplama (Molecular Beam Epitaxy)
MEMS	: Mikro Elektro-Mekanik Sistemler (Micro Electro-Mecanical Systems)
MFM	: Manyetik Kuvvet Mikroskobu (Magnatic Force Microscope)
MIT	: Massachusetts İnstitute of Technology
MOCVD	: Metal Organik Kimyasal Buhar Depozitleme (Metal Organic Chemical Vapor Deposition)
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
nm	: Nanometre
PLD	: Puls Lazer Depozitleme (Pulse Laser Deposition)
ppm	: Milyonda Bir Birim (Parts Per million)
RIE	: Reaktif İyon Kazıma (Reactive Ion Etching)

SCE	: Yüzey İletim Elektron (Surface Conduction Electron)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
SHPM	: Taramalı Hall Aygıtı Mikroskobu (Scanning Hall Probe Microscope)
SPM	: Taramalı Pozisyon Mikroskobu (Scanning Position Microscope)
STM	: Taramalı Tünelleme Mikroskobu (Scanning Tunneling Microscope)
TEM	: Geçirmeli Elektron Mikroskobu (Transmission Electron Microscope)
UNAM	: Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi
UV	: Ultra Viyole
VLS	: Buhar-Sıvı-Katı Oluşum Sistemi (Vapor-Liquid-Solid)
VS	: Buhar-Katı Oluşum Sistemi (Vapor-Solid)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Nano yapıların üretilme teknikleri ve elde edilen ürünler.....	19
Şekil 2.2.	Batırılmış kalem litografisi.....	21
Şekil 2.3.	Yukarıdan-aşağıya işleme metoduna bir örnek: fotolitografi.....	23
Şekil 2.4.	Yıllara göre milyon dolar cinsinden nanoteknolojiye yapılan yatırımlar.....	28
Şekil 3.1.	Tipik bir CVD sentezleme düzeneği.....	32
Şekil 3.2.	Silisyum nano kablonun büyümesinin şematik gösterimi.....	34
Şekil 3.3.	a. akım-gerilim (I-V) grafiği ZnO nano kablo FET'in n-tip davranış sergilediğini göstermekte b. tipik FET akım-gerilim grafiği yüksek performans cihaz karakteristiği göstermekte.....	38
Şekil 3.4.	a. Dikey FET'in 3 boyutlu şeması b. akım-gerilim karakteristiği İçerideki resim dikey FETin kesitinden alınmış SEM fotoğrafı (resmin ölçeği 200 nm.)	39
Şekil 3.5.	ZnO Nanoçubuk Lojik Devreleri a. 'OR' lojik kapısı. b. AND lojik kapısı (bu ölçüm için V_c a 3V uygulandı) c. NOT logic kapısı d. NOR kapısı.....	40
Şekil 3.6.	a. ZnO nano kabloları ışığı SnO ₂ nano kablonun içine doğru yönlendirirken alınmış bir optik mikroskop resmi b. ZnO-SnO ₂ nano kabloların kesişimini gösteren SEM fotoğrafı [71] c. gözlenen ZnO nano kablo lazer boşluğu uyarılmış emisyon.....	41
Şekil 3.7.	a. p-GaN/n-ZnO nanoçubuklarının hetero kesişim cihazını gösteren şema b. Oda sıcaklığında ve farklı gerilimlerde EL spektrumu. İç kısımdaki fotoğraf 5V gerilimdeki ışık emisyonu....	42
Şekil 3.8.	a. UV (365nm) ve görünen ışığın polarize edilmiş ışık tespiti b. Nano kablonun havada 633 nm. lazere havada ve vakumda (içerideki resim) foto tepkisi.....	43

Şekil 3.9.	a. ZnO nano kablo dizisiyle üretilen güneş pilinin şeması b. iki pil için akım yoğunluğu-gerilim grafiği.....	45
Şekil 3.10.	a. Nano jeneratörün şematik gösterimi b. GaN alt tabaka üzerinde dikey olarak hizalanmış ZnO nano kablolar c. zigzag şeklinde üretilmiş elektrotlar d. nano jeneratörün kesit SEM fotoğrafı.	46
Şekil 3.11.	Öngörülen elektronik burun şeması.....	48
Şekil 4.1.	GSL—1600X yüksek sıcaklık vakumlu, tüplü reaktör.....	52
Şekil 4.2.	MTI GSL1600X vakumlu tüp reaktörün şematik gösterimi.....	53
Şekil 4.3.	Nano yapıların sentezlenmesi için hazırlanmış düzeneğin şematik gösterimi.....	54
Şekil 4.4.	Nano yapıların sentezlenmesinde kullanılan optimum sıcaklık-zaman grafiği.....	58
Şekil 4.5.	Nano yapıların sentezlenmesinde kullanılan sıcaklık değişim grafiği ve GaAs alt tabakanın tüpün içindeki pozisyonu.....	59
Şekil 4.6.	Raman Spektrometrenin şematik gösterimi.....	63
Şekil 4.7.	0°C de metalden alan emisyonu için enerji seviye diyagramı.....	65
Şekil 4.8.	Farklı çalışma fonksiyonları için örnek J -E grafikleri (a- $\Phi = 4,0eV$; b- $\Phi = 4,5eV$; c- $\Phi = 5,0eV$)	68
Şekil 4.9.	Farklı elektrik alan arttırma faktörleri için örnek $1/E-\ln (J/E^2)$ grafikleri (kare $\beta = 100$; daire $\beta = 250$; üçgen $\beta = 500$)	68
Şekil 4.10.	Kapılanmış alan emisyon katodunun şematik gösterimi.....	70
Şekil 5.1.	Alan emisyon triyod cihazın şematik gösterimi.....	73
Şekil 5.2.	GaAs alt tabaka üzerinde sentezlenen β -Ga ₂ O ₃ nano kabloların Raman Spektrumu.....	74
Şekil 5.3.	GaAs alt tabaka üzerinde sentezlenen β -Ga ₂ O ₃ nano kabloların EDS Analizi	75
Şekil 5.4.	Alan emisyon cihaz uygulamasının şematik gösterimi.....	77
Şekil 5.5.	GaAs alt tabaka üzerinde sentezlenen β -Ga ₂ O ₃ nano kabloların emisyon akım yoğunluğu-uygulanan elektrik alan (J-E) grafiği....	78
Şekil 5.6.	Ampirik Fowler-Nordheim (F-N) koordinatları içinde, alan emisyon akım-gerilim karakteristiği.....	78

Şekil 5.7.	GaAs alt tabaka üzerinde sentezlenen β -Ga ₂ O ₃ nano kabloların alan emisyon akımının zamana göre değişim grafiği.....	79
Şekil 5.8.	GaAs alt tabaka üzerinde sentezlenen β -Ga ₂ O ₃ nano kabloların a. uzaktan b. daha yakından görünüm.....	86
Şekil 5.9.	Nano Blokların ve tepelerinde oluşan sivri uçları gösteren SEM fotoğrafları a. yakından görünüş b. genel görünüşü.....	87
Şekil 5.10.	Yüksek sıcaklıktan dolayı GaAs üzerinde oluşan krater benzeri delikleri gösteren SEM fotoğrafları a. uzaktan b. daha yakından görünüm.....	88
Şekil 5.11.	Oluşan nano blokların ve sivri uçların kesit SEM fotoğrafları a. uzaktan b. daha yakından görünüm.....	89
Şekil 5.12.	GaAs alt tabakanın büyütme işleminden sonraki kesit SEM fotoğrafları a. yakından b. daha uzaktan görünüm.....	90
Şekil 5.13.	β -Ga ₂ O ₃ ince film tabakasını gösteren SEM fotoğrafı a. uzaktan b. daha yakından görünüm.....	91
Şekil 5.14.	GaAs alt tabaka üzerinde sentezlenen Ga ₂ O ₃ nano kabloların sıcaklığa bağlı muhtemel oluşum aşamaları.....	93
Şekil 5.15.	β -Ga ₂ O ₃ nano yapıların muhtemel oluşum evreleri a. GaAs alt tabaka b. yüzeyde Galyum damlacıklarının oluşumu c. β -Ga ₂ O ₃ ince film tabakasının oluşumu d. nano blokların oluşumu e. ultra sivri uçların oluşumu.....	94
Şekil 6.1.	Nano boyutlu yapıların taşınmasında kullanılan nano cımbız.....	95
Şekil 6.2.	a. AFM'nin çalışma prensibi b. AFM ucunun SEM görüntüsü c. AFM ucu olarak monte edilmiş sivri uçlu Ga ₂ O ₃ nano yapı.....	96
Şekil 6.3.	Sivri uçlu Ga ₂ O ₃ nano yapıların emiter olarak kullanıldıkları bir alan emisyon display.....	97
Şekil 6.4.	β -Ga ₂ O ₃ nano kablonun FET gaz sensörü olarak kullanılması.....	97
Şekil 6.5.	a. Sentezleme süresinin uzatılması ile üretilen uzun β -Ga ₂ O ₃ nano yapılar b. sentezleme süresiyle birlikte ortamdaki O ₂ miktarının da artırılmasıyla elde edilen uzun β -Ga ₂ O ₃ nano yapılar.....	98

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Nanoteknolojinin Tarihsel Dönüm Noktaları.....	12
Tablo 4.1.	Farklı Parametrelerle Elde Edilen Nano β -Ga ₂ O ₃ Yapılar.....	55
Tablo 6.1.	Alan Emisyon Cihaz Karakteristiklerinin Bir Boyutlu Nano Yapıların Alan Emisyon Karakteristikleriyle Karşılaştırılması.....	82

ÖZET

Anahtar kelimeler: Nano Kablolar, Alan Emisyon, Galyum Oksit, Bant Aralığı, Çalışma Fonksiyonu, Elektrik Alan Güçlendirme Katsayısı

Son yıllarda bir boyutlu, dikey ayarlanmış, aşağıdan-yukarıya nanoyapıların fabrikasyon metodları, sentezlenmesinin basitliği ve yüksek elektromekanik performanslarından dolayı oldukça fazla ilgi çekti. Karbon nanotüpler, geniş bant aralığına sahip yarıiletkenler, metal nano kablolar ve pek çok metal-oksit malzemeler birçok araştırmaya konu oldular. Bu malzemelerden bazıları düşük elektron afinitesi ve/veya yüksek kimyasal stabiliteye sahiptirler.

Monoklinik galyumoksit, geniş bant aralığına ($E_g = 4.9$ eV) sahip önemli bir metal-oksit yarıiletkenidir. İletkenlik ve ışık verme özellikleri onu flat panel displayler, güneş enerji cihazları ve yüksek sıcaklıklarda çalışan, stabil gaz sensörleri için çok uygun, önemli bir materyal yapmaktadır.

Oldukça iyi anlaşılmiş bir kuantum işlemi olan alan emisyon, düşük enerji dağılımıyla yüksek elektron parlaklığı elde etmek için iyi bir kaynaktır. Yüksek elektrik alan altında Fermi seviyesi yakınındaki elektronlar enerji bariyerini aşarak vakum seviyesine çıkarlar. Alan emisyonunu kullanan pek çok uygulama için malzemeler düşük eşik emisyon alanı ve yüksek akım yoğunluklarında yüksek stabilite göstermelidirler. Düşük çalışma fonksiyonu ve büyük alan artırma faktörü, düşük bir elektron emisyonu eşik alanına katkıda bulunur. Çalışma fonksiyonu malzemelerin çeşidine bağlı ayırıcı bir özellikken alan artırma faktörü büyük oranda emiterlerin şekline bağlıdır. Çok emek isteyen ve pahalı yukarıdan-aşağıya işlem teknikleri, bu teknikle üretilen emiterlerin uzun süre verimli çalışmamaları ve düşük dayanma süresine rağmen oldukça küçük yarıçaplı alan emisyon uçları günümüze kadar sıklıkla kullanılmıştır.

Bu tezde; tamamen yeni bir teknik kullanılarak alan emisyon alanında kullanılmak için oldukça elverişli alan emisyon özellikleri sergileyen ve bugüne kadar bildirilmiş tüm nano yapılardan farklı geometrik şekle sahip monoklinik galyumoksit nano yapıların sentezlenmesi ve karakterizasyonu konuları sırasıyla ele alınmaktadır.

SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF CONDUCTOR/SEMICONDUCTOR CIRCUIT ELEMENTS FOR NANO DIMENSIONAL ELECTRONIC CIRCUITS

SUMMARY

Key Words: Nanowires, Field Emission, beta-gallium oxide, Band Gap, Work Function, Field Enhancement Factor

Recently, numerous vertically-oriented one-dimensional nanostructures fabrication methods, using bottom-up synthesis processes, have attracted interest owing to their simplicity of synthesis and high electromechanical performance. Materials such as carbon nanotubes (CNTs), wide band-gap semiconductors, metal nanowires, and several oxides such as Indium oxide, Zinc oxide, Tin oxide and Gallium oxide have stimulated considerable interest. Some of these materials have low electron affinity and/or high chemical stability.

Monoclinic gallium oxide is an important metal oxide semiconductor with a wide band gap ($E_g = 4.9$ eV). The conduction and luminescence properties makes it a good candidate for optoelectronic applications such as flat panel displays, solar energy devices, and high-temperature, stable gas sensors.

Field emission, a well-understood quantum process, is a good source for high-brightness electrons with low energy spread. Under high electric field, electrons near the Fermi level escape to the vacuum level by overcoming the energy barrier. For many applications using field emission, the materials should exhibit very low threshold emission fields and a high degree of stability at high current density. A low work-function and a large field enhancement factor contribute to a low threshold field of electron emission. While work-function is an intrinsic material property, the field enhancement factor (FEF) predominantly depends on the geometry of the emitters. Tedious and costly top-down processing techniques have been demonstrated to fabricate field emission tips with diminishingly small radius, although most such emitters have finite lifetime and exhibit performance degradation over a short period.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Mikro elektronikteki hızlı gelişim, çok daha küçük yapılar sentezleyerek bunları elektronik devrelere entegre etmek suretiyle performans ve mimarileri geliştirme isteğini artırmıştır. Bununla birlikte şu andaki mevcut teknolojilerle sürekli minyatürizasyon çalışmaları fiziksel limitlere ulaşmakta ve alternatif, çığır açıcı, yeni tekniklerin kullanılması kaçınılmaz bir ihtiyaç halini almaktadır. Aşağıdan-yukarıya montaj tekniği, mikron seviyesinin altında hatta nano seviyede yapılar üretilebilmesine imkan sağlamakta ve bundan dolayı da CMOS teknolojisi için yeni imkanlar sunmaktadır.

Yarı iletkenler arasında çok değişik özellikleri ve fonksiyonları ile metal-oksitler en kullanışlı materyaller olarak ayrı bir yer tutmaktadırlar. Onların bu özellikleri sadece dökme malzemelerinden gelen piezo elektrik, kimyasal algılama, ışık algılama gibi özellikler olmakla kalmayıp aynı zamanda yüksek anizotropik yapıları ve boyut sınırlamalarından da kaynaklanmaktadır.

Son yıllarda hızla artan dikey, kontrollü olarak, aşağıdan yukarıya sentezleme yöntemiyle oluşturulmuş bir boyutlu nano yapılar, sentezlenmelerinin kolay olması ve yüksek elektromekanik performanslarından dolayı oldukça büyük ilgi odağı haline gelmişlerdir. Karbon nano tüpler (CNT), geniş bant aralıklı yarı iletkenler, metal nano kablolar ve bunun yanında İndiyum oksit (In_2O_3), çinko oksit (ZnO), kalay oksit (SnO_2) ve galyum oksit (Ga_2O_3) gibi pek çok metal-oksit materyaller üzerinde oldukça fazla çalışma yapılan materyaller olmuştur. Bu materyallerde bazıları aynı zamanda yüksek oranda kimyasal stabiliteye de sahiptirler.

Monoklinik galyum oksit ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$) geniş bant genişliğine ($E_g = 4.9 \text{ eV}$) sahip, önemli bir metal-oksit materyaldir. İletkenlik [1] ve ışıldama [2] özellikleri Monoklinik galyum oksiti ($\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$), flat panel paneller gibi optoelektronik

uygulamalar, güneş enerjisi cihazları ve yüksek sıcaklıkta çalışabilen gaz sensörleri [3] için çok güçlü bir aday malzeme haline getirmektedir.

Alan emisyon, yeterince büyük bir elektrik alan altında, malzeme yüzeyinden elektronun vakum ortamına çıkması olayıdır. Elektronları yayan malzeme ya da elektrot genellikle düşük elektron çekim gücüne sahiptir. Karbon nano tüplerin mükemmel alan emisyon özelliklerinin keşfedilmesinden bu yana, yüksek en-boy oranlarından dolayı 1D yapılar üzerine oldukça fazla sayıda araştırmalar yapılmıştır. Son birkaç yıldır yarı iletken 1D malzemeler çok iyi seviyedeki alan emisyon özelliklerinden dolayı araştırmacıların dikkatini çekmektedir. Teorik modelleme, iyi derecede kontrol edilebilen elektriksel özellikleri ve düşük elektron çekimleri gibi avantajları yarı iletkenlerin alan emisyonu için ne kadar uygun olduğunu ortaya koymuştur [4].

Nano yapıların kullanılabilceği düşünülen ilk alanlardan birisi hızla büyüyen ve gelecek 10 yıl içerisinde 70 milyar dolarlık bir pazara ulaşacağı tahmin edilen soğuk katot ya da alan emisyon display olarak bilinen endüstri alanıdır. Bu alanda araştırma çalışmaları yürüten şirketler enerji verimliliğini arttıracak ve boyutları düşürecek alternatif teknolojiler bulmak için uzun zamandır bu alana yatırımlar yapmaktadırlar. Özellikle bir boyutlu, nanotüp ve nano kablo olarak bilinen nano yapıların, sivri uçları ve en-boy oranlarının büyük olmasından dolayı alan emisyon düz panel displayler için uygun bir elektron kaynağı olduğu düşünülmüştür.

Elektrik alan altında kalan yapının ucundaki elektrik alan arttırımı kullanılan yapının en-boy oranıyla doğrudan bağlantılıdır. Nano kablolar ve nano tüpler çok büyük en-boy oranlarıyla (50-10.000) sentezlenebildikleri için bu yapıların civarındaki gerçek elektrik alanı oldukça yüksek değerlere ulaşmaktadır. Bundan dolayı da malzemenin ucundan vakum aralığına olan elektron tünellemesi standart katotlara göre çok daha düşük gerilim uygulanmasıyla gerçekleşmiş olur. Düşük çalışma gerilimi, vakum mikro elektronik cihazların taşınabilirliği konusunda çok önemli bir avantaj sağlamaktadır (el displayleri, X ışını kaynakları ve gaz iyonizasyon sensörleri vb.).

Metal-oksit nano kablolar kullanılarak yapılan ve dönüm noktası özelliği taşıyan ilk alan emisyon çalışması Lee tarafından yapılmıştır [5]. Hizalanan ZnO nano kablo alan emiteri $0.1 \mu\text{A cm}^{-2}$ akım yoğunluğunda $6.0 \text{ V}/\mu\text{m}$ emisyon başlama alanı ve $1 \mu\text{A cm}^{-2}$ akım yoğunluğunda $11.0 \text{ V}/\mu\text{m}$ eşik alanı özelliklerini sergilemiştir ki bu özellikler flat panel display uygulamaları için yeteri derecede parlaktır. Dikey olarak hizalanmış metal-oksit nano kabloların çok iyi alan emisyon gösterdiğinin anlaşılması üzerine SnO₂ (kalay oksit) [6], In₂O₃ (indiyum oksit) [7], TiO₂ (titanyum oksit) [8], CuO (bakır oksit) [9] nano kablolar da dahil olmak üzere pek çok metal-oksit nano kablo üzerine alan emisyon araştırması yapılmıştır.

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışma, her geçen gün gelişen ve hemen hemen hayatın her alanında etkilerini görmeye başladığımız nanoteknoloji yöntemlerini kullanarak yeni nano yapılar sentezlemek ve sentezlenen bu yapıların kullanılacakları uygulama alanlarını tespit etmek amacıyla yapılan karakterizasyon ve cihaz uygulaması çalışmalarını içermektedir. Son olarak ta alan emisyon özelliğine dayalı çalışan bir cihaz uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Nano boyutta ortaya çıkan farklı ve çoğu zaman mikro ve makro boyutta bulunması mümkün olmayan özellikleri taşıyan malzemelerin ve elektronik devre elemanlarının sentezlenmesi, karakteristiklerinin ortaya çıkarılması ve bu karakteristiğe uygun bir uygulama alanlarının bulunması bu çalışmanın temel amacını oluşturmaktadır.

Soğuk katod ya da alan emisyon monitörleri olarak bilinen uygulama alanı, nano yapıların en öncelikli uygulama alanlarından birisi olarak düşünülmektedir. Tek boyutlu nano yapılar, yüksek en-boy oranları ve sivri uçları nedeniyle vakum mikroelektronik aygıtların içinde elektron emiter olarak kullanılmak için çok uygun yapılardır. Nano yapının ucundaki elektrik alan güçlendirmesi en-boy oranıyla doğru orantılı olarak gerçekleşmektedir. Nano kablolar ve nano tüplerde bu oran 50-10.000 civarında olabilmekte ve bu durum da uçta oluşan alan güçlendirme katsayısının çok yüksek olması sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Yüksek güçlendirme katsayısı ise

elektronların emiterden vakum boşluğuna atlaması için gereken voltajın standart sistemlere göre çok daha düşük seviyede olmasını sağlamaktadır. Düşük çalışma gerilimi, mikro elektronik sistemlerin taşınabilirliği açısından çok büyük avantaj sağlamaktadır.

Soğuk katot özelliğiyle çalışan mikro elektronik vakum aygıtları Fowler – Nordheim (F–N) tünellemesi esasına dayanır. Termo iyonik emisyonun aksine, bu metotta herhangi bir ekstra ısıtma işlemine gereksinim duyulmamaktadır.

Yukarıda bahsedilen taşınabilirlik özelliğine ek olarak soğuk katot teknolojisıyla çalışan monitörler, yüksek parlaklık, yüksek ışıltama verimliliği, düz yapı, geniş görüş açısı ve yüksek çözünürlük gibi avantajları da beraberinde getirmektedir.

Nanoteknolojide meydana gelen gelişmelerle birlikte tek boyutlu nano kablolar ve nano tüpler de dahil olmak üzere pek çok nano yapının kontrollü olarak üretilmesini sağlayan farklı stratejiler üzerinde pek çok çalışmalar yapılmaktadır. Bu teknolojiyle çalışan monitörler, matris adresleme şeması ile birleştirilebilirler ve bu sayede CRT monitörlere kıyasla güç tüketim oranları büyük ölçüde düşürülmüş olur.

Fowler –Nordheim tünelleme akımının çalışma fonksiyonuna çok hassas olması sebebiyle düşük çalışma fonksiyonuna sahip olan geniş yasak bant aralıklı yarı iletkenler soğuk katot teknolojisinin ilgi alanına girmektedir. Bazı geniş yasak bant aralıklı yarı iletkenlerde, iletim bandının altı, vakum seviyesinin üzerinde bulunmaktadır. Bu durum soğuk katot teknolojisi için çok büyük avantaj teşkil etmektedir [10].

Bu çalışma, Monoklinik galyum oksit (β -Ga₂O₃) materyalinin vakum mikroelektronik uygulamalarda elektron emiter olarak kullanılabileceği bir yapıda sentezlenmesi ve sentezlenen nano yapıların karakterizasyonu ile cihaz uygulaması üzerine yoğunlaşmaktadır.

1.2. Tezin Kapsamı

Tez çalışması ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- a. Kapsamlı bir literatür çalışması sonucunda nano boyutlu elektronik devrelerde kullanılmak amacıyla üretilecek nano yapıların sentezlenmesi için uygun yöntemin tespiti
- b. Sentezlenecek malzemenin tespiti
- c. Sentezleme için gerekli olan materyallerin (alt tabaka, metal ve metal tozları, taşıyıcı gaz vb.) temin edilmesi ve deney düzeneğinin dizaynı
- d. Dizayn edilen deney düzeneğinin karakterizasyonu
- e. Sentezleme işlemine başlamadan önce alt tabakanın, temiz oda içerisinde temizlenmesi
- f. İstenen nano yapılar elde edilinceye kadar farklı parametrelerin denenerek sentezleme işleminin tekrar edilmesi
- g. Üretilen Ga_2O_3 nano yapıların morfoloik özelliklerinin ve kimyasal bileşenlerinin belirlenmesi amacıyla taramalı elektron mikroskobu, EDS analizi ve Raman spektrum karakterizasyonlarının yapılması
- h. Elde edilen nano Ga_2O_3 yapıların alan emisyon özelliklerini tespit edilmesi amacıyla alan emisyon karakterizasyonunun ve aygıt uygulamasının yapılması.
- i. Üretilen Ga_2O_3 nano yapıların aynı özelliklerle ve tekrarlanabilir bir şekilde yeniden üretilebilmesini sağlamak amacıyla, üretilme aşamalarının belirlenmesi

- j. Üretilen Ga₂O₃ nano yapıların, alan emisyon özelliklerinin bugüne kadar alan emisyon karakterizasyonları gerçekleştirilen tek boyutlu nano yapılarla (Karbon nano tüpler, nano kablolar, nano şeritler vb.) karşılaştırılması

Yapılan çalışmaların ve gerçekleştirilen uygulamaların katkısı; katalizör kullanımına ihtiyaç duyulmadan, diğer pek çok sentezleme metodunda olduğu gibi karmaşık hazırlık aşamaları gerektirmeyen bir metal-oksit nano yapı sentezlemesinin keşfedilmesi. Bunun sonucunda oluşan yapıların farklı yöntemler kullanılarak karakterizasyonlarının gerçekleştirilmesi ve elektronik devrelerde kullanılması amacıyla alan emisyon özelliğinin karakterizasyonunun gerçekleştirilmiş olması üretilen Ga₂O₃ nano yapılarla gerçekleştirilen alan emisyon cihazının üstün bir performans sergilemesi olarak özetlenebilir. Ayrıca yapılan karakterizasyon işlemleri göstermiştir ki; bu yapılar kolayca ve kontrollü olarak üretilebilmektedir. Bu durum, gelecek yıllardaki pek çok elektrik alan emisyon tabanlı elektronik cihaz uygulamaları için mükemmel bir temel bileşen olarak kullanılabilir.

1.3. Tez Planı

Giriş bölümünde yapılan çalışma ile ilişkili konular kısaca tanımlandıktan ve çalışma kısaca özetlendikten sonra tezin içeriği hakkında genel hatlarıyla bilgiler verilmektedir.

2. bölümde, elektronik devrelerdeki minyatürizasyon, minyatürizasyonun gerekliliği ve bu konuda herhangi bir araştırma yapmak için gerekli olan temel terimler ile nanoteknoloji hakkında genel bilgiler verilmektedir. Nano yapıların genel üretim teknikleri hakkında genel bilgiler verilmektedir. Nanoteknolojinin uygulama alanları, dünyada bu alanda yapılan çalışmalar özetlenerek bu bölüm tamamlanmaktadır.

3. bölümde, nano kablolar özellikle de tek boyutlu metal-oksit nano kablolar hakkında ayrıntılı bilgilere yer verilmektedir. Bu bilgiler içerisinde üretim ve

sentezleme teknikleri ile bu tekniklerin avantaj ve dezavantajları, metal-oksit nano yapılarla üretilmiş elektronik devre elemanlarından bazı örnekler de yer almaktadır.

4. bölümde, yapılan çalışmanın yani nano boyutlu β -Ga₂O₃ yapıların sentezlenmesi çalışmaları ve deney düzeneği hakkında detaylı bilgiler yer almaktadır. Bu bölümde ayrıca sentezlenen nano boyutlu β -Ga₂O₃ yapıların karakterizasyonunda kullanılan teknikler ve araçlar hakkında kısa bilgiler verilmektedir.

5. bölümde, üretilen nano boyutlu β -Ga₂O₃ yapıların karakterizasyon çalışmalarının sonuçları değerlendirilmiştir. Bu bölümde karakterizasyon çalışmalarında kullanılan taramalı elektron mikroskobu nano grafları, ürünün kimyasal bileşimi ve yapısı hakkında bilgi edinmek için uygulanmış olan EDS ve Raman spektroskopisi sonuçları değerlendirilmektedir. Ayrıca elektronik devre uygulamaları için uygunluğunu anlamak üzere gerçekleştirilen ve mükemmel sonuçlar alındığı anlaşılan alan emisyon karakteristiği hakkında ayrıntılı bilgi sunulmakta ve üretilen alan emisyon cihazının daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırmalara yer verilmektedir.

6. bölümde ise elde edilen sonuçlar ele alınarak gelecekte yapılacak uygulamalara ve araştırmanın daha ileriye götürülmesi için dikkate alınması gereken hususlar yer almaktadır. Ayrıca elde edilen sonuçlar neticesinde, üretilen nano boyutlu β -Ga₂O₃ yapıların kullanabileceği uygulama alanlarından örnekler verilmektedir.

BÖLÜM 2. MİNYATÜRİZASYON VE NANOTEKNOLOJİ

2.1. Giriş

‘İnsanlar bana minyatürizasyondan bahsediyorlar ve bugüne kadar ne denli yol alındığını anlatıyorlar. Aynı zamanda küçük parmak tırnağı büyüklüğündeki motordan bahsediyorlar. Hali hazırda bütün bir kutsal kitabı toplu iğne başı büyüklüğünde bir yere yazabileceğimizden bahsediyorlar. Fakat bu daha hiçbirşey değil. Bu, yapmayı bugün üzerinde konuşmayı düşündüğüm konuya göre ancak çok ilkel ve yarım yamalak atılmış bir adım. Aşağılarda insanın şaşkınlıktan dudağını uçuklatacak seviyede küçük bir dünya var hala. 2000 yılında, insanlar geriye dönüp baktığında merak edecekler ve birbirlerine soracaklar; acaba neden kimse 1960 yılına kadar bu yönde bir çalışma yapmayı ve bu yöne gitmeyi düşünmedi diye.

Neden 24 ciltlik Britanika Ansiklopedisini bir toplu iğnenin başı büyüklüğünde bir alana yazamayalım ki?’

Yukarıdaki ilginç bölüm, Kaliforniya Teknoloji Enstitüsünde Fizik Profesörü olan, adına pek çok ödüller verilen Richard P. Feynman’ın aynı enstitüde 29 Aralık 1959’da Amerikan Fizik Topluluğu toplantısında verdiği konuşmasından alınmıştır.

Şu anda içinde bulunduğumuz 2009 yılından geriye dönüp 1959 yılında öngörülen fikirlere baktığımızda şaşkırmamak ve Prof.Feynman’a hak vermemek elde değil. Kendi zamanında çok eleştirilmiş ya da tam olarak anlaşılammıştı belki. Ama bugün onun ne kadar doğru bir öngöründe bulunduğunu daha iyi anlıyor ve gelişmelere bakarak, uygarlık adına ne kadar geç kaldığımızı daha iyi anlıyoruz.

Bu bölümde son zamanlarda gazete, televizyon, internet haberlerinde sıkça duyduğumuz, günlük sohbetlerimizin bir parçası haline gelmiş olan, kimilerine ilham verip geleceğe daha ümitle bakmasına, kimilerine ise küresel kirlenme dolayısıyla kaygı ve endişe veren Nanoteknoloji Nedir? sorusuna cevap vermeye çalışacağız.

2.2. Nanoteknoloji

Günümüzde nano, teknik bir ölçü birimi olarak kullanılır ve herhangi bir birimin milyarda biri anlamını taşır. Genellikle metre ile birlikte kullanılır. Nanometre, 1 metrenin milyarda biri ölçüsünde bir uzunluğu temsil eder (yaklaşık olarak ard arda dizilmiş 5 ila 10 atom).

Nanometre o kadar küçük bir boyuttur ki çıplak gözle bu boyuttaki bir şeyi görmenin imkansız olmasının yanında optik mikroskopla görmek bile mümkün değildir. Bu boyuttaki bir yapıyı ya da elementi görmek için elektron mikroskobu kullanmak bir zorunluluk olarak karşımıza çıkmaktadır.

Nanoteknoloji, en küçük boyutlarda materyallerin ve yapıların dizaynı, imal edilmesi ve çevresel kontrollerine verilen isimdir. Başka bir deyişle Nanoteknoloji;

- Yaklaşık 1-100nm. boyutunda atomik, moleküler ya da makro moleküler seviyede araştırma ve teknoloji geliştirme
- Küçük ve/veya orta boyutlu olmaları sebebiyle sahip oldukları yeni özelliklerinden dolayı, yapıları, sistem ve cihazları üretmek ve kullanmak
- Atomik boyutta kontrol ve manüpile etme kabiliyeti olarak ta tanımlanabilir [11].

Genellikle 100 nm den daha küçük boyutlarda temel fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikler benzersiz, yeni ve üstün performanslı materyaller ve cihazlar üretmeye uygun hale getirilebilir. Nanoteknoloji mevcut ticari pazarlar ve yeni ticari pazarlar için oldukça önemli fırsatlar sunmaktadır.

Nanoteknolojinin önemi, atomlar ve moleküller seviyesinde (1 ila 100 nanometre boyutunda) çalışarak, gelişmiş ve/veya tamamen yeni fiziksel, kimyasal, biyolojik özelliklere sahip yapılar elde edilmesine imkan sağlamasından kaynaklanmaktadır. Malzeme özellikleri ve cihazların çalışma prensipleri, genel olarak 100 nm.'den büyük boyutları temel alarak yapılan varsayımların sonucunda ortaya çıkarılmış geleneksel modelleme ve teorilere dayanmaktadır. Kritik uzunluklar 100 nm.'nin altına indiğinde ise geleneksel teori ve modeller ortaya çıkan özellikleri açıklamakta çoğu zaman yetersiz kalmaktadır.

Nanoteknoloji işte burada devreye girmektedir. Daha sağlam, daha kaliteli, daha uzun ömürlü ve daha ucuz, daha hafif, daha küçük cihazlar geliştirme isteği bir çok endüstri kolunda gözlenen eğilimlerdir. Minyatürizasyon olarak tanımlanabilecek bu eğilim birçok mühendislik çalışmasının temelini oluşturmaktadır. Minyatürizasyonun sadece kullanılan parçaların daha az yer kaplamasından çok daha önemli getirileri vardır. Minyatürizasyon, üretimde daha az malzeme, daha az enerji, daha ucuz ve kolay nakliye, daha çok fonksiyon ve kullanımda kolaylık olarak uygulamada kendini göstermektedir.

20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren bir çok endüstride kullanılan toleranslar sürekli iyileştirilmiş, üstün kalite anlayışı geliştirilmiştir. Mikroteknoloji ürünü olarak tanımlayabileceğimiz parçalar otomotiv, elektronik, iletişim ve bilişim gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılır olmuştur. Günümüzde ise mikroteknolojilerden daha küçük teknolojilerin, nanoteknolojinin kullanımını yaygınlaşmaktadır.

Genel olarak sayısal anlamdaki değişim kalitede de değişimi doğurur. Cihazların boyutlarındaki küçülme, atomların içindeki elektronların hareketlerini ve etkileşimlerini kontrol eden kuantum fiziğinden dolayı operasyonlarda da değişim meydana getirebilir. Aslında ürünlerde meydana gelen minyatürizasyon, her boyut için spesifik olan fizik kurallarını da hesaba katarak milimetre, mikrometre ve

nanometre boyutlarında işlem yapabilen yeni nesil ölçüm ve kontrol sistemlerini de gerekli kılmaktadır.

Atomları, milyon metreler boyutundaki gerçek dünya ile entegre edebilmek için milyonlarca atomun toplam özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Çünkü madde devam eden bir ortamdır ve biz klasik mekaniği kullanmaktayız. İki farklı uzunluk boyutunu birleştirmek için çoklu fizik temelli modelleri destekleyen ve yeni karşılaştırmalı temsillere dayanan yepyeni standartlarda tanımlamalara ihtiyaç vardır. Bu tanımlamalar ve standartlar yardımıyla yeni bir konsept oluşturmak ve nano boyutlu devre elemanlarını makro boyutta kullanılan elektronik cihazlara entegre etmek mümkün olacaktır.

Nanoteknoloji, uluslararası hükümetler tarafından bir anahtar teknoloji olarak tanımlanmaktadır. Nanoteknoloji, devrim sayılabilecek şekilde malzeme ve ürünlerin üretim/tasarım şekillerinde değişiklik meydana getirir. Yeni malzeme, cihaz ve sistemlerin geliştirilmesi, geleneksel bilimsel disiplinlerin ve toplam teknoloji devriminin, ticari aktivitelerin ilaç taşımadan, enerji depolamaya oradan da yeni elektronik malzemelere kadar varan bir çeşitlilikte birbirine yakınlaşmasına, iç içe girmesine öncülük eder.

Bilgisayar hard disklerinin teknolojisi içerisindeki nano yapılandırılmış manyetik katmanlardan otomotiv endüstrisindeki iletken plastikler ve güneş ışınları içerisindeki UV ışınlarını emen koruyucu yüzey kaplama nano parçacıklarına kadar nanoteknolojinin ticari faydaları günümüzde farkedilmektedir [12].

Nanometre boyutunda geçerli olan kanunlar tamamen yeni bir dünya olarak kabul edilebilir. Nano boyuttaki maddelerin özellikleri daha büyük boyutlardakiler kadar öngörülebilir özellikler değildir. Davranışlardaki önemli değişiklikler sadece boyutun küçülmesiyle oluşan karakteristik değişimleri değildir. Aynı zamanda en klasik örnek olarak yarı iletken nano parçacıkların boyutlarına bağlı olarak ışık emisyon renginin değişmesi gibi tamamen yeni bir kanun da olabilir. Nano malzemeler ve nano

cihazların dizaynı, kontrollü bir şekilde üretilmesi ve entegrasyonu muhtemelen büyük bir devrim niteliğinde olacaktır.

Malzemelerin temel birimlerinden bütün doğal malzemeler ve sistemler nano boyutta kendi yapılarını kurarlar. Maddenin atomik ve moleküler seviyede kontrolü, temel özelliklerin -kanunların ve işlemlerin oluştuğu boyut olan- nano boyuta adapte edilmesi anlamına gelir.

Nanoteknoloji, otomobil ve elektronik malzemelerden gelişmiş teşhis, ameliyat, gelişmiş ilaç, yapay doku ve kemik üretimine kadar insan tarafından yapılmış bütün objelerin üretimini etkileyebilir. Atom-atom mühendisliğini kullanarak elektronik cihazlar yapmak için atomlar ve moleküller arasındaki etkileşimi, bunları nasıl kontrol edebileceğimizi, nasıl sabit tutacağımızı, birbirleri arasında hangi sinyallerle haberleşmeyi sağladıklarını ve bu yapıları nasıl gerçek dünyayla birleştirileceği anlaşılacak zorundadır. Bu amaç yeni bilgi, yeni araç ve yeni yaklaşımlar gerektirmektedir [13].

Tablo 2.1 Nanoteknolojinin tarihsel dönüm noktaları

Yıl	Buluşu Yapan	Buluş
1905	Albert Einstein	Molekül Çapının Hesaplanması
1931	Max Knoll & Ernst Ruska	Elektron Mikroskobu
1959	Richard Feynman	'Aşağıda Çok Fazla Yer Var'
1968	Alfred Y. Cho & John Arthur (Bell Lab.)	MBE (Atomik Katman Teşekkülü)
1974	Norio Taniguchi	1µm'nin Altındaki Fabrikasyon Metodları için Nanoteknoloji
1981	Gerd Binnig & Heinrich Rohrer	STM için Nobel Ödülü
1985	Robert F. Curl, Harold W. Kroto, Richard Smalley	Bucky Topları
1986	K. Eric Drexler	Yaratılışın Motoru

Tablo 2.2 Nanoteknolojinin tarihsel dönüm noktaları (Devam)

1989	M. Eigler	STM Aracıyla Yazı
1991	Sumio Iijima(NEC)	Karbon Nanotüpler
1993	Warren Robinett, R. Stanley Williams	SEM ile Sanal Gerçeklik Sisteminin Birleştirilmesi
1998	Cees Dekker ve Arkadaşları	Karbon Nanotüp Transistör
1999	James M. Tour & Mark A. Read	Tek Molekül Anahtarlama
2000	Eigler ve Arkadaşları	Kuantum Çitleri ve Aynaları
2001	Florian Bamberg	Nanotüpleri Elektron Işınıyla Lehimleme
2004	İntel	90nm. Teknolojisiyle Pentium IV "Prescott" İşlemcisini Üretti
2006	Yi Lu ve Arkadaşları	DNA Molekülleriyle Zeki Nano Malzemeler

2.2.1. Moore kanunu

1965 yılında Intel'in kurucularından birisi olan Gordon Moore tarafından yapılan ve bir inç kare içerisindeki entegre devrelerin, entegre devre ilk bulunduğu beri her yıl ikiye katlandığını söyleyen gözlem Moore Kanunu olarak anılmaktadır [14]. Moore bu trendin görülebilecek bir geleceğe kadar devam edeceğini öngörmüştür. Sonraki yıllarda ilerleme hızı biraz yavaşladı. Ama veri yoğunluğu yaklaşık 18 ayda bir ikiye katlandı. Bu, Moore'un kendisinin de hayattayken gördüğü Moore Kanununun şimdiki tanımı olarak kabul edilmekte. Moore'un da dahil olduğu pek çok uzman Moore Kanununun en az 20 yıl daha bu şekilde geçerliliğini sürdüreceğini öngörmektedir.

Moore'un orijinal formülasyonu neydi? O, sadece hesaplama gücüyle ilgili bir şey değildi. Bundan daha öte yapıların boyutlarının küçülmesiyle ilgili bir şeydi. Moore'un orijinal olarak ne söylediğini anlamak bize yarı iletken üretiminde temel

faktörleri ve bizim bilgisayarlarla ve günümüz teknolojisiyle neler yapabileceğimiz hakkında bilgi sahibi olma imkanı tanıyacaktır.

Düşük maliyet, entegre devrelerin en büyük avantajlarından birisidir. Tek bir alt tabaka üzerinde daha büyük devrelerin üretilmesi işlemi devam ettiği sürece de bu avantaj devam edecektir.

Mikroelektronikte günümüzdeki gelişmeleri Moore kanunları domine etmekte ve her yıl çip başına transistör sayısı ikiye katlanmaktadır. Yakında mikroişlemci mimarisi çip başına 10 GHz.'i aşkın bir hızla çalışmak suretiyle 1 milyarı aşacağı öngörülmektedir. Şu andaki fabrikasyon teknolojisiyle bu küçülme hızına yetişilememekle kalmayıp aynı zamanda güç ihtiyacında da çok ciddi oranlarda artış ortaya çıkacaktır. İlaveten CMOS FET içindeki 20 nm. olarak öngörülen kanal uzunluğu, 2014 yılına kadar kapı oksit kalınlığını 2 tek katman civarında düşürecektir. Sonuç olarak birleşik tünelleme-indükleme akım sızıntısı ve dielektrik bozulma cihaz bozulmalarında başlıca sebep olacaktır.

Basit bir devre için bileşenlerin maliyeti devre içerisinde yer alan elemanların sayısı ile ters orantılıdır. Yani birim alana ne kadar fazla devre elemanı sıkıştırabilirsek eleman başına düşen maliyeti o nispette azaltılmış olur.

2.3. Boyutla Değişen Özellikler

Küçük boyutlu malzemelerin boyutları nanometre boyutuna doğru düşerken elektronik, manyetik, optik, katalitik ve termodinamik özellikleri dökme materyallerin gösterdiği özelliklerden tek moleküllü malzemelerin özelliklerine doğru büyük oranda bir değişim gösterir. Mikrometre boyutundaki malzemeler yaygın olarak kullanılırken nano boyuttaki malzemelerin göstermiş olduğu bu değişime benzer bir değişim göstermezler. Mikro boyutlu malzemeler genel olarak dökme malzemelerle aynı özelliklere sahiptirler. Bununla birlikte nano boyutta malzemelerin temel özellikleri başka hiçbir boyutta görülmeyen şekilde malzemenin

boyutuna, şekline ve kompozisyonuna bağlıdır. Yani nano boyut diğerlerinden tamamen farklı bir küçüklük boyutudur.

Boyuta bağlı özelliklerin değişimi, nano boyuttaki objelerin hem bilimsel çalışmalar için hem de endüstri için çok büyük bir potansiyele sahip olmasında ana etkidir. Nano parçacıkların fiziksel özellikleri yoğun bir şekilde güncel ilginin konusu olmuştur [15].

Belli bir malzemenin hangi boyuta geldiğinde dökme malzeme özelliğinden boyuta bağlı özellikleri göstermeye başlayacağını önceden tespit etmek oldukça zordur. Bu eşik noktası her malzeme ve özellik için farklıdır.

Maddenin temel özellikleri, yapıtaşı olan atomların kimyasal yapıları ve madde içinde bu atomların dizilişleriyle belirlenir. Örneğin bakır, oda sıcaklığında katı ve iyi bir iletken, hidrojen ve oksijen moleküllerinden oluşan suysa sıvı ve şeffaftır. Gündelik hayatımızda kullandığımız, karşılaştığımız nesnelerin boyutları atomların boyutundan (1 Angstrom = 10^{-10} m) o kadar büyüktür ki bir fındık büyüklüğündeki maddede trilyon kere trilyon civarında atom bulunur.

Makroskopik boyutlardaki bir altın telin iki ucuna elektriksel gerilim (V) uygulandığında belli bir akım (I) ölçülür. Telin ölçülen direnci ($R=V/I$) telin uzunluğuyla (L) ve altının öz direnciyle (ρ) doğru, kesit alanıyla (A) ise ters orantılıdır;

$$R = \rho L/A \quad (2.1)$$

Dolayısıyla telin direnci geometrik ölçülerinin yanısıra hangi malzemedan yapıldığıyla da belirlenir. Öz direnci belirleyen etkenlerden bazıları, malzemedeki birim hacimdeki serbest elektronların sayısı (n), bu elektronların etkin kütleleri (m) ve bu elektronların kristal içinde hangi sıklıkla çarpışma yaşadıklarıdır:

$$\rho = m/(n l^2 \tau) \quad (2.2)$$

Eğer, τ sürede bir elektronun kristal içinde katedeceği ortalama yol (l) telin uzunluğundan çok daha küçükse, elektronların taşınımı difüzyon karakterinde olacaktır.

Burada özetlemeye çalıştığımız elektriksel direnç mekanizması, kullanılan telin ölçülerini küçültmeye başladığımızda uzunca bir süre değişmeden aynı kalır. Uzunluğu mikrometre (metrenin milyonda biri) mertebesinde olan altın tellerde bile elektronlar bir uçtan diğer uca ulaşmaya kadar pek çok (yaklaşık 10) çarpışma yaşarlar. Ancak kalınlıkları nanometre ölçeğine (on atomdan daha az), boyları da 100 nanometrenin altına indiğinde mikroskopik tellerin elektriksel, mekanik ve diğer özellikleri çok farklılaşmaya başlar. Bu durumda, nanotelin iletkenliği uzunluğundan bağımsız olarak yalnızca kalınlığıyla ve evrensel sabit bir değer (iletkenlik kuantumu) katları halinde belirlenir [16].

2.3.1. Termal özellikler

Nano kristallerin pekçok eşsiz özelliklerinin arasında yer alan erime noktası sıcaklıkları nano kristalin yarıçapıyla bağlantılıdır ve malzemenin pek çok özelliklerini belirleyen önemli termodinamik karakteristiklerden birisidir. Araştırmalar göstermiştir ki bir malzemenin erime noktası sıcaklığı kesinlikle boyuta bağlıdır ve dökme malzemenin erime noktası sıcaklığından her zaman düşüktür [17-19].

2.3.2. Mekanik özellikler

Bazı nano malzemeler aynı zamanda kendilerine has mekanik özellikler de sergilerler. Örneğin karbon nano tüpler ısıya karşı oldukça dayanıklıdır. Ek olarak esneklik özelliği de gösterirler. Aynı zamanda karbon nano tüpler bilinen en katı malzemedir.

Makroskopik bileşenlerin dizaynı, yaklaşık 1mm. üzerindeki bütün büyüklükler için uzunluktan bağımsız olan mühendislik malzemelerinin tepkilerine dayanılarak yapılır. Mikrometre boyutu civarında ve daha düşük boyutlarda bu özellik işlememeye başlamaktadır. Bu büyüklük etkisi özellikle plastisite ve kırılabilirlik gibi geri çevrilebilir işlemler için önemlidir. Plastisite için, deneysel deliller göstermiştir ki malzeme ne kadar küçük olursa o kadar sert olur. Kırılabilirlik sıklıkla boyutla bağlantılıdır. Çünkü fiziksel mekanizma direk olarak, kırılabilirlik karakteristiği küçülme miktarıyla aynı oranda artan mikro yapıyla bağlantılıdır. Bu boyutlarda yüzeyler de önemli hale gelir. Bununla birlikte temas ve kırılabilirlik gibi yüzey özellikleri de boyuta bağlı olarak değişen özelliklerdir.

2.3.3. Optik özellikler

Makro boyutlu malzemeler genel olarak dökme malzemelerle aynı özelliklere sahiptirler. Bununla birlikte nano boyutta malzemelerin temel özellikleri başka hiçbir boyutta görülmeyen şekilde malzemenin boyutuna, şekline ve kompozisyonuna bağlıdır. Yani nano boyut diğerlerinden tamamen farklı bir küçüklük boyutudur.

Altını her seferinde keserek daha küçük parçalara ayırabilirsiniz. Bu kesme işlemi sırasında belli bir noktaya gelinceye kadar aynı renk, erime noktası sıcaklığı vb. özellikleri aynı kalır. Ama nano boyutun belli bir noktasında altın parçacıkları farklı davranmaya başlarlar.

2.3.4. Elektriksel özellikler

Nano boyuttaki malzemelerin elektriksel özellikler bakımından da makro boyutta gösterdiği özellikleri göstermeleri gerekmez. Makro boyutta iletken olan bir malzeme nano boyutta yalıtkan hale gelebilirler ya da tam tersi makro boyutta yalıtkan olan bir malzeme nano boyutta iletken bir özellik kazanabilir. Örneğin bir yalıtkan yeterince ince hale gelince kuantum tünellemesi adı verilen bir etki ile elektrik akımını geçirebilir. Bu durum klasik olarak karşılaşılmayan, sadece nano ya da daha küçük boyutta görülen bir etkidir.

2.3.5. Manyetik özellikler

Malzemelerin manyetik özellikleri de diğerleri gibi boyuta bağımlı olarak değişebilir. Bir mıknatıs yeterince küçük parçalara ayrıldığında manyetik momenti maddenin içinde her zaman hazır bulunan ve termal enerji olarak ta bilinen parçacıkların gelişigüzel hareketlerine aşırı derecede hassas hale gelir. Belli bir noktaya gelindiğinde malzemenin kendi içindeki termal enerjisi manyetik momentin yönünü değiştirmek için gerekli olan enerjiyle benzer hale gelir. Bu da parçacıkların gelişigüzel hareketlerini önemli bir hale getirir. Bu kritik büyüklük nano boyutta ortaya çıkar. Harddiskler ve veri kaydeden kasetler manyetik malzemelerin özelliklerine dayanılarak üretilen uygulamalar arasında yer alırlar. Bu etki, adı geçen ürünlerin depolama yoğunluğunu kısıtlar. Çünkü bu kritik noktanın altında malzemenin manyetik momentumu güvenilmez bir hale gelir. Bu durum da bilgilerin kaybedilmesine sebep olur.

2.3.6. Kimyasal özellikler

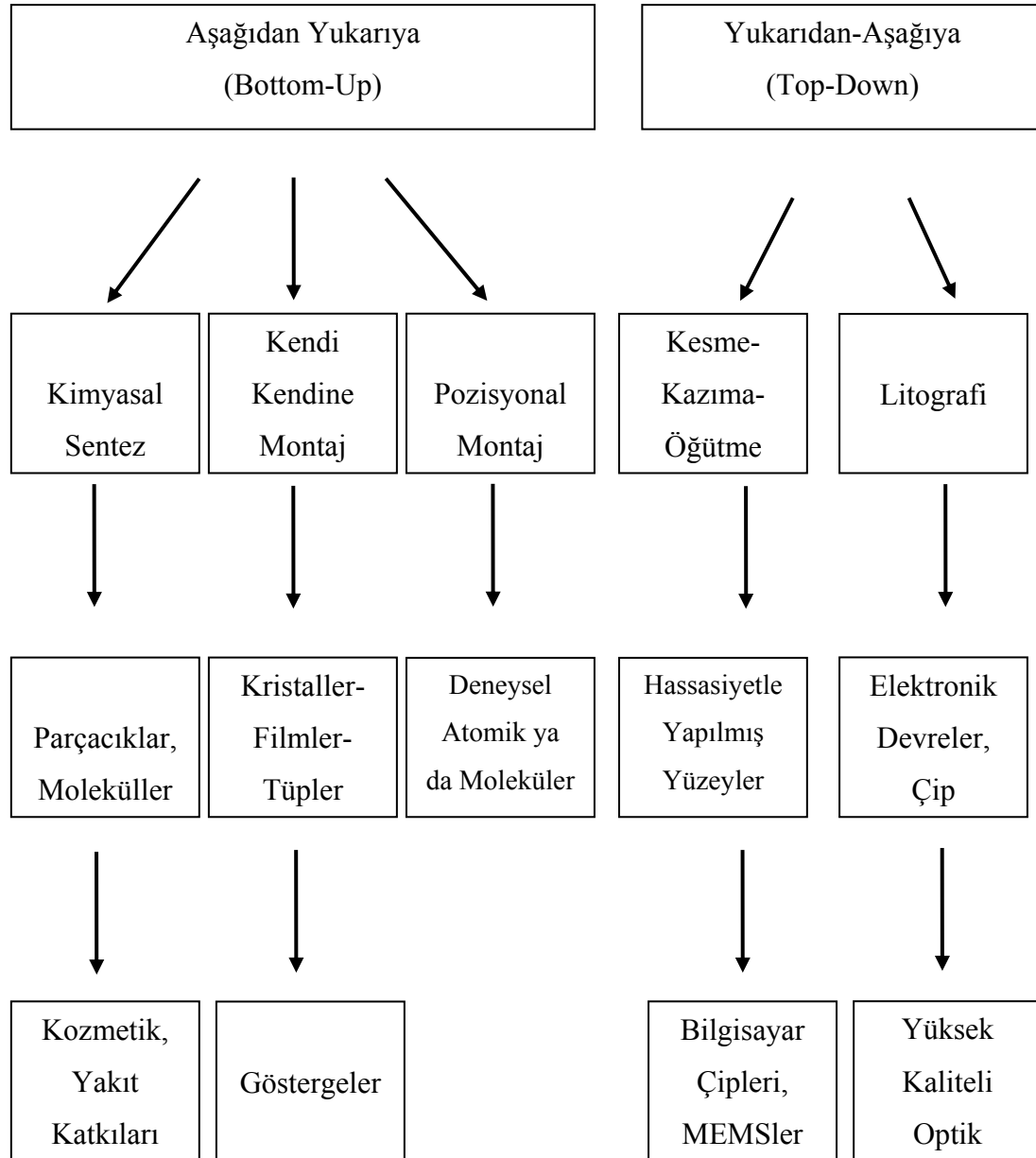
Fiziksel özelliklerine ilave olarak malzemelerin kimyasal özellikleri de boyuta bağlı olarak değişebilmektedir.

Örneğin makro boyutta altın katalitik olarak diğer metallerden çok daha az aktif olarak kabul edilir. Bunun yanında çapı 8nm. 'den daha küçük nano boyuttaki altın parçacıkları bazı kimyasal reaksiyonlarda reaksiyonun hızını artırmak için katalizör olarak kullanılabilir.

Bu parçacıkların bir uygulama alanı otomobillerden çıkan karbonmonoksit (CO) gibi zararlı gazların çok hızlı bir şekilde karbondioksit (CO₂) ve suya dönüştürülmesini sağlamak amacıyla katalitik dönüştürücü olarak kullanılabilir. Altın nano parçacıklarının bu uygulama için kullanılması otomobillerden kaynaklanan hava kirliliğini önemli ölçüde azaltmaya yardımcı olabilir. Çünkü altın nano parçacıkları sıfır derecenin altındaki sıcaklıklarda bile katalizör olarak çalışabilir.

2.4. Nano Yapıların Üretilme Teknikleri

Nanoyapıların elde edimesinde iki ana yöntem bulunmaktadır. Aşağıdan yukarıya (bottom-up) ve yukarıdan aşağıya (top down) üretim metodu. Bu yöntemler Şekil 2.2 de ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Nano yapıların üretilme teknikleri ve elde edilen ürünler

2.4.1. Aşağıdan yukarıya (Bottom-Up) üretim metodu

Aşağıdan yukarıya yaklaşımı (küçükten büyüğe), moleküler nanoteknolojiyi belirtmekte ve organik veya inorganik yapıları, maddenin en temel birimi olan atomlardan başlayarak atom atom, molekül molekül inşa edilmesi yöntemini ifade etmektedir.

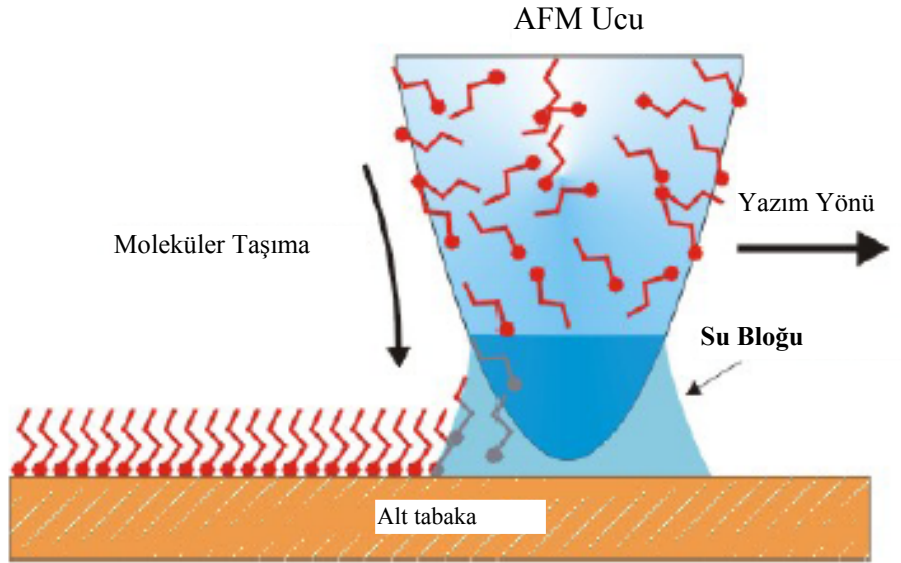
Aşağıdan-yukarıya metodunda, önce nano yapı blokları oluşturulur ve daha sonra son ürün haline getirilmek üzere montaj işlemi gerçekleştirilir. Bu yaklaşıma bir örnek olarak püskürtme tekniği ile toz bileşenlerin oluşturulması ve daha sonra da bunların kompakt hale getirilip son ürünün elde edilmesi verilebilir. Bu teknik, kompozit malzemelerin oluşturulmasında yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.

Bu metot; kimyasal, kendi kendine montaj ve pozisyonel montaj olarak üç ana gruba ayrılır. Bunlardan pozisyonel montaj atomların veya moleküllerin tek tek yerleştirilmesiyle gerçekleştirilen yegane yöntemdir. Genel olarak büyük oranlarda atomlar, moleküller ya da partiküller kimyasal sentez metoduyla sentezlenir ve daha sonra istenilen yere monte edilirler.

Kimyasal sentezde ilk adım nano partiküllerin oluştuğu ya da oluşturulabileceği halin ya da fazın oluşturulmasıdır. Nano partiküllerin büyüyebileceği faz elde edilince genellikle bir kimyasal reaksiyon oluşur. Son ürünü elde etmek için daha başka faz değişimi ya da katı hal reaksiyonu gerekli olabilir.

Kendi kendine montaj metodu, atomların ya da moleküllerin kendilerini belirlenen şekillerde düzenleyerek birimler arasındaki fiziksel ya da kimyasal etkileşimlerle nano yapılara dönüştürdükleri bir aşağıdan-yukarıya metodudur. Tuz kristalinin ve kar tanesinin oluşumu örnek olarak verilebilir. Kendi kendine montaj tabiatta binlerce yıldır gerçekleşiyor olmasına karşılık nanoteknolojide kullanımı oldukça yenidir. Bu metoda, daha az kirlilik üreterek ve daha az enerji gerektirerek gerçekleşmesinden dolayı büyük bir ilgi mevcuttur.

Pozisyonel montaj ise atom ve moleküllerin kontrollü olarak teker teker istenilen yerlere yerleştirildikleri bir aşağıdan-yukarıya metodudur. Çalışılan yüzeyler için taramalı pozisyon mikroskobu (SPM) ya da optik cımbızlar kullanılabilir. Pozisyonel montaj yöntemi çok fazla işçilik ve zaman gerektirdiği için henüz atomik boyutta endüstriyel işlemler için uygun değildir.



Şekil 2.2. Batırılmış kalem litografi [20]

2.4.2. Yukarıdan aşağıya (Top-Down) üretim metodu

Yukarıdan aşağıya yaklaşımı (büyükten küçüğe), makineler, asitler ve benzeri mekanik ve kimyasal yöntemler kullanılarak nano yapıların fabrikasyonu ve imal edilmesi yöntemlerini ifade eder.

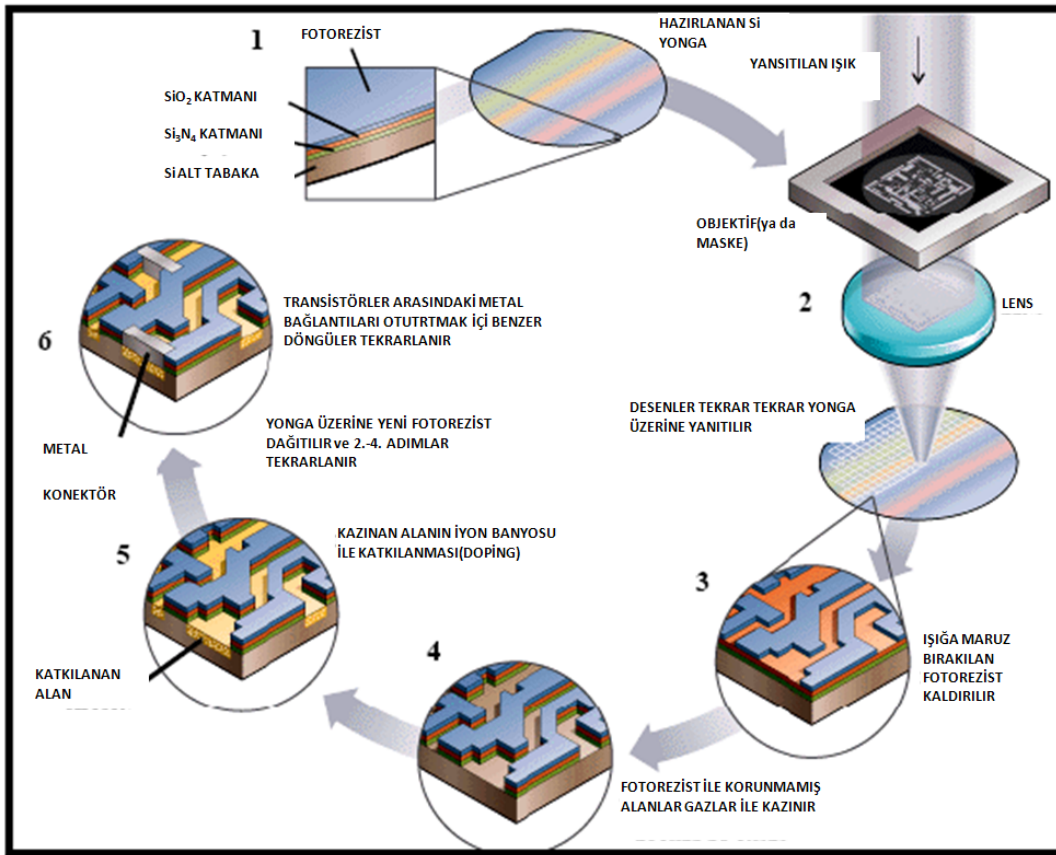
Teknolojinin bugünkü seviyesi sebebi ile yapılan çalışmaların birçoğu yukarıdan aşağıya (top-down) sınıfında değerlendirilir.

Yukarıdan-aşağıya üretim metodu, büyük bir parça malzeme ile başlayarak kazıma, öğütme ya da makinada işleme tabi tutma suretiyle malzemeleri çıkartarak nano yapılar elde etme metodudur (örneğin çipler üzerindeki devreler). Bu işlem mükemmel bir şekilde ayarlanmış mühendislikle, litografiyle yapılabilir ki bu

teknikler 30 yıldan uzun süredir yarı iletken endüstrisinde kullanılmış ve geliştirilmiştir. Yukarıda-aşağıya metodları fazla enerji harcamaları ve aşağıdan yukarıya tekniğine göre daha fazla artık madde üretmelerine rağmen daha karmaşık ve güvenilir yapılar oluşturmaya imkan sağlamaktadırlar.

Yukarıdan-aşağıya tekniğine bir başka örnek değirmende öğütme metodudur. Bu teknikte nano yapının oluşturulması, kontrollü bir biçimde dökme bir malzemenin öğütülmesiyle gerçekleştirilir. Bu nano yapılar daha sonra tekrar yeni bir dökme malzemeye monte edilirler.

Entegre devrelerin üretilmesinde litografik işlemler çoklukla kullanılmaktadır. Litografi, yüzeyin ışık, iyon ya da elektrona maruz bırakılarak şablon oluşturulması ve daha sonra da istenilen cihazı elde edebilmek için kazıyarak ya da metal koyarak yapılmaktadır. Bilişim teknolojilerinde başarıya ulaşabilmek için nanometre boyutunda şablon oluşturabilmek temel olarak ulaşılması gereken bir noktadır. Temel litografik araçlar; şablonu yazmak için kullanılan fokuslanmış elektron ya da iyon demeti ve bir maskenin üzerinden ışık geçirmek suretiyle şablonu yarı iletken yonga plakasına yazmaya aktarma metodu olmak üzere iki bölüme ayrılabilir. Elektron ve iyona dayalı metodların ikisi de 10nm. nin altındaki yapılar üretme kabiliyetine sahiptirler. Fakat her iki yöntem de üretimde kullanılmayacak kadar yavaş yöntemlerdir. Yarı iletken cihazların üretiminde optik litografi çoklukla kullanılmaktadır. Diğer iki metod kadar küçük boyutlarda yapılar üretemese de optik litografi, ucuzluğu ve hızıyla üretimde kullanılmaya devam etmektedir. Elektron demeti litografi öncelikli olarak optik litografide kullanılacak maskelerin üretiminde, iyon demeti litografi ise daha çok maskeleri tamir etmek ya da çok özel cihaz uygulamaları için kullanılır. Şekil 2.4 te fotolitografi yönteminin uygulanış adımları gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Yukarıdan-aşağıya işleme metoduna bir örnek: fotolitografi

2.5. Nanoteknolojinin Uygulama Alanları

2.5.1. Malzeme ve imalat sektörü

Malzemelerin atomik ve moleküler boyutlardan başlayarak inşa edilmesi, konvansiyonel metodlar ile elde edilen malzemelere oranla daha sağlam ve hafif maddelerin ortaya çıkmasını sağlayacaktır. Bu malzemeler, daha düşük hata seviyeleri ve eşsiz dayanıklılık güçleri ile mevcut birçok endüstriyel süreç için devrimsel yenilikler getirecektir. Benzersiz ve alışılmamış özellikleri ile nano tüpler, elyaflar, lifler ve kaplama malzemeleri imalat yöntem ve tekniklerinin gelişmesine imkan sağlayacaktır.

Yakın bir gelecekte akıllı yüzeyler hemen her yerde karşımıza çıkacaktır. Suyu ittiğinden dolayı silecek gerektirmeyen otomobil camları, buğulanmayan banyo aynaları ve araç iç camları, kendi kendini temizleyen bina dış cepheleri, tıkanmayan stent çeperleri, yosun ve deniz hayvanlarının yapışamadığı gemi dışı yüzey boyaları, ve sürtünmesiz yüzeyler akla ilk gelen akıllı yüzey uygulamalarından bazılarıdır [21].

2.5.2. Nano elektronik ve bilişim teknolojileri

Elektronik araçların nanometre ölçeklerinde elde edilmesi ile halen kullanılan sistemlerinin işlem güçleri ve kapasiteleri kat kat arttırılabilecektir. Nano teknolojinin kullanım alanlarından biri olarak öngörülen kuantum bilgisayarlarının geliştirilmesi ile günümüzün en modern bilgisayarları olan bilgisayarlar ile kıyaslanamayacak seviyelerde işlem gücü elde etmek mümkün olacaktır. Bunlara ek olarak elektronik araçlar için geliştirilen sensör, gösterge sistemleri ve sinyal iletimi alanlarında çok büyük ilerlemeler kaydedilecektir.

Elektronların hareketinin yarıiletken kristallerde kontrol edilmesi, yeni bir teknoloji devrimine yol açmıştır ve bu teknoloji sayesinde insanoğlunun yaşamı inanılmaz ölçüde kolaylaşmış, bilgisayar, CD çalar gibi bir çok elektronik alet hayatımıza girmiştir. Fakat elektronlar arasındaki etkileşmeler ve elektronların düşük hızlara sahip olmaları, bilim adamlarını yeni arayışlara itmiştir. 1987 yılında periyodik fotonik yapılarda ışığın yasak banda sahip olduğunun gösterilmesi, ışığın hareketinin kontrol edilmesinde bir çığır açmıştır. Fotonlar (ışık kuantaları) hem birbirleriyle etkileşmemekte hem de elektronlara göre binlerce kat daha yüksek hızlara sahip olmaktadır.

Hepsi-optik devreler, elektronik devrelere göre çok daha hızlı çalışacağından, yakın bir gelecekte elektronik çağının yerini fotonik çağa bırakması beklenmektedir [21].

2.5.3. Savunma sanayi

Nanoteknoloji, askeri uygulamalar konusunda birçok alanda potansiyel vaatmektedir. Geliştirilmiş elektronik savaş kapasitesi, daha iyi silah sistemleri, geliştirilmiş kamuflaj ve akıllı sistemler birçok Ar-Ge çalışmasının gerçekleştirildiği alanlardır.

Kimyasal ve biyolojik ajanları tespit edebilecek şekilde üretilecek olan akıllı üniforma, aynı zamanda kalbi duran askere kalp masaj yaparak onu hayata geri döndürebilecektir. Savaş meydanında yaralanan askere ait bütün bilgileri kablosuz haberleşme hattıyla merkeze bildirebilecek, gerektiğinde kısa süre içerisinde gerekli müdahalenin yapılmasına olanak sağlayacaktır. Üniforma, gerektiğinde çok sert bir zırha dönüşebileceği gibi, askeri cihazların ihtiyacı olacak enerjiyi de güneşten sağlayacaktır[21].

2.5.4. Çevre ve enerji

Günümüzün en önemli küresel sorunlarından birisi hiç kuşkusuz hızla artan enerji ve yakıt tüketimidir. Kısa sürede çözüm bulunamazsa, 50 yıl içerisinde yeryüzündeki doğal kaynakların tükenmesi beklenmektedir. Ayrıca bu yakıtların çevreye verdiği zarar bazı bölgelerde ciddi sorunlar oluşturmaya başlamıştır. Bu nedenle gelişmiş ülkelerde yeni enerji kaynakları üzerine yapılan araştırmalara önemli destekler verilmektedir.

Nano malzemelerin ve nano kompozitlerin fosil yakıt endüstrilerinin verimliliğini geliştirme potansiyeli bulunmaktadır. Nano kompozitlerin yaygın olarak kullanılması ile daha yüksek verimliliğe sahip motorların ve dolayısı ile daha temiz, çevre dostu ulaşım sistemlerinin kurulması mümkün olacaktır.

2.5.5. Sağlık sektörü

Nanoteknoloji, yaşayan sistemlere moleküler seviyelerde müdahale etme imkanı sağlayacaktır. Yaşayan organizmalar ile etkileşime geçebilecek boyutlarda araçlar üretilmesi ile birçok yeni teşhis ve tedavi yöntemlerinin gelişmesi olasıdır.

Son yılların en önemli tıbbi problemlerinden birisi de vücuttaki kanserli hücrelerin, sağlıklı dokulara zarar vermeden yok edilmesinin sağlanmasıdır. Ayrıca anti tümör terapiler için bağışıklık sisteminin harekete geçirilip kanserli hücreleri yok etmesini sağlamak da çok önemlidir. Kemoterapi, kanserli hücreleri yok ederken aynı zamanda sağlıklı dokulara da zarar vermektedir. Bundan dolayı birçok hastanın tedavi boyunca uygulanan yöntemlerin yan etkilerinden dolayı rahatsızlıkları büyük bir sorun oluşturmaktadır. Geliştirilecek olan akıllı ilaç sistemleri ile bu problemin çözülebileceği öngörülmektedir [21].

2.5.6. Tekstil

19. yüzyıl başlarında gelişmeye başlayan tekstil endüstrisi nanoteknoloji sayesinde yeni bir döneme girmeye hazırlanmaktadır. Tekstilde kullanılan malzemelere nanometre boyutlarında farklı özellikler kazandırılması çok önemli gelişmelere yol açacaktır. Örnek olarak, çorap ipliğinin gümüş nano parçacıklar ile katkılandırılması, çorap içerisinde bakteri ve mikrop barınmasını engelleyeceğinden koku oluşumunu önlemiş olacaktır. Suyu sevmeyen (iten) kumaşlardan üretilmiş tekstil ürünlerinde kirlenme engellenmiş, dolayısıyla yıkama ve tekrar ütüleme ihtiyacı en aza indirilmiş olacaktır. Böylece su sarfiyatı azalacak, hatta belirli bir süre sonra belki de çamaşır makinelerine bile gereksinim kalmayacaktır.

2.5.7. Ziraat ve biyoteknoloji

Son yıllarda gelişmekte olan nanoteknoloji-biyoloji beraberliği insanoğlunun birçok çözülmez gibi görünen problemlerini çözmeye başlamıştır. Canlı memeli nöronlarının aksonları ve dentritleri boyunca iletilen sinir sinyallerini saptamak,

güçlendirmek veya zayıflatmak (yani beyin faaliyetlerinin elektro fizyolojik ölçümünü sağlamak) için geliştirilen incecik silisyum nano kablolar, nanoteknoloji ve nörobilim arasında yepyeni bir etkileşim alanı oluşturacaktır.

2.5.8. Havacılık ve uzay araştırmaları

Havacılık ve uzay araçları çok maliyetli teknolojilerdir. Bu araçların imalatı sırasında kullanılan malzemelerin ağırlığı maliyetlerin yüksekliğinde çok önemli bir yer tutmaktadır. Nanoteknoloji bu malzemelerin ağırlığının önemli ölçüde azaltılması ile maliyetlerin düşürülmesini sağlayabilir. Ayrıca çekme direnci çelikten kat kat yüksek nano tüpler sayesinde dünya yüzeyinden atmosfere kadar yükselebilecek yapılar inşa edilmesi potansiyel uygulama alanları içinde yer alabilir. Böylece uzay araştırma maliyetlerinin büyük bir kısmını meydana getiren fırlatma maliyetleri düşürülebilir.

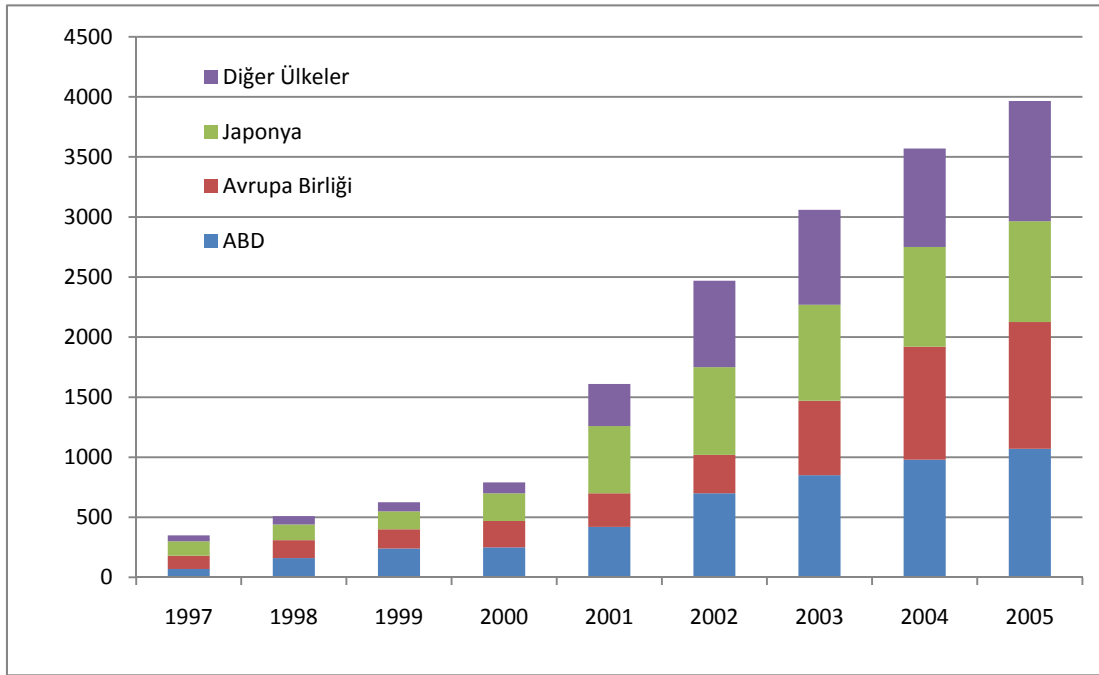
2.6. Dünyada Nanoteknoloji

Amerika Birleşik Devletleri Hükümeti 2008 yılı itibariyle nanoteknoloji kullanılarak üretilen ürünlerden yaklaşık 320 milyar dolar tutarında gelir elde edileceğini, gelecek on yıl içerisinde ise nanoteknoloji ürün ve hizmetlerini kapsayan 1 trilyon dolar hacminde küresel pazar oluşacağını tahmin etmektedir. Gelişen Nanoteknoloji alanlarında akademik programlar oluşturulmaktadır. Kırk tanesi ABD’de olmak üzere nanoteknoloji alanında yaklaşık 140 üniversite programı bulunmaktadır.

Avrupa Birliği’nin 1994-1998 yılları arasında yürütmüş olduğu 4. Çerçeve programı kapsamında nanoteknoloji alanında araştırma yapan yaklaşık 80 firma desteklenmiş, 1998- 2002 yıllarını kapsayan 5. Çerçeve programı kapsamında ise bu alana yapılan destek miktarı yıllık 45 milyon Euro civarında olmuştur. Geniş bir yelpazede yapılan destekler arasında nano-elektronik cihazlar, karbon nanotüpler, biosensörler, moleküler tanımlama sistemleri, nano-kompozit malzemeler ve yeni mikroskop teknolojileri öne çıkmaktadır.

6. Çerçeve Programının tematik öncelikli bu alanı, nanoteknoloji ve nanobilim çalışmalarını, bilgi tabanlı çok işlevli malzemeler ile yeni üretim süreçleri ile araçlarının geliştirilmesini kapsamaktadır. Nanoteknoloji öncelikli alanının iki ana hedefi vardır; birincisi yenilikçi nanoteknoloji ürünlerinin günümüzün endüstriyel sektörlerine tanıtılması, ikincisi ise yeni malzeme, yeni araç ve yeni ürünlerin geliştirilmesi ile yeni endüstri kolları ve sektörleri yaratılmasını teşvik etmek olarak özetlenebilir.

Ayrıca Avrupa Birliği ülkelerinin birçoğunda nanoteknoloji alanında gerçekleştirilen araştırma ve geliştirme çalışmalarını destekleyen ulusal programlar bulunmaktadır.



Şekil 2.4. Yıllara göre milyon dolar cinsinden nanoteknolojiye yapılan yatırımlar

Amerika Birleşik Devletleri'nde 1999 yılında yayımlanan ulusal nanoteknoloji bildirgesi ile ülkenin nanoteknoloji alanındaki öncelikleri belirlenmiş ve bu konuda yapılan Ar-Ge çalışmaları için bütçeler ayrılmıştır. 2000 yılında nanoteknoloji alanında yapılan Ar-Ge çalışmalarına hükümet tarafından sağlanan destek 420 milyon dolar civarında iken 2001 yılı bütçesinde bu alana ayrılan pay yaklaşık 520

milyon dolara ulaşmış, 2003 yılı için ise yaklaşık 700 milyon dolar olarak belirlenmiştir.

Aşya ülkeleri içinde nanoteknolojiye yatırım yapan ülkelerin başında Japonya gelmektedir. Japonya dünyada ABD'den sonra nanoteknoloji alanında en fazla Ar-Ge harcaması yapan ikinci ülke konumundadır. Nanoteknoloji üzerine yapılmakta olan yatırımın her yıl %15 ile %20 oranında artmakta olduğu Japonya'da nanoteknoloji tanımı dünyanın geri kalan ülkelerine oranla çok daha geniş kapsamlıdır. Moleküler seviyede yapılan birçok araştırma (örnek vermek gerekirse, DNA üzerine yapılan araştırmalar) nanoteknoloji tanımı içerisinde yer almaktadır. Ayrıca NEC ve Sumitomo gibi firmalar carbon nanotüpler alanında çalışmalar yürütmekte, araştırmalar-gerçekleştirmektedir.

Güney Kore, nanoteknolojinin mikro elektronik uygulamaları alanında yoğunlaşmıştır. Nanoteknoloji çalışmalarının sürdürüldüğü birçok üniversite ve araştırma merkezi olduğu gibi Güney Kore'nin en büyük şirketlerinden biri olan Samsung, mikro elektronik uygulamalar ve mikro elektro-mekanik sistemler (MEMS) üzerine araştırmalar yürütmektedir.

Tayvan, Singapur, Tayland, Hindistan ve Vietnam nanoteknolojiyi öncelikli alan olarak belirlemiş ve uygun çerçeveyi belirlemek için adımlar atmaktadır.

BÖLÜM 3. METAL-OKSİT NANO KABLolar

Karbon nano tüplerin 1991 bulunuşundan beri dikkatleri üzerine önemli ölçüde toplayan nano ölçekli materyallerden birisi de bir boyutlu (1D) sistemler olmuştur. Bir boyutlu sistemlerin sentezlenmesi, karakterizasyonu ve cihaz uygulamalarıyla ilgili pek çok araştırma çalışması başarıyla tamamlanmıştır. Bir boyutlu (1D) sistemler, yüksek en-boy oranı ile bu yapılar daha iyi kristal özellik, daha yüksek entegrasyon yoğunluğu ve düşük enerji ihtiyacı gibi özellikleri sayesinde daha gelişmiş elektronik sistemler oluşturma imkanı sağlarlar. Aynı zamanda geniş bir hacim-yüzey oranı ve küçük boyutları sayesinde yüzey kimyasal işlemlere karşı yüksek hasasiyet gösterirler. Ek olarak ölçü sınırlaması, ayarlanabilir bant genişliği, daha yüksek optik kazanım ve daha yüksek operasyon hızı gibi avantajları da beraberlerinde getirmektedirler.

Tek element ve bileşik yarı iletkenleri de içeren çeşitli inorganik nano materyaller başarılı bir şekilde sentezlenmiştir [22]. Bu malzemeler fiziksel özellik karakterizasyonları ile gelecek nano boyuttaki elektronik, optoelektronik ve sensör uygulamaları için ümit vaadeden materyaller olduklarını göstermişlerdir. Yarı iletkenler arasında çok değişik özellikleri ve fonksiyonları ile metal-oksitler en kullanışlı materyaller olarak ayrı bir yer tutarlar. Onların bu özellikleri sadece dökme malzemelerinden gelen piezo elektrik, kimyasal algılama, ışık algılama gibi özellikler olmakla kalmayıp aynı zamanda yüksek anizotropik yapıları ve boyut sınırlamalarından da kaynaklanmaktadır.

3.1. Tek Boyutlu (1D) Metal-Oksit Sistemlerin Sentezlenmesi

Bir boyutlu (1D) nano yapıların üretilmesi için kullanılan pek çok farklı metod bulunmaktadır. Sentezlenme ortamlarına göre bu metodları buhar faz üretim ve sıvı

(solüsyon) faz üretim olarak ikiye ayırabiliriz. Pek çok metal-oksit nano yapılar iyi bir şekilde geliştirilmiş olan ve metal buharı ile oksijenin reaksiyonu sonucu oluşan buhar faz tekniği ile üretilirler. Üretim esnasındaki temel mekanizmalar buhar-sıvı-katı (VLS) ve buhar-katı (VS) işlemleridir. Diğer taraftan solüsyon faz üretim metodları, bir boyutlu nano yapıların daha ucuz şekilde elde edilmesine ve daha fazla esnekliğe imkan sağlar.

3.1.1. Buhar faz malzeme üretimi

Yüksek sıcaklıkta buhar faz üretim yöntemi, termal reaktör yardımıyla metal buhar kaynağı ile oksijenin reaksiyonunu kontrol eden basit bir yaklaşımdır. Malzemenin çapını, en-boy oranını ve kristal yapısını kontrol edebilmek için termal kimyasal buhar depozitleme (CVD), direk termal buharlaştırma [23], puls lazer depozitleme (PLD) [24-26] ve metal organik kimyasal buhar depozitleme (MOCVD) [27-29] metodu da dahil olmak üzere pek çok farklı teknik kullanılmaktadır. Bu üretim metodları, buhar-sıvı-katı (VLS) ya da buhar-katı (VS) olmak üzere temel iki mekanizma temelli çalışırlar.

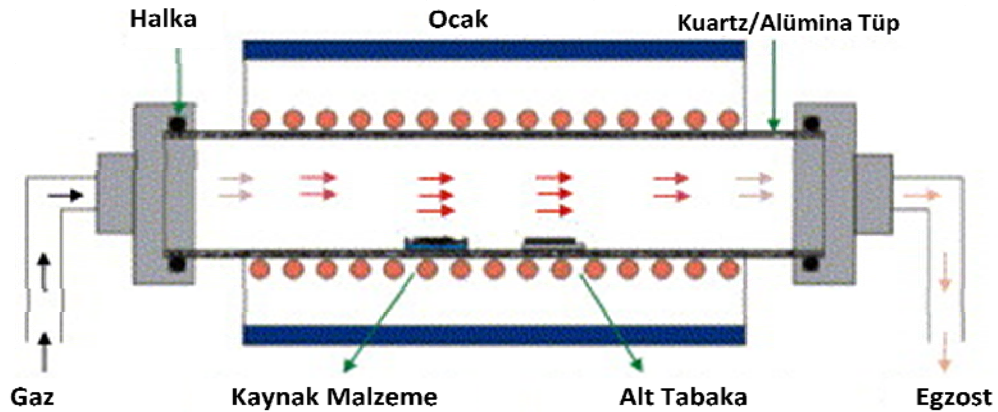
3.1.1.1. Buhar-sıvı-katı (VLS) mekanizması

VLS üretim mekanizması ilk olarak Wagner ve Ellis tarafından 1964 [30] yılında küçük boyutlu Silisyum tellerinin üretimini [31] gözlerken ortaya atılmıştır. Aslında VLS, metal nano kümelerin ya da nano parçacıkların katalizör olarak kullanıldığı, katalizör yardımıyla gerçekleştirilen bir üretim tekniğidir. Bu tohumcuklar, ara yüzey enerjisini, büyüme yönünü ve 1D yapının çapını belirlerler. Bundan dolayı uygun bir katalizör seçimi çok önemlidir. 1D metal-oksitlerin üretimi esnasında VLS işlemi katalizör ve kaynak metali içeren alaşım damlacığı tarafından başlatılır. Sıvı damlacık tamamen kaynak metalle doymuş hale geldikten sonra çökme işlemi başlar. Oksijen akışı altında 1D metal-oksit kristal oluşur [32]. Normalde büyüme tipi epitaksiyel olduğu için oluşan nano yapının kristal kalitesi yüksektir. Bazı araştırmacılar VLS işlemini gerçek zamanlı olarak geçirmeli elektron mikroskobu (TEM) ile gözlemek suretiyle ispatlamıştır [33].

Metal-oksit nano kabloların ZnO [34], MgO [35], CdO [36], TiO₂ [37], SnO₂ [38], In₂O₃ [39], and Ga₂O₃ [40] gibi çok büyük bir kısmı katalizör yardımı mekanizması kullanılarak sentezlenmiştir.

VLS mekanizması ile çalışan pek çok yaklaşımlar ortaya konulmuştur. Örnek olarak termal CVD sentez işlemi; termal reaktör metal kaynağı buharlaştırmak için kullanır. Daha sonra yeterli miktarda oksijen gazı, gaz akış kontrol cihazı yardımıyla ortama bırakılır. Bununla birlikte oksijen gazı ya da metal buharı, metal-oksit kaynak malzemenin [41, 42] karbotermal ya da hidrojen indirgenmesi yoluyla ve oksijen gazı yerine su buharının ortama verilmesi [43] gibi pek çok değişik metotla sağlanabilir.

Şekil 3.1 de tipik bir CVD tekniğinin kurulumu görülmektedir. Sistem, yatay tüp ve ısıtma elemanından oluşmaktadır. Kaynak malzeme tüpün içine yerleştirilir ve katalizör nano parçacıklarla kaplanmış başka bir alt tabaka (silisyum, silisyum oksit, safir vb.) gaz akışının altına gelecek şekilde konulur.

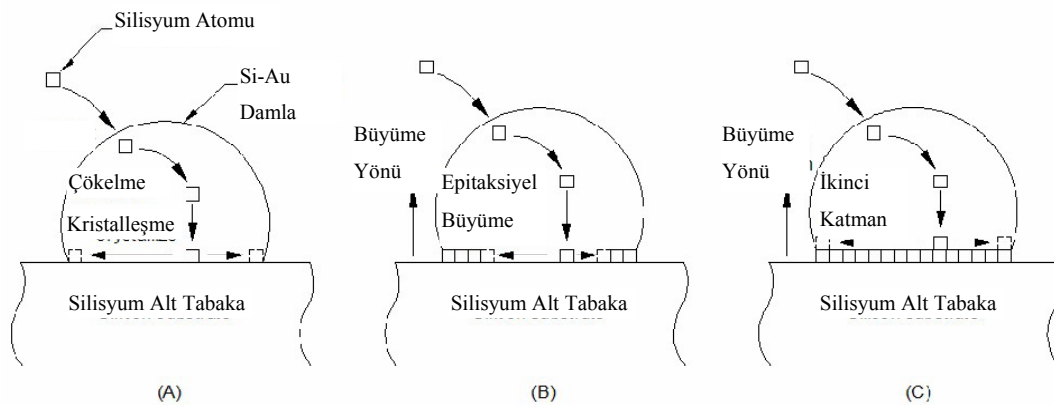


Şekil 3.1. Tipik bir CVD sentezleme düzeneği

VLS işlemi içerisinde hala bilinmeyen mekanizmalar bulunmaktadır. Givargizov, VLS mekanizmasını görebilmek ve devam ettirebilmek için gerekli olan şeyleri yayınlamıştır [44]. Bunlar;

- Nano kablo büyümesinin oluşması için ortamda bulunan malzemenin saflığını bozan atomlar kristal malzeme ile sıvı bir solüsyon oluşturması gerekir.
- Oluşum sıcaklığında katının çözünürlüğü sıvının çözünürlüğüne göre küçük olmalıdır. Nano kablonun oluşabilmesi için öncelikle katalizör damlanın oluşturulması hedeflenmelidir.
- Tüm sıvı damla üzerindeki denge buhar basıncı küçük olmalıdır.
- Sentezleme için kullanılacak atomlar tüm ürünlerin oluşturabileceği kimyasal reaksiyonlara kapalı olmalı.
- Sıvı damlacığın büyüyen kristale temas açısı büyük olmalı.
- Büyüyen bileşke kristal için (GaAs, SiC gibi) sıvı damlacık büyüyen bileşiklerden birisi olabilir (Ga ya da Si gibi).
- Büyüme için uygun büyüme koşullarının artışı, oluşabilecek diğer ara faz formasyonları önleyecek şekilde uygun sıcaklık seçimini gerektirir.
- İki faz arasındaki kristolografik oryantasyon açısından alt tabaka ile sıvı damlacık arasındaki arayüz iyice tanımlanmış olmalıdır.

Şekil 3.2 de Silisyum nano kablonun büyümesi şematik olarak gösterilmektedir. a'da Si atomları sıvı damlacığın içine sızmakta ve enerji seviyesi en düşük olan damlacık-alt tabaka arayüzüne gitmektedirler. b'de epitaksiyel büyüme işlemi başlıyor, c'de ise ilk katman oluşumu tamamlandığında diğer katmanın oluşumu başlamaktadır.



Şekil 3.2. Silisyum nano kablonun büyümesinin şematik gösterimi [45]

3.1.1.2. Buhar-katı (VS) mekanizması

Buhar-katı (VS) işlemi pek çok katalizörsüz büyüme işlemi içerisinde gerçekleşir [46-48]. Bu durum sıklıkla gözlemlenen bir durum olmasına karşın hala temel olarak anlaşılabilmiş değildir. Çok az sayıda çalışma bu işlemi serbest yüzey enerjisinin minimize edilmesi olgusuyla açıklamaktadır [49, 50]. Yüksek sıcaklıkta metal direk olarak buharlaşır ve aşağı kısımda bulunan daha düşük sıcaklığa sahip alt tabakanın üzerinde yoğunlaşır. Yoğunlaşma işlemi gerçekleştikten sonra yoğunlaşan moleküller ilk kristaller olarak başlangıç yapısını oluştururlar. Sonuç olarak bu moleküller yüzey enerjisini minimize etmek için büyümeye başlarlar. Bu büyüme işlemi pek çok termodinamik parametrenin etkisiyle ve kompleks bir şekilde gerçekleşmektedir.

3.1.2. Solüsyon faz malzeme üretimi

Nano kabloların, nano çubukların ve nano iğneciklerin büyütülmesinde solüsyon metodu başarıyla uygulanmaktadır. Bu sentezleme metodu, genellikle önemli ölçüde karmaşıklığı ve maliyeti düşürmesi için düşük ortam sıcaklığı gerektirir. Büyüme yönünü kontrol etmek için araştırmacılar kalıp yardımıyla ve kalıpsız olmak üzere iki gruba ayrılabilir pek çok yöntemler geliştirmişlerdir.

3.1.2.1. Yüzey aktif madde yardımıyla büyüme

Yüzey aktif madde büyüme metodu metal-oksit nano kabloların büyütülmesinde uygun bir yöntem olarak benimsenmektedir. Bu büyüme genellikle yağ faz, yüzey aktif faz ve sulu faz olmak üzere gerçekleşir. Emülsiyon sistemde yüzey aktif madde mikro reaktör olarak görev yapar. İstenilen malzemeyi elde etmek için başlangıç maddesi ve yüzey aktif madde çok dikkatlice seçilmelidir. Ayrıca sıcaklık, pH değeri ve reaksiyona girecek malzemelerin yoğunluğu da uygun olarak ayarlanmalıdır.

Sonuç olarak yüzey aktif madde yardımıyla sentezleme, deneme-yanılma yöntemiyle uygun bileşenlerin bulunabilmesine imkan sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem kullanılarak ZnO [51], SnO₂ [52], NiO [53] nano çubukları üretilmiştir.

3.1.2.2. Sono kimyasal metot

Sono kimyasal metotta, reaksiyon ortamını akustik olarak ya hızlandırmak ya da değiştirmek için ultrason dalgalarını kullanılır. Sonikasyon işlemi sıvı içerisinde pek çok baloncunun oluşmasına, büyümesine ve çökmesine sebep olan akustik kavitasyon olgusuna dayanılarak gerçekleştirilmektedir [54]. Sıra dışı reaksiyon şartları belli alanlarda oluşturulabilir. Oluşturulan bu 5000K (yaklaşık 4727°C) den daha büyük sıcaklıklar, 500 atm.'den daha büyük basınç ve 10¹⁰ K/s'den daha büyük soğutma hızı gibi sıradışı şartlarla kimyasal reaksiyon yoluyla metal-oksit nano yapılar sentezlenebilir [55-57].

3.1.2.3. Hidrotermal metot

Bu metot kristal yapılar oluşturmak için 1970'lerden bu yana kullanılan bir metottur. Bu işlem çözülebilir başlangıç maddesi olarak kullanılacak malzemenin metal tuzunun (metal yada metal organik) sulu karışımı ile başlar. Genellikle karıştırılmış çözelti bir otoklav içine yüksek bir sıcaklıkta ve yüksek basınç altında konulur. Tipik olarak sıcaklık 100 °C-300 °C arasında basınç ise 1atm.'den fazladır. ZnO nano çubukları bu yöntemle sentezlemek amacıyla pek çok çalışma ortaya konulmuştur [58, 59]. Bu teknikle aynı zamanda Ga₂O₃ [60] ve MnO₂ nano tüpler [61] gibi pek çok oksit nano yapılar sentezlenmiştir.

3.2. Bir Boyutlu Metal-Oksit Nano Yapılardan Üretilmiş Elektronik Devre Elemanları

Mikro elektronikteki hızlı gelişim, çok daha küçük yapılar sentezleyerek bunları elektronik devrelere entegre etmek suretiyle performans ve mimarileri geliştirme isteğini artırmıştır. Bununla birlikte şu andaki mevcut teknolojilerle sürekli

minyatürizasyon çalışmaları fiziksel limitlere ulaşmakta ve alternatif, çığır açıcı, yeni tekniklerin kullanılması kaçınılmaz bir ihtiyaç halini almaktadır. Aşağıdan-yukarıya montaj tekniği, mikron seviyesinin altında hatta nano seviyede yapılar üretilebilmesine imkan sağlamak ve bundan dolayı da CMOS teknolojisi için yeni imkanlar sunmaktadır. Aynı zamanda ilerisi için potansiyel olarak görülen 1D nano sistemler, boyutları ve yapı anizotropisinden dolayı çok ayrıcalıklı fiziksel özellikler sergilemektedirler. Bu özellikler, yeni nesil elektronik, optoelektronik ve elektromekanik cihazlar dizayn etmek için araştırmacılar tarafından çalışılmaktadır. Bu bağlamda 1D nano yapılar elektriksel taşıyıcı nakli ve cihaz entegrasyonu için ideal bir kanalı temsil etmektedir.

3.2.1. Alan etkili transistörler (FET)

Tek Boyutlu yapılar, FET'ler içerisinde üretilerek lojik kapı, hesaplama devreleri ve kimyasal sensörler gibi elektronik cihazların temel bileşenleri olarak kullanılmaktadır. ZnO [62], In₂O₃ [25], SnO₂ [63] ve Ga₂O₃ [40] gibi pek çok metal-oksit 1D yapı FET olarak üretilmiş ve kullanılmıştır.

Kısaca fabrikasyon işlemi şu şekilde tanımlanabilir;

Nano kablolar büyütüldükten sonra sıvı içerisinde asılı pozisyona gelebilmeleri için genellikle izopropanol alkol ya da etanol gibi bir çözeltinin içerisinde alınır ve daha sonra da SiO₂/Si alt tabakasının üzerine bırakılırlar. SiO₂'in altında kalan alt tabaka (p⁺⁺ or n⁺⁺) olacak şekilde ayarlanır ve alt gate olarak çalışır. Fotolitografi ya da elektron demeti litografi kullanılarak elektrot modeli oluşturulur.

Nano kablonun silindir şeklinde olduğu varsayılarak r yarıçaplı ve L uzunluğundaki bir nano kablo için alt gate'e karşılık gelen birim uzunluk için kapasitans basitçe;

$$\frac{C}{L} = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \quad (3.1)$$

Şeklinde hesaplanabilir. Burada ϵ oksit gate'in dielektrik sabiti ve h ise oksit tabakasının kalınlığını göstermektedir.

İyi tanımlanmış bir transfer karakteristiğinden 1D taşıyıcı konsantrasyonu ve mobilitesi şu şekilde gösterilebilir[64];

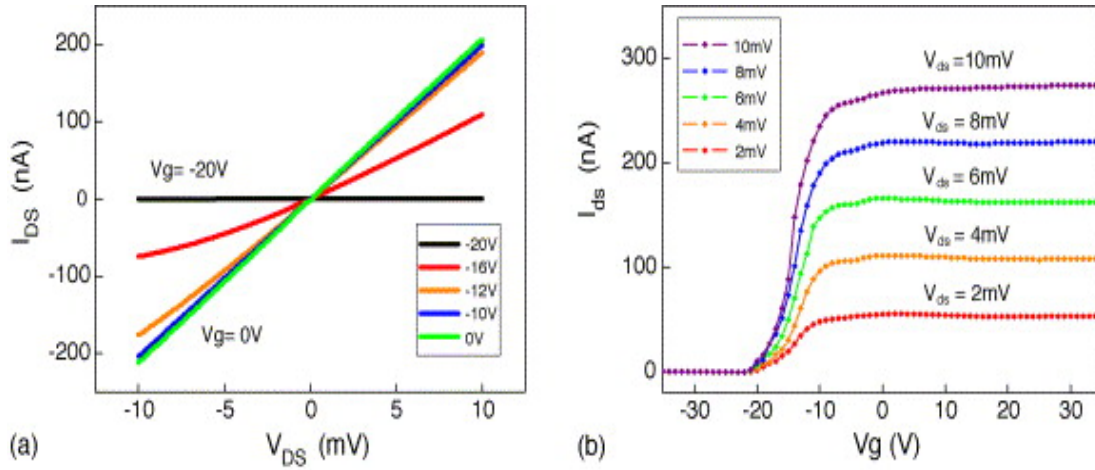
$$\text{Taşıyıcı Konsantrasyonu} \quad : \quad n = \frac{V_g(th)}{e} \times \frac{C}{L} \quad (3.2)$$

$$\text{Taşıyıcı Mobilitesi} \quad : \quad \mu_e = \frac{dl}{dV_g} \times \frac{L^2}{CV_{ds}} \quad (3.3)$$

Burada $V_g(th)$ kanal içerisindeki taşıyıcılar tamamen tüketilmişken k gate eşik voltajı, dl/dV_g ise ortak kondüktansı göstermektedir.

ZnO nano kablolar ve nano kemerler yoğun bir şekilde FET cihazlarının elektriksel taşıma ölçümleri için üretilmiş ve çalışılmıştır. Şekil 3.3 de farklı voltaj değerleri için $I_{DS}-V_{DS}$ karakteristiği görülmektedir. Buradaki ölçümlerde Ti/Au (titanyum/altın) elektrot kullanılmış ve yüksek iletkenlik sergilemişlerdir. Aynı zamanda mükemmel gate bağımlılığı ve yüksek açık/kapalı oranı gözlenmiştir.

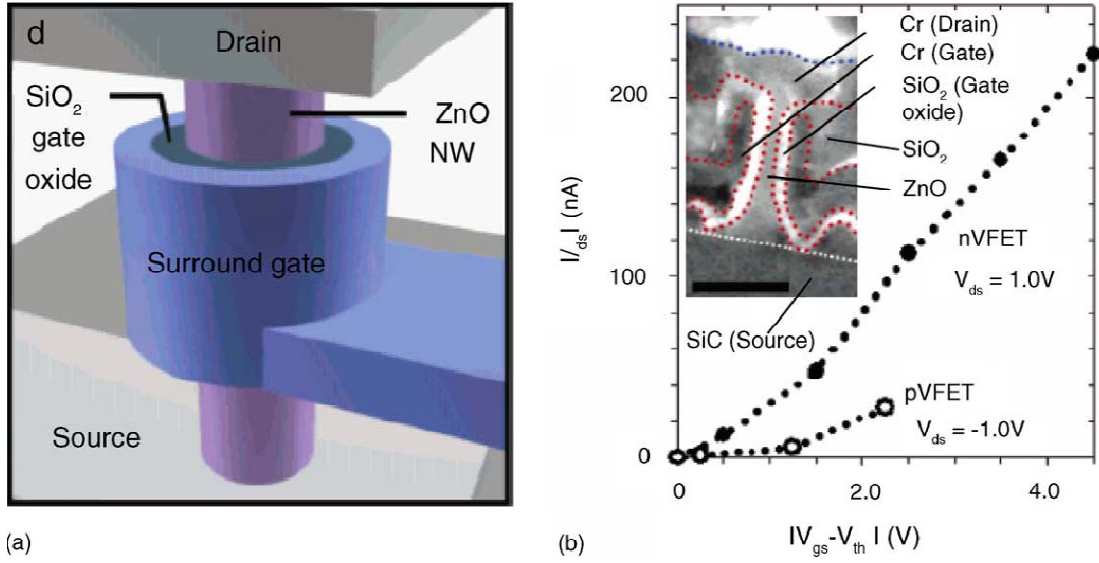
Bu ve buna benzer sonuçlar göstermiştir ki ZnO 1D cihazlar yüksek hızla çalışan elektronik devre uygulamaları için büyük bir potansiyele sahiptir [65].



Şekil 3.3 a. akım-gerilim (I-V) grafiği ZnO nano kablo FET'in n-tip davranış sergilediğini göstermekte b. tipik FET akım-gerilim grafiği yüksek performans cihaz karakteristiği göstermekte [66]

3.2.1.1. Dikey elektronik devre elemanları

Nano boyutlardaki cihazların entegrasyon yoğunluğunu artırmak ve boyuttan gelen avantajı en iyi biçimde değerlendirebilmek için dikey FET lerle alakalı pek çok çalışmalar yapıldı. Dikey, çevrelenmiş nano kablo FET ilk defa Ng tarafından üretildi [67]. Bu çalışmada nano kabloların pozisyonları litografik kalıp model kullanılarak yapıldı. Dikey olarak hizalanmış ZnO nano kablolar, altın parçacıkları litografi yoluyla kalıp modellenerek büyümeleri sağlanmıştır. Bu dikey nano kablolar daha sonra sırasıyla gate oksit ve gate elektrot olarak işlev gören SiO_2 (silisyum dioksit) and Cr (krom) ile Şekil 3.4. a' da gösterildiği gibi çevrelenmiştir. Şekil 3.4. b bu FET için I-V karakteristiğini göstermektedir. p-kanal lineer olmayan bir karakteristik sergilerken n kanal FET lineer bir karakteristik sergilemektedir.



Şekil 3.4 a. Dikey FET'in 3 boyutlu şeması b. akım-gerilim karakteristiği İçerideki resim dikey FETin kesitinden alınmış SEM fotoğrafı (resmin ölçeği 200 nm.) [67]

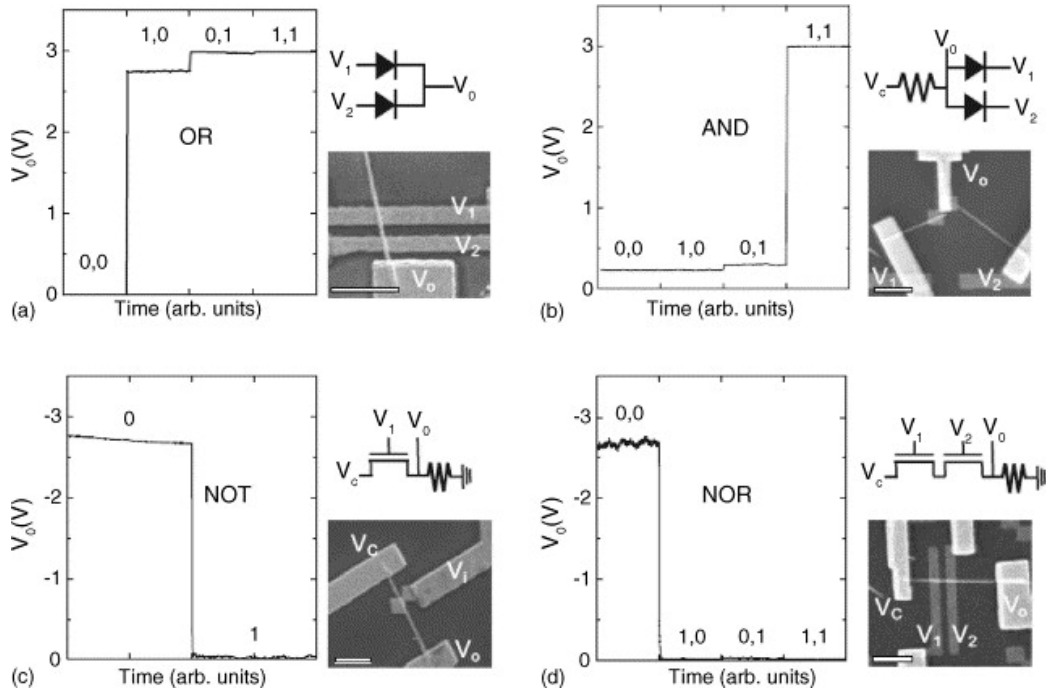
Aynı araştırma grubu aynı zamanda In_2O_3 nano kablolardan da bir dikey FET yapmayı başarmıştır [68].

3.2.1.2. Lojik kapı devre elemanları

Elektrikle kontrol edilen açık-kapalı anahtarlama ile diyotlar ve FET'ler lojik kapılar (ki entegre bilgisayar devreleri için anahtar bileşen konumundadırlar) gibi yüksek seviyede devreler için temel devre elemanlarıdır.

Metal-oksit tek boyutlu sistemlerin transistör fonksiyonları elektrikselsel taşıma çalışmaları ile doğrulanmıştır.

Park ve çalışma grubu, 'OR', 'AND', 'NOT', 'NOR' lojik birimlerini ZnO nano kablolarla dizayn etmiş ve üretimini gerçekleştirmiştir [69]. Şekil 3.5 te ZnO nanoçubuklarla oluşturulmuş lojik devrelerin SEM fotoğrafları ve doğruluk tabloları görülmektedir. Bu kapılar, metal-yarı iletken Schottky jonksiyon diyodlar ya da FET'lerin kombinasyonu ile oluşturulmuştur.



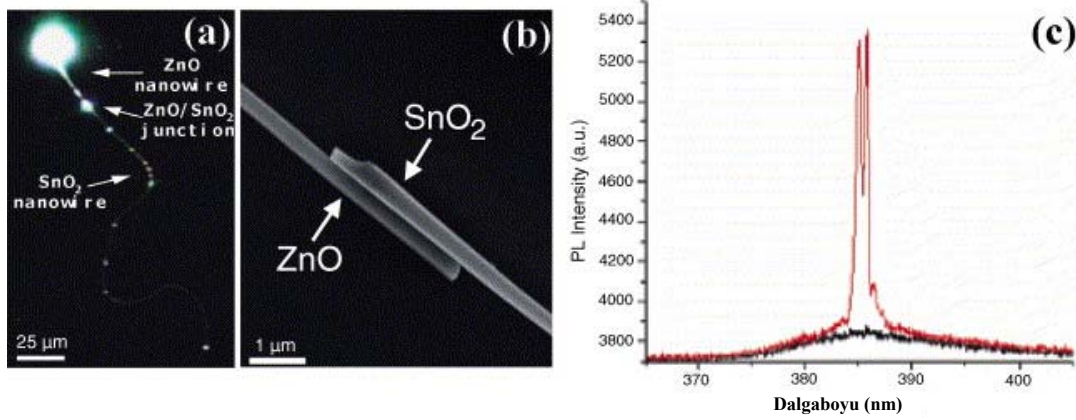
Şekil 3.5 ZnO Nanoçubuk Lojik Devreleri a. 'OR' lojik kapısı. b. AND lojik kapısı (bu ölçüm için V_c a 3V uygulandı) c. NOT lojik kapısı d. NOR kapısı [70]

3.2.2. Optoelektronik cihazlar

3.2.2.1. Emiter, lazer ve dalga yönlendirici

Geniş bant aralığı ve uyarma bağ enerjisinden dolayı ZnO özellikle kısa dalga boylu optoelektronik uygulamalar için çok uygundur. Fotoluminesans özellikleri göstermiştir ki ZnO nano kablolar UV emisyon ve lazer için oldukça ümit vadeden bir malzemedir. Silindiriğe yakın geometrileri ve geniş yansıma indeksinden (~ 2.0) dolayı ZnO dalga yönlendirici olarak seçilebilecek iyi bir devre elemanı adaydır. Law tarafından gerçekleştirilen çalışmada [71] optik olarak pompalanan ışık emisyonu ZnO nano kablosu tarafından yönlendirilmiş ve SnO₂ nanoçubuğu içinde ikileştirilmiştir. Ek olarak düzgün yüzeye sahip nano kablo formları, iyi şekilde hizalanmış ZnO nano kabloların içinde, oda sıcaklığında yüksek lazerleme sağlayan

optik rezonans boşlukları için iyi bir adaydır [72]. Tipik lazer tepe noktası şekil 3.6.c de gösterilmektedir.

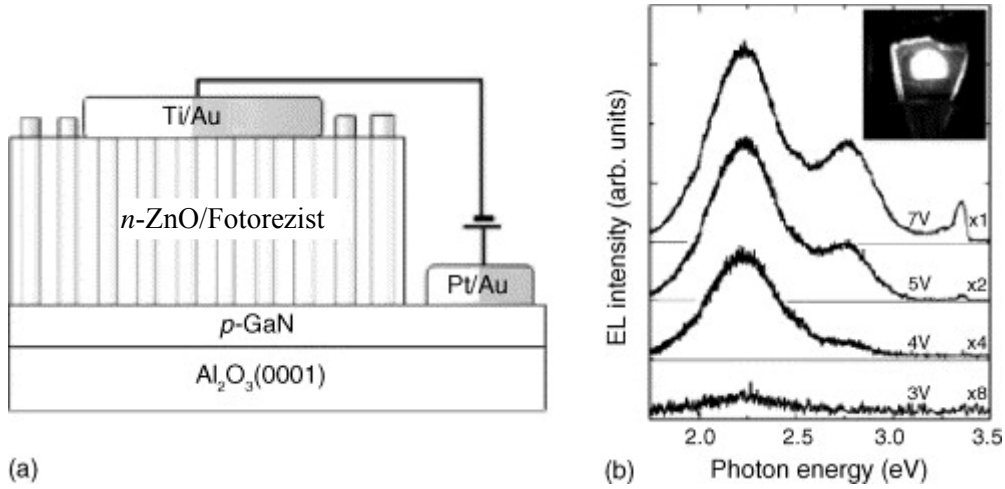


Şekil 3.6. a. ZnO nano kabloları ışığı SnO₂ nano kablunun içine doğru yönlendirirken alınmış bir optik mikroskop resmi b. ZnO-SnO₂ nano kabloların kesişimini gösteren SEM fotoğrafı [71] c. gözlenen ZnO nano kablo lazer boşluğu uyarılmış emisyon [72]

3.2.2.2. Led

Yukarıda bahsedildiği gibi metal-oksit nano kablo dizileri özel bir UV yayım ve bunun yanında dışarıdan bir lazer kaynağının uyarımı altında lazer özellikleri göstermişlerdir. Bununla birlikte cihaz uygulamaları perspektifinden elektrik tarafından kontrol edilen ışık yayım ve lazer özellikleri daha fazla öneme sahiptir. Bu amaca ulaşmak için hem elektronlar hem de boşluklar elektron-boşluk çiftinin yeniden kombinasyonu için metal-oksit nano yapı içerisine enjekte edilmesi gerekmektedir. Aslında iç moleküler p-n kesişimi ZnO nano kablolar kullanılarak Liu tarafından gerçekleştirilmiş ama bununla birlikte ışık emisyonu gözlenmemiştir [73].

Alternatif bir çözüm olarak n-ZnO ve p-GaN p-n hetero kesişimlerinden oluşan ışık emisyonu çalışması ile önemli bir başarı elde edilmiştir. Bu çalışmada dikey olarak hizalanmış ZnO nanoçubuk dizisi epitaksiyal olarak p-tip GaN (Galyum Nitrat) alt tabaka üzerinde büyütülmüştür (Şekil 3.7.a). Şekil 3.7.b de gösterilen elektrolüminesans (EL) oda sıcaklığında ölçülmüştür.



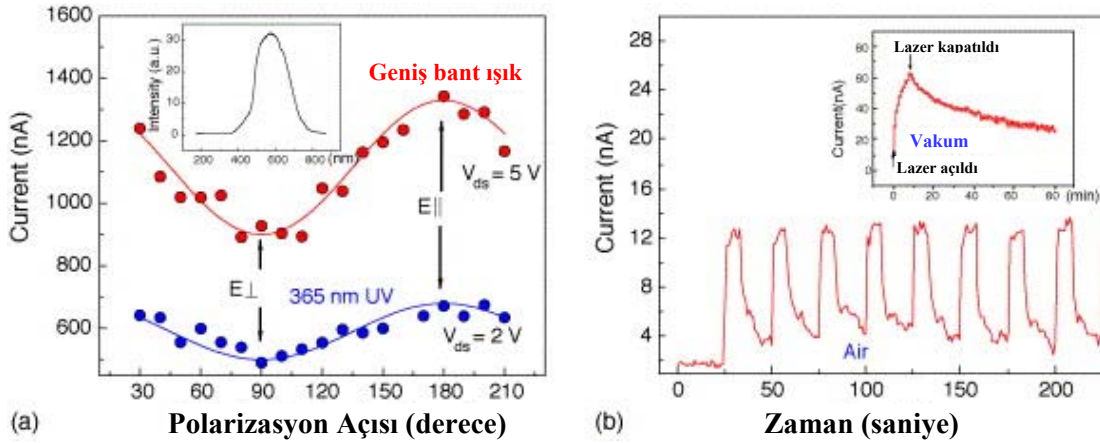
Şekil 3.7. a. p-GaN/n-ZnO nanoçubuklarının hetero kesişim cihazını gösteren şema b. Oda sıcaklığında ve farklı gerilimlerde EL spektrumu. İç kısımdaki fotoğraf 5V gerilimdeki ışık emisyonu [74]

3.2.2.3. Polarizasyonla çalışan ışık dedektörü

UV emisyonu ve lazer özellikleri yanında metal-oksitlerin ışık tesbit edebilme özellikleri de çalışılmıştır. Görünür dalga boyu tespiti ve polarize edilmiş ışık tespiti ZnO nano kablolar, SnO₂ nano kablolar ve In₂O₃ nano kablolar için çalışılmıştır. Foto iletkenlik özelliği $\cos^2\theta$ ile orantılı olduğu görülmüştür. Buradaki θ gelen ışığın polarizasyonu ile nano kablonun aksisi arasında kalan açıdır. Bu açı, gelen ışığın elektrik alan bileşeninin nano kablonun uzun aksisine paralel olarak polarize edildiğinde maksimumdur (Şekil 3.8.a). nano kablonun çapı ışığın dalga boyundan çok daha küçük olduğu için ışığın nano kablo aksisine normal olan elektrik alan bileşeni nano kablonun içinde efektif bir şekilde azaltılmış olur.

ZnO nano kabloların foto iletkenlik ölçümleri sırasında Fan, çevrenin foto cevabı önemli ölçüde etkilediğini gördü [75]. Örnek olarak nano kablolar üzerindeki kimyasal emilim foto akım rahatlatma zamanını önemli ölçüde hızlandırabilir. Şekil 3.8.b de görüldüğü gibi foto akım rahatlatma süresi havada 8 sn. civarında iken vakum içerisinde saatler sürmektedir. Çünkü ışık tarafından üretilen elektronlar

önemli ölçüde iletkenliği artırırken, havada aydınlatma üzerine ışık tarafından üretilen holler yüzey tarafından kimyasal olarak emilmiş iyonları deşarj ederler. Aydınlatma kapatıldığında havadaki oksit yapıcı gaz (temel olarak O_2) yüzey tarafından emilir ve iletkenliği düşürür. Yüzey kimyasal emilime hassasiyet, görüldüğü gibi kimyasal sensör uygulamaları için önemli bir özelliktir.



Şekil 3.8. a. UV (365nm) ve görünen ışığın polarize edilmiş ışık tespiti b. Nano kablonun havada 633 nm. lazere havada ve vakumda (içerideki resim) foto tepkisi [75]

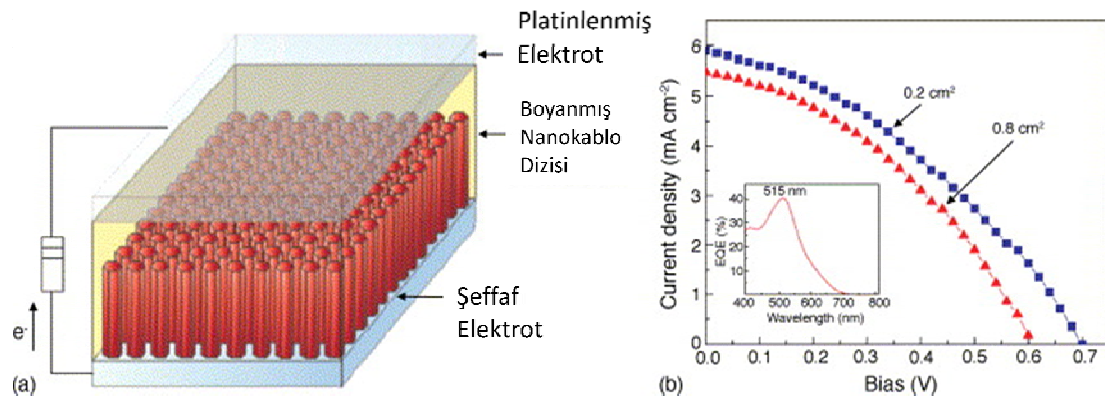
Metal-oksitlerde bulunan geniş bant aralığı mavi-UV aralığındaki uygulamaları hızlandırmıştır. Bununla birlikte bazı metal-oksitler endirek bant aralıklarından dolayı IR (kızılötesi) ışık tespiti de sergilerler.

3.2.2.4. Güneş pilleri

Sürekli artmaya devam eden enerji tüketimi, alternatif enerji kaynakları için acil bir ihtiyaç ortaya çıkarmıştır. Güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmek, hiç şüphe yok ki maliyet efektif ve çevre dostu bir çözümdür. Bundan dolayı güneş enerjisi dönüşüm cihazları gelecekteki enerji kaynakları arasında çok önemli bir rol oynayacaktır. Nanoteknolojiyi güneş pillerinin içerisine monte etmek üzere yarı iletken 1D nano yapılar emilim tabakaları olarak fotovoltaik güneş pillerinin içerisine yerleştirilmiştir [76].

Ayrık enerji seviyeleriyle bu çeşit emilim tabakasının güneş enerjisinin çevrimindeki verimliliğini artıracakları öngörülmektedir. Başka bir çalışma ise sıradan bir boyadan üretilmiş pillerin içindeki nano parçacık filmini nano kablo dizisiyle değiştirerek gerçekleştirilmiştir. Daha yüksek kristal yapı ve hızlı taşıyıcı toplama hızından ayrı olarak nano kablolar aynı zamanda polimer jel ya da katı inorganik faz gibi standart olmayan elektrolitler kullanabilen pil dizaynı için de avantajlıdır [77]. Boyadan sentezlenen güneş pili sistemlerinde ZnO [77], TiO₂ [78] ve CuO [79] nano kabloları foto-anod olarak kullanılmıştır.

Yang ve grubu, ZnO nano kablo dizisini reutenyum tabanlı boyadan sentezlenmiş pil içerisinde yıkamıştır (Şekil 3.9.a). $\sim 100 \text{ mW cm}^{-2}$ tam güneş yoğunluğu altında nano kablo doldurma faktörü 0.37 iken dönüşüm verimliliği %1.5 olarak belirtilmiştir [77]. Şekil 3.9.b farklı aktif alanlar ve iki pil için akım yoğunluğu-gerilim grafiğini göstermektedir. Küçük pil (0.8 cm² alana sahip) büyük pilden (0.2 cm² alana sahip) daha yüksek kısa devre akımı Jsc ve açık devre gerilimi Voc sergilemektedir. Dış kuantum verimliliği \sim %40 seviyesinde, boyanın maksimum emilim noktasında tepe noktasına ulaşır. Dahası, %7 ye varan dönüşüm verimliliği, daha yoğun doldurma faktörü (0.70) ile TiO₂ nanoçubuklar kullanılarak elde edilmiştir [78].



Şekil 3.9. a. ZnO nano kablo dizisiyle üretilen güneş pilinin şeması b. iki pil için akım yoğunluğu-gerilim grafiği [77]

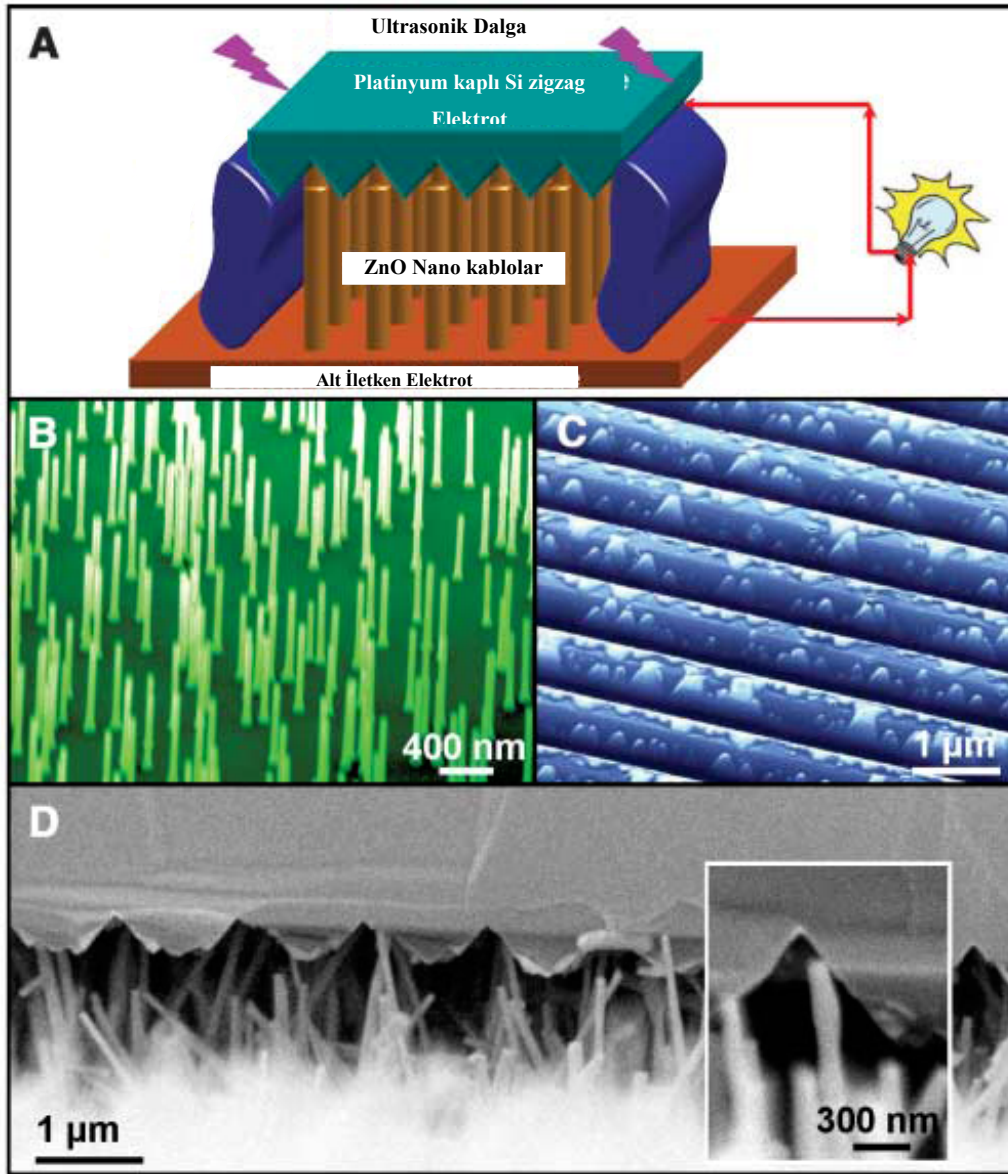
3.2.3. Rezonatör ve konsollar

3.2.3.1. Nano rezonatör

Teorik modellemeden farklı olarak nano kabloların Young modülü ve titreşim frekansı gibi mekanik özellikleri, çok özel dizayn edilmiş ve hassas ölçüm cihazları gerektirdiğinden çok fazla üzerinde çalışma yapılamamış özelliklerdir. Bu konuda öncü bir çalışma olarak Wang ve grubu nano yapıların bükülme modellerini ve piezo elektrik özelliklerini ortaya koymuştur [80-82].

Bu çalışmada 1D yapıları harmonik rezonansa getirmek için elektrik alan uygulanmak suretiyle uyarılma gerçekleştirilmiştir. ZnO nanoçubuk, SiO₂/SiC kompozit, karbon nanotüpler potansiyel nano rezonatör uygulamaları için test edilmişlerdir.

Bu konuda yapılan en güncel çalışma ise Wang ve grubu tarafından ZnO nano kabloların ultrasonik dalgalarla hareket ettirilmesi ile elde edilen nano jeneratördür (Şekil 3.11) [83].



Şekil 3.10. a. Nano jeneratörün şematik gösterimi b. GaN alt tabaka üzerinde dikey olarak hizalanmış ZnO nano kablolar c. zigzag şeklinde üretilmiş elektrotlar d. nano jeneratörün kesit SEM fotoğrafı [83]

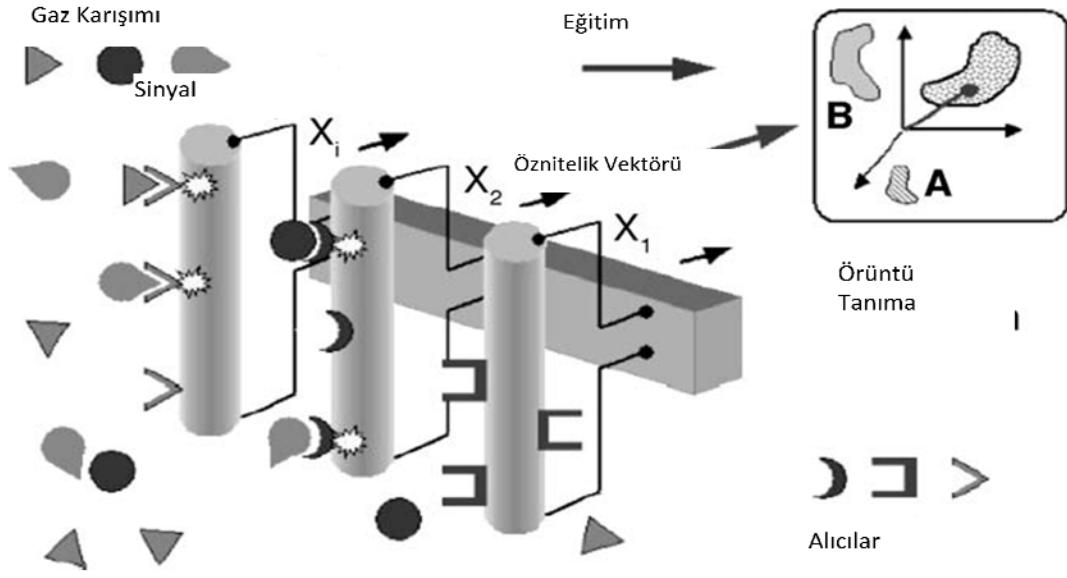
3.2.3.2. Kimyasal sensörler

Metal-oksitlerin sensör özellikleri üzerinde en fazla çalışmanın yapıldığı, en iyi bilinen ve en önemli özellikleridir. Işık ve basınç algılama özelliklerine ek olarak metal-oksitler çevrelerinin kimyasal özelliklerine karşı da oldukça hassas bir algılama özelliğine sahiptirler. Çok kötü şartlar altında çalışabilme özelliklerinin

yanında hassasiyetleri, güvenilirlikleri ve uzun süreli olarak kullanılabilirlikleri yönüyle de metal-oksit malzemeler diğer kimyasal sensörlere üstünlük sağlarlar.

En yüksek algılama hassasiyetine erişebilmek için ince film gaz sensörleri genellikle yüksek sıcaklık derecelerinde kullanılırlar. Bu durum tek bir sensör cihazının sıcaklık kontrol birimi ile birlikte çalışması gerektiğini göstermektedir ki bu da kompleks yapının ve enerji ihtiyacının daha da artması sonucunu doğurmaktadır. Neyse ki metal-oksit nano kablolarla üretilen gaz sensörleri oda sıcaklığında çok daha fazla hassasiyet sergilemişlerdir. Örneğin oda sıcaklığında ZnO nano kabloyla NO₂ gazı ölçümü, 0.6 ppm NO₂ gazı uygulandığında iletkenliğinde %50 daha fazla değişiklik oluşturduğunu göstermiştir [84]. Aksine ZnO ince film ile oluşturulmuş bir gaz sensörü, daha fazla miktarda NO₂ gazı uygulanmasına rağmen (1.5 ppm) iletkenlikte % 2 değişiklik göstermiştir [85]. Bu ümit verici sonuçlar metal-oksit nano kabloların oda sıcaklığında, yüksek hassasiyetle çalışan gaz sensörleri üretimi için ne kadar büyük bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak FET şeklinde dizayn edilmiş metal-oksit nano kablo gaz sensörleri göstermiştir ki algılama hassasiyeti bu tip cihazlarda elektrik alanı değiştirmek suretiyle ayarlanabilmektedir [86].

Metal-oksit nano kablo elektrik alan etkili sensör çalışmaları çerçevesinde görülmüştür ki; arka gate tarafından uygulanan elektrik alan ile farklı gazların ayrıştırılması ve tespit edilmesi sağlanabilir [87]. Nihai hedef çoklu algılama sistemlerinin entegrasyonu ile memelilerin koku alma sistemlerini taklit eden bir elektronik burun geliştirmektir. Nano kablo yüzeyleri molekül seçici alıcılarla fonksiyonel hale getirilebilir. Bu konsept Şekil 3.17 de gösterilmiştir [86].



Şekil 3.11. Öngörülen elektronik burun şeması. [86]

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Giriş

Metal-oksit nano yapıların üretilmesi için kullanılan pek çok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları çok büyük maddi yatırımlar ve uygulanabilecekleri izole edilmiş özel laboratuvarlara ihtiyaç duymaktadırlar. Yapılan çalışmada, kullanılacak deney düzeneği ve yöntem belirlenirken öncelikli olarak sistemin çok kompleks bir yapıya sahip olmamasına, maliyetinin karşılanabilir olmasına ve az bir yatırımla istenilen herhangi bir laboratuvar ortamında gerçekleştirilebilmesi gibi özellikler göz önünde bulundurulmuştur.

Yapılan kapsamlı literatür çalışması sonucunda metal-oksit nano kablo sentezlemek için daha önce uygulanmış ve başarı elde edilmiş deney düzeneklerinden en uygun olanın kullanılmasına karar verilmiştir. Yöntem olarak ise buhar-sıvı-katı (VLS) yöntemi seçilmiştir.

4.2. Gerçekleştirilen Deneyler

4.2.1. Deney düzeneği

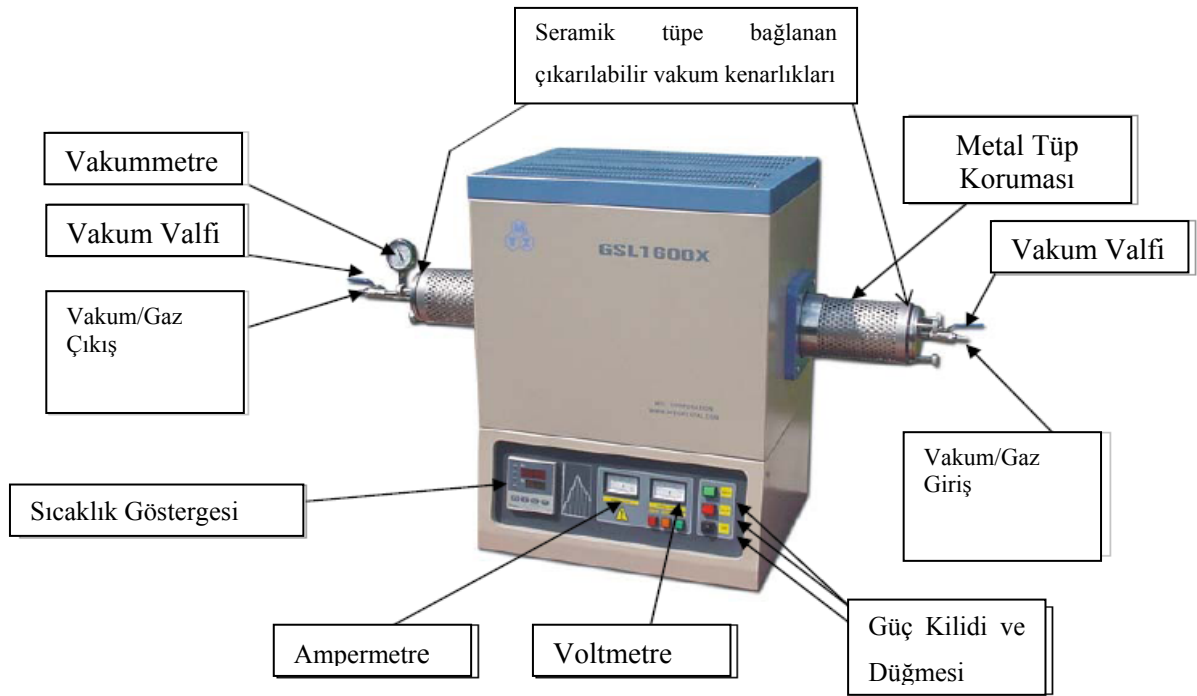
Bu deney için MTI isimli firmanın ürettiği, yüksek sıcaklıklara çıkabilen GSL-1600 reaktörü tercih edildi. Reaktörde ısıtma elemanı olarak MoSi_2 (Molibdenyum Disilisayt) kullanılmıştır. Reaktör içindeki maksimum sıcaklık vakum altında ve gaz akışıyla birlikte, kademeli olarak ve dakikada ortalama 7°C artarak 1600°C ' ye kadar çıkabilmektedir.

Reaktörün orta kısmında bulunan 120 cm. uzunluğunda, 5 cm. dış ve 4,6 cm. iç çapa sahip olan alüminyum oksit tüp boru sayesinde yüksek sıcaklıklarda nano ve mikro

boyutlu materyallerin sentezlenmesi mümkün olmaktadır. Şekil 4.2. de görüldüğü gibi, bu tüp borunun iki ucuna yerleştirilen ve sıcaklığı geçirmeyen özel bir malzemeden üretilen bloklar sayesinde hem sıcaklık kaybı önlenmiş hem de yüksek sıcaklıklara ulaşıldığında tüp içerisindeki sıcaklık dağılımının mümkün olduğunca homojen olması sağlanmıştır.

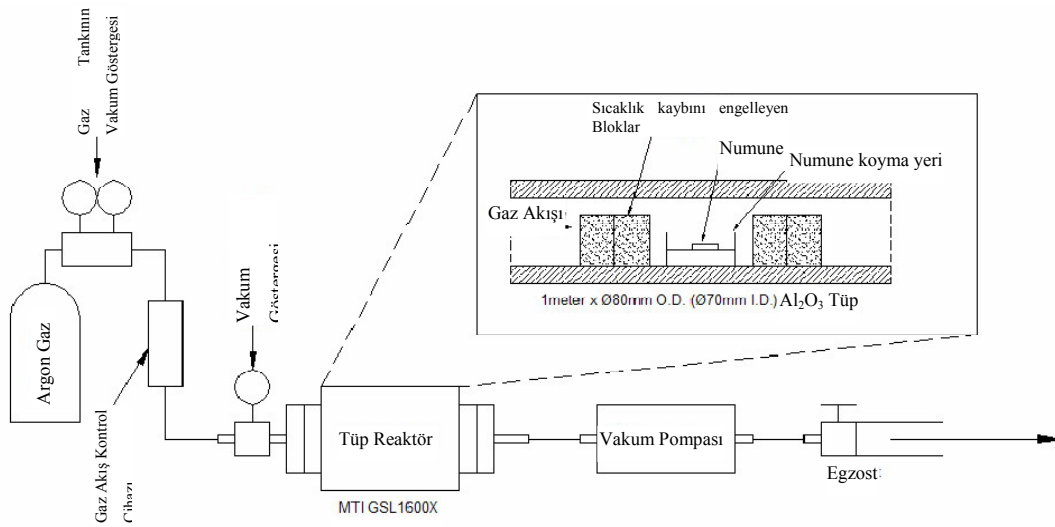
Sentezleme işlemi sırasında ortamda bulunan Argon gazı, ticari olarak satın alınabilen büyük silindir tüplerden, gaz akış miktarını ayarlamaya imkan sağlayan ayar mekanizmasından geçirilerek tüpe verilmiştir.

Reaktörün sıcaklığı 30 kademeli şekilde ayarlanabilmekte ve 708P tipinde gelişmiş bir sıcaklık kontrolörü ile çalışmaktadır. Bu reaktör çok çeşitli yeni materyaller üretmek amacıyla araştırma laboratuvarları ve seramik laboratuvarları için tasarlanmıştır.



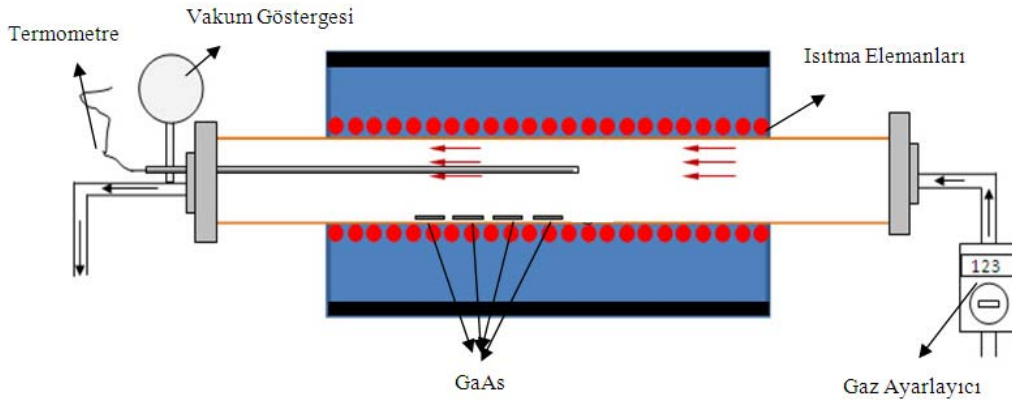
Şekil 4.1. GSL—1600X yüksek sıcaklık vakumlu, tüplü reaktör

Metal Galyumun oksitlenmesini sağlayan O₂ gazı ise Argon gaz akışına ve uygulanan vakuma rağmen tüp içerisinde kalan çok küçük miktardaki gazdan ibarettir. Parametreler değiştirilmek suretiyle gerçekleştirilen pek çok sentezleme deneyi göstermiştir ki; kullanılan alt tabakanın bulunduğu noktanın lokal sıcaklığı ve ortamda bulunan Oksijen miktarı, ortaya çıkan materyalin şeklini ve özelliklerini çok büyük oranda etkilemektedir.



Şekil 4.2. MTI GSL1600X vakumlu tüp reaktörün şematik gösterimi

Alüminyum oksit tüpün dayanıklı yapısından dolayı bu sistem içerisinde vakum, tüpün içine sızan gazın miktarını değiştirmek suretiyle istenilen değere ayarlanabilir. Bu reaktörün içerisinde yapılan deneylerin hemen hemen hepsi yaklaşık 749×10^{-3} Torr vakum altında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3'te gerekli değişiklikler yapılarak ihtiyacı karşılayacak şekilde dizaynı yapılmış deney düzeneğinin şeması görülmektedir.



Şekil 4.3. Nano yapıların sentezlenmesi için hazırlanmış düzeneğin şematik gösterimi.

Sistem vakum altında iken, sentezleme işlemi sırasında tüp içerisinde Argon gazı akışı sağlanmıştır. Bu gazın akış hacmi 10 sccm (standart santimetreküp cinsinden dakikada geçen gaz miktarı) ile 100 sccm arasında değişen değerlerde kullanılmıştır.

4.2.2. Deney parametreleri


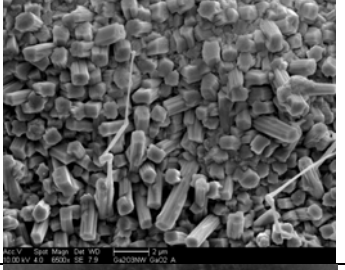
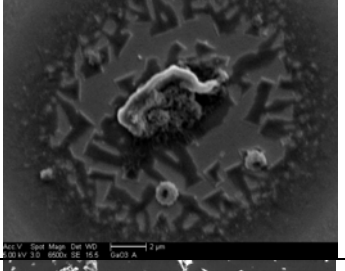
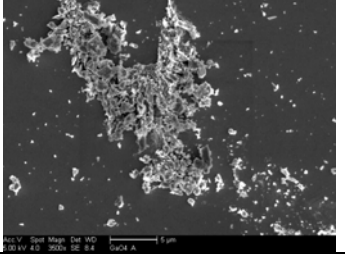
Başarılı bir şekilde, istenilen özelliklere sahip nano yapıların sentezlenebilmesi için gerekli olan en uygun sıcaklık, vakum, nano yapıların üzerinde büyüyecekleri alt tabakaların seçimi ve deney düzeneği içerisinde yerleştirilecekleri yer gibi değerlerin belirlenmesi; hem yapılan sentezlemenin tekrarlanabilir olması hem de bu değişkenlerin sentezlenen yapıların özelliklerinde meydana getirdikleri farklılıkların tespit edilebilmesi için çok önem arz etmektedir.

Kurulan deney düzeneğinde en uygun değerlerin belirlenebilmesi için pek çok denemeler yapılmıştır. Örneğin uygun pozisyonu tespit etmek için Alüminyum Oksit tüpün içerisinde farklı yerlere farklı alt tabakalar konarak en uygun yer tespit edilmiştir. Farklı alt tabakalarda materyal sentezlenmesini sağlamak için farklı metal tozları da denenmiş ve son olarak ta farklı sıcaklık değerleri ile farklı sıcaklık artış zamanları denenmiştir. Bu kadar farklı değişkenlerle çalışarak ortaya uygun bir

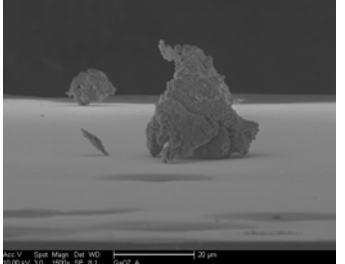
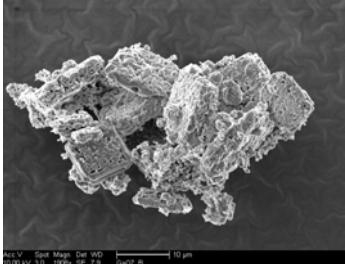
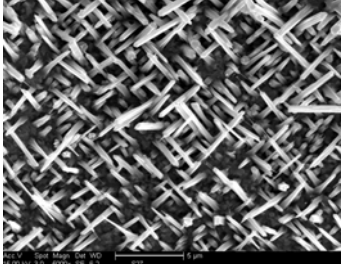
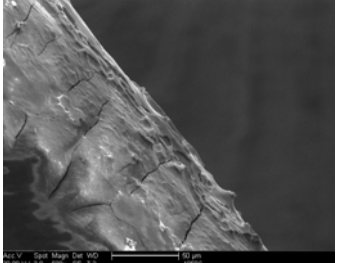
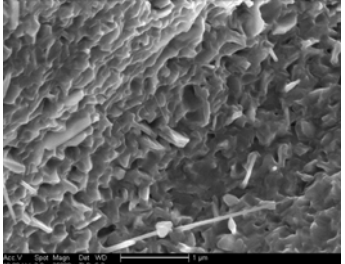
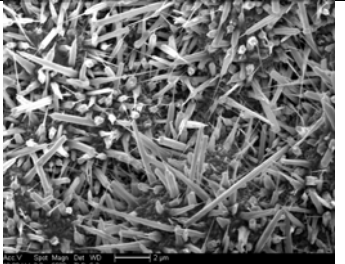
konfigürasyon çıkarmak her ne kadar zor ve zaman isteyen bir süreç olsa da bu faktörlerin hepsi ayrı ayrı sentezlenen malzemenin yapısı ve özelliklerinde çok önemli etkiye sahip oldukları için hassasiyetle üzerinde durulmuştur.

Tablo 4.1’de deney çalışmalarının başlangıcından itibaren, deney parametrelerinin değiştirilmesiyle gerçekleştirilen deneyler ve sonuçta elde edilen yapılar görülmekte. Yapılan deneylerde vakum hep sabit tutulmuş olup 749×10^{-3} Torr olarak ölçülmüştür.

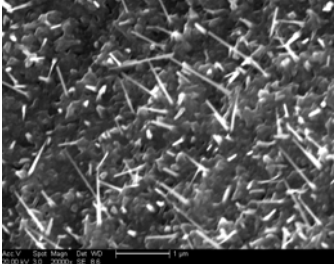
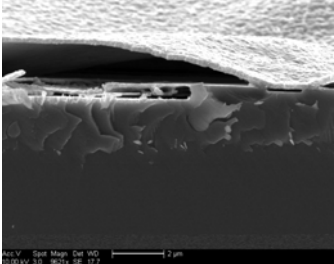
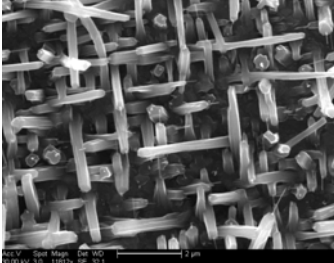
Tablo 4.1. Farklı Parametrelerle Elde Edilen Nano β -Ga₂O₃ Yapılar

Örnek- Alt Tabaka Oryantasyonu	Gaz Akışı (sccm)	Alt tabakanın merkeze uzaklığı (cm)	Ayarlanan Sıcaklık (°C)	Alt Tabaka Sıcaklığı (°C)	Süre (dk.)	SEM Mikrografı
A-(100)	50	7	1050	976	40	
B-(100)	100	12,5	1050	836	40	
C-(111)	100	0	400	380	120	
D-(100)	100	0	400	380	240	

Tablo 4.1. Farklı Parametrelerle Elde Edilen Nano β -Ga₂O₃ Yapılar (Devam)

E-(100)	30	0	700	650	120	
F-(111)	30	0	700	650	120	
G-(100)	100	12	1050	840	40	
H-(100)	100	7	950	863	5	
I-(111)	100	9	1050	872	80	
J-(100)	100	11	1050	850	80	

Tablo 4.1. Farklı Parametrelerle Elde Edilen Nano β -Ga₂O₃ Yapılar (Devam)

K-(111)	100	15	1050	764	80	
L-(111)	100	11,5	1050	847	15	
M-(100)	100	12	1050	840	40	

Sonuçlar yakından incelenecek olursa kullanılan alt tabakanın oryantasyonunun elde edilen nano yapıların şekli ve çeşidi üzerinde büyük bir etkisi olduğu görülmektedir. (111) oryantasyona sahip olan alt tabakalarda nano blok ve nano kablolar yerine daha kalın bir ince tabaka oluşumu ve mikro boyutlu yapıların oluştuğu gözlenmiştir (Örnek C-F-I-K-L). Özellikle örnek L’de oluşan ince film tabakası ve başka herhangi bir nano yapının oluşmadığı açıkça görülmektedir.

Argon gazının akış hızının etkisini incelediğimizde ise gaz akışının düşük olduğu örneklerde daha büyük yapıların oluşumu görülmektedir (Örnek A-E-F). Bu durum, ortamda bulunan oksijen miktarının fazla olmasından dolayı metal Galyum’un daha fazla oksijenle tepkimeye girmesiyle açıklanabilmektedir.

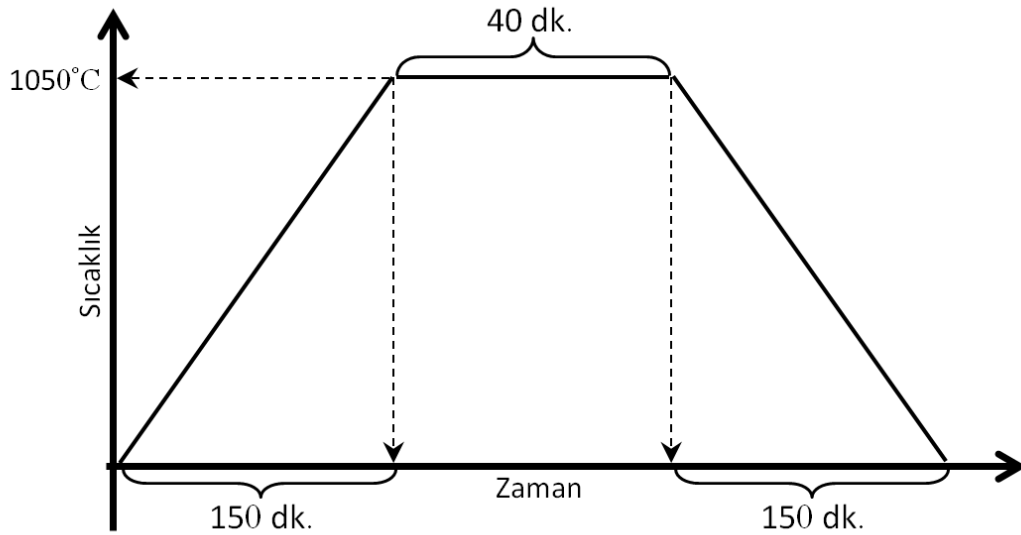
Alt tabakanın reaktörün merkezine olan uzaklığı doğrudan alt tabaka sıcaklığını etkilediğinden üretilen yapıların şekli ve büyüklüğü üzerinde etkisi olduğu tespit

edilmiştir. Alt tabaka sıcaklığının fazla olması, GaAs alt tabakadan yüzeye sızan Ga miktarını arttırdığı için ortamda fazla miktarda oksijen olması durumunda büyük yapıların oluştuğu görülmektedir (Örnek A).

Maksimum sıcaklıkta bekleme süresi, elde edilen β -Ga₂O₃ nano kabloların boyunu doğrudan etkilemektedir. Yüksek sıcaklıkta yeteri kadar beklenmemesi durumunda diğer parametrelerin uygun olmasına rağmen nano kablo ve nano blok oluşumunun olmadığı gözlenmiştir (Örnek H).

Yapılan bütün deneyler sonucunda elde edilen yapılar gözönüne alındığında alan emisyon uygulamalarında kullanmaya en elverişli yapıların M ve G örneklerinden elde edilen yapılar olduğu görülmüş ve bu deneylerde kullanılan parametreler optimum deney parametreleri olarak tespit edilmiştir.

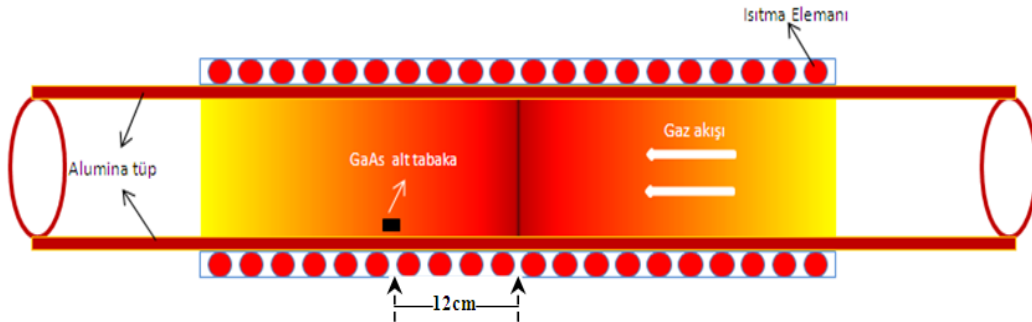
Şekil 4.4'te optimum deney parametreleri ile gerçekleştirilen deneyler için kullanılan sıcaklığın zamana göre değişim grafiği görülmektedir.



Şekil 4.4. Nano yapıların sentezlenmesinde kullanılan optimum sıcaklık-zaman grafiği

Bu şekilde yapılan pek çok sayıda denemeden sonra GaAs (galyum arsenit) in alt tabaka olarak bu çalışmada sentezlenmesi hedeflenen malzeme için en uygun alt tabaka olduğu görülmüştür. Son denemelerde GaAs alt tabaka olarak kullanılmış ve üzerinde çok miktarlarda, kuvvetli ve uzun Ga_2O_3 nanobloklar tesbit edilmiştir. GaAs ile yapılan çalışmanın geliştirilmesi hedeflenmiştir. Çünkü yapılan literatür taraması sonucu ortaya çıkan tabloya göre bu şekilde (sadece GaAs'ın yüksek sıcaklıkta ısıtılması ile) elde edilmiş, rapor edilmiş, tam olarak bu tez çalışması sonucunda ortaya çıkarılan özellikleri gösteren hiçbir nano yapı ve bilimsel yayına rastlanmamıştır. GaAs alt tabakanın yüksek sıcaklıkta ısıtılması sonucu elde edilen nano yapılarla ilgili araştırma çalışmaları [88, 89] sentezlenme ve büyüme aşamalarını tespiti üzerine yoğunlaşmış ve herhangi bir elektronik cihaz ve karakterizasyonu işlemi gerçekleştirilmemiştir.

Şekil 4.5 te ideal sentezleme şartlarının gösterildiği deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 4.5. Nano yapıların sentezlenmesinde kullanılan sıcaklık değişim grafiği ve GaAs alt tabakanın tüpün içindeki pozisyonu

4.3. Kullanılan Karakterizasyon Metotları ve Araçları

4.3.1. Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope-SEM)

Taramalı Elektron Mikroskobu yüksek enerji elektron ışın demetinin numune üzerine odaklanması ve düşen elektronların numuneyle etkileşiminden oluşan sinyallerin toplanmasıyla çeşitli resimler oluşturan bir elektron mikroskobu çeşididir. SEM

içinde toplanan sinyaller çok çeşitlidir ve ikincil elektron, karakteristik X dalgaları ve saçılmış elektronları da içerebilir. SEM'in içindeki bu sinyaller yalnızca numune üzerine birincil ışın çarpmasından değil aynı zamanda numune yüzeyine yakın derinlikteki bölgeyle etkileşimden de gelmektedir.

SEM, öncelikli kullanım modu olan ikincil elektron görüntüleme modu içinde yüksek çözünürlükte fotoğraflar oluşturabilme özelliğine sahiptir. Fotoğrafın oluşturulma şeklinden, üretilen fotoğrafın derinliğinden ve üç boyutlu görüntüye yakınlığından dolayı SEM fotoğrafları bir numunenin yüzey yapısını anlamak için oldukça büyük öneme ve güvenilirliğe sahiptir.

Öncelikli ışın, numunenin iç kabuk elektronlarının çıkarılmasına sebep olduğunda karakteristik X ışınları yayılımı gerçekleşir. Bu ışınlar numunenin element kompozisyonunu anlamak için kullanılmaktadır. Numuneden yayılan geri saçılmış elektronlar, bir fotoğraf oluşturmak için yalnız başına kullanılabilir ya da karakteristik X ışınları ile birleştirilerek element kompozisyonunu belirlemede kullanılabilir.

SEM, Manfred von Ardenne tarafından 1937 yılında ortaya çıkarılmıştır [90, 91]. Bu cihaz daha sonra Charles Oatley tarafından geliştirilmiş ve ticari olarak ilk defa Cambridge Instruments tarafından ürün olarak piyasaya sürülmüştür.

4.3.2. Enerji ayırıcı spektrometri (EDS)

Hedef numune ile bir elektron ışınının etkileşmesi X ışınlarını da içeren pek çok farklı emisyonu sebep olur. Enerji ayırıcı dedektör farklı elementlerin X ışını karakteristiklerinin bir enerji spektrumu içine ayrıştırılması için kullanılır. EDS sistem yazılımı ise belli elementlerin miktarını tespit etmek için enerji spektrum analizinde kullanılır. EDS birkaç mikron derinliğe kadar materyallerin kimyasal kompozisyonunu bulmak ve daha büyük alanlar için element kompozisyon haritaları oluşturmak için kullanılmaktadır. Bu özellikler birlikte çok sayıda materyal için temel kompozisyon bilgilerinin elde edilmesini sağlar.

EDS sistemleri genellikle taramalı elektron mikroskobu (SEM), geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ya da elektron prob mikro analizör (EPMA) sistemlerinin içine entegre edilirler. Bu sistemler, hassas bir X ışın dedektörü, soğutma için sıvı azot odası ile enerji spektrumu toplamak ve analiz etmek için kullanılan bir yazılımdan oluşmaktadır. Dedektör, ana cihazın numune odacığının içinde bulunan ve sıvı azot tarafından soğutulan uzun bir kolun sonuna monte edilir. Çoğunlukla dedektörler hassasiyeti artırmak için düşük voltajlarda çalışabilen Si(Li) kristallerinden yapılırlar. Fakat dedektör teknolojisindeki son gelişmeler, ‘silisyum sapma dedektörleri’ adı verilen ve daha yüksek sayma oranı ile ve sıvı azot soğutması olmadan çalışan dedektörleri kullanmaya imkan sağlamaktadır.

Bir EDS dedektörü iyonizasyondan, kristal içindeki iletken hale gelen ve gerilim oluşturan serbest elektronlardan dolayı gelen X ışınlarının enerjilerini emen bir kristal içerir. X ışını emilimi böylece X ışınlarını orantılı olarak elektriksel voltaja dönüştürür. Elektriksel pulslar elementin X ışınları karakteristiğine karşılık gelir.

Tipik bir EDS spektrumu X ışınları sayısı-enerji (keV) grafiği olarak gösterilir. Enerji tepeleri numune içerisindeki farklı elementleri göstermektedir. Genellikle bu tepeler çok yakın ve önceden belirlenmiştir. Fakat pek çok element birden fazla tepe noktasına sahiptir. Mesela demir elementi genellikle çok güçlü $K\alpha$ ve $K\beta$ tepe noktaları gösterir. Numune içerisinde bulunan az miktardaki elementler arka radyasyondan elementin tesbit edilemeyeceği X ışınları üreteceklerdir.

4.3.3. Raman spektroskopisi

Raman spektroskopisi tekniği çok esnek olarak kullanılabilen bir tekniktir. Bu özelliğinden dolayı bir optik ölçüm tekniği olan Raman Spektroskopisi, uzaydan gelen kaya parçacıklarını analiz etmede kullanıldığı gibi aynı zamanda okyanusların derinliklerinde oluşan doğal gazların kimyasal bileşimlerini tespit etmekte de kullanılabilir. Bilim adamları bu tekniği aynı zamanda insan vücudunun

içerisinde bulunan kanser hücrelerini ve pek çok başka hastalıkları görüntülemekte de kullanılmaktadırlar.

Raman spektroskopisi metodu, farmakoloji, adli tıp, biyomedikal araştırmalar, jeolojik sınıflandırma, tehlikeli materyallerin görüntülenmesi yanında eczacılık endüstrisinde kalitenin sağlanması, alternatif yakıt kaynaklarının geliştirilmesinde hatta kozmetik ürünlerin test edilmesinde çok önemli rol oynayabilir.

Raman spektroskopisi, bilim adamlarının bir obje ya da maddenin moleküler kompozisyonu hakkında detaylı bilgiler edinmesini mümkün kılan, bozucu olmayan, uygulanması basit, hiçbir numune hazırlama tekniği gerektirmeyen bir lazer tekniğidir.

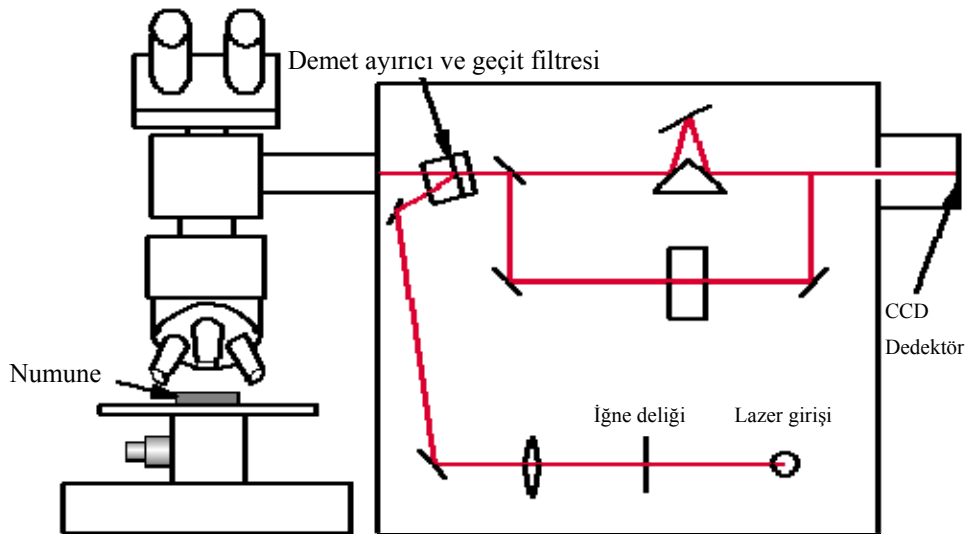
Yüksek yoğunlukta bir lazerden gelen ışık bir numune üzerine çarptığında ışığın büyük bir kısmı gittiği gibi aynı dalga boyunda ya da renkte geri gelir. Bununla birlikte fotonların çok küçük bir bölümü çok az miktarda başka renklere kayar. İşte bu renk sapmasını analiz ederek ışığın numune üzerinde ne çeşit bir molekülle etkileştiği anlaşılabilir.

Moleküler seviyede fotonlar emilim ya da dağılıma işlemi yoluyla maddeyle etkileşebilirler. Dağılıma elastik olarak ya da elastik olmayarak oluşabilir. Elastik olmayan işlem Raman dağılıma olarak adlandırılırken, elastik işlem Rayleigh dağılıma olarak adlandırılır.

Dağılan fotonların elektrik alan bileşeni molekülün elektron bulutunu karıştırır ve bir sanal seviye ortaya çıkartır. Raman dağılıma, sistem fotonlarla enerji değiştirdiğinde ve sonradan başlangıç seviyesinin altında ya da üstünde bulunan titreşimsel enerji seviyesine düştüğünde oluşur. Yansıyan ve dağılan fotonların arasındaki enerji farklılığını gösteren frekans kayması 'Raman Kayması' olarak adlandırılır. Sistemin titreşimsel enerji kaybetmesine ya da kazanmasına bağlı olarak dağılan fotonların kayması geri gelen fotonlara göre yukarı ya da aşağıya doğru oluşur. Aşağı kayanlar 'stoke', yukarı kayanlar ise 'anti-stoke' olarak anılırlar.

Tespit edilen fotonların sayıları ile gelen lazer enerjisinden kaynaklanan Raman kaymalarının grafiği Raman spektrumunu verir. Farklı materyaller farklı titreşimsel modlara sahiptirler ve dolayısıyla da farklı Raman spektrumları vardır. Bu özellik Raman spektrumunu materyallerin tanımlanması için çok kullanışlı bir teknik haline getirir.

Materyal karakterizasyonu için kullanılan pek çok Raman Spektrometresi lazer ışığını küçük bir alan ($<1-100\mu\text{m}$ çapında) üzerine odaklamak için optik mikroskop kullanır. Numuneden gelen ışık mikroskopun objektifinden geri geçerek spektrometreye gelir. Raman kaydırılmış radyasyon şarj-çiftleştirilmiş cihaz (CCD) dedektör tarafından toplanır ayrıca veri toplama ve eğri uydurma için de bir bilgisayar kullanılır. Şekil 4.6'da bir Raman Spektrometre düzeneğinin şeması görülmektedir.



Şekil 4.6. Raman Spektrometrenin şematik gösterimi

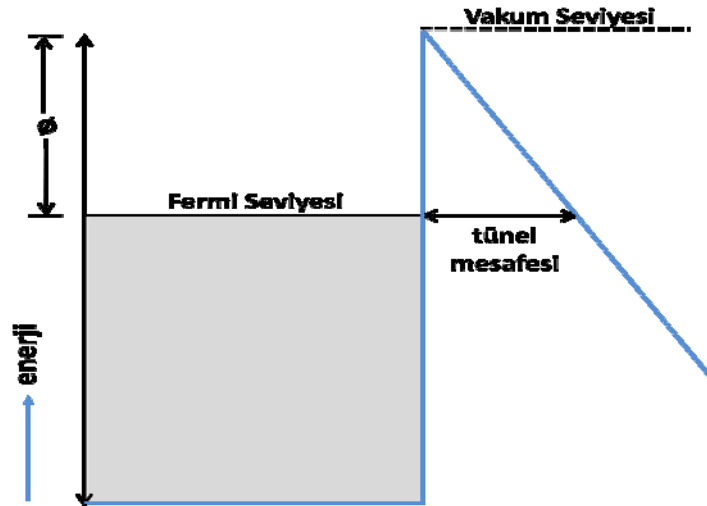
Bu ışık etkisi, Calcutta Üniversitesinde Hintli bir fizikçi olan ve bu buluşuyla 1930 yılında fizik alanında Nobel ödülü alan Sir C.V. Raman'ın adıyla isimlendirilmiştir.

4.3.4. Alan emisyon

Alan emisyonu, soğuk emisyon ya da Fowler-Nordheim tüneli olarak ta bilinen, yüksek elektrik alan altında elektronların potansiyel bir bariyer üzerinden bir tünel oluşturarak atlmasını sağlayan bir işlemdir. Başka bir deyişle; elektronların yüksek elektrik alan altında bulunan bir materyal yüzeyinden başka bir materyal yüzeyine akmasıdır.

Ortamda yüksek bir elektrik alan yokken bir elektron koridoruna bir bariyer gibi davranan materyalin yüzeyinden ayrılabilmek için çalışma fonksiyonu adı verilen belli bir minimum enerjiyi toplamalıdır. Eğer materyal çok kuvvetli bir elektrik alan altında, negatif yüke maruz bırakılır ve pozitif yüklü bir başka materyal (anod) yakınına getirilirse materyalde bulunan elektronlar ekstra enerjiye sahip olmuş, böylece de çalışma fonksiyonunun değeri azaltılmış olur ve yakındaki anoda kolaylıkla geçebilirler. Kuvvetli bir elektrik alan etkisi altında elde edilen ve materyalin yüzeyinden gelen akım “alan emisyon” olarak adlandırılır.

Alan emisyonu, düşük sıcaklıklardaki materyaller için şekil 4.10'daki gibi açıklanabilir. Materyal, birkaç elektron volt kadar vakum seviyesinin aşağısında bulunan, Fermi seviyesine elektronlarla doldurulmuş bir potansiyel kutu olarak kabul edilebilir. Fermi seviyesinden vakum seviyesine kadar olan mesafe çalışma fonksiyonu, ϕ , olarak adlandırılır. Vakum seviyesi, dışarıdan herhangi bir alanın olmadığı durumda, materyal dışındaki, dinlenme halindeki bir elektronun potansiyel enerjisini temsil eder. Kuvvetli bir alan olması halinde materyal dışındaki, elektronların içinden tünelleme yapabilecekleri potansiyel üçgen bariyerin oluşabilmesi için AB doğrusu boyunca bozulacaktır. Emisyonun büyük bir kısmı bariyerin en ince olduğu Fermi seviyesi çevresinde gerçekleşir. Şekil 4.7 metal malzemedeki alan emisyonu için enerji seviyesi diyagramını göstermektedir.



Şekil 4.7. 0°C de metalden alan emisyonu için enerji seviye diyagramı

Bu durum içine hiç klasik analog bulunmayan, tamamıyla kuantum-mekanik bir olaydır. Bu olay, bir elektronun dalga fonksiyonu klasik dönme noktasında ortadan kaybolmaması fakat üstel bir şekilde bariyere (elektronların toplam enerjisinin potansiyel enerjiden daha az olduğu yer) doğru zayıflaması sonucunda oluşur.

Alan emisyonu, vakum altında ve özellikle elektronların kuantum mekanik etki ile akmasından dolayı benzersiz bir elektron emisyonudur. Yüksek elektrik alanı, elektronlar katı materyalden vakuma doğru akış ihtimalini artırmak için metal (yarı iletken)-vakum ara yüzündeki potansiyel bariyerini yeterli miktarda yakınlaştırır.

Bu etkiden bazı durumlarda atomik boyutlarda görüntülemeye imkan tanıyan alan emisyon mikroskoplarında faydalanılmaktadır. Alan emisyonu, daha düşük değerlerde elektron emisyonuna imkan sağlayan Shottky etkisinden ayırmak için bazen yüksek alan emisyonu olarak ta isimlendirilir.

Kısaca özetlemek gerekirse;

- Elektronlar, materyal içine potansiyel duvarı ile hapsedilmişlerdir
- Elektron enerjisi materyalden çıkmak için yetersiz

- Çıkabilmesi için elektrona ekstra bir enerji verilmesi gerekiyor (termal, foto emisyon ya da elektrik alan)
- Kuantum Mekanîği potansiyel bariyerin dışında hızlı bir elektron dalga fonksiyonu düşmesi sergiler
- Dışarıdan bir elektrik alan uygulanması, potansiyel bariyeri düşürür ve inceltir
- Yüksek yüzey alanıyla dışarıya olan potansiyel bariyer ince bir hale gelir
- Alan 10^8 V/m dan büyük olunca tünel akımı kayda değer hale gelir
- Düşük sıcaklıkta oluşan emisyonun dolayısıyla bazen Soğuk Emisyon olarak ta adlandırılır.
- Fowler-Nordheim bazı elektronların potansiyel bariyer üzerinden tünelleme yapabileceğini ve vakuma çıkabileceklerini göstermek için kuantum mekaniğini kullanmıştır.

$$I(E) = \frac{1.54 \times 10^6 A (\beta E)^2}{\Phi} \text{Exp}\left(-\frac{6.83 \times 10^3 \Phi^{3/2}}{\beta E}\right) \quad (4.1)$$

4.1 numaralı eşitlik, elektrik alan emisyonu için kullanılan Fowler-Nordheim eşitliğidir.

Bu eşitlikte;

- **E** Elektrik alan (MV/m)
- **Φ** malzemenin çalışma fonksiyonu (eV)
- **β** alan arttırma faktörü
- **A** efektif emisyon alanı

değerlerini ifade eder.

Başka bir ifade ile alan emisyonu akım yoğunluğu ile uygulanan elektrik alan arasındaki ilişki Fowler-Nordheim a göre aşağıdaki eşitlikle açıklanabilir;

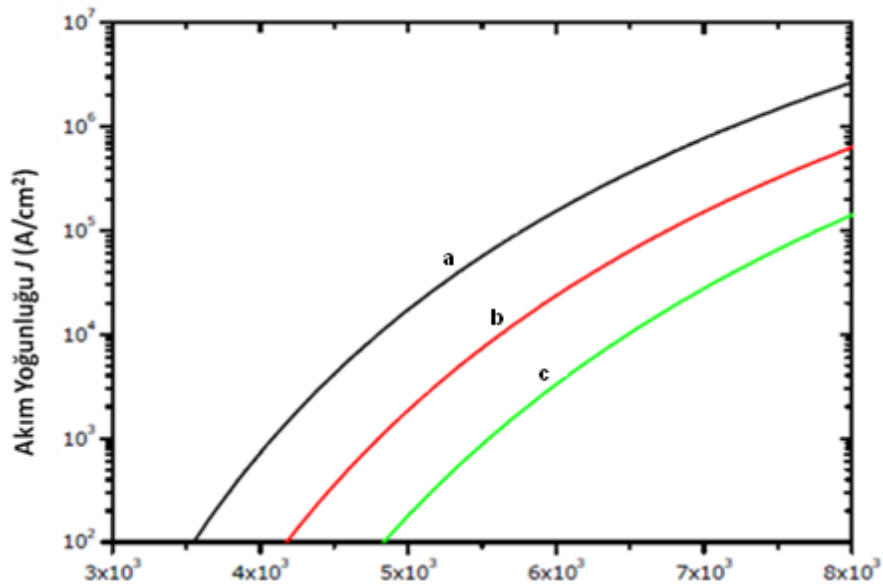
$$J = \frac{A\beta^2 E^2}{\phi} \exp\left(\frac{-B\phi^{3/2}}{\beta E}\right) \quad (4.2)$$

Burada;

- **A (Sabit)** = $1,56 \times 10^{-10}$ (AV⁻² eV)
- **B (Sabit)** = $6,83 \times 10^{-3}$ (VeV^{-3/2} μm⁻¹)

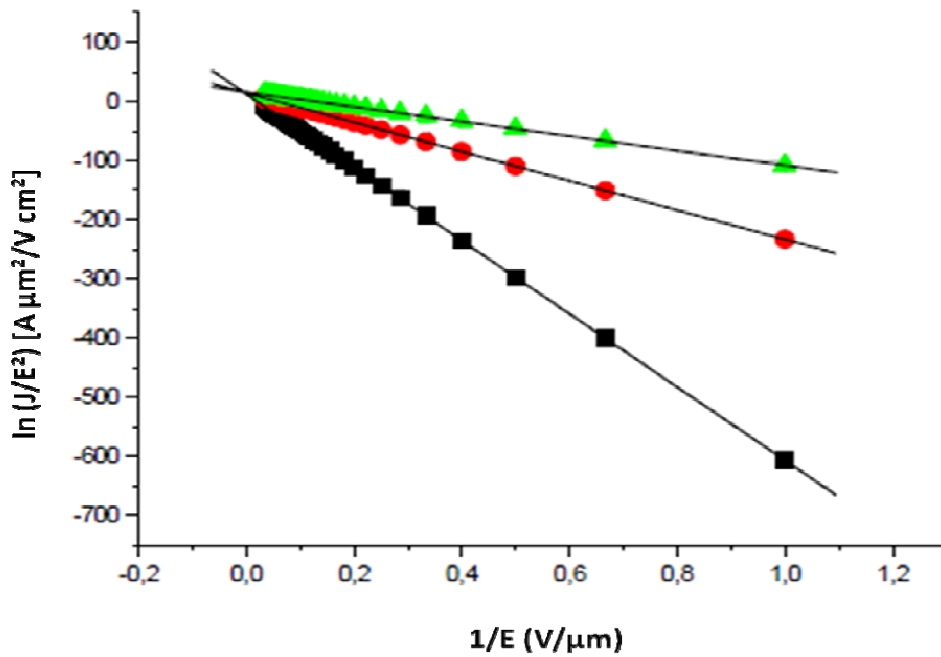
F-N eşitliği içerisindeki elektrik alan artırma faktörü β bir düz yüzey üzerindeki herhangi bir sivri ucun meydana getirdiği alan emisyon arttırımının derecesini gösterir ve elektrik alanın ortalama makroskopik değerine kıyasla sivri uçtaki gerçek değerini temsil eder. Nano boyuttaki emiterler için bu değer, yapının geometrisi, kristal özellikleri, iletkenliği, çalışma fonksiyonu ve nano yapıların yoğunluğu ile doğrudan bağlantılıdır.

Şekil 4.8 de farklı çalışma fonksiyonları için örnek J (Akım yoğunluğu)- E (Elektrik Alan) grafikleri görülmektedir.



Şekil 4.8. Farklı çalışma fonksiyonları için örnek J (akım yoğunluğu)- E (elektrik alan) grafikleri (a- $\Phi = 4,0\text{eV}$; b- $\Phi = 4,5\text{eV}$; c- $\Phi = 5,0\text{eV}$)

Eğer $1/E - \ln(J/E^2)$ grafiğini çizecek olursak bu grafiği bir doğruya yaklaştırmamız neticesinde elde ettiğimiz grafiğin eğimi bize elektrik alan emisyonu için kullandığımız materyalin çalışma fonksiyonunu verecektir. Şekil 4.9 da farklı elektrik alan arttırma faktörleri için örnek $1/E - \ln(J/E^2)$ grafikleri görülmektedir.



Şekil 4.9. Farklı elektrik alan arttırma faktörleri için örnek $1/E - \ln(J/E^2)$ grafikleri (kare $\beta = 100$; daire $\beta = 250$; üçgen $\beta = 500$)

Uydurulmuş verinin eğimi çalışma fonksiyonuna orantılıdır. Eğer çalışma fonksiyonu değişirse F-N grafiğinin eğimi de değişir.

$$Eğim = -\frac{d\ln\left(\frac{J}{E^2}\right)}{d\left(\frac{1}{E}\right)} = -\alpha\Phi^{3/2} \quad (4.3)$$

Günümüzde alan elektron emisyonu, vakum-mikro elektroniğin ve mikro-nano elektroniğin ortaya çıkmasıyla pek çok uygulamaya ilham kaynağı olmaktadır.

Nokta alan emisyon katodları, yüksek çözünürlüklü elektron mikroskopları, Auger spektroskopisi, atomik çözünürlüklü holografî ve atomik yüzeylerin tanımlanmasını gerektiren diğer birçok alanda yeni uygulamalar bulunmaktadır.

Alan elektron emisyonu, aynı zamanda, modern yüksek akım elektroniğinin temeli olan ve patlama elektron emisyonu olarak adlandırılan etki sayesinde yüksek güç ve süper yüksek güçlü elektron ışınlarının (binlerce ve milyonlarca amper) üretim işlemini başlatmaya ve sürdürmeye elverişli bir yapıya da sahiptir [92, 93].

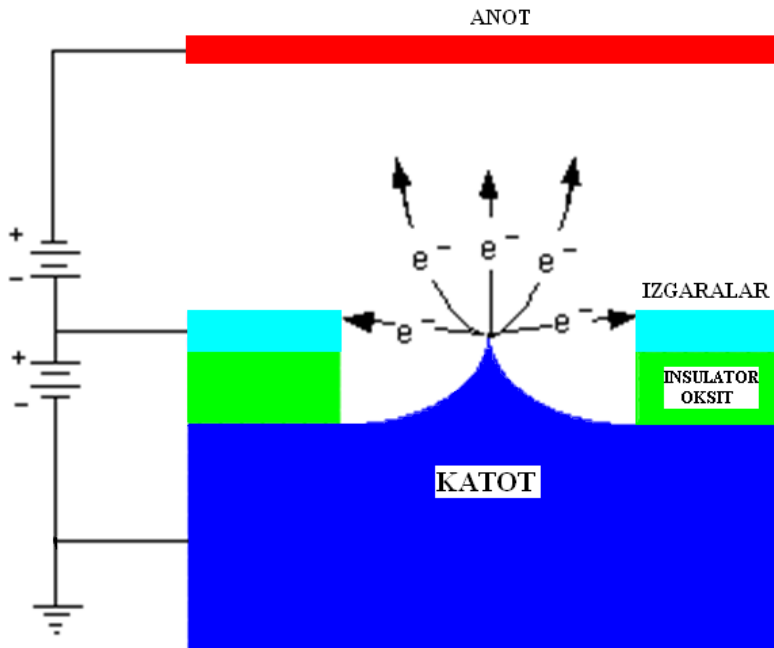
Alan emisyonu en kolay şekilde çok ince metal ya da yarı iletken, iğne şeklinde yapılardan elde edilir. Kontrollü bir şekilde üretilebilen en küçük iğne tarzı ucun yarıçapı 100 nm. civarındadır. Küçük optik kaynak boyutu ve alan emisyon katodunun akım yoğunluğu bu tip yapıları mikro prob ve elektron mikroskopları için çok iyi bir potansiyel haline getirir. Çünkü 500 nm. den küçük odaklanmış ışın için alan emisyonu termo iyonik katodlardan daha fazla akım üretir.

Çeşitli alan emisyon uygulamalarında kullanılmak üzere tekrarlanabilir kapılanmış katot üretimi araştırma projelerinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır.

Alan emisyon dizileri RF ve mikro dalga uygulamaları için gelecek vadetmektedirler. Çünkü yüksek verimlilikte çalışan elektron tabancaları için potansiyel içermektedirler. Bu verimlilik özellikle bu dizilerin mikron altı boyutta yapılar olarak

üretilebilmeleri ve aralarındaki mesafenin küçültülebilmelerinden kaynaklanmaktadır. Bu katotların uç çapının küçük olması büyük bir alan yükseltmesine sebebiyet vermektedir. Kapı ise daha düşük aktivasyon (turn-on) voltajı ve daha yüksek geçiş iletimi (transkondüktans) sağlaması için uca çok yakın bir şekilde yerleştirilebilir.

Şekil 4.10'da gösterildiği gibi kapılanmış alan emisyon katotları, bir alt tabaka üzerine çökeltilmiş ya da yukarıdan-aşağı üretim metodları kullanılarak, kazınarak oluşturulmuş sivri uçlardan ibarettir. İkinci elektrot yani kapı ya da çıkarım ızgarası sivri ucun yakınına yerleştirilir. Kapı, hem ızgaraya elektriksel izolasyon hem de uçla kapı arasındaki mesafenin ayarlanmasını sağlayan bir mesafe ayarlayıcılığı sağlar. Operasyon sırasında çıkarım ızgarasıyla katot arasında bir potansiyel uygulanır. Bu potansiyel tarafından sivri uca oluşturulan elektrik alan, ucun çok fazla sivri olmasından dolayı artırılmış ve böylece elektronların emisyonu sağlanmış olur. Pek çok durumda 15V kadar düşük bir potansiyel bile bir emisyon oluşturmak için yeterlidir. Aşağıdaki çizimde; yayılan elektronlar anotta toplanmaktadır. Gerçekte anotlar basit metal anottan ya da fosfor ekrandan kompleks elektron optiklere kadar pek çok farklı yapıda olabilirler.



Şekil 4.10. Kapılanmış alan emisyon katodunun şematik gösterimi

BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

5.1. Giriş

Vakum mikro elektronik cihazlar, soğuk katot ya da Fowler–Nordheim ($F-N$) tünellemesi prensibiyle çalışırlar. Bir başka teknik olan termo-iyonik emisyonun aksine soğuk emisyonda tünellemeyi sağlamak için yüksek bir sıcaklık gerekmemekte ve bu da büyük bir avantaj sağlamaktadır.

Yukarıda adı geçen taşınabilirlik avantajından başka, soğuk katot prensibiyle çalışan displayler yüksek parlaklık, efektif ışımaya, daha düz yapı, daha geniş görme açısı ve daha yüksek çözünürlük gibi pek çok avantaj da sağlamaktadır. Soğuk katot prensibiyle çalışan displayler, adresleme plan matrisiyle birleştirilebilir ve bu sayede de Katot Işın tüplerine (CRT) oranla güç tüketiminde büyük oranlarda düşme sağlanabilir.

Kısaca vakum mikro elektroniğin gelişiminden ve şimdiye kadar kullanılan materyallerden bahsedilecek olursa;

‘Spindt’ katotlardan oluşan ilk alan emisyon cihazı Charles Spindt tarafından Molibdenyum hunilerinin açılı buharlaştırma yöntemiyle oluşturulmasıyla elde edilmiştir [94]. Spindt katotları günümüzde kendilerine iyon kaynağı ve kütle spektrometreleri alanlarında uygulama imkanı bulmaktadır.

Motorola firması Spindt katotlarını kullanarak display oluşturmak için oldukça büyük gayret ve para harcamasına rağmen başarılı bir sonuç elde edememiştir [95]. 15 inç, tamamen renkli bir display prototipi geliştirilmesine rağmen üretilen

prototipin kullanım ömrü ve maliyeti LCD monitörlerle kıyaslandığında ortaya çıkan büyük fark, bu projenin sonlandırılmasına sebep olmuştur.

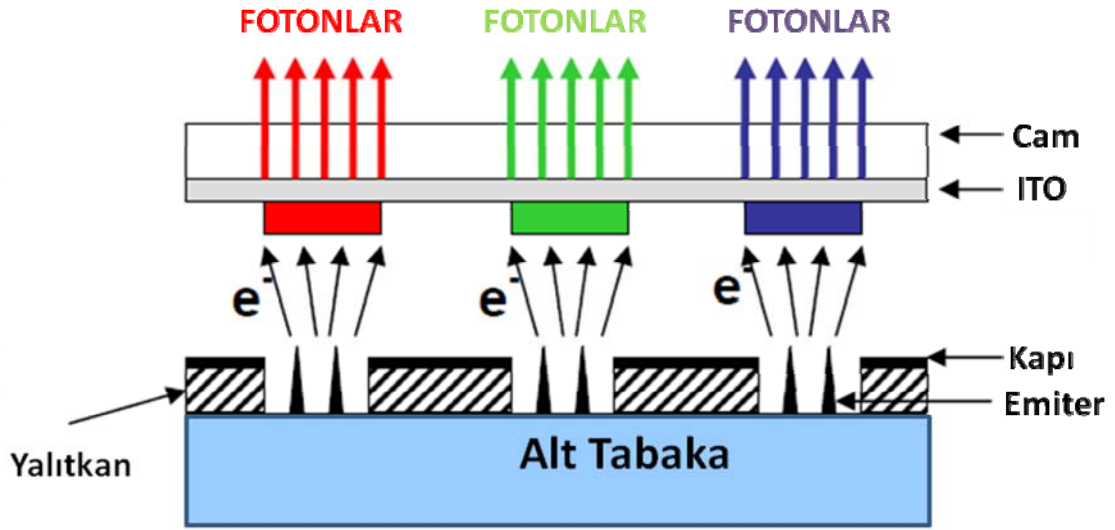
Karbon nanotüplerin keşfi ve alan emisyon özelliklerinin ortaya çıkarılmasıyla, pek çok firma ile birlikte Samsung firması da karbon nano tüpleri kullanarak alan emisyon display üretmek için çalışmalarını başlatmıştır [96]. Şu an itibariyle bir prototip geliştirilmiş olmasına rağmen henüz testleri tam olarak tamamlanmadığı için ticari anlamda piyasaya sürülmemiştir.

Geniş bant aralığına sahip yarı iletken nano noyutlu yapılar, düşük çalışma fonksiyonlarından dolayı dikkat çekmektedirler. Çünkü Fowler–Nordheim tünellemesinde akım, çalışma fonksiyonuna karşı çok hassastır. Çalışma fonksiyonu ne kadar düşük olursa o kadar avantaj sağlamaktadır.

Yakın zamanda Silisyum nano yapılar, yıllardır Silisyum teknolojisinde edinilen tecrübe, bilgi birikimi ve bu tip cihazların CMOS devrelere entegrasyonunun kolay olması gibi sebeplerden ötürü oldukça fazla dikkat çekmiştir.

Alan emisyon monitörlerle yarışan ve gelişmeler kaydeden diğer teknolojiler; LCD monitörler [97], plazma monitörler [98], organik LED tabanlı monitörler[99] ve yüzey iletim elektron (SCE) emiterleri [100] olarak sıralanabilir.

Alan emisyon için seçilen materyalden ayrı olarak, güçlendirilmiş işlerlik sağlamak için alan emisyon cihazları dizayn edilebilir. Şu anda piyasada bulunan cihazlar, triyot konfigürasyonunda tasarlanmışlardır. İlave kapı elektrot katmanı elektron demetinin daha iyi odaklanması avantajını sağlamakla birlikte, bu yapıları elde etmek için yapılması gereken işlemlerin sayısının ve kompleksliğinin artması dezavantajını da beraberinde getirmektedir. Şekil 6.1. de bir alan emisyon triyod cihazın şeması görülmektedir.

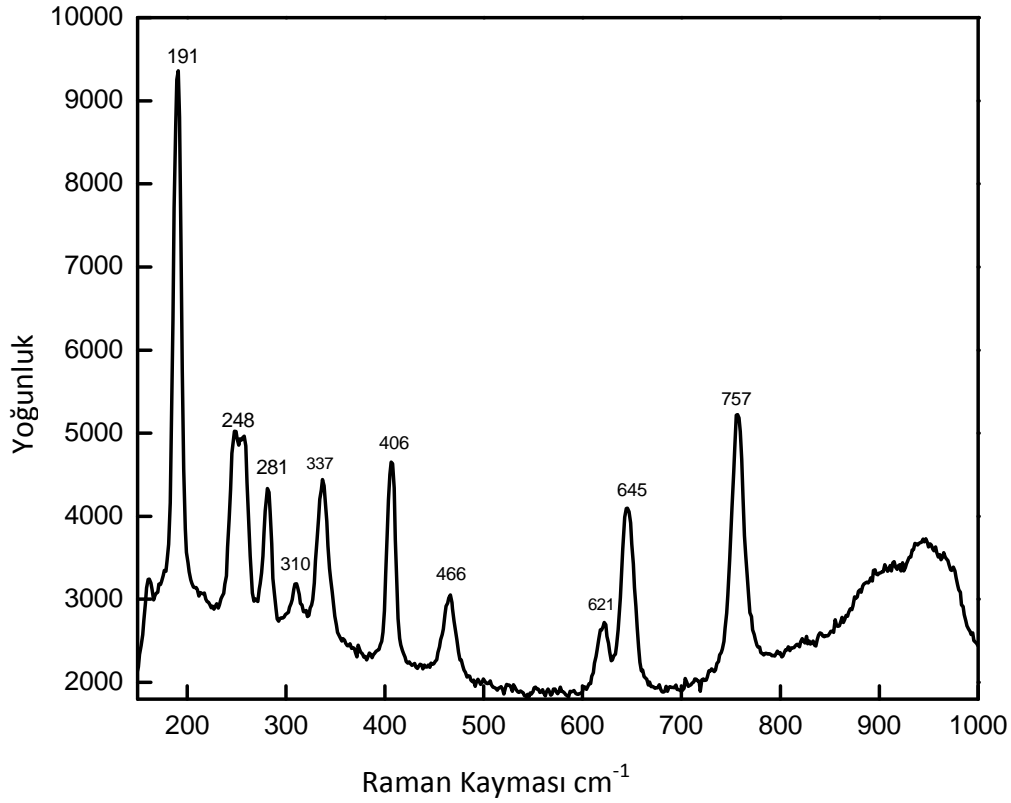


Şekil 5.1. Alan emisyon triyod cihazın şematik gösterimi

Bu tez kapsamında yapılan çalışmada, oldukça keskin uçlu Ga_2O_3 blokların sentezlenmesi ve karakterizasyonu başarıyla gerçekleştirilmiştir. Sentezleme sırasında GaAs alt tabakanın, yaklaşık 5cm. çapında bir alüminyum oksit yatay tüp içinde, $1050^{\circ}C$ de ısıtılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Nano yapıların morfolojileri ve yapılarının karakterizasyonu taramalı elektron mikroskopuyla (SEM), seçilmiş alan kırınım ve Raman-saçılım spektroskopisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Alan emisyon özelliklerinden birisi olan açılma alan noktası ve eşik alanı özellikleri tespit edilmiştir.

5.2. Nano Boyutlu β -Ga₂O₃ Yapıların Karakterizasyon Sonuçları

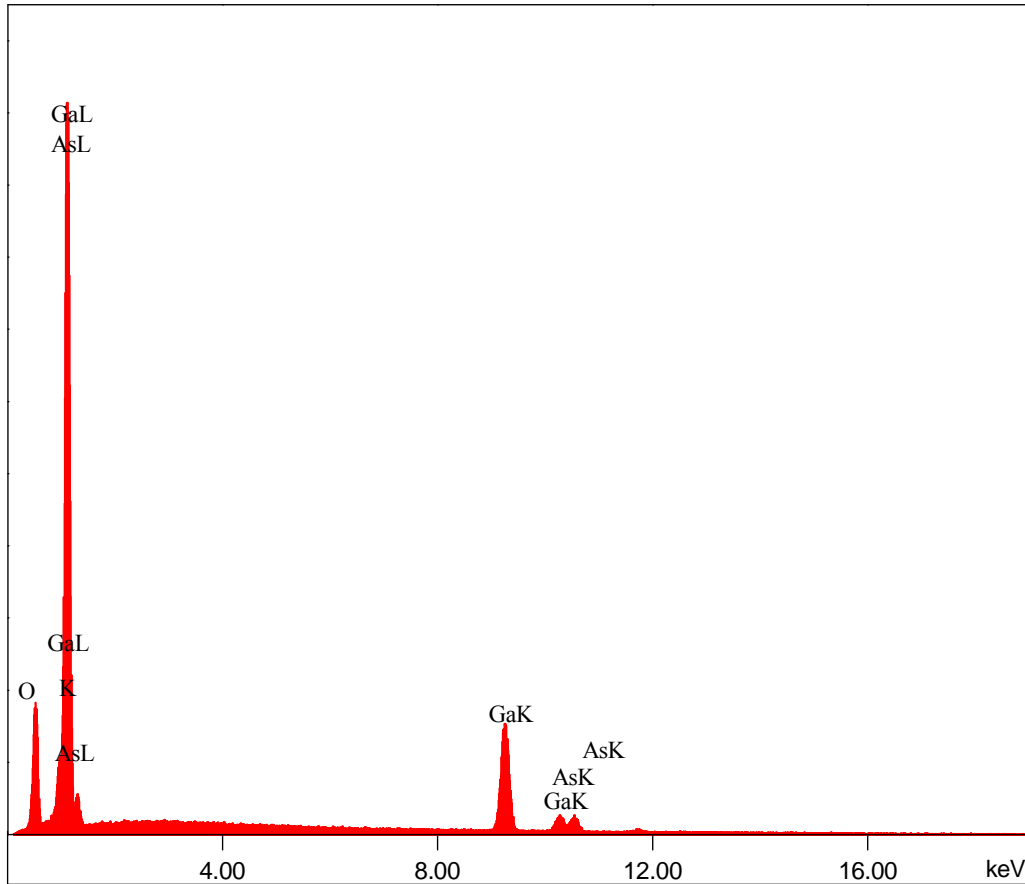
5.2.1. Raman spektrumu karakterizasyon sonuçları



Şekil 5.2. GaAs alt tabaka üzerinde sentezlenen β -Ga₂O₃ nano kabloların Raman Spektrumu

Ga₂O₃ nano kabloların Raman spektrumu, Renishaw RM 1000 Research Lazer Raman mikroskobu kullanılarak elde edilmiştir. Grafik, oda sıcaklığında β -Ga₂O₃ nano kabloların 514 nm. dalga boyunda uyarılmasıyla elde edilen Raman dağınım spektrumunu göstermektedir. 191 cm⁻¹, 310 cm⁻¹, 337 cm⁻¹, 406 cm⁻¹, 466 cm⁻¹, 621 cm⁻¹, 646 cm⁻¹ noktalarında tepeler gözlenmiştir. Bu tepeler tamamıyla β -Ga₂O₃ materyalinin özellikleri ve Raman tepe noktalarıyla uyum göstermektedir [101, 102].

5.2.2. Kimyasal bileşenlerin tesbit edilmesi için yapılan EDS analizi sonuçları



Şekil 5.3. GaAs alt tabaka üzerinde sentezlenen β -Ga₂O₃ nano kabloların EDS Analizi

Ga₂O₃ nano kabloların kimyasal bileşenlerini tesbit etmek için taramalı elektron mikroskobuna monte edilmiş EDS ölçüm cihazı kullanılmıştır. EDS verileri nano kabloların temel bileşenleri olarak Ga (galyum) ve O₂'i göstermektedir. Aynı zamanda grafikte göze çarpan As (arsenik) ise alt tabaka olarak kullanılan malzemedeki (GaAs) kaynaklanmaktadır.

5.2.3. Alan emisyon cihaz uygulaması

Her yönüyle iyice anlaşılmış bir kuantum işlemi olan alan emisyon özelliği, elektronların yüksek parlaklığı ile düşük enerji dağılımı için iyi bir kaynaktır. Yüksek elektrik alan altında Fermi seviyesine yakın elektronlar enerji bariyerini aşarak vakum seviyesine çıkarlar. Alan emisyon özelliği kullanılan pek çok

uygulama için materyaller çok düşük eşik emisyon alanı ve yüksek akım yoğunluğunda yüksek oranda stabilite göstermelidirler. Düşük bir çalışma fonksiyonu ve büyük alan güçlendirme faktörü düşük bir elektron emisyon eşik alanının oluşmasına katkıda bulunur. Çalışma fonksiyonu malzemeden gelen bir özellik iken alan güçlendirme faktörü büyük oranda elektron vericinin (emiter) geometrisine bağlıdır. Uzun ve pahalı yukarıdan-aşağıya işlem teknikleri kullanılarak oldukça küçük çaplarda alan emisyon uçları üretilmiş [103, 104] olmasına karşın bu tarz vericilerin ömürleri sınırlıdır ve performansları da zamanla düşme göstermektedir.

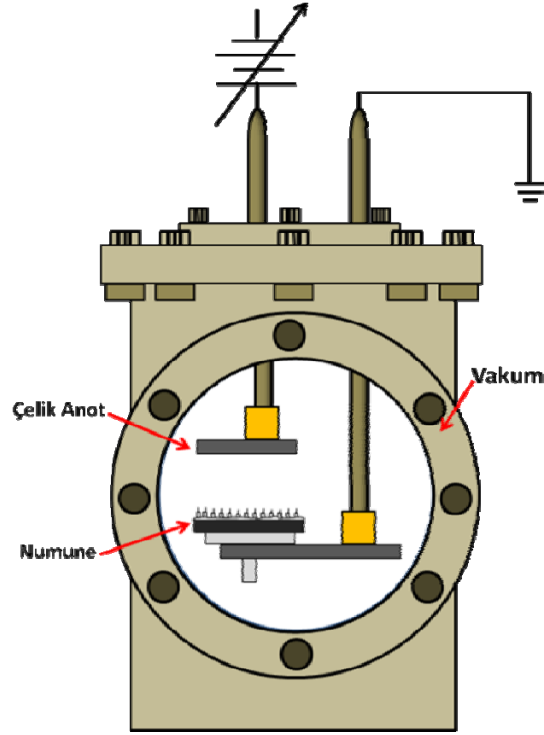
Zhan ve arkadaşları Ga₂O₃-C nano kablolardan ilk olarak alan emisyonunu, emisyon başlama alanı 8.6 V μ m⁻¹ ile rapor etmişlerdir [105]. Cao ve arkadaşları ise kaktüs benzeri Ga₂O₃ nano yapıları eşik elektrik alanı 12.6V μ m⁻¹ değeriyle bildirmiştir [106].

Bu tez kapsamında yapılan alan emisyon uygulaması, yüksek vakum odacığında (~15x10⁻⁶ Pa) gerçekleştirilmiştir. Cihaz uygulamasında kullanılan β -Ga₂O₃ nano kablolar katod olarak bağlantısı yapılmış ve alüminyumdan üretilmiş olan taramalı elektron mikroskopunun örnek tutucusuna sabitlenmiştir. Anod ile β -Ga₂O₃ nano kabloların uçları arasındaki mesafe 1mm. olarak ayarlanmış (Şekil 5.4) ve ölçülen emisyon yüzey alanı 76.5 mm² olarak kayda geçirilmiştir. Alan emisyon akım-gerilim eğrisi Fowler-Nordheim (F-N) eşitliği kullanılarak analiz edilmiştir. Alan emisyonu için F-N eşitliği;

$$J = (A\beta^2 E^2 / \Phi) \exp[-B \Phi^{3/2} (\beta E)^{-1}] \quad (5.1)$$

olarak verilmektedir.

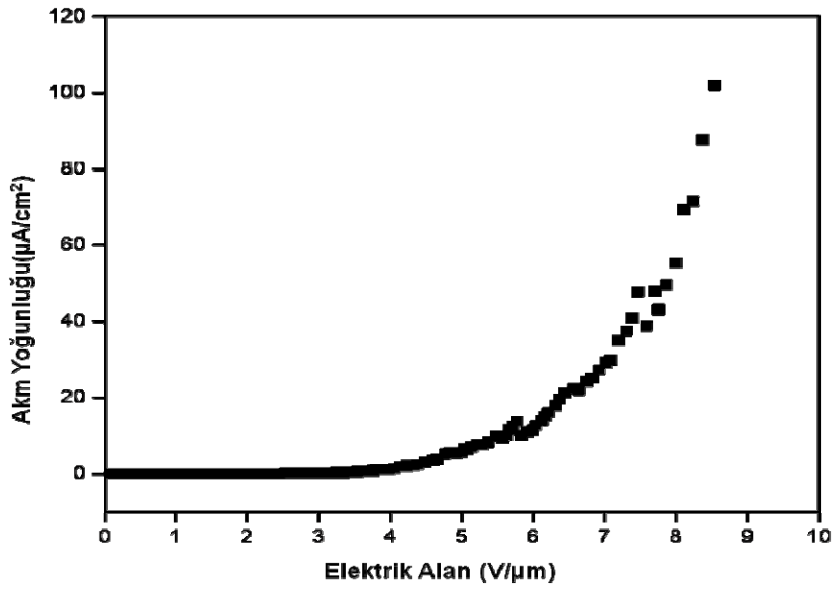
Bu eşitlikte; J akım yoğunluğu, E uygulanan elektrik alan, Φ Ga₂O₃ için 4,15eV olarak öngörülen [107] çalışma fonksiyonu ve β da alan emisyonu güçlendirme faktörüdür.



Şekil 5.4. Alan emisyon cihaz uygulamasının şematik gösterimi

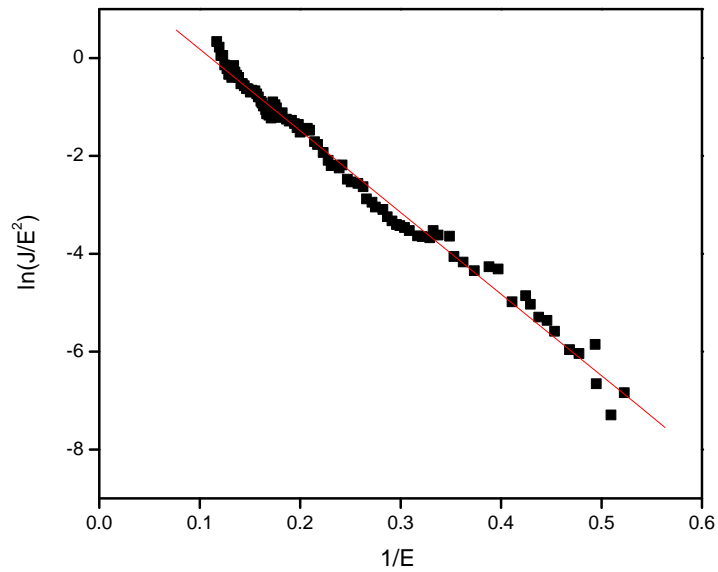
Şekil 5.5.'de β -Ga₂O₃ nano yapılarından elde edilen emisyon akım yoğunluğu-uygulanan elektrik alan (J-E) grafiği görülmektedir.

$10 \mu\text{Acm}^{-2}$ emisyon akım yoğunluğunun elde edilebilmesi için uygulanması gereken elektrik alan, emisyon başlama alanı olarak tanımlanmaktadır. 10mAcm^{-2} emisyon akım yoğunluğunun elde edilebilmesi için uygulanması gereken elektrik alan ise eşik alanı olarak tanımlanmaktadır. Üretilen β -Ga₂O₃ nano yapılarından üretilen alan emisyon cihazında emisyon başlama alanı $2.1 \text{V}\mu\text{m}^{-1}$ ve eşik alanı $5.6 \text{V}\mu\text{m}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Şunu özellikle belirtmek gerekir ki; emisyon başlama alanı $2.1 \text{V}\mu\text{m}^{-1}$ nano boyuttaki elmas ($3\text{-}5 \text{V}\mu\text{m}^{-1}$) [108] ve tek duvarlı karbon nano tüpler kadar ($0,7\text{-}3,9\mu\text{m}^{-1}$) [109] düşük seviyededir. Bu mükemmel derecedeki alan emisyon karakteristiği Ga₂O₃ nano kabloları endüstriyel alan emisyon uygulamaları için oldukça önemli bir potansiyel haline getirmektedir.



Şekil 5.5. GaAs alt tabaka üzerinde sentezlenen β -Ga₂O₃ nano kabloların emisyon akım yoğunluğu-uygulanan elektrik alan (J-E) grafiği.

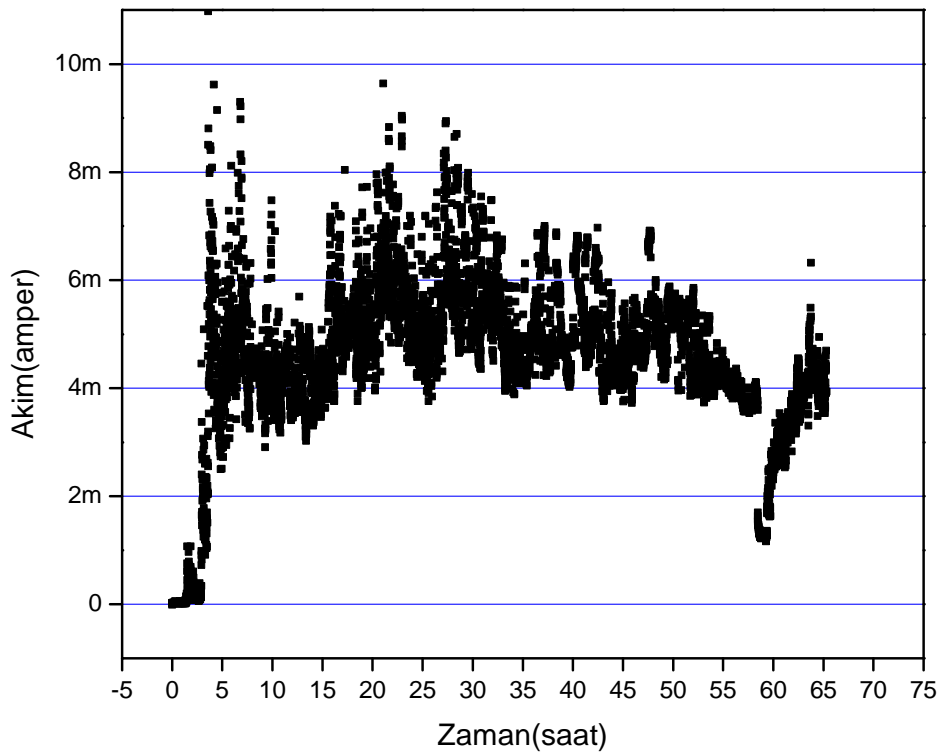
Şekilde 5.6.'da yer alan grafik ise Ampirik Fowler-Nordheim (F-N) koordinatları içinde, Alan Emisyon Akım-Gerilim Karakteristiğini göstermektedir. F-N grafiği Ga₂O₃ nano yapılardan kaynaklanan alan emisyonuna işaret eden oldukça lineer bir karakteristik sergilemektedir.



Şekil 5.6. Ampirik Fowler-Nordheim (F-N) koordinatları içinde, alan emisyon akım-gerilim karakteristiği

Şekil 5.7’de Ga_2O_3 nano yapıların elektrik alan etkisi altında ürettikleri emisyon akımının zamanla değişimi gösterilmektedir. Bu yapılar, grafikten de kolayca anlaşılabilir gibi çok uzun bir süre (yaklaşık 70 saat) yüksek emisyon akımı (ortalama 5mA) üreterek performanslarını devam ettirebilmektedirler. Bu da bu tip malzemelerden üretilen herhangi bir alan emisyon cihazının ömrünün oldukça uzun olacağını göstermektedir.

Bu grafikte dikkat çeken bir başka önemli nokta da emisyon akımında oluşan dalgalanmaların çok fazla olmamasıdır ki bu özellik alan emisyon cihazları için çok önemlidir.



Şekil 5.7. GaAs alt tabaka üzerinde sentezlenen $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ nano kabloların alan emisyon akımının zamana göre değişim grafiği

Alan Emisyon akımı bilgisi, I_{FN} , F-N eşitliğinin değiştirilmiş bir versiyonu [110, 111] kullanılarak analiz edilmiştir. Metallerin aksine, yarı iletkenlere uygulanan

elektrik alan iletim bandının bozulmasına sebebiyet verebilir. Yüksek alan etkisi altında iletim bandının tabanı, yüzeyde bir elektron havuzu oluşturarak Fermi seviyesinin altına doğru bükülür [111, 112].

F-N formülü içerisinde kullanıldığı gibi, etkin çalışma fonksiyonu aşağıdaki şekilde verilir;

$$\phi_{eff} = \phi - \zeta E_{loc}^{4/5} \text{ eV} \quad (5.2)$$

Bu formülde E_{loc} lokal elektrik alanı, ϕ yarı iletkenin çalışma fonksiyonunu (ki bu çalışmada β -Ga₂O₃ nano yapılar kullanıldığı için 4.15 eV olarak alınmıştır [107]) ve ζ (5.3) numaralı eşitlikle verilen sabiti ifade etmektedir.

$$\zeta = 4.5 \times 10^{-7} \epsilon_r^{-2/5} \text{ eV}^{1/5} \text{ cm}^{4/5} \quad (5.3)$$

Sonuç olarak ortaya çıkan F-N eşitliği;

$$I_{FN} = A \cdot J_{FN} = A \frac{a}{t(y)^2} \frac{E^2}{\phi_{eff}} \exp \left[-b \frac{\phi_{eff}^{3/2}}{E} v(y) \right] \times \left[1 - \left(1 + \frac{2\kappa\zeta E^{4/5} \phi_{eff}^{1/2}}{E} \right) + \exp \left(\frac{2\kappa\zeta E^{4/5} \phi_{eff}^{1/2}}{E} \right) \right] A \cdot \text{cm}^{-2} \quad (5.4)$$

olmaktadır.

A etkin emisyon alanı, a ve b evrensel F-N sabitleri, $\kappa = 5.16 \times 10^7 \text{ eV}^{-1/2} \text{ cm}^{-1}$ ve y ise aşağıdaki formülle verilen görüntü kuvvet engel azaltma faktörü

$$y = c \frac{F^{1/2}}{\phi_{eff}} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \right)^{1/2} \quad (5.5)$$

burada $c = 3.7947 \times 10^{-4} \text{ eV} \cdot \text{V}^{-1/2} \cdot \text{cm}^{1/2}$, ϵ_r yarı iletken dielektrik sabiti (Ga_2O_3 için 10.2 alınmıştır [113]), $t(y)$ ve $v(y)$ ise düzeltme faktörleridir [114].

Lineer rejimdeki F-N eğrisinin eğimi (S) $\phi_{eff}^{3/2}$ ile doğru orantılıdır [112] ve şu şekilde tanımlanır;

$$S \equiv \partial \ln(I_{FN}/V^2) / \partial(1/V) \quad (5.6)$$

(5.1) numaralı eşitlikle tanımlanan nano boyutlu sivri uçlar için alan güçlendirme faktörünü (β) bulmak için (5.7) numaralı eşitliğin çözülmesi gerekmektedir.

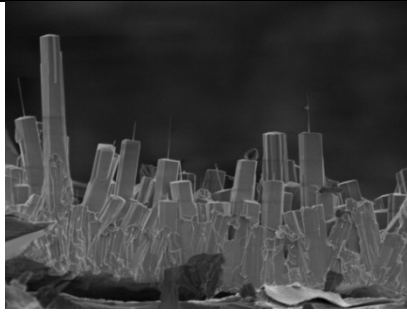
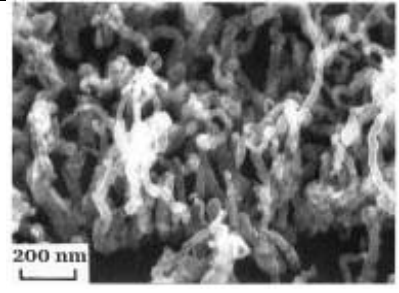

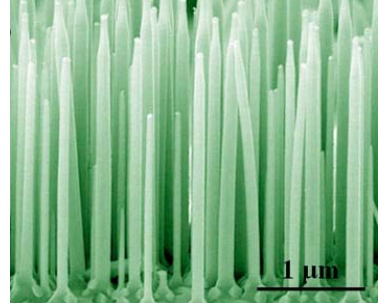
$$\beta = E_{loc} / E_{app} \quad (5.7)$$

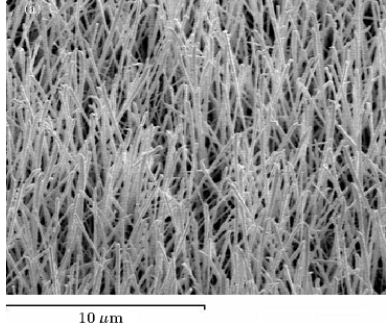
Burada E_{loc} ve E_{app} sırasıyla, yükseltilmiş lokal ve uygulanan alan kuvvetleridir. Uygulanan elektrik alanı $E_{app} = V/d$ olarak ifade edilir.

Bu parametrelere göre ortalama elektrik alan güçlendirme katsayısı $\beta \approx 3786$ olarak elde edildi. Bugüne kadar yapılmış çalışmalarda bulunan malzemelerin ve nano yapıların alan emisyon çalışmalarından kolaylıkla anlaşılabilceği gibi bulunan bu elektrik alan güçlendirme katsayısı (β) en iyiler arasında yer almaktadır. Alan emisyonu konusunda üzerinde çok fazla çalışma yapılan ve bu alanda çok iyi özelliklere sahip olduğu bilinen karbon tabanlı malzemeler göz ardı edilecek olursa bu rakamın ne kadar önemli ve gelecek adına anlamlı olduğu daha iyi anlaşılacaktır. Öyle ki; çok farklı yapılarından ve ultra sivri uçlarından dolayı Ga_2O_3 nano yapılar bazı karbon tabanlı nano boyutlu malzemelerden bile daha iyi alan emisyon özellikleri sergilemişlerdir.

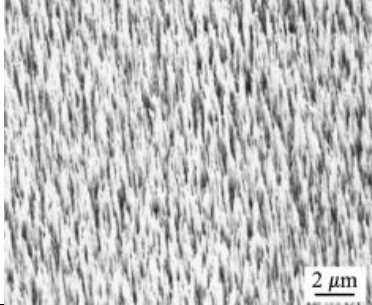
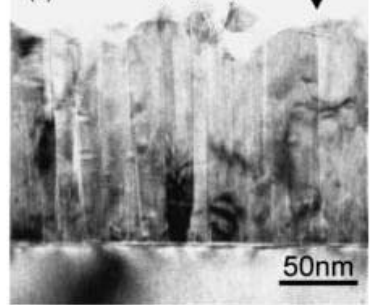
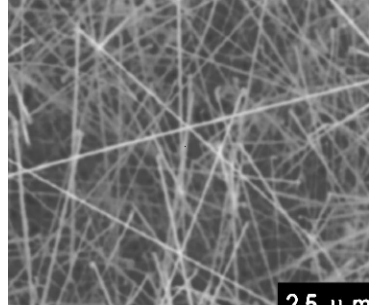

Etkin emisyon alanı yardımcı $\Gamma(y)$ fonksiyonu kullanılarak, Forbes [114] tarafından sunulduğu şekilde $A \approx 2.31 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ olarak hesaplanmıştır.

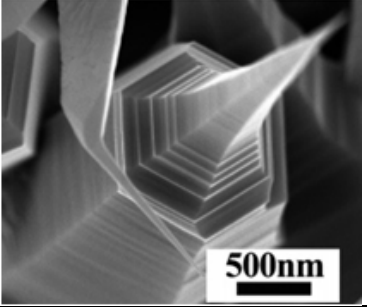
Tablo 6.1. Alan Emisyon Cihaz Karakteristiklerinin Bir Boyutlu Nano Yapıların Alan Emisyon Karakteristikleriyle Karşılaştırılması

Bir Boyutlu Nano Yapılar	Açılma Alanı (V/ μm)	Eşik Alanı (V/ μm)	Elektrik Alan Güçlendirme Katsayısı (β)	SEM Mikrografı
<u>Ultra Sivri Uçlu Ga₂O₃ Nano kablolar</u>	<u>2.1</u>	<u>5.6</u>	<u>~ 3786</u>	
Karbon Nano Tüpler [115]	0.75	1.6	-	
CN _x Nano Tüpler [116]	2-3	3	-	
Sn Katkılanmış In ₂ O ₃ Nano Kablo Dizisi [117]	2	-	3850	

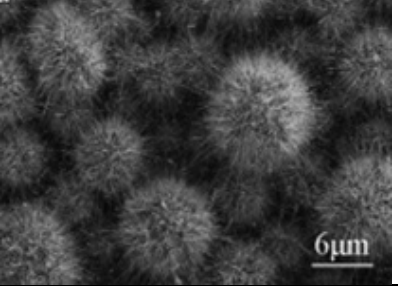
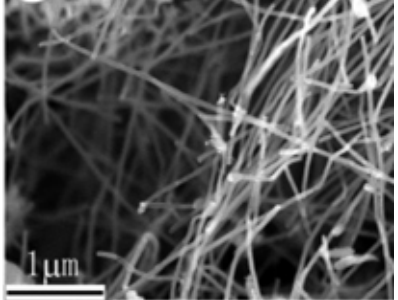
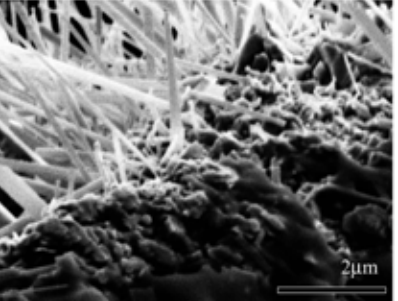
In Katkılanmış SnO ₂ Nano Kablo Dizisi [118]	1.5-2.5	-	1682-2938	
---	---------	---	-----------	--

Tablo 6.2. Alan Emisyon Cihaz Karakteristiklerinin Bir Boyutlu Nano Yapıların Alan Emisyon Karakteristikleriyle Karşılaştırılması (Devam)

GaAs Nano Kablolar [119]	2	6.5	3500	
GaN Nano Kemer Film [120]	1.3	2.3	1270-4960	
SnO ₂ Nano Kemerler [121]	2.4	2.1	460-2304	
NiO Nano Çubuklar [122]	11.5	6.5	2130	

ZnO Nano İğne Dizileri [123]	5.3	-	-	
------------------------------	-----	---	---	--

Tablo 6.3. Alan Emisyon Cihaz Karakteristiklerinin Bir Boyutlu Nano Yapıların Alan Emisyon Karakteristikleriyle Karşılaştırılması (Devam)

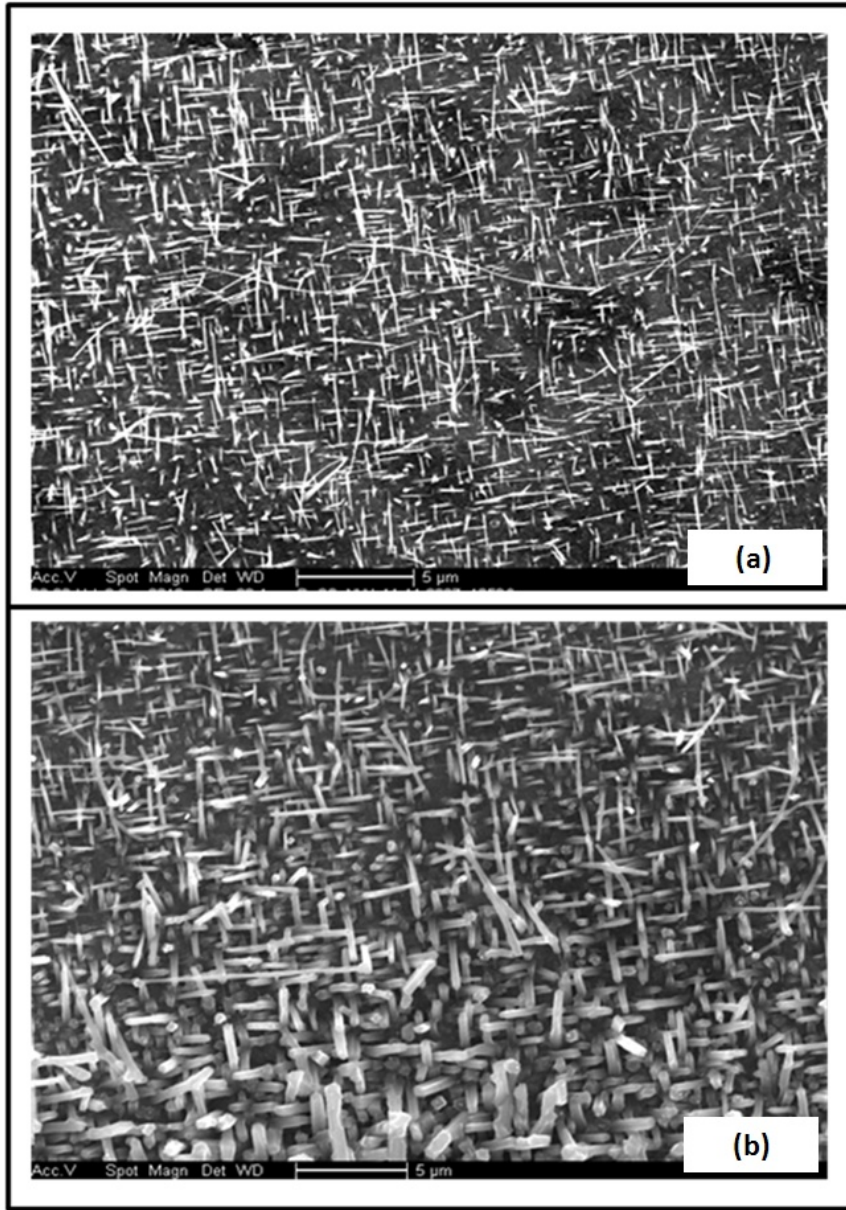
Kaktüs Benzeri Ga_2O_3 Nano Yapılar [106]	12.6	23.2	38.2	
Ga_2O_3 -C Nano Kablolar [105]	7.73	8.45	-	
Yarı-Hizalanmış Ga_2O_3 Nano Kablolar [124]	6.2	N/A	~880	

5.2.4. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) karakterizasyon sonuçları

Üretilen β -Ga₂O₃ nano yapıların yüzey morfolojilerinin karakterizasyonu, FEI firmasının XL30-SFEG model taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SEM fotoğrafları, Ga₂O₃ nano yapıların alt tabaka üzerinde yoğun bir şekilde sentezlendiğini, pek çoğunun tepelerinde en-boy oranları çok yüksek ve oldukça sivri uçlar bulunduğunu göstermektedir.

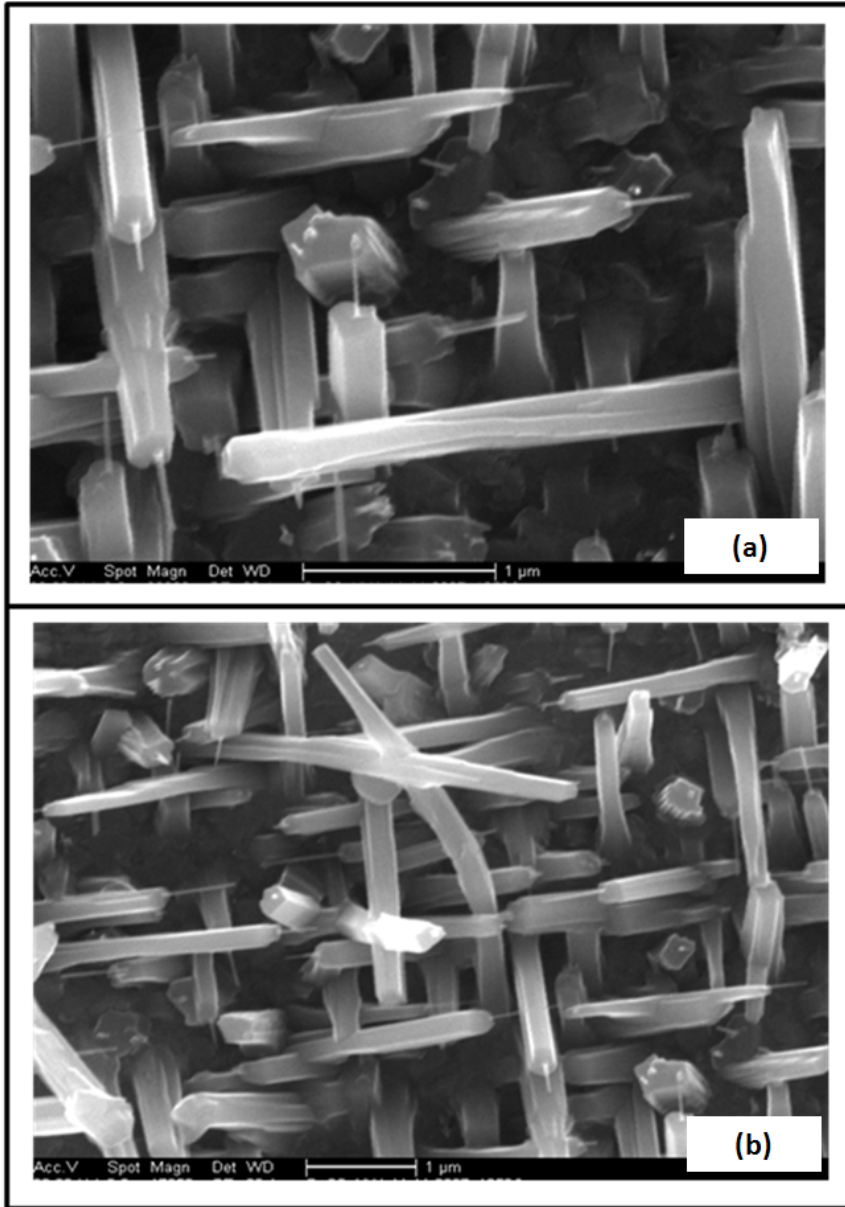
Nano yapıların taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karakterizasyonu sırasında karşılaşılan problemlerden birisi kesit görüntüsünün alınması olmuştur. Bir alt tabaka üzerinde büyütülen nano yapının kesit görüntüsünü alabilmek için, büyüme işlemi gerçekleştirildikten sonra alt tabakanın orta kısımlarına yakın bölümlerinden bir elmas kesici yardımıyla küçük bir çizik atılarak ikiye ayrılması gerekmektedir. GaAs alt tabaka yüksek sıcaklığa maruz kalmış olduğu için çok kırılabilir hale gelmektedir ve bu durum daha kolay ikiye bölünmesini sağlamaktadır. Bununla birlikte ikiye bölme işlemi sırasında β - Ga₂O₃ ince tabaka da kırılıp parçalanabilmekte ve incelemek istenen nano yapıların kaybolması söz konusu olmaktadır. Bu problemin üstesinden gelmek için ikiye bölme işlemi sırasında çok hassas davranılması ve nümunelerin taşınması sırasında sarsılmayı en aza indirecek tedbirlerin alınması gerekmektedir.

Şekil 5.8’de belli bölgelerde uzun nano kablolar görülürken çoğunlukla nispeten kısa ve oldukça sivri uçlu nano yapılar da göze çarpmaktadır. Uzun nano kabloların boyları bazı bölgelerde 20-25 μ m. ye ulaştığı görülmektedir. Nano kabloların bazılarının boylarının oldukça uzun olması, büyüme sırasında ortamda Argon gaz akışının olması ile açıklanabilir.



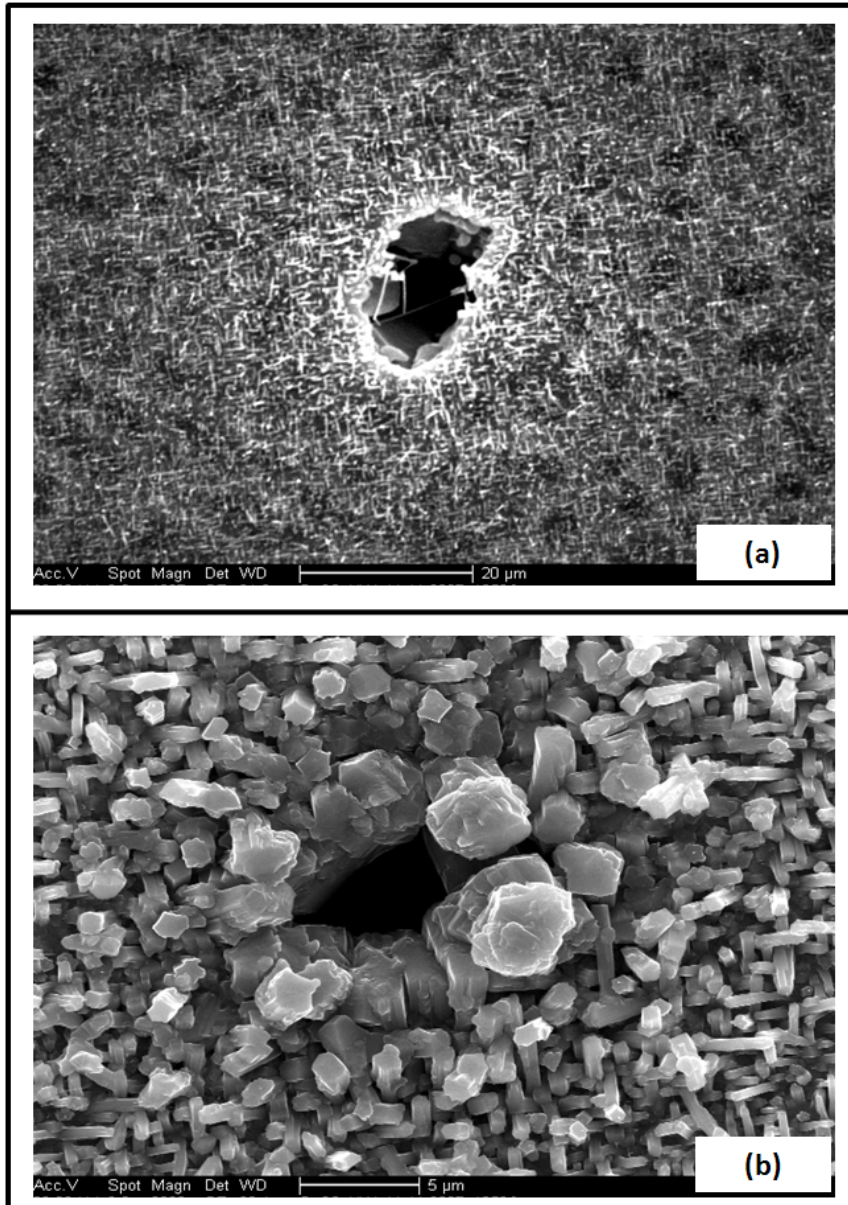
Şekil 5.8. GaAs alt tabaka üzerinde sentezlenen β -Ga₂O₃ nano kabloların a. uzaktan b. daha yakından görünüm

Şekil 5.9’da görülen Ga₂O₃ nano kablolar, belirgin bir şekilde sivri uçlara sahipler. Bazı nano kolonlar katmanlar halinde büyümüş bazı nano kablolar ise büyüme sırasında birbirleriyle kesişmiş ve buna rağmen büyüme yönlerini değiştirmeden önceki istikametlerinde büyümelerini tamamlamışlar.



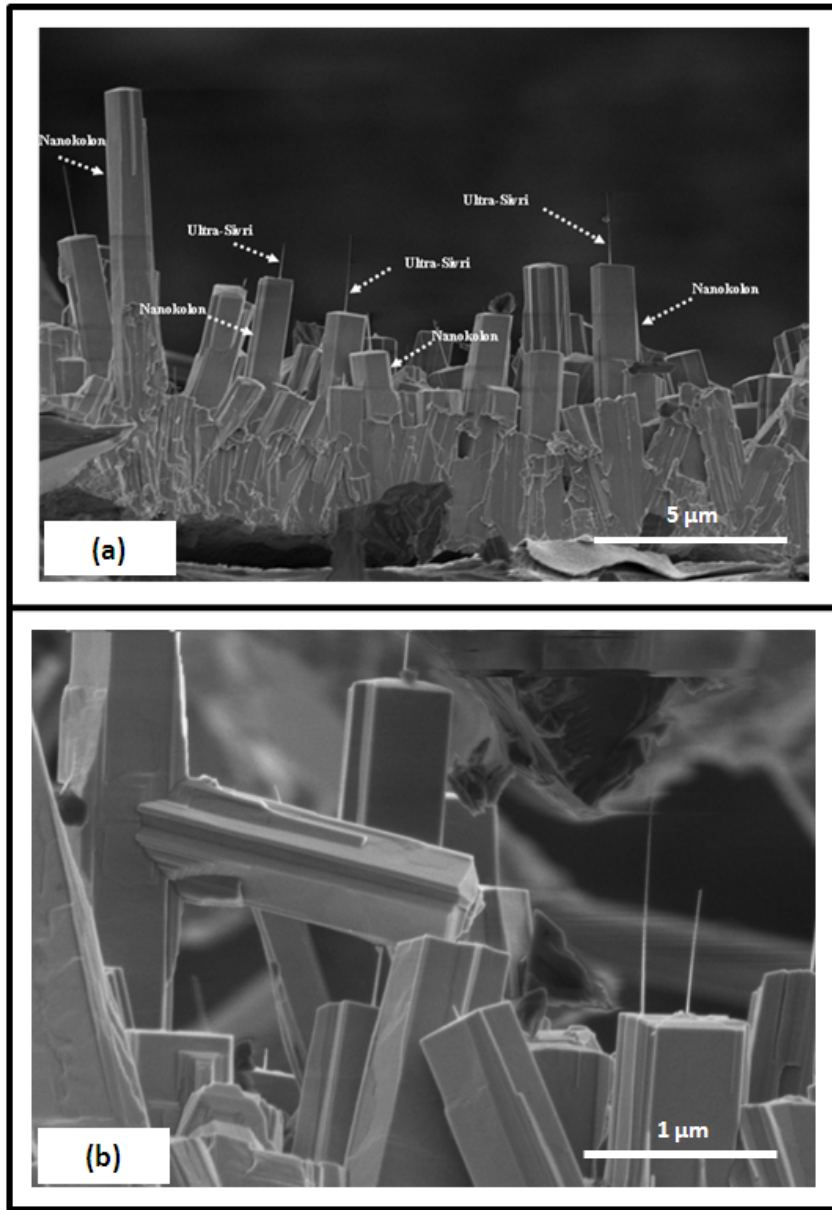
Şekil 5.9. Nano Blokların ve tepelerinde oluşan sivri uçları gösteren SEM fotoğrafları a. yakından görünüş b. genel görünüşü

Şekil 5.10'da GaAs alt tabaka üzerinde, sentezleme sırasında yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan yanardağ görünümlü yapılar görülmektedir. Sentezlenme sırasında, kraterlerin buldukları bölgelerde erimiş yüksek sıcaklıktaki Galyum bulunması düşünülmektedir. Alt tabakadan Arsenik gazının çıkışı bu bölgelerde yoğun olduğundan alt kısımlarda boşluklar oluşmuştur. Kraterlerin yakın çevresinde sivri uçlu nano blokların oluşmaya başladığı Şekil 5.10 b'de açıkça görülmektedir.



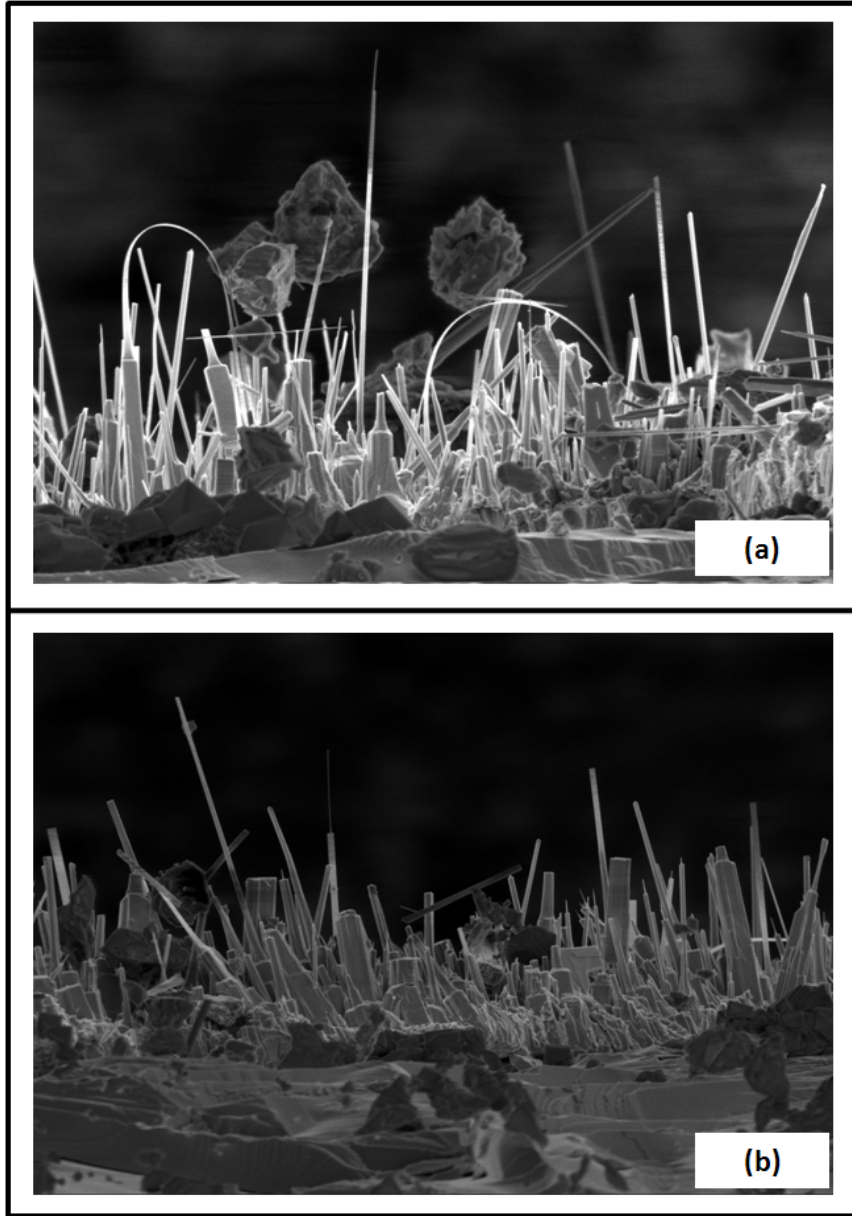
Şekil 5.10. Yüksek sıcaklıktan dolayı GaAs üzerinde oluşan krater benzeri delikleri gösteren SEM fotoğrafları a. uzaktan b. daha yakından görünüm

Şekil 5.11’de GaAs alt tabaka üzerinde sentezlenen β -Ga₂O₃ nano kabloları kesitten gösteren SEM fotoğrafı görülmektedir. Çok yoğun ve farklı boyutlarda nano yapılar görülmektedir. Şekil 5.11.a’da nano ve mikro kolonların üst kısımlarında oluşan oldukça sivri uçlar ve alt kısımla ise β -Ga₂O₃ ince tabakası yer almaktadır. Şekil 5.11.b’de ise başka bir nano bloktan büyümüş nano blok görülmektedir.



Şekil 5.11. Oluşan nano blokların ve sivri uçların kesit SEM fotoğrafları a. uzaktan b. daha yakından görünüm

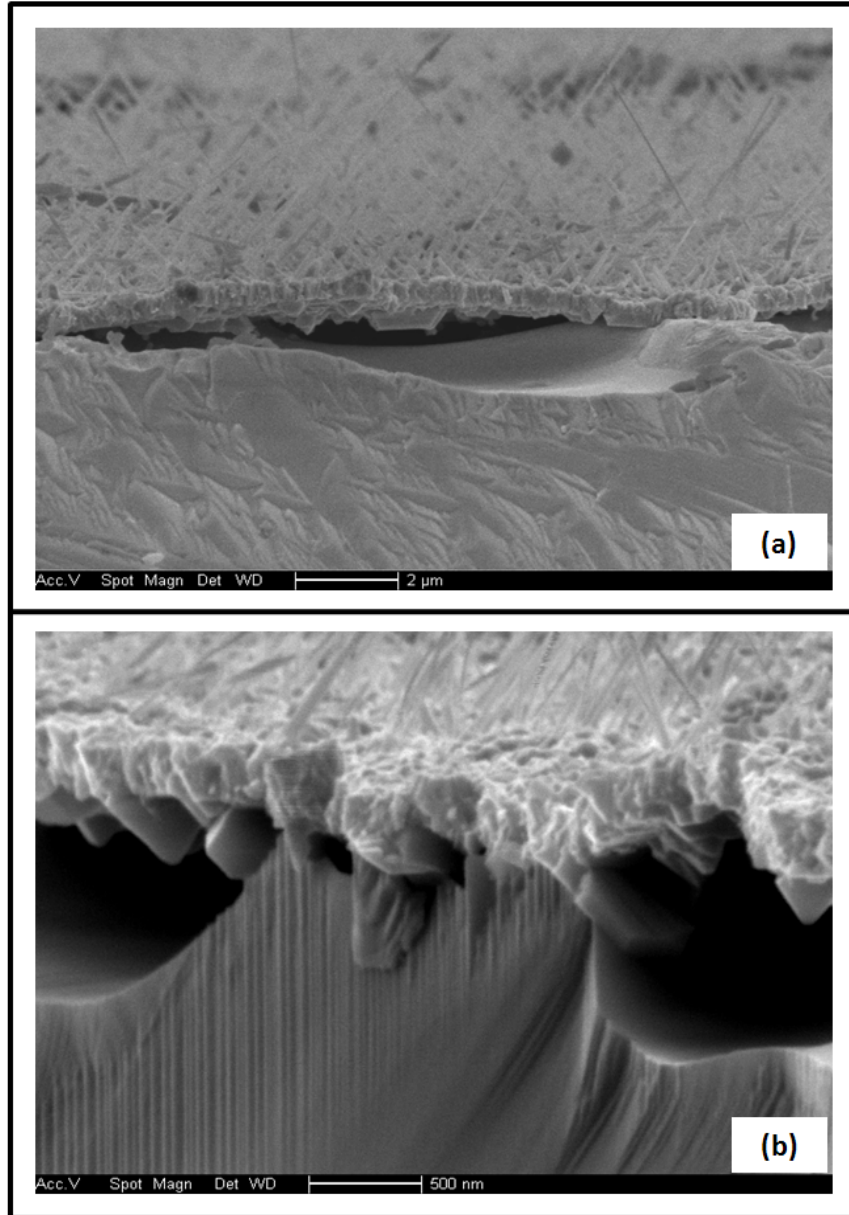
Şekil 5.12’de GaAs alt tabakanın sentezleme işlemi sonrasında kesitten alınmış SEM fotoğrafı görülmektedir. Kısa ve sivri uçlu nano blokların yanında uzun hatta uzunluktan eğilmiş nano bloklar da görülmektedir.



Şekil 5.12. GaAs alt tabakanın büyütmeye işleminden sonraki kesit SEM fotoğrafı a. yakından b. daha uzaktan görünüm

Şekil 5.12'deki SEM fotoğraflarında, nano yapıların ve alt tabakanın üzerlerinde görülen kaya parçacıklarını andıran yapılar, alt tabakanın kesit fotoğrafı için ikiye bölünmesi sırasında β -Ga₂O₃ ince tabakandan kopmasıyla oluşan yapılardır.

Şekil 5.13'te β -Ga₂O₃ ince film tabakasını ve bu tabakanın üzerindeki nano kabloları kesitten gösteren SEM fotoğrafı yer almaktadır. Fotoğrafta Arseniğin buharlaşmasıyla oluşan boşluklar, ince film tabakasının oluşumu ve onun üzerinde de nano blok oluşumu net bir biçimde görülmektedir.



Şekil 5.13. β -Ga₂O₃ ince film tabakasını gösteren SEM fotoğrafı a. uzaktan b. daha yakından görünüm

5.2.5. Ga₂O₃ nano yapıların muhtemel oluşum aşamaları

GaAs ayrışma sıcaklığı olan 585°C'nin üzerindeki bir sıcaklıkta ısıtıl ısıtılması halinde faz ayrışma rejimine geçirilmiş olur. Bu rejimde yüzeydeki sıvı Galyum kümeleri termo-dinamik olarak hareketli hale gelirler. Ayrışma sıcaklığı civarında (~585°C) latis yapı bozulmaya başlar ve GaAs yüzeyinden Arsenik kaybı meydana gelir. Yüzeydeki Galyum konsantrasyonu belli seviyeye ulaştınca kümelerin oluşması ve faz ayrışımı başlar [125].

Sıvı metal Galyum kümelerinin oluşması temel olarak üç adımda gerçekleşir;

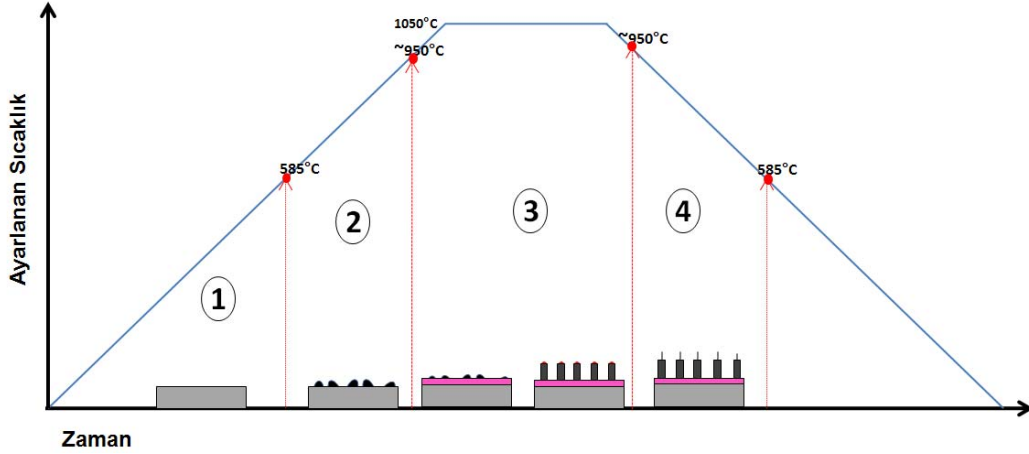
1. GaAs alt tabakaya doğru gerçekleşen Arsenik yayılımı ve buharlaşması
2. Yüzeyde Galyum kümelerinin oluşması ve alt tabakadan çıkan Arseniğin bu kümelerin içine emilmesi
3. Galyum kümelerinin içine Arsenik yayılması ve buharlaşıp ayrılması

GaAs yüzeyindeki metal Galyum ile ilgili yapılan çalışmalar göstermiştir ki; sıvı Galyum içerisinde Arseniğin buharlaşması, yüzeyden buharlaşmasına göre çok daha hızlı gerçekleşmektedir [89].

Eğer ortamda bulunan Oksijen miktarı fazla ise yüksek sıcaklıklarda nano kablolar ya da nano bloklar yerine Ga₂O₃ ince film ya da mikro-nano boyutlu nano kolonların olması daha muhtemeldir. Sonuç olarak denebilir ki; yüksek sıcaklıklarda, ortamdaki Oksijen konsantrasyonunun yüksek olması herhangi tek boyutlu nano yapının oluşmasını engeller.

Bu tez çalışmasında, optimum şartlarda yapılan büyütme işleminde; kullanılan reaktörün sıcaklığı 150 dakika içerisinde oda sıcaklığından 1050 °C'ye kadar, dakikada 7 °C artırılarak çıkarılmış ve bu sıcaklıkta 40 dakika bekletilmiştir. Bu sırada tüpün içerisinde GaAs alt tabakanın bırakıldığı bölgenin sıcaklığı (orta noktadan 12 cm. kadar uzakta) yaklaşık olarak 840 °C olarak ölçülmüştür. Daha sonra reaktör yine aynı şekilde oda sıcaklığı seviyesine getirilmiştir.

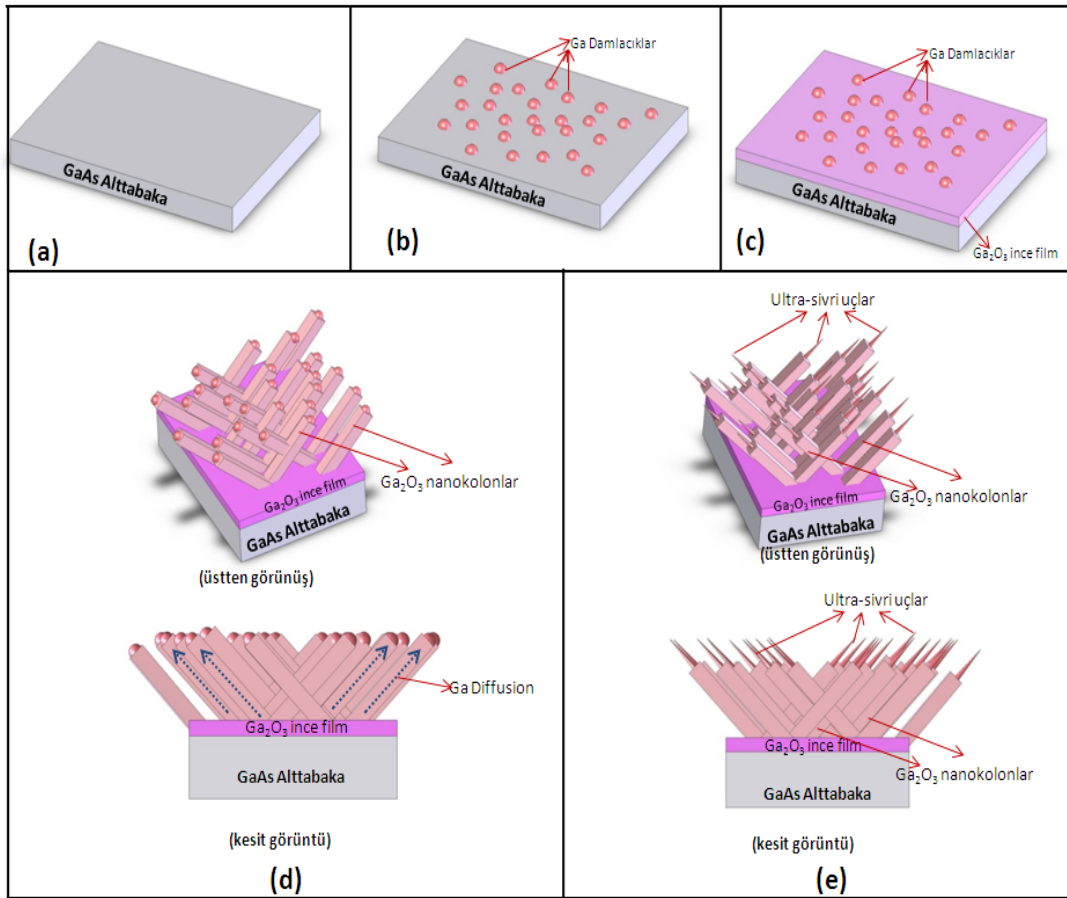
Şekil 5.14'te GaAs alt tabaka üzerinde büyütülen β -Ga₂O₃ nano yapıların sıcaklık değişimine bağlı olarak muhtemel oluşum evreleri görülmektedir.



Şekil 5.14. GaAs alt tabaka üzerinde sentezlenen Ga₂O₃ nano kabloların sıcaklığa bağlı muhtemel oluşum aşamaları

Şekil 5.15'te GaAs alt tabaka üzerinde büyütülen β -Ga₂O₃ nano yapıların muhtemel oluşum evreleri yer almaktadır. GaAs'in ayrışma sıcaklığı civarlarında (~585°C) GaAs alt tabakanın latis yapısının bozulmaya başlamakta ve GaAs yüzeyinden Arsenik kaybı meydana gelmektedir. Yüzeydeki Galyum konsantrasyonu belli seviyeye ulaştığında sıvı Galyum kümelerinin oluşması ve faz ayrışımını başlatmaktadır.

Eğer ortamdaki Oksijen konsantrasyonu fazla ise tek boyutlu nano yapılar yerine mikro boyutlu yapılar veya ince film tabakası oluşmaya başlamaktadır. GaAs alt tabakanın üzerinde biriken sıvı Galyum kümeleri difüzyon yoluyla oluşan Ga₂O₃ ince filmin yüzeyine çıkar ve orada birikmeye başlarlar. Ortamdaki Oksijen konsantrasyonunun azalması ince film tabakası üzerinde β -Ga₂O₃ nano çubukların oluşmaya başlamasına sebep olmaktadır. Büyüme sırasında alt tabakadan sızmaya devam eden sıvı Galyum, nano blokların içerisinde yayılmaya ve yüksek sıcaklık sebebiyle tepeye çıkmaya devam etmektedir. Bu işlem ortam sıcaklığı düştükçe yavaşlamaya başlamaktadır. En sonunda nano çubuğun tepesinde bulunan çok az miktardaki sıvı Galyum ultra sıvı uç oluşumunu sağlamaktadır.



Şekil 5.15. β -Ga₂O₃ nano yapılarının muhtemel oluşum evreleri a. GaAs alt tabaka b. yüzeyde Galyum damlacıklarının oluşumu c. β -Ga₂O₃ ince film tabakasının oluşumu d. nano blokların oluşumu e. ultra sivri uçların oluşumu

Üretilen nano ve mikro boyutta, mükemmel yakın alan emisyon özellikleri gösteren β -Ga₂O₃ nano yapılarının oluşma aşamalarını bilmek büyük önem taşımaktadır. Çünkü bu ve benzeri yapıları yeniden üretebilmek, istenilen özelliklerde istenilen değişiklikleri yapabilmek için oluşum şartlarının bilinmesine ihtiyaç vardır.

Eğer bu çok bileşenli ve kompleks sentezlenme aşamaları iyi bir şekilde anlaşılabilirse Ga₂O₃ nano yapılar, yakın gelecekteki pek çok alan emisyon cihazının üretilmesine kaynaklık yapabilir.

BÖLÜM 6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada oldukça sivri uçlu β -Ga₂O₃ nano blokların sentezlenmesi ve karakterizasyonu başarıyla gerçekleştirilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde ve kapsamlı bir araştırma yapıldığında görülmüştür ki üretilen malzemeler hem morfolojik yapıları yönüyle hem de gösterdikleri elektrik alan emisyon özellikleri yönüyle çok tatmin edici ve gelecek vaadeden sonuçlar sergilemişlerdir.

Maddeler halinde özetlersek bu çalışmada;

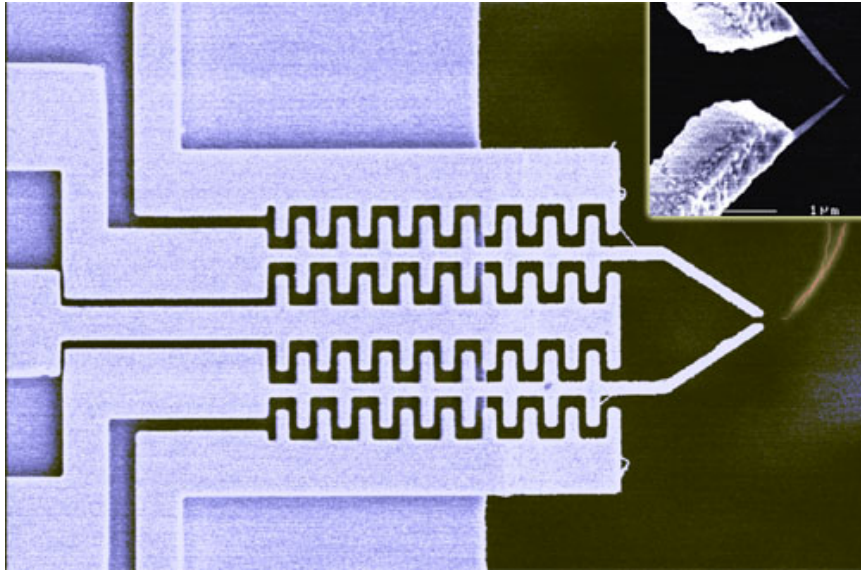
- β -Ga₂O₃ nano blokların sentezlenmesi
- Morfolojik özelliklerinin taramalı elektron mikroskopuyla (SEM) analizi
- Kimyasal özelliklerinin EDS ve Raman spektroskopisi ile belirlenmesi
- Elektrik alan emisyon özelliklerinin karakterize edilmesi amacıyla alan emisyon cihaz uygulamasının gerçekleştirilmesi ve literatürdeki diğer çalışmalarla kıyaslanması

çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar ışığında Ga₂O₃ nano yapılar ileride aşağıdaki uygulamalarda kullanılabilir:

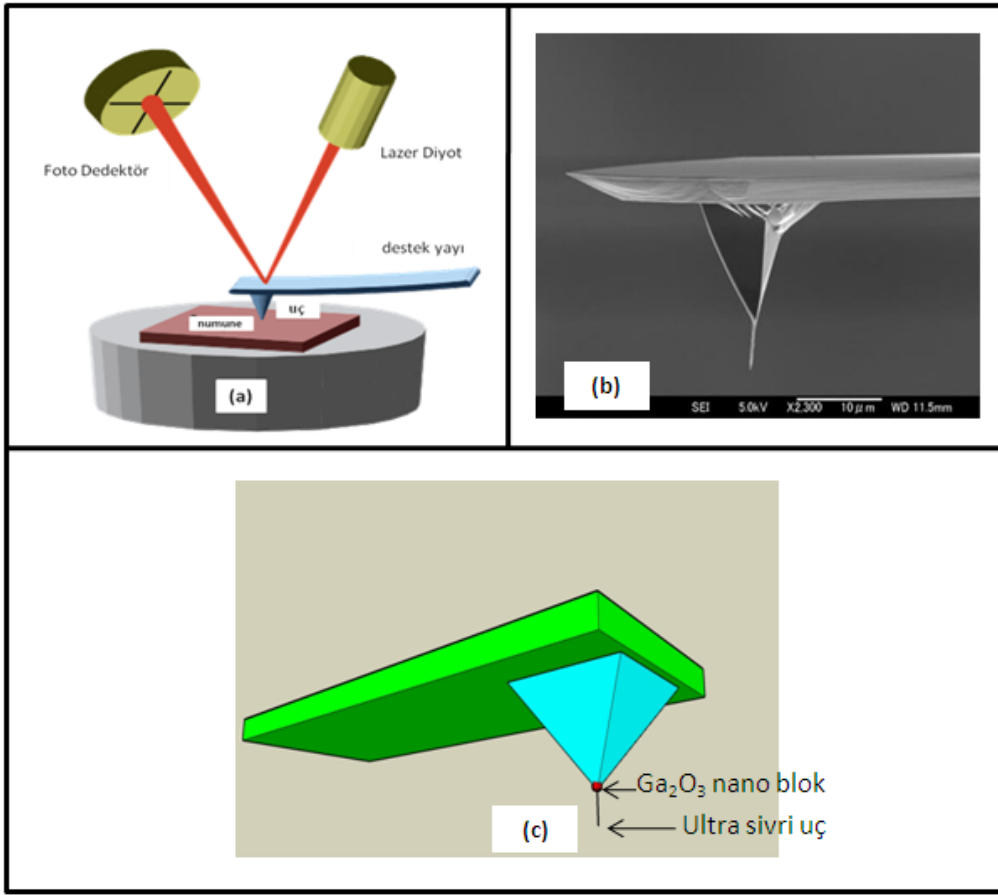
Son zamanlarda özellikle Avrupa'daki pek çok üniversite tarafından üretilen, tek boyutlu nano yapıların üretildikleri yerlerden alınıp devre içerisine taşınmasında kullanılan nano boyuttaki cımbızlar yardımıyla (Şekil 6.1) taşınarak atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ucu olarak kullanılması.

Üretilen Ga_2O_3 nano yapıların uçları çok sivri bir yapıya sahiptir. AFM'lerde kullanılan ucun sivriliği mikroskopun çözünürlüğünü belirleyen en temel özelliktir. Kullanılan uç ne kadar ince olursa elde edilecek çözünürlük de o kadar iyi olacaktır. Ga_2O_3 nano yapıların uçlarının çaplarının 3-5 nm civarında olduğu göz önüne alınırsa ne bu uygulama için ne kadar uygun oldukları görülmektedir. Üretilen nano yapıların AFM ucu olarak kullanılmasına yönelik çalışmalar Bilkent Üniversitesi'nden bir grup araştırmacıyla ortaklaşa yürütülmektedir.



Şekil 6.1 Nano boyutlu yapıların taşınmasında kullanılan nano cımbız [126]

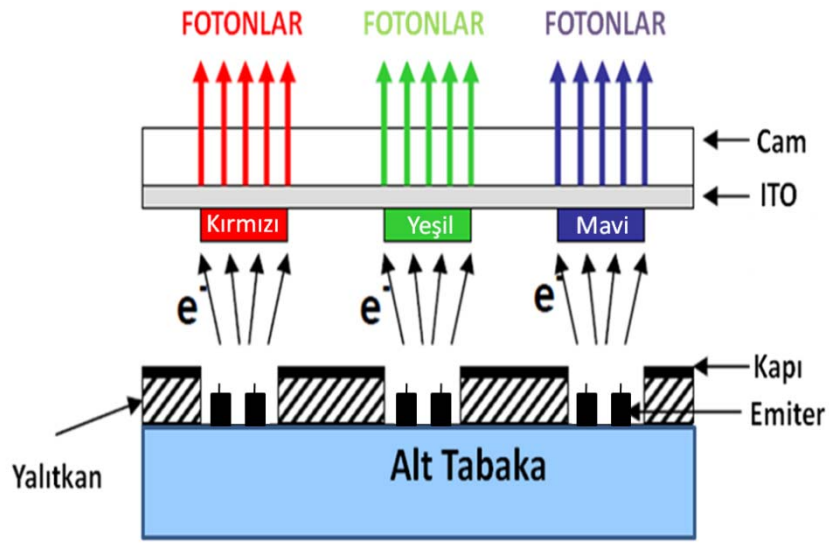
Şekil 6.2 incelendiğinde bir atomik kuvvet mikroskopunun çalışma prensibi (a), kullanılmakta olan bir AFM ucunun elektron mikroskobu kullanılarak elde edilmiş sivri ucu (b) ve son olarak ta ileride AFM uygulamalarında kullanılması düşünülen $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ nano yapıların uç olarak monte edilmiş halinin gösterildiği çizim (c) görülmektedir.



Şekil 6.2 a. AFM'nin çalışma prensibi b. AFM ucunun SEM görüntüsü c. AFM ucu olarak monte edilmiş sivri uçlu Ga₂O₃ nano yapı

Elde edilen ürünün kullanım alanlarından bir tanesi ve belki de en önemli olanı; alan emisyon display uygulamalarıdır. Alan emisyon özellikleri bu konuda en iyi performans sergileyen nano yapılar olan karbon nano tüpler ile neredeyse yakın olan ve metal-oksit nano yapılar içerisinde en iyilerden olan bu yapılar rahatlıkla alan emisyon uygulamalarında emiter olarak kullanılabilirler. Sergiledikleri mükemmel yakın alan emisyon özelliklerinin yanısıra dayanıklılıkları ve sentezlenmelerinin diğer karmaşık metotlara kıyasla daha kolay olması bu yapıların alan emisyon displaylerde kullanılması için bir diğer nedendir.

Şekil 6.3'te bir alan emisyon displayde emiter olarak kullanılmış, sivri uçlu Ga₂O₃ nano yapıları gösteren çizim görülmekte.

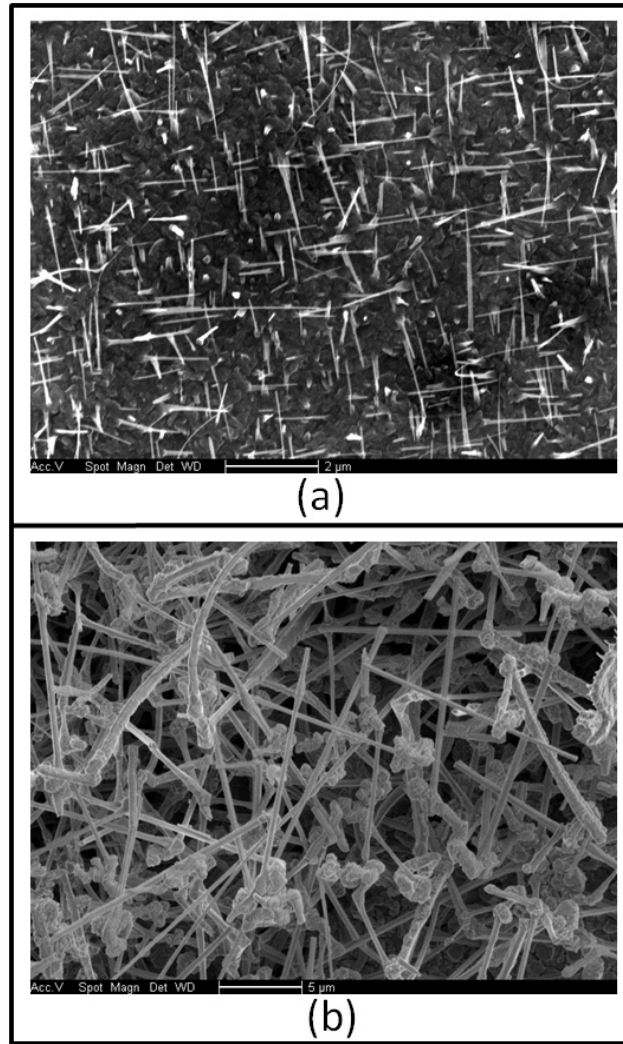


Şekil 6.3 Sivri uçlu Ga_2O_3 nano yapıların emiter olarak kullanıldıkları bir alan emisyon display

Yapılarında bulundukları oksijen boşluklarının sebebiyle metal-oksit nano yapılar gaz sensörü olarak kullanılmaya çok elverişlidirler. Bu çalışmada elde edilen Ga_2O_3 belli parametrelerin (sentezlenme süresi, oksijen miktarı) değiştirilmesiyle daha uzun şekilde üretilebilmektedirler. Şekil 6.5'te sentezlenme zamanının uzatılması sonucunda elde edilen daha uzun Ga_2O_3 nano yapılar görülmektedir. Farklı metodlarla üretildikleri yerlerden ayrılıp arzu edilen yere bırakılan bu yapılar basit birkaç adımdan sonra şekil 6.4'teki gibi bir FET gaz sensörü haline dönüştürülebilir. En boy oranlarının oldukça büyük olması sebebiyle nano gaz sensörlerinin hassasiyetleri diğer sensörlere göre çok daha fazladır.



Şekil 6.4 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ nano kablonun FET gaz sensörü olarak kullanılması



Şekil 6.5 a. Sentezleme süresinin uzatılması ile üretilen uzun β - Ga_2O_3 nano yapılar b. sentezleme süresiyle birlikte ortamdaki O_2 miktarının da artırılmasıyla elde edilen uzun β - Ga_2O_3 nano yapılar

Yapılan çalışma sırasında karşılaşılan en önemli zorluklardan birisi malzemelerin büyütülmesi sırasında sıcaklığın çok yüksek olmasından dolayı kesin büyüme evrelerinin tam olarak bilinmemesidir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda malzeme bilimi konusunda derin bilgisi olan araştırmacılarla yakın ilişki içerisinde çalışarak tam olarak büyüme sisteminin en ince ayrıntılarına kadar ortaya çıkarılması gerekmektedir.

Bir diğer zorluk, henüz nano boyutlu yapıları kontrollü bir şekilde ve hızlı olarak transfer edebilmek mümkün olmadığından bu işlemin yapılamamasıdır. Bu zorluğu aşmak iki yöntemle mümkün görünmektedir. Birincisi büyütülecek malzemelerin

büyüme yerlerinin hassas bir şekilde ve kontrollü olarak tespit edilip büyümenin bu noktalarda gerçekleştirilmesi. Bir diğeri ise sentezleme işlemi gerçekleştirildikten sonra hassas cihazlar geliştirmek suretiyle istenilen noktaya transferinin gerçekleştirilmesidir.

KAYNAKLAR

- [1] ZOLTAN, H., JOZSEF, M., GABOR, K., FERENC, R., PETER, D., ROY, C.H. , KUPERBERG, J.M., Role of oxygen vacancy defect states in the n-type conduction of beta-Ga₂O₃. Journal of Applied Physics 1999; 86: 3792-3796.
- [2] WANG, Y.W., LIANG, C.H., WANG, G.Z., GAO, T., WANG, S.X., FAN, J.C. , ZHANG, L.D., Preparation and characterization of ordered semiconductor CdO nanowire arrays. Journal of Materials Science Letters 2001; 20: 1687-1689.
- [3] LIU, Z., YAMAZAKI, T., SHEN, Y., KIKUTA, T., NAKATANI, N. , LI, Y., O₂ and CO sensing of Ga₂O₃ multiple nanowire gas sensors. Sensors and Actuators B 2008; 129: 666-670.
- [4] MARINOV, T., BULDUM, A., CLEMONS, C.B., KREIDER, K.L., YOUNG, G.W. , HARIHARAN, S.I., Field emission from coated nanowires. Journal of Applied Physics 2005; 98: 044314.
- [5] LEE, C.J., LEE, T.J., LYU, S.C., ZHANG, Y., RUH, H., LEE, H.J., Field emission from well-aligned zinc oxide nanowires grown at low temperature. Applied Physics Letters 2002; 81: 3648-3650.
- [6] JANG, H.S., KIM, D.H., LEE, H.R., LEE, S.Y., Field emission from cone-like single crystalline indium tin oxide nanorods. Materials Letters 2005; 59: 1526-1529.
- [7] LI, S.Q., LIANG, Y.X., WANG, T.H., Electric-field-aligned vertical growth and field emission properties of In₂O₃ nanowires. Applied Physics Letters 2005; 87: 143104.
- [8] WU, J.M., SHIH, H.C., WU, W.T., Electron field emission from single crystalline TiO₂ nanowires prepared by thermal evaporation. Chemical Physics Letters 2005; 413: 490-494.
- [9] JUN, C., HUANG, N.Y., DENG, S.Z., SHE, J.C., XU, N.S., WEIXIN, Z., XIAOGANG, W., SHIHE, Y., Effects of light illumination on field emission from CuO nanobelt arrays. Applied Physics Letters 2005; 86: 151107.
- [10] BELL, R.L., Negative electron affinity devices. In. Oxford,: Clarendon Press, 1973.

- [11] <http://nano.org/view.php?type=article&all=1>, Haziran 2009
- [12] <http://www.oxford-instruments.com/news/Pages/news.aspx>, Temmuz 2009
- [13] WANG, Z.L., What is Nanotechnology? <http://www.nanoscience.gatech.edu/zlwang/research/nano.html>, Temmuz 2009
- [14] MOORE, G.E., Cramming More Components Onto Integrated Circuits. Proceedings of the IEEE 1998; 86: 82 - 85
- [15] GLEITER, H., Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. Acta Materialia 2000; 48: 1-29.
- [16] TAKAYANAGI, K., KONDO, Y., OHNISHI, H., Suspended gold nanowires: Ballistic transport of electrons. JSAP International 3 2001; 3: 8.
- [17] SHI, F.G., Size dependent thermal vibrations and melting in nanocrystals. J Mater Res 1994; 9: 1307.
- [18] ZHANG, Z., LI, J.C., JIANG, Q., Modelling for size-dependent and dimension-dependent melting of nanocrystals. J Phys D 2000; 33: 2653.
- [19] ZHANG, Z., ZHAO, M., JIANG, Q., Melting temperatures of semiconductor nanocrystals in the mesoscopic size range. Semicond Sci Technol 2001; 16: L33.
- [20] <http://www.npl.co.uk/nanoscience/surface-nanoanalysis/research/dip-pen-lithography>, Temmuz 2009
- [21] BAYINDIR, M., Natoteknoloji Hayatımızda. Bilim ve Ütopya Dergisi 2007: 12-18.
- [22] RAO, C.N.R., DEEPAK, F.L., GUNDIAH, G., GOVINDARAJ, A., Inorganic nanowires. Progress in Solid State Chemistry 2003; 31: 5-147.
- [23] DAI, Z.R., ZWPZLW Novel Nanostructures of Functional Oxides Synthesized by Thermal Evaporation. Advanced Functional Materials 2003; 13: 9-24.
- [24] LIU, Z., ZHANG, D., HAN, S., LI, C., TANG, T., JIN, W., LIU, X., LEI, B., ZHOU, C., Laser Ablation Synthesis and Electron Transport Studies of Tin Oxide Nanowires. Advanced Materials 2003; 15: 1754-1757.
- [25] DAIHUA, Z., CHAO, L., SONG, H., XIAOLEI, L., TAO, T., WU, J., CHONGWU, Z., Electronic transport studies of single-crystalline In₂O₃ nanowires. Applied Physics Letters 2003; 82: 112-114.

- [26] XIAOLEI, L., CHAO, L., SONG, H., JIE, H., CHONGWU, Z., Synthesis and electronic transport studies of CdO nanoneedles. *Applied Physics Letters* 2003; 82: 1950-1952.
- [27] MALANDRINO, G., FINOCCHIARO, S.T., LONIGRO, R., BONGIORNO, C., SPINELLA, C., FRAGALA, I.L., Free-Standing Copper(II) Oxide Nanotube Arrays through an MOCVD Template Process. *Chem Mater* 2004; 16: 5559-5561.
- [28] KIM, H.W., KIM, N.H., Synthesis of β -Ga₂O₃ nanowires by an MOCVD approach. *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 2005; 81: 763-765.
- [29] PARK, W.I., KIM, D.H., JUNG, S.W., GYU-CHUL, Y., Metalorganic vapor-phase epitaxial growth of vertically well-aligned ZnO nanorods. *Applied Physics Letters* 2002; 80: 4232-4234.
- [30] WAGNER, R.S., ELLIS, W.C., Vapor-Liquid-Solid Mechanism of Single Crystal Growth. *Applied Physics Letters* 1964; 4: 89-90.
- [31] WAGNER, R.S., ELLIS, W.C., JACKSON, K.A., ARNOLD, S.M., Study of the Filamentary Growth of Silicon Crystals from the Vapor. *Journal of Applied Physics* 1964; 35: 2993-3000.
- [32] XIANG, L., XIAOHUA, W., HUI, C., CHANG, R.P.H., Growth mechanism and properties of ZnO nanorods synthesized by plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Journal of Applied Physics* 2004; 95: 3141-3147.
- [33] WU, Y., YANG, P., Direct Observation of Vapor-Liquid-Solid Nanowire Growth. *J Am Chem Soc* 2001; 123: 3165-3166.
- [34] BAE, S.Y., SEO, H.W., PARK, J., Vertically Aligned Sulfur-Doped ZnO Nanowires Synthesized via Chemical Vapor Deposition. *J Phys Chem B* 2004; 108: 5206-5210.
- [35] CHEN, Y., LI, J., HAN, Y., YANG, X., DAI, J., The effect of Mg vapor source on the formation of MgO whiskers and sheets. *Journal of Crystal Growth* 2002; 245: 163-170.
- [36] LIU, X., CHAO, L., SONG, H., JIE, H., CHONGWU, Z., Synthesis and electronic transport studies of CdO nanoneedles. *Applied Physics Letters* 2003; 82: 1950-1952.
- [37] WU, J.M., SHIH, H.C., WU, W.T., TSENG, Y.K., CHEN, I.C., Thermal evaporation growth and the luminescence property of TiO₂ nanowires. *Journal of Crystal Growth* 2005; 281: 384-390.

- [38] DAI, Z.R., GOLE, J.L., STOUT, J.D., WANG, Z.L., Tin Oxide Nanowires, Nanoribbons, and Nanotubes. *J Phys Chem B* 2002; 106: 1274-1279.
- [39] DAI, L., CHEN, X.L., JIAN, J.K., HE, M., ZHOU, T., HU, B.Q., Fabrication and characterization of In_2O_3 nanowires. *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 2002; 75: 687-689.
- [40] PAI-CHUN, C., ZHIYONG, F., WEI-YU, T., RAJAGOPAL, A., JIA, G.L., beta- Ga_2O_3 nanowires: Synthesis, characterization, and p-channel field-effect transistor. *Applied Physics Letters* 2005; 87: 222102.
- [41] YANG, P., Controlled Growth of ZnO Nanowires and Their Optical Properties. *Advanced Functional Materials* 2002; 12: 323-331.
- [42] WANG, X.D., SUMMERS, C.J. , WANG, Z.L., Large-Scale Hexagonal-Patterned Growth of Aligned ZnO Nanorods for Nano-optoelectronics and Nanosensor Arrays. *Nano Lett* 2004; 4: 423-426.
- [43] HUANG, H., YANG, S., GONG, J., LIU, H., DUAN, J., ZHAO, X., ZHANG, R., LIU, Y., Controllable Assembly of Aligned ZnO Nanowires/Belts Arrays. *J Phys Chem B* 2005; 109: 20746-20750.
- [44] GIVARGIZOV, E.I., Fundamental Aspect of VLS Growth. *Journal of Crystal Growth* 1975; 31: 20-30.
- [45] EDGAR, C.W., A Novel Technique for the Self-Assembly of Nanodroplet Arrays for Orderly Synthesis of Semiconductor Nanowires. Master Thesis 2006: 33.
- [46] UMAR, A., KIM, S.H., LEE, Y.S., NAHM, K.S. , HAHN, Y.B., Catalyst-free large-quantity synthesis of ZnO nanorods by a vapor-solid growth mechanism: Structural and optical properties. *Journal of Crystal Growth* 2005; 282: 131-136.
- [47] SEKAR, A., KIM, S.H., UMAR, A., HAHN, Y.B., Catalyst-free synthesis of ZnO nanowires on Si by oxidation of Zn powders. *Journal of Crystal Growth* 2005; 277: 471-478.
- [48] SUN, Y., FUGE, G.M. , ASHFOLD, M.N.R., Growth mechanisms for ZnO nanorods formed by pulsed laser deposition. *Superlattices and Microstructures* 2006; 39: 33-40.
- [49] SEARS, G.W., A mechanism of whisker growth. *Acta Metallurgica* 1955; 3: 367-369.
- [50] BLAKELY, J.M. , JACKSON, K.A., Growth of Crystal Whiskers. *The Journal of Chemical Physics* 1962; 37: 428-430.

- [51] XU, C., XU, G., LIU, Y., WANG, G., A simple and novel route for the preparation of ZnO nanorods. *Solid State Communications* 2002; 122: 175-179.
- [52] XU, C., ZHAO, X., LIU, S., WANG, G., Large-scale synthesis of rutile SnO₂ nanorods. *Solid State Communications* 2003; 125: 301-304.
- [53] XU, C., XU, G., WANG, G., Preparation and characterization of NiO nanorods by thermal decomposition of NiC₂O₄ precursor. *Journal of Materials Science* 2003; 38: 779-782.
- [54] THOMPSON, L.H., DORAISWAMY, L.K., Sonochemistry: Science and Engineering. *Ind Eng Chem Res* 1999; 38: 1215-1249.
- [55] GAO, T., LI, Q., WANG, T., Sonochemical Synthesis, Optical Properties, and Electrical Properties of Core/Shell-Type ZnO Nanorod/CdS Nanoparticle Composites. *Chem Mater* 2005; 17: 887-892.
- [56] POL, V.G., PALCHIK, O., GEDANKEN, A., FELNER, I., Synthesis of Europium Oxide Nanorods by Ultrasound Irradiation. *J Phys Chem B* 2002; 106: 9737-9743.
- [57] MIAO, J.J., WANG, H., LI, Y.R., ZHU, J.M., ZHU, J.J., Ultrasonic-induced synthesis of CeO₂ nanotubes. *Journal of Crystal Growth* 2005; 281: 525-529.
- [58] LIU, B., ZENG, H.C., Hydrothermal Synthesis of ZnO Nanorods in the Diameter Regime of 50 nm. *J Am Chem Soc* 2003; 125: 4430-4431.
- [59] GUO, M., DIAO, P., CAI, S., Hydrothermal growth of well-aligned ZnO nanorod arrays: Dependence of morphology and alignment ordering upon preparing conditions. *Journal of Solid State Chemistry* 2005; 178: 1864-1873.
- [60] ZHANG, J., LIU, Z., LIN, C., LIN, J., A simple method to synthesize [beta]-Ga₂O₃ nanorods and their photoluminescence properties. *Journal of Crystal Growth* 2005; 280: 99-106.
- [61] ZHENG, D., SUN, S., FAN, W., YU, H., FAN, C., CAO, G., YIN, Z., SONG, X., One-Step Preparation of Single-Crystalline β-MnO₂ Nanotubes. *J Phys Chem B* 2005; 109: 16439-16443.
- [62] ZHIYONG, F., DAWEI, W., PAI-CHUN, C., WEI-YU, T., JIA, G.L., ZnO nanowire field-effect transistor and oxygen sensing property. *Applied Physics Letters* 2004; 85: 5923-5925.
- [63] LIU, Z., Laser Ablation Synthesis and Electron Transport Studies of Tin Oxide Nanowires. *Advanced Materials* 2003; 15: 1754-1757.

- [64] WON-IL, P., JIN-SUK, K., GYU-CHUL, Y., BAE, M.H. , LEE, H.J., Fabrication and electrical characteristics of high-performance ZnO nanorod field-effect transistors. *Applied Physics Letters* 2004; 85: 5052-5054.
- [65] WANG, X., DING, Y., SUMMERS, C.J. , WANG, Z.L., Large-Scale Synthesis of Six-Nanometer-Wide ZnO Nanobelts. *J Phys Chem B* 2004; 108: 8773-8777.
- [66] CHANG, P.C., FAN, Z., CHIEN, C.J., STICHTENOTH, D., RONNING, C., LU, J.G., High-performance ZnO nanowire field effect transistors. *Applied Physics Letters* 2006; 89.
- [67] NG, H.T., HAN, J., YAMADA, T., NGUYEN, P., CHEN, Y.P. , MEYYAPPAN, M., Single Crystal Nanowire Vertical Surround-Gate Field-Effect Transistor. *Nano Lett* 2004; 4: 1247-1252.
- [68] NGUYEN, P., NG, H.T., YAMADA, T., SMITH, M.K., LI, J., HAN, J., MEYYAPPAN, M., Direct Integration of Metal Oxide Nanowire in Vertical Field-Effect Transistor. *Nano Lett* 2004; 4: 651-657.
- [69] PARK, W. I., ZnO Nanorod Logic Circuits. *Advanced Materials* 2005; 17: 1393-1397.
- [70] PARK, W.I., KIM, J.S., YI, G.C. , LEE, H.J., ZnO nanorod logic circuits. *Advanced Materials* 2005; 17: 1393-1397.
- [71] LAW, M., SIRBULY, D.J., JOHNSON, J.C., GOLDBERGER, J., SAYKALLY, R.J., YANG, P., Nanoribbon Waveguides for Subwavelength Photonics Integration. *Science* 2004; 305: 1269-1273.
- [72] JOHNSON, J.C., YAN, H., YANG, P., SAYKALLY, R.J., Optical Cavity Effects in ZnO Nanowire Lasers and Waveguides. *J Phys Chem B* 2003; 107: 8816-8828.
- [73] LIU, C.H., YIU, W.C., AU, F.C.K., DING, J.X., LEE, C.S. , LEE, S.T., Electrical properties of zinc oxide nanowires and intramolecular p--n junctions. *Applied Physics Letters* 2003; 83: 3168-3170.
- [74] PARK, W.I. , YI, G.C., Electroluminescence in n-ZnO nanorod arrays vertically grown on p-GaN. *Advanced Materials* 2004; 16: 87-91.
- [75] FAN, Z., PAI-CHUN, C., JIA, G.L., ERICH, CW, REGINALD, M.P., CHIEN-HUNG, L., HENRY, P.L., Photoluminescence and polarized photodetection of single ZnO nanowires. *Applied Physics Letters* 2004; 85: 6128-6130.

- [76] JAYADEVAN, K.P., TSENG, T.Y., One-dimensional semiconductor nanostructures as absorber layers in solar cells. *J Nanosci Nanotechnol* 2006; 5: 1768.
- [77] LAW, M., GREENE, L.E., JOHNSON, J.C., SAYKALLY, R., YANG, P., Nanowire dye-sensitized solar cells. *Nat Mater* 2005; 4: 455-459.
- [78] JIU, J., WANG, F., ISODA, S., ADACHI, M., Highly Efficient Dye-sensitized Solar Cells Based on Single Crystalline TiO₂ Nanorod Film. *Chemistry Letters* 2005; 34: 1506-1507.
- [79] ANANDAN, S., WEN, X., YANG, S., Room temperature growth of CuO nanorod arrays on copper and their application as a cathode in dye-sensitized solar cells. *Materials Chemistry and Physics* 2005; 93: 35-40.
- [80] WANG, Z.L., New Developments in Transmission Electron Microscopy for Nanotechnology. *Advanced Materials* 2003; 15: 1497-1514.
- [81] ZHAO, M.H., WANG, Z.L., MAO, S.X., Piezoelectric Characterization of Individual Zinc Oxide Nanobelt Probed by Piezoresponse Force Microscope. *Nano Lett* 2004; 4: 587-590.
- [82] SONG, J., WANG, X., RIEDO, E., WANG, Z.L., Elastic Property of Vertically Aligned Nanowires. *Nano Lett* 2005; 5: 1954-1958.
- [83] WANG, X., SONG, J., LIU, J., WANG, Z.L., Direct-Current Nanogenerator Driven by Ultrasonic Waves. *Science* 2007; 316: 102-105.
- [84] ZHIYONG, F., JIA, G.L., Gate-refreshable nanowire chemical sensors. *Applied Physics Letters* 2005; 86: 123510.
- [85] SHISHIYANU, S.T., SHISHIYANU, T.S., LUPAN, O.I., Sensing characteristics of tin-doped ZnO thin films as NO₂ gas sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical* 2005; 107: 379-386.
- [86] KOLMAKOV, A., MOSKOVITS, M., CHEMICAL SENSING AND CATALYSIS BY ONE-DIMENSIONAL METAL-OXIDE NANOSTRUCTURES. *Annual Review of Materials Research* 2004; 34: 151-180.
- [87] ZHANG, Y., KOLMAKOV, A., CHRETIEN, S., METIU, H., MOSKOVITS, M., Control of Catalytic Reactions at the Surface of a Metal Oxide Nanowire by Manipulating Electron Density Inside It. *Nano Lett* 2004; 4: 403-407.
- [88] LO, K.C., HO, H.P., FU, K.Y., CHU, P.K., Implantation-assisted synthesis of gallium oxide nanoribbons on gallium arsenide using carbon and nitrogen. *Surface and Coating Technology* 2007; 201: 6804-6807.

- [89] LOWES, T.D., ZINKEALLMANG, M., Microscopic Study of Cluster Formation in the Ga on GaAs(001) System. *Journal of Applied Physics* 1993; 73: 4937-4941.
- [90] VON ARDENNE, M., Das Elektronen-Rastermikroskop. Theoretische Grundlagen(in German). *Zeitschrift für Physik* 1938: 553-572.
- [91] VON ARDENNE, M., Das Elektronen-Rastermikroskop. Praktische Ausführung (in German). *Z Techn Phys* 1938: 407-416.
- [92] MESYATS, G.A., GNF Explosive electron emission of initial stages of vacuum discharges. *Kholodnie Katodi (Radio, Moskva)* 1974: 269–292 (in Russian).
- [93] FURSEY, G.N., Field Emission and Vacuum Breakdown. *IEEE Transactions on Electrical Insulation* 1985; EI-20: 659 - 670
- [94] SPINDT, C.A., BRODIE, I., HUMPHREY, L., WESTERBERG, E.R., Physical-Properties of Thin-Film Field-Emission Cathodes with Molybdenum Cones. *Journal of Applied Physics* 1976; 47: 5248-5263.
- [95] CHALAMALA, B.R., WEI, Y., GNADE, B.E., Fed up with fat tubes. *IEEE Spectrum* 1998; 35: 42-51.
- [96] CHOI, W.B., CHUNG, D.S., KANG, J.H., KIM, H.Y., JIN, Y.W., HAN, I.T., LEE, Y.H., JUNG, J.E., LEE, N.S., PARK, G.S., KIM, J.M., Fully sealed, high-brightness carbon-nanotube field-emission display. *Applied Physics Letters* 1999; 75: 3129-3131.
- [97] WERNER, K., The flowering of flat displays. *Ieee Spectrum* 1997; 34: 40-49.
- [98] SATO, S., YAMAMOTO, H., SHIROUCHI, Y., IEMORI, T., NAKAYAMA, N., MORITA, I., Surface Discharge-Type Plasma Display Panel. *Ieee Transactions on Electron Devices* 1976; 23: 328-331.
- [99] SASAOKA, T., SEKIYA, M., YUMOTO, A., YAMADA, J., HIRANO, T., IWASE, Y., YAMADA, T., TISHIBASHI, T., MORI, T., ASANO, M., TAMURA, S., URABE, T., A 13.0-inch AMOLED display with top emitting structure and adaptive current mode programmed pixel circuit (TAC). *SID Tech Dig* 2001: 384.
- [100] YAMAGUCHI, E.E.A., A 10-in. surface-conduction electron-emitter display. *J SID* 1997; 5: 345–348.
- [101] CHOI, Y.C., KIM, W.S., PARK, Y.S., LEE, S.M., BAE, D.J., LEE, Y.H., PARK, G.S., CHOI, W.B., LEE, N.S., KIM, J.M., Catalytic Growth of β -Ga₂O₃ Nanowires by Arc Discharge. *Advanced Materials* 2000; 12: 746-750.

- [102] LO, K.C., HO, H.P., FU, K.Y., CHU, P.K., LI, K.F., CHEAH, K.W., Preparation of GaN thin film and Ga₂O₃ nanoribbons by plasma immersion ion implantation of N into GaAs. *Journal of Applied Physics* 2004; 95: 8178-8184.
- [103] BRODIE, I., SPINDT, C.A., Vacuum Microelectronics. In. *Advances in Electronics and Electron Physics*, Vol 83. 1992; 1-106.
- [104] SPINDT, C.A., HOLLAND, C.E., ROSENGREEN, A., BRODIE, I.B.I., Field-emitter arrays for vacuum microelectronics. *Electron Devices, IEEE Transactions on* 1991; 38: 2355-2363.
- [105] ZHAN, J.H., BANDO, Y., HU, J.Q., LI, Y.B. , GOLBERG, D., Synthesis and field-emission properties of Ga₂O₃-C nanocables. *Chemistry of Materials* 2004; 16: 5158-5161.
- [106] CAO, C.B., CHEN, Z., AN, X.Q., ZHU, H.S., Growth and field emission properties of cactus-like gallium oxide nanostructures. *Journal of Physical Chemistry C* 2008; 112: 95-98.
- [107] ROBERTSON, J., FALABRETTI, B., Band offsets of high K gate oxides on high mobility semiconductors. *Materials Science and Engineering B-Solid State Materials for Advanced Technology* 2006; 135: 267-271.
- [108] HE, D., SHAO, L., GONG, W., XIE, E., XU, K., CHEN, G., Electron transport and electron field emission of nanodiamond synthesized by explosive detonation. *Diamond and Related Materials* 2000; 9: 1600-1603.
- [109] YEH, C.M., CHEN, M.Y., HWANG, J., GAN, J.Y., KOU, C.S., Field emission from a composite structure consisting of vertically aligned single-walled carbon nanotubes and carbon nanocones. *Nanotechnology* 2006: 5930.
- [110] BANAN-SADEGHIAN, R., BADILESCU, S., DJAOUED, Y., BALAJI, S., TRUONG, V.V., KAHRIZI, M., Ultra-low-voltage Schottky-boarrier field-enhanced electron emission from gold nanowires electrochemically grown in modified porous alumina templates. *Ieee Electron Device Letters* 2008; 29: 312-314.
- [111] STRATTON, R., Field Emission from Semiconductors. *Proceedings of the Physical Society of London Section B* 1955; 68: 746-757.
- [112] MELMED, A.J., GOMER, R., Field Emission from Whiskers. *Journal of Chemical Physics* 1961; 34: 1802-1807.
- [113] PASSLACK, M., HONG, M., SCHUBERT, E.F., MANNAERTS, J.P., HOBSON, W.S., MORIYA, N., LOPATA, J., ZYDZIK, G.J., Ga₂O₃ Films for Insulator/Iii-V Semiconductor Interfaces. *Compound Semiconductors* 1994 1995: 597-602.

- [114] FORBES, R.G., Field emission: New theory for the derivation of emission area from a Fowler-Nordheim plot. *Journal of Vacuum Science & Technology B* 1999; 17: 526-533.
- [115] RAO, A.M., JACQUES, D., HADDON, R.C., ZHU, W., BOWER, C., JIN, S., In situ-grown carbon nanotube array with excellent field emission characteristics. *Applied Physics Letters* 2000; 76: 3813-3815.
- [116] GOLBERG, D., DOROZHKIN, P.S., BANDO, Y., DONG, Z.C., TANG, C.C., UEMURA, Y., GROBERT, N., REYES-REYES, M., TERRONES, H., TERRONES, M., Structure, transport and field-emission properties of compound nanotubes: CN_x vs. BNC_x (x < 0.1). *Applied Physics a-Materials Science & Processing* 2003; 76: 499-507.
- [117] WAN, Q., FENG, P., WANG, T.H., Vertically aligned tin-doped indium oxide nanowire arrays: Epitaxial growth and electron field emission properties. *Applied Physics Letters* 2006; 89.
- [118] XUE, X.Y., SHI, S.L., LIN, Z.X., ZHENG, K.L., ZHANG, Y.A., GUO, T.L., WANG, T.H., Optoelectronic characteristics and field emission properties of indium-doped tin oxide nanowire arrays. *Chinese Physics Letters* 2007; 24: 3492-3494.
- [119] ZHI, C.Y., BAI, X.D., WANG, E.G., Synthesis and field-electron-emission behavior of aligned GaAs nanowires. *Applied Physics Letters* 2005; 86.
- [120] YAMASHITA, T., HASEGAWA, S., NISHIDA, S., ISHIMARU, M., HIROTSU, Y., ASAH, H., Electron field emission from GaN nanorod films grown on Si substrates with native silicon oxides. *Applied Physics Letters* 2005; 86: -.
- [121] CHEN, Y.J.L., Q. H.; LIANG, Y. X.; WANG, T. H.; ZHAO, Q.; YU, D. P. Field-emission from long SnO₂ nanobelt arrays. *Applied Physics Letters* 2004; 85.
- [122] ZHANG, Z., ZHAO, Y., ZHU, M., NiO films consisting of vertically aligned cone-shaped NiO rods. *Applied Physics Letters* 2006; 88: 033101-3.
- [123] ZHANG, Z., YUAN, H., ZHOU, J., LIU, D., LUO, S., MIAO, Y., GAO, Y., WANG, J., LIU, L., SONG, L., XIANG, Y., ZHAO, X., ZHOU, W., XIE, S., Growth Mechanism, Photoluminescence, and Field-Emission Properties of ZnO Nanoneedle Arrays. *J Phys Chem B* 2006; 110: 8566-8569.
- [124] HUANG, Y., WANG, Z., WANG, Q., GU, C., TANG, C., BANDO, Y., GOLBERG, D., Quasi-Aligned Ga₂O₃ Nanowires Grown on Brass Wire Meshes and Their Electrical and Field-Emission Properties. *The Journal of Physical Chemistry C* 2009; 113: 1980-1983.

- [125] SHORLIN, K., ZINKE-ALLMANG, M., Shape cycle of Ga clusters on GaAs during coalescence growth. *Surface Science* 2007; 601: 2438-2444.
- [126] <http://www.nanopicoftheday.org/2003pics/nanotweezer.htm>, Temmuz 2009

ÖZGEÇMİŞ

Yavuz BAYAM, 09.07.1975 tarihinde Akşehir' de doğdu. İlkokulu Akşehir Karabulut Köyü ve Afyon'un Çay ilçesinde, ortaokulu Eskişehir'in Hamidiye Köyünde bulunan Yunusemre Öğretmen Lisesi'nde ve lise eğitimini Konya'nın Çumra ilçesinde bulunan Çumra Ziraat Meslek Lisesi'nde 1993 yılında tamamladı. 1993 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü 1998 yılında bitirdi. 1998 yılının Temmuz ayında Sakarya Üniversitesi Enformatik Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2002 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar ve Bilişim Mühendisliği Anabilim Dalında Master Çalışmasını tamamladı. 2005 yılı Nisan ayından itibaren 1 yıl süre ile Arizona State University Computer Science Departman'ında ziyaretçi araştırmacı olarak doktora araştırma çalışması yaptı. 2006 yılı Mayıs ayından 2009 yılı Mayıs ayına kadar geçen sürede ise University of California Davis Department of Electrical and Computer Engineering'de, Assocoated Professor M.Saif Islam yönetiminde, INANO isimli grupta Nantoteknoloji alanında doktora araştırmalarına misafir araştırmacı olarak devam etti. Halen University of California Davis Electrical and Computer Engineering bölümü INANO grubunda misafir araştırmacı olarak faaliyetlerini sürdürmektedir.