MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METAL-OKSİT NANOTEL TABANLI AYGITLARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

MUSTAFA COŞKUN

DOKTORA TEZİ
Fizik Anabilim Dalı
Fizik Programı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Fatih DUMLUDAĞ

EŞ-DANIŞMAN
Prof. Dr. Ahmet ALTINDAL

İSTANBUL, 2017

MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METAL-OKSİT NANOTEL TABANLI AYGITLARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

MUSTAFA COŞKUN

(720311001)

DOKTORA TEZİ
Fizik Anabilim Dalı
Fizik Programı

DANIŞMAN
Doç. Dr. Fatih DUMLUDAĞ

EŞ-DANIŞMAN
Prof. Dr. Ahmet ALTINDAL

İSTANBUL, 2017

MARMARA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Öğrencisi Mustafa COŞKUN'un **"Metal-Oksit Nanotel Tabanlı Aygıtların Üretimi ve Karakterizasyonu"** başlıklı tez çalışması, 14/09/2017 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Fatih DUMLUDAĞ (Danışman)
Marmara Üniversitesi .....

Prof. Dr. Uğur YAHŞİ (Üye)
Marmara Üniversitesi .....

Prof. Dr. Mustafa ÖZDEMİR (Üye)
İstanbul Teknik Üniversitesi .....

Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT (Üye)
İstanbul Medeniyet Üniversitesi .....

Prof. Dr. Şahin AKTAŞ (Üye)
Marmara Üniversitesi .....

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 25.09.2017 tarih ve 2017/21-02 sayılı kararı ile Mustafa COŞKUN'un Fizik Anabilim Dalı Fizik Programında Doktora derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Bülent EKİCİ

TEŞEKKÜR

Öncelikle, tezimin her aşamasında yardımlarını benden esirgemeyen danışmanım sayın Doç. Dr. Fatih DUMLUDAĞ'a ve eş danışmanım sayın Prof. Dr. Ahmet ALTINDAL'a sonsuz teşekkürler ederim.

Tezimin yurtdışı ayağındaki çalışmaları için bana laboratuvarını açan ve verdiği değerli fikirleri, tavsiyeleri ve eleştirileri ile bana yol gösteren California Üniversitesi, Davis, Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümünden sayın Prof. M. Saif ISLAM'a teşekkürü bir borç bildiğimi belirtmek isterim. Yurtdışındaki çalışmalarım boyunca bana laboratuvarda destek olan ve tecrübesi ile bana yeni fikirler veren Dr. Matthew OMBABA'ya ve Integrated Nanodevices & Nanosystems Lab. (INANO) grubunun çok değerli her bir üyesine ayrı ayrı teşekkür etmek istiyorum. Bu tezin deneysel çalışmaları için yurtdışı doktora bursu aldığım (BIDEB-2214A- Destek No: 1059B141400053) ve ayrıca 1002 hızlı destek projemi (Proje No: 113Z472) desteklenmeye değer gören TÜBİTAK'a ayrıca teşekkür ediyorum. Doktora tez projemi destekleyen (Proje Kodu: FEN-C-DRP-110913-0379) Marmara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Komisyonuna da ayrıca teşekkür ederim.

Bizlerin yetişmesine katkı sağlayan Marmara Üniversitesi Fizik Bölümü'nün çok değerli Hocalarına, İstanbul Medeniyet Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümünden Sayın Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT'e, Arş. Gör. Fatih M. ÇOŞKUN'a, Marmara Üniversitesi'nden doktora arkadaşlarım İzzet Paruğ DURU'ya, Pınar KİREZLİ'ye, Marmara Üniversitesi Fizik Bölümü araştırma görevlilerinden Taner KALAYCI'ya, Caner DEĞER'e, İstanbul Üniversitesi Biyoloji Bölümü araştırma görevlilerinden Vahap ELDEM'e değerli fikirlerinden ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Son olarak benim bugünlere gelmemi sağlayan, dualarını ve desteklerini sürekli arkamda hissettiğim çok değerli Aileme ve sevgili eşim Sümeyye COŞKUN'a desteklerinden dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Mustafa COŞKUN

İÇİNDEKİLER

ONAY ..... **Hata! Yer işareti tanımlanmamış.**
TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ÖZET iv
ABSTRACT vi
YENİLİK BEYANI vii
SEMBOLLER viii
KISALTMALAR x
ŞEKİL xii
TABLO LİSTE xvii
1 GİRİŞ 1
1.1 GENEL BİLGİLER 8
1.1.1 Şeffaf İletken Oksitler (TCO) 8
1.1.1.1 Çinko Oksit (ZnO) 9
1.1.1.2 Kalay Dioksit (SnO_2) 11
1.1.1.3 İndiyum Oksit (In_2O_3) 12
1.1.2 Nanotel Büyütme Yöntemleri 13
1.1.2.1 Vapor-Liquid-Solid (VLS) Metodu 13
1.1.2.2 Vapor-Solid-Solid (VSS) Metodu 15
1.1.2.3 Anodik Alümina Oksit (AAO) Kalıp Destekli Yöntem 16
1.1.3 Silicon-on-Insulator (SOI) Altlık 19
1.1.4 Silisyum (Si) Yarıiletken 21
1.1.5 Organik Yarıiletkenler 23
1.1.5.1 Tris (8-hydroxyquinolinato) aluminium (Alq3) 24
1.1.5.2 Fulleren (C_{60}) 24
1.1.5.3 Ftalosiyaninler (Pc) ve Porfirazinler (Pz) 26
1.1.6 Alan Etkili Transistörler (FET) 27
1.1.6.1 Alan Etkili Transistör Parametrelerinin Matematiksel Çıkarımları 31
1.1.7 Memristör 36
1.1.7.1 Memristör Parametrelerinin Matematiksel Çıkarımları 41
2 MATERYAL VE YÖNTEM 46
2.1 AAO Kalıpların Oluşturulması ve Nanotellerin Büyütülmesi 46
2.2 SOI Altlıkların Desenlendirilmesi 48
2.3 Metal-Oksit Nanotellerin Büyütülmesi 50

2.4 Nanotellerin Köprü Şeklinde Büyütülmesi 52
2.5 H2Pz Molekülünün Sentezi 54
2.6 Organik Mikro tellerin/kristallerin Büyütülmesi 56
2.7 Nanotellerin Analizleri 56
2.8 Elektriksel Karakterizasyon 57
3 BULGULAR 60
3.1 Metal-Oksit Nanotel Köprülü Aygıtlar 62
3.1.1 Rezistör Ölçümleri 63
3.1.1.1 Birinci ITZO Aygıt 63
3.1.1.2 İkinci ITZO Aygıt 66
3.1.1.3 Üçüncü ITZO Aygıt 67
3.1.1.4 Dördüncü ITZO Aygıt 69
3.1.1.5 Beşinci ITZO Aygıt 70
3.1.1.6 Altıncı ITZO Aygıt 71
3.1.1.7 Yedinci ITZO Aygıt 73
3.1.1.8 Zn Katkılı In_2O_3 Aygıt 74
3.1.1.9 Tüm Rezistör Aygıtların Karşılaştırmalı Analizi 76
3.1.2 Alan Etkili Transistör (FET) Ölçümleri 81
3.1.2.1 Birinci ITZO FET 81
3.1.2.2 İkinci ITZO FET 84
3.1.2.3 Üçüncü ITZO FET 86
3.1.2.4 Dördüncü ITZO FET 88
3.1.2.5 Beşinci ITZO FET 89
3.1.2.6 Zn Katkılı In_2O_3 nanotel Aktif Katmanlı FET 91
3.1.2.7 Transistörlerle ile İlgili Genel Bir Değerlendirme 95
3.1.3 Memristör Aygıtların Fabrikasyonu ve Karakterizasyonu 96
3.2 Alq3 mikroteller 104
3.3 Fulleren (C_{60}) Mikroteller/Kristaller 110
3.3.1 C_{60} Mikrotel Aktif Katmanlı FET lerin İmali ve Karakterizasyonu 117
3.4 H2Pz mikro çubukların sentezi 120
4 TARTIŞMA VE SONUÇ 123
ÖZGEÇMİŞ 146

ÖZET

METAL-OKSİT NANOTEL TABANLI AYGITLARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Karbon nanotüpün Japon bilim adamı Iijima tarafından keşfedilmesi ile beraber, nano tel, nano tüp vb. 1-boyutlu nano yapılar ilgi odağı olmuş ve yoğun olarak çalışılmaya başlanmıştır. Özellikle yüksek hızlı ve yüksek performanslı aygıt üretimi için nanoteller halen en iyi aday olarak görülmektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda nanotel aktif katmanlı aygıtların üretimi için kullanılan yöntemlerde nanotellerin uygun bir altlık üzerinde büyütüldükten sonra başka bir altlık üzerine düzgün bir şekilde transfer edilmesi ve daha sonra elektrotların kaplanmasını gerektirmektedir. Bu durum hem zaman ve hem de malzeme tüketimi açısından önemli bir problem oluşturmaktadır. Bu tez çalışması ile ilk defa indiyum-kalay-çinko-oksit (ITZO) ve çinko katkılı In_2O_3 kompozisyonlarına sahip nanotellerin elektrotlar arasına doğrudan köprü şeklinde büyütülmesi hedeflenmiş böylece literatüre yeni çalışmalar kazandırılmaya çalışılmıştır. Bu tez çalışması kapsamında biri organik diğeri de inorganik olmak üzere iki farklı malzeme grubundan nanoteller ve mikroteller üretilmiştir. İnorganik malzemelerden indiyum-kalay-çinko-oksit (ITZO) ve çinko katkılı In_2O_3 kompozisyonlarında nanoteller büyütülmüş ve bu tellerin SEM, EDX ve XRD analizleri yapılmıştır. Buhar-katı-katı (VSS) metodu kullanılarak önceden desenlendirilmiş SOI (silicon-on-insulator) altıklar üzerindeki silikon elektrotlar arasına köprü şeklinde direkt büyütülen nanotellerden rezistör, memristör ve alan etkili transistör (FET)'ler üretilmiş ve bu aygıtların karakterizasyonları elde edilmiştir. İmal edilen FET lerden ITZO aktif katmanlılar p-tipi özellik gösterirken Zn katkılı In_2O_3 aktif katmanlı olan FET n-tipi özellik göstermiştir. Üretilen inorganik nanotel tabanlı aygıtlarda hem omik hem de doğrultucu davranış gözlemlenmiştir. Organik malzeme olarak C_{60}, Alq_3 ve H_2Pz olmak üzere üç farklı organik malzeme kullanılmıştır. Organik mikrotel/çubuk ve mikro yapıların üretiminde çözelti temelli yöntemler kullanılmıştır. Bu malzemelerden C_{60} ve Alq_3 ten elde edilen mikroteller SiO_2/Si altlık üzerine transfer edilmiş ve altın elektrotlar kaplanarak FET'ler imal edilmiştir. Organik moleküllerden elde edilen FET ler de p-tip davranış gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Organik mikrotel, inorganik nanotel, Köprülü nanoteller, PVD, VSS, FET, Memristör, Rezistör.

ABSTRACT

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF METAL-OXIDE NANOWIRE BASED DEVICES

Nanostructures, in particular one-dimensional nanostructures have attracted considerable attention and are currently under intense investigation due to their potential use in nanoscale electronic, optical, and optoelectronic devices since the discovery of carbon nanotube by Iijima. Nanowires are still seen as the best candidates, especially for high speed and high performance device manufacturing. However, in the literature, the methods used for the production of nanowire active layered devices require that the nanowires be grown on a suitable substrate and then transferred uniformly onto another substrate and then coated electrodes. This is seen as a significant problem both in terms of time and material consumption. Within the scope of this thesis, nano wires and micro-wires were produced from two different material groups, one organic and the other inorganic. Indium-tin-zinc-oxide (ITZO) and zinc-doped In_2O_3 nanowires were grown as inorganic material and SEM, EDX and XRD analyzes of these wires were conducted. Inorganic nanowires were directly grown between heavily doped p-type Si electrodes on prefabricated SOI wafer usin vapor-solid-solid method and their field effect transistor (FET), memristor and resistor measurements were performed. C_{60}, Alq3 and H2Pz materials were used as organic materials. Anti-solvent diffusion method combined solvent evaporation-induced self-assembly method was employed for the fabrication of organic microwires/rods and micro structures. In order to fabricate organic microwire FET, Alq3 and C_{60} microwire were transfered on the SiO_2/Si structure and deposited gold metal for source/drain elctrodes. Bridged ITZO nanowire active layered FETs showed p-type behavior while Zn doped one showed n-type behavior. Also we observed memristor behavior in some of ITZO nanowires. Furthermore, both ohmic and rectifier behaviors were observed in the produced inorganic nanowire resistor devices. Finally, p-type FET behavior were observed both in Alq3 and C_{60} microwire.

Key words: Organic microwires, inorganic nanowires, Bridge nanowire, PVD, VSS, FET, memristor, resistor.

YENİLİK BEYANI

METAL-OKSİT NANOTEL TABANLI AYGITLARIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Bu tez çalışmasında, ilk defa metal-oksit materyallerden indiyum-kalay-çinko-oksit (ITZO) ve çinko katkılı In_2O_3 nanotellerin iki elektrot arasına köprü şeklinde büyütülmesi suretiyle alan etkili transistör, memristör ve resistör gibi aygıtlar imal edilerek bunların elektriksel karakterizasyonları yapılmıştır. Nanotellerin aygıt uygulamalarına yönelik hali hazırdaki problemlerinden birisi olan nanotellerin bir altlıktan başka bir altlığa transferine alternatif bir metot olarak nanotellerin direk olarak aygıtların elektrotları arasına köprü şeklinde büyütülmesi önerilmiştir. Bununla birlikte elde edilen nanotellerin yapısal ve kimyasal analizleri için SEM, EDX ve XRD gibi analizleri yapılmıştır. Metal-oksit nanotellerin yanısıra yine ilk defa C_{60}, Alq_3 ve H_2Pz gibi organik moleküllerden uygun yöntem ve çözücüler kullanılarak mikro tel, çubuk ve çeşitli geometrik şekillere sahip kristalik yapılar elde edilmiştir. C_{60} ve Alq_3 moleküllerinden elde edilen mikro teller kullanılarak alan etkili transistörler imal edilmiş ve elektriksel karakterizasyonları elde edilmiştir.

Temmuz 2017 **Doç. Dr. Fatih DUMLUDAĞ** **Mustafa COŞKUN**

Prof. Dr. Ahmet ALTINDAL

SEMBOLLER

Å : Angstrom (10^{-10} m)

Au : Altın

$\boldsymbol{l}$: Transistörün kanal uzunluğu (um)

W : Transistörün kanal genişliği (um)

$\mathbf{V_{SD}}$: Transistörün kaynak-savak gerilimi (V)

$\mathbf{V_{GS}}$: Transistörün kapı-kaynak gerilimi (V)

$\mathbf{I_{SD}}$: Transistörün source-drain akımı (A)

$\mathbf{V_T}$: Transistörün eşik voltajı (V)

$\boldsymbol{Q}$: Yük (C)

$\mathbf{C_i}$: Birim alan başına kapasite (F/cm^2)

μ : Yük haraketliliği ($cm^2/V.s$)

E : Elektrik alan (V/cm)

$\boldsymbol{\varepsilon_i}$: Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti

$\boldsymbol{\varepsilon_0}$: Boşluğun dielektrik permitivitesi (F/cm)

$\mathbf{t_i}$: Yalıtkan tabakanın kalınlığı (nm)

r : Nanotelin yarıçapı (nm)

h : Dielektrik tabakanın kalınlığı (nm)

$\boldsymbol{\varepsilon_r}$: Yalıtkan tabakanın rölatif dielektrik sabiti

$\mathbf{V_d}$: Yük taşıyıcılarının sürüklenme hızı (cm/s)

$\mathbf{C_g}$: Yalıtkan tabakanın kapasite değeri (F)

$\mathbf{C_D}$: Tükenim bölgesinin kapasite değeri (F)

$\mathbf{E_c}$: İletkenlik Bandı (eV)

$\mathbf{E_v}$: Valans Bandı (eV)

E_g : Yasak Band Aralığı (eV)

g_m : Geçiş iletkenliği (S)

SS : Eşik altı salınım (V/decade)

R : Direnç (Ω)

$R_{eşdeğer}$: Eşdeğer Direnç (Ω)

C : Kapasitör (F)

L : İndüktör (H)

I : Akım (A)

φ : Manyetik Akı (W/m^2)

V : Potansiyel (V)

M(q) : Memriztans (Ω)

R_{ON} : Memristörün açık durumdaki direnç değeri (Ω)

R_{OFF} : Memristörün kapalı durumdaki direnç değeri (Ω)

D : Memristör aygıtındaki aktif katmanın kalınlığı (nm)

X : Memristörün katkılı bölgesinin kalınlığı (nm)

ρ : Özdirenç (Ω.cm)

σ : Öziletkenlik (S/cm)

G : İletkenlik (S)

χ : Elektron Alınganlığı (eV)

KISALTMALAR

STM : Taramalı Tünelleme Mikroskopu (Scanning Tunneling Microscope)

VLS : Buhar-Sıvı-Katı (Vapor-Liquid-Solid)

VSS : Buhar-Katı-Katı (Vapor-Solid-Solid)

FET : Alan Etkili Tranzistör (Field Effect Transistor)

LED : Işık Yayan Diyot (Light Emitting Diode)

PV : Güneşpili (Photovoltaic)

PMMA : Poly (metyl methacrylate)

Si : Silisyum

SOI : Silicon-on-Insulator

CVD : Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapor Deposition)

UV : Ultraviyole

PDMS : Poly dimetylsiloxane

C_{60} : Fulleren

Alq3 : Tris(8-hydroxyquinolinato) aluminium

B_2H_6 : Diboran (Diborane)

ZnO : Çinko oksit

SnO_2 : Kalay dioksit

In_2O_3 : İndiyum oksit

TiO_2 : Titanyum dioksit

InP : İndiyum fosfat

CCl_4 : Carbon tetrakloride

SEM : Taramalı Elektron Mikroskopu (Scanning Electron Microscop)

EDX : Enerji Dağılımlı X-Işını (Energy Dispersive X-Ray)

XRD : X-Işını Saçılması (X-Ray Diffraction)

H2Pz **:** Metalsiz Porfirazin

TCO **:** Şeffaf İletken Oksit (Transparent Conductive Oxide)

ITO **:** İndiyum-Kalay-Oksit (Indium-Tin-Oxide)

IR **:** Infrared

ITZO **:** İndiyum-Kalay-Çinko-Oksit (Indium-Tin-Zinc-Oxide)

AAO **:** Anodik-Alümüna-Oksit (Anodic-Alumina-Oxide)

SiO_2 **:** Silikon dioksit

OLED **:** Organik Işık Yayan Diyot (Organic Light Emitting Diode)

Pc **:** Ftalosiyanin

Pz **:** Porfirazin

JFET **:** Eklem Alan Etkili Transistör (Junction Field Effect Transistor)

MOSFET **:** Metal-Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)

CMOS **:** Complementary Metal-Oxide-Semiconductor

SS **:** Eşikaltı salınım (Subthreshold Swing)

MIM **:** Metal-Yalıtkan-Metal (Metal-Insulator-Metal)

LRS **:** Düşük Direnç Durumu (Low Resistance State)

HRS **:** Yüksek Direnç Durumu (High Resistance State)

KOH **:** Potasyum Hidroksit

IPA **:** İzopropil Alkol

HOMO **:** Enyüksek işgal edilmiş moleküler orbital **(**Highest Occupied Molecular Orbital)

LUMO **:** Endüşük işgal edilmemiş moleküler orbital **(**Lowest Unoccupied Molecular Orbital)

ŞEKİL

Şekil 1.1 1970–2000 yılları arasında rapor edilmiş ikili şeffaf iletken oksitlerin özdirenç değerleri [116]. 9
Şekil 1.2 ZnO kristal yapılar: (a) Kübik kayatuzu (cubic rocksalt), (b) kübik çinko blende (cubic zinc blende), ve (c) hegzagonal wurtzite (hexagonal wurtzite). Büyük gri küreler Zn siyah küçük küreler O atomlarını temsil etmektedir [123]. 10
Şekil 1.3 Wurtzite kristal yapısına sahip ZnO nun örgü parametrelerinden a ve c nin gösterimi (a) HSE (Heys, Scuseria and Ernzerhof functional) hibrit fonksiyonu kullanılarak hesaplanan enerji-band yapısı (b) [124]. ZnO ya ait enerji band diagramı (c)..... 11
Şekil 1.4 (a) Rutil SnO_2 nin birim hücresi [127]. (b) SnO_2 nin enerji band diyagramı. 12
Şekil 1.5 In_2O_3 in kübik kristal yapısı (a) [142] ve enerji band yapısı (b) 13
Şekil 1.6 (a) VLS metodu ile üç aşamada nanotel büyütmeyi gösteren şematik bir gösterim (I) alaşım (alloying), (II) çekirdeklenme (nucleation), ve (III) yönsel büyüme (axial growth). Bu üç aşama altın-germanyum (Au-Ge) ikili faz diyagramı için verilmiştir. (b) nanotellerin büyütme süreci boyunca faz ve içeriksel gelişimin gösterilmesi [145]. 14
Şekil 1.7 5 nm altın kaplı silikon altlıklar üzerine VLS metodu ile büyüttüğümüz ZnO nanotellerin SEM görüntüleri. 15
Şekil 1.8 Tipik bir yüksek sıcaklık fırının şematik gösterimi. VLS (ve VSS) metodu ile nanotellerin nasıl büyütüldüğünü özetlemektedir [146]..... 16
Şekil 1.9 Silikon altlıklar üzerine VSS metodu ile büyütülmüş olduğumuz ITZO nanotellerin SEM görüntüleri. 16
Şekil 1.10 Bir AAO kalıbın oluşturulması esnasında izlenen basamaklar [151]. 17
Şekil 1.11 Laboratuarımızda yaptığımız bazı AAO kalıpların SEM görüntüleri. 18
Şekil 1.12 Elektrokimyasal yöntemin şematik gösterimi [152]..... 19
Şekil 1.13 AAO kalıpların içinin ZnO ile doldurulması ile elde edilen nanotellerin SEM görüntüleri. Bu yöntemle nanotel üretmek için 0.01M Zinc nitrate hexahydrate ($Zn(NO_3)_2.6H_2O$) çözeltisi kullanılmıştır. Depozisyon işlemi -1.5V geriliminde ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. 19
Şekil 1.14 Köprü şeklinde büyütülmüş nanotellerin SOI altlık üzerinde 3 boyutlu gösterimi**.** 20
Şekil 1.15 SOI altlık üretiminde kullanılan Smartcut (Nanocleave) yönteminin akış diyagramı [154]. 21
Şekil 1.16 a) p-tip silisyumun enerji-band diyagramı, b) ticari olarak kullanılan silisyum yarıiletken altlıkların tiplerine göre kesim yönelimleri [156]. 22
Şekil 1.17 a) Alq3 molekülünün moleküler yapısı ve b) enerji seviyeleri [165,166]. ... 24
Şekil 1.18 a) Fulleren molekülünün molekül yapısı ve b) enerji band diyagramı [174,175]. 25
Şekil 1.19 Metalli ftalosiyanin ve metalsiz porfirazin moleküllerine ait molekül yapılar. 26
Şekil 1.20 Alan etkili transistörün yapısının üç boyutlu şematik gösterimi. 27

Şekil 1.21 n-kanallı alan etkili transistörün a) çıkış ve b) transfer karakteristikleri [181,182]. 28
Şekil 1.22 a) Alan Etkili Transistörün elektrotlarına gerilim uygulanmamış haldeki iki boyutlu görüntüsü. b) Sadece kapı elektrotuna pozitif bir gerilim uygulandığında yalıtkan tabaka içerisinde dipollerin oluşumu ve yarıiletken tabaka içerisinde n-tipi transistör kanalının oluşumu. c) Sadece kapı elektrotuna negatif bir gerilim uygulandığında yalıtkan tabaka içerisinde dipollerin oluşumu ile yarıiletken tabaka içerisinde p-tipi transistör kanalının oluşumu. 28
Şekil 1.23 a) Alan etkili transistörün iki boyutlu gösterimi, b) lineer bölge, c) kıstırılma (pinch-off), d) doyum bölgesi [183]. 31
Şekil 1.24 Alan etkili Transistörlerin transfer karakteristikleri ve temel parametreleri [186,182]. 34
Şekil 1.25 Temel pasif devre elemanları ve devre değişkenleri ile olan ilişkilerini gösteren tablo[189]. 37
Şekil 1.26 a) Memristör (analog tipi) aygıtının teorik (I-V) karakteristiği [190]. b) HP laboratuarında keşfedilen memristör (dijital tipi) aygıtının deneysel (I-V) karakteristiği ve aygıtın şekli [189]. 39
Şekil 1.27 Bir memristör aygıtın çalışma anında katkılı ve katkısız bölgelerini gösteren iki boyutlu gösterim. Turuncu daireler oksijen boşluklarını temsil etmektedir [191]... 40
Şekil 1.28 İletken flametin, aygıtın iki elektrotu arasında oluşumunu gösteren akış diyagramı. Oklar aygıtın açık durumdan kapalı duruma doğru gidişini göstermektedir. [192]. 41
Şekil 1.29 Memristörün matematiksel eşitliklerini çıkarmak için kullanılan şekiller ve eşdeğer devre. 42
Şekil 2.1 Yaptığımız AAO çeşitli kalıpların SEM görüntüleri 47
Şekil 2.2 AAO kalıp kullanılarak elektrodepozisyon yöntemi ile ZnO nanotellerin oluşturulması 48
Şekil 2.3 SOI altlıkları desenlendirmek için kullanılan fotolitografi metodunun işlem basamakları. 49
Şekil 2.4 Metal-oksit nanotelleri büyütmek için kullandığımız kaynak materyaller. ... 51
Şekil 2.5 VSS veya VLS metodu ile nanotel büyütmek için kullanılan yüksek sıcaklık fırınına ait kesit. 51
Şekil 2.6 Nanotelleri büyütmek için kullandığımız tek ısıtma bölgeli yüksek sıcaklık fırını vakum pompası ve flanj bağlantıları ile görünümü. 52
Şekil 2.7 Nanotelleri büyütmek için kullandığımız tüp fırının merkezi sıcaklığının zamana bağlı değişimi. 52
Şekil 2.8 SOI altlık üzerinde desenlendirilen silisyum elektrotlar arasına metal-oksit nanotellerin direk büyütülmesini özetleyen üç boyutlu gösterim. 53
Şekil 2.9 Kullandığımız (**3**) H2Pz molekülünün sentez basamakları. 55
Şekil 2.10 Analizleri için kullanılan SEM (a, b), EDX (a), XRD (c) ve Optik mikroskop (d) cihazları. 57
Şekil 2.11 Elektriksel karakterizasyon için elektriksel bağlantıları ve aygıtın son aşamasını gösteren 3 boyutlu şematik gösterim (yukarıdaki) ile kullanılan numune

istasyonu ve yarıiletken karakterizasyon cihazının görünümleri (aşağıda)..... 58
Şekil 2.12 Rezistör aygıtların UV ışığa tepkilerini ölçmek için kullandığımız UV ışık kaynağının güç kaynağı (a) ve kendisi (b) ile fiber kablosu (c) ve UV ışık kaynağının dalga boyunu veren emisyon spektrum (d) ölçümünün verileri..... 59
Şekil 3.1 a) PDF 01-089-1397 cart numaralı ZnO' ya ait XRD verileri.b) PDF 00-044-1087 cart numaralı In_2O_3'de ait XRD verileri. c) Ürettiğimiz Zn katkılı In_2O_3 nanotellere ait XRD verileri..... 60
Şekil 3.2 a) PDF 01-089-1397 cart numaralı ZnO' ya ait XRD verileri.b) PDF 01-070-4175.c) PDF 00-044-1087 cart numaralı In_2O_3'de ait XRD verileri. d,e,f,g,h,ı) Tablo 3.1 de verilen aygıtlara ait ITZO nanotellerin XRD verileri..... 62
Şekil 3.3 1. ITZO aygıtın SEM görünlürei ve EDX analiz sonuçları. 63
Şekil 3.4 1. ITZO aygıtın I-V karakteristikleri 65
Şekil 3.5 a) 1.ITZO aygıta ait nanotellerin şekli ve ebatları, b) aygıtın eşdeğer devresi. 66
Şekil 3.6 2. ITZO aygıtın SEM ve EDX analiz sonuçları..... 67
Şekil 3.7 2. ITZO aygıtın I-V karakteristikleri. 67
Şekil 3.8 3. ITZO rezistör aygıtın SEM, EDX analiz sonuçları..... 68
Şekil 3.9 3. ITZO rezistör aygıtın elektriksel ölçümlerinin sonuçları..... 68
Şekil 3.10 Dördüncü ITZO rezistör aygıtının sırasıyla SEM, EDX analiz sonuçları. .. 69
Şekil 3.11 Dördüncü ITZO rezistör aygıtının elektriksel karakterizasyonun sonuçları. 70
Şekil 3.12 Beşinci ITZO rezistör aygıtın sırasıyla SEM, EDX analizlerinin sonuçları. 71
Şekil 3.13 Beşinci ITZO rezistör aygıtın elektriksel karakterizasyon sonuçları..... 71
Şekil 3.14 Altıncı ITZO rezistör aygıtının SEM, EDX ve elektriksel karakterizasyon analizlerinin sonuçları. 72
Şekil 3.15 Altıncı ITZO rezistör aygıtının SEM, EDX ve elektriksel karakterizasyon analizlerinin sonuçları. 73
Şekil 3.16 Yedinci ITZO rezistör aygıta ait SEM, EDX analizlerin sonuçları. 74
Şekil 3.17 Yedinci ITZO rezistör aygıta ait elektriksel karakterizasyon sonuçları. 74
Şekil 3.18 Zn katkılı In_2O_3 nanotel köprülü aygıtın SEM, EDX analiz ölçüm sonuçları. 75
Şekil 3.19 Zn katkılı In_2O_3 nanotel köprülü aygıtın elektriksel ölçüm sonuçları. 75
Şekil 3.20 Tüm rezistör aygıtların I-V karakteristiklerinin toplu halde gösterimi..... 76
Şekil 3.21 1 numaralı aygıtın gruptan çıkarılması ile elde edilen diğer rezistör aygıtların karanlıktaki I-V karakteristiklerinin gösterimi. Bu durumda 6 numaralı diğerlerine oranla daha baskın durumdadır. 77
Şekil 3.22 Bir önceki grafikten 6 numaralı örneğinde çıkarılması elde edilen I-V karakteristikleri. Bu grupta yer alan aygıtlar için karşılaştırmalı olarak yorum yapılabilecek bir durum söz konusudur..... 78
Şekil 3.23 Tüm rezistör aygıtların fotoakım değerlerinin gerilime bağlı değişimi..... 79
Şekil 3.24 Tüm rezistör aygıtlardan 1. aygıtın verileri çıkarıldıktan sonra kalan aygıtların fotoakım değerlerinin gerilime bağlı değişimleri..... 80
Şekil 3.25 5.aygıtın verileri çıkarıldıktan sonra kalan aygıtların fotoakım değerlerinin gerilime bağlı değişimleri..... 80

Şekil 3.26 1. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının SEM ve EDX analiz sonuçları. 82
Şekil 3.27 1. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının elektriksel ölçüm sonuçları. a)çıkış karakteristiği, b) transfer karakteristiği..... 83
Şekil 3.28 2. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının SEM, EDX analiz sonuçları. 85
Şekil 3.29 2. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının elektriksel ölçüm sonuçları. a) çıkış karakteristiği, b) transfer karakteristiği..... 86
Şekil 3.30 3. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının SEM görüntüleri ve EDX analiz sonuçları..... 87
Şekil 3.31 3. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının elektriksel ölçüm sonuçları. a) çıkış karakteristiği, b) transfer karakteristiği..... 88
Şekil 3.32 4. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının SEM, EDX analiz sonuçları. 89
Şekil 3.33 4. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının elektriksel ölçüm sonuçları. a) çıkış karakteristiği, b) transfer karakteristiği..... 89
Şekil 3.34 5. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının SEM, EDX analiz ölçüm sonuçları. 90
Şekil 3.35 5. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının elektriksel ölçüm sonuçları. a) çıkış karakteristiği, b) transfer karakteristiği..... 91
Şekil 3.36 Zn Katkılı In_2O_3 nanotel aktif katmanlı FET aygıtına ait SEM ve EDX ölçüm sonuçları. 92
Şekil 3.37 Zn Katkılı In_2O_3 nanotel aktif katmanlı FET aygıtına ait elektriksel karakterizasyon sonuçları. a) çıkış karakteristiği, b) transfer karakteristiği..... 92
Şekil 3.38 Yığın halde bulunan Zn katkılı In_2O_3 materyalinin Si elektrotlar arasındaki SEM görüntüsü ve buna ait EDX ölçüm sonucu..... 94
Şekil 3.39 Yığın şeklinde silisyum elektrotlar arasında büyüyen Zn katkılı In_2O_3 ince film şeklindeki (yığın halde) FET aygıtının; a) çıkış ve b) transfer karakteristiklerinin sonuçları. 95
Şekil 3.40 Memristör aygıtının üç boyutlu gösterimi. 97
Şekil 3.41 1. köprülü ITZO nanotel memristör aygıtının SEM ve EDX analiz sonuçları. 98
Şekil 3.42 Birinci köprülü ITZO meristör aygıtına ait I-V karakteristikleri: (a) Tek çevrim (b) Çoklu çevrim (lineer ölçek), (c) Çoklu çevrim (logaritmik ölçek)..... 99
Şekil 3.43 İkinci köprülü ITZO nanotel memristör aygıtının SEM ve EDX analiz sonuçları. 100
Şekil 3.44 Birinci köprülü ITZO meristör aygıtına ait I-V karakteristikleri: (a) Tek çevrim (b) Çoklu çevrim (lineer ölçek), (c) Çoklu çevrim (log. ölçek). 101
Şekil 3.45 Üçüncü köprülü ITZO nanotel memristör aygıtının SEM ve EDX analiz sonuçları. 102
Şekil 3.46 Birinci köprülü ITZO meristör aygıtına ait I-V karakteristikleri: (a) Tek çevrim (b) Çoklu çevrim (lineer ölçek), (c) Çoklu çevrim (log. ölçek). 103
Şekil 3.47 Hexane içerisinde büyütülmüş Alq3 mikrotellerin optik mikroskop görüntüleri. 104

Şekil 3.48 Alq3 mikrotellerin farklı büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri. 105
Şekil 3.49 Alq3 mikrotellerin sırasıyla (a) fotolüminesans, (b) XRD ve (c) absorbsiyon analiz sonuçları. 106
Şekil 3.50 Alq3 mikrotel aktif katmanlı FET aygıtının SEM ve optik mikroskop görüntüleri. 107
Şekil 3.51 Alq3 mikrotellerin iki elektrotlu rezistör ölçümü. 108
Şekil 3.52 Alq3 mikrotel aktif katmanlı FET aygıtının elektriksel ölçüm sonuçları. .. 109
Şekil 3.53 Altın (Au) ve Alq3 mikrotellerin enerji band diyagramının gösterilişi. Ok işareti sisteme deşiklerin enjekte edişini göstermektedir. 110
Şekil 3.54 C_{60} mikrotellerin aseton yardımıyla elde edilmiş optik mikroskop görüntüleri. 111
Şekil 3.55 Etanol kullanılarak oluşturulan C_{60} mikrotellerin optik mikroskop görüntüleri. 112
Şekil 3.56 Kloroform kullanılarak büyütülen C_{60} mikro tellerinin optik mikroskop görüntüleri. 113
Şekil 3.57 Metanol ve Etanol kimyasallarına ait kimyasal formüller. 114
Şekil 3.58 Metanol kullanılarak büyütülen C_{60} mikro kristallerin optik mikroskop görüntüleri. 114
Şekil 3.59 n-hegzan kullanılarak büyütülen C_{60} mikro kristallerin optik mikroskop görüntüleri. 115
Şekil 3.60 C_{60} materyalinden büyütülen farklı geometrik şekillere sahip mikro kristallerin optik mikroskop görüntüleri. Dairesel şekilli (en alttaki) parçacıklar etanol içerisinde büyütülürken diğer şekiller kloroform içerisinde büyütülmüştür. 117
Şekil 3.61 PMMA/SiO_2/n^+-Si üzerine fabrike edilmiş C_{60} mikrotel FET lere ait çıkış ve transfer karakteristikleri. 118
Şekil 3.62 n^+-Si gate elektrot'a negatif elektrik sinyalinin uygulanmasına bağlı olarak transistör kanalının oluşumunu gösteren çizim. 119
Şekil 3.63 SiO_2/n^+-Si üzerine üretilmiş edilmiş C_{60} mikrotel FET e ait çıkış ve transfer karakteristikleri. 120
Şekil 3.64 H2Pz materyalinden etanol yardımıyla büyütülen mikro çubukların optik mikroskop görüntüleri. 121
Şekil 3.65 H2Pz materyalinden tetrahidrofuran (THF) yardımıyla büyütülen mikro çubukların optik mikroskop görüntüleri. 122

TABLO LİSTE

Tablo 3.1 Nanotel köprülü rezistör aygıtların EDX analiz sonuçlarını kullanarak ikili atomik oranları. 64
Tablo 3.2 Tüm FET aygıtlara ait parametler. 93

1 GİRİŞ

1959 yılında Richard Feynman'ın "aşağıda daha çok şey var (There is a plenty of room in the bottom)" şeklindeki ifadesi [1,2], ileride nanoteknoloji alanında yapılacak çalışmalar için adeta bir kıvılcım oluşturmuştur. Nanoteknoloji kelime olarak 1974 yılında Tokyo Bilim Üniversitesinden Norio Taniguchi tarafından bir makale ile bilim insanlarının bilgisine sunulmuştur [2]. 1981 yılında taramalı tünelleme mikroskobunun (Scanning Tunneling Microscope (STM)) keşfi [3] ve 1989 yılında kullanılmaya başlanması ile atomik boyutlarda görüntülemeyi sağlamış ve bu keşfi yapan bilim insanları da 1986 yılında Nobel fizik ödülü ile ödüllendirilmişlerdir. STM nin keşfi ile 1986 yılında fullerenin yapısı [4] ve 1991 yılında karbon nanotüplerin yapısının görüntülenmesini sağlamıştır [5]. 2000'li yıllara doğru ABD'nin bu alana ciddi manada yatırım yapmaya başlaması diğer ülkelerin de ilgisini çekmiş ve nanoteknolojiye ciddi manada fonlar ayrılmaya başlanmıştır. Nanoteknoloji bugün neredeyse hayatın her alanında karşımıza çıkmaktadır (sağlık, tekstil, güvenlik, uzay ve haberleşme vb.). Hayatın her alanına nüfuz eden bu teknolojiyi yakından takip etmek ve üretmek artık her ülke için hayati önem taşımaktadır.

Nano yapıların (özellikle nanotel ve nanotüp gibi) üretim metotlarının çeşitlenmesi ile beraber aygıt üretiminde kullanılması son 20 yılda oldukça ilgi çeken bir alan haline gelmiştir [6-10]. Özellikle ucuz ve kolay üretim yöntemlerinin bulunması birçok araştırmacıya bu alanda büyük imkânlar sağlamıştır. Bugüne kadar nanotel üretmek için birçok yöntem geliştirilmiştir [11-19]. Bu yöntemleri genelde olarak iki grup altında toplamak mümkündür. Bunlar yukarıdan aşağıya (Top-Down) ve aşağıdan yukarıya (Bottom-Up) yöntemleridir [20]. Yukarıdan aşağıya yönteminde genel olarak bir yığın (bulk) materyal çeşitli kimyasal süreçlerden geçirilerek aşındırılır ve temelde bir makro yapıdan mikro veya nanoyapılar elde edilir. Tüm litografi teknikleri bu grupta toplanabilir (foto litografi, e-beam litografi vs.) [21,22]. Son yıllarda aygıtların ebatlarındaki küçülmeden dolayı ileri litografi yöntemlerine gereksinim duyulmuş ve bu da bu yöntemin maliyetinde ciddi artışlara neden olmuştur. Aşağıdan yukarı yöntemi bünyesinde birbirinden çok farklı metotlar barındırmaktadır. Yukarıdan aşağıya yöntemi ile karşılaştırıldığında belki maliyet olarak çok ucuz metotlara rastlamakla beraber elde

edilen nanotellerin düzeninin ve ebatlarının (boy ve çap) kontrolü kısmen de olsa yukarıdan-aşağıya yöntemine nazaran daha zordur [23]. Aşağıdan yukarıya yönteminde, yukarıdan aşağıya metodunun aksine, atomik boyuttaki parçacıkların birleşmesi ile nano yapılar üretilir. Bu grupta yer alan metotlara örnek vermek gerekirse; buhar-sıvı-katı (vapor-liquid-solid (VLS)) [24], buhar-katı-katı (vapor-solid-solid (VSS)) [25], lazer ablasyon (laser ablation) [26], hidrotermal (hydrothermal) [27], sonokimyasal (sonochemical) [28], şablon destekli (template assisted) metot [29] vb. gibi metotlar sıralanabilir. Bahsi geçen bu metotların kendi içlerinde avantajlı ve dezavantajlı yönleri olmakla beraber literatürde en çok çalışılan yöntemlerdir. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu yöntemlerle üretilen nanoteller genel itibariyle aygıt uygulamaları için bir altlıktan başka bir altlığa transfer edilmektedir (özellikle FET çalışmalarında). Nanotellerin bir altlıktan başka bir altlığa transferi gerek zaman gerek malzeme açısından ekonomik olmamaktadır. Dolayısıyla bu problemi çözmek için nanotellerin aygıtların elektrotları arasına doğrudan büyütülmesi büyük önem arz etmektedir. Bu tezin konusu olan nanotellerin, aygıtların elektrotları arasına direk köprü (Bridge) şeklinde büyütülmesi yüksek performanslı aygıt üretimi alanında önemli katkılar sağlayacaktır. Bu yöntem özellikle memristör, sensör ve detektör gibi iki elektrotlu aygıt uygulamaları için çok önemli avantajlar sağlamakla beraber transistör gibi üç elektrotlu aygıt uygulamaları için daha fazla geliştirilmesi gereken bir metottur.

Nanotellerde yük iletimini sınırlayan tanecik sınırları (grain boundary) ince filmlere oranla çok daha az olduğundan nanotellerin veya nanotüp lerin kullanıldığı aygıtların performansı önemli ölçüde artmaktadır [30]. Yük iletiminin bir boyuta indirgenmesi yük taşıyıcılarının ince filmlere nazaran daha az tanecik sınırları ve kristal yapı kusurları ile karşılaşmasına dolayısıyla yük haraketliliğinin artmasına neden olmaktadır [30]. Bununla beraber nanotellerin diğer önemli özelliklerinden biri de yüzey alanı/hacim oranlarının oldukça yüksek olmasıdır ki bu özellikle sensör, detektör gibi aygıtlar için önemli bir parametredir. Bu tezin de konusu olan nanotellerin uygulama alanları arasında ve literatürde üzerinde en çok durulan konular arasında alan etkili transistörler (FET) [30-40], ışık yayan diyotlar (LED) [41-50], fotovoltaikler (PV) [51-62] ve sensörler [63-78] yer almaktadır. Aygıt uygulamalarında üzerinde en çok durulan nanoteller Si [79-81], ZnO [82-86], SnO_2 [87-90], In_2O_3 [91-93], InP [94,95], vb. gibi materyaller verilebilir. Bu malzeme gruplarından özellikle metal-oksit grupları

araştırmacıların üzerinde en çok durduğu gruptur. Söz konusu bu ileri teknoloji ürünlerinin gelişimi bu aygıtlarda aktif katman olarak kullanılan malzemenin kimyası ve fiziksel özellikleriyle doğrudan ilişkilidir. Her nekadar literatürde yapılan çalışmalar çoğunlukla inorganik malzemeler üzerine yoğunlaşmışsa da son yıllarda organik materyallerin elektronik uygulamaları da hızla artmaktadır. Özellikle organik malzemelerde moleküler yapı kolaylıkla değiştirilebildiğinden çok fonksiyonlu organik malzemelerin sentezi üzerine ciddi çalışmalar yapılmaktadır [96]. Ayrıca organik moleküllerin inorganik muadillerine oranla düşük sıcaklık gerektiren proseslere ihtiyaç duymalarından dolayı plastik gibi son derece ucuz ve bükülebilir altlıkların kullanımına imkân sağlaması katlanabilir veya bükülebilir elektronik aygıtlara bir kapı aralamıştır [97]. Gerek üretimi gerekse karakterizasyonlarının yapılması konusunda, inorganik nanoteller üzerine yapılan çalışmalar çok daha fazladır. Fakat bunların uygulamada kullanımları hala yeterli düzeyde değildir. Bunun nedenlerinden belki en önemlisi, nanotel tabanlı aygıt üretiminin ince film muadillerine nazaran çok daha zor ve pahalı olması gösterilebilir.

Jin Yong Oh ve arkadaşlarının [98] yaptıkları çalışmada fotolitografi yöntemi ile desenlendirdikleri p-tip SOI altlık üzerinde Si elektrotlar arasına chemical vapor deposition (CVD) metodu ile Si nanoteller büyütmüşlerdir. Si elektrotlar arasına büyütülen bu tek Si nanotelinin çevresine yine CVD metodu ile 10 nm SiO_2 yalıtkanı büyütüp p+ amorf Si gate elektrotu olarak yalıtkan tabakanın üzerine büyütülmüştür. Elde edilen yapının FET ölçümleri yapılmış ve elde edilen sonuçların literatürde Si nanotel ile yapılan FET'ler ile karşılaştırılabilir olduğu bulunmuştur. Ayrıca bu metotla üretilen 3 boyutlu transistörlerin oldukça tekrarlanabilir olduklarını belirtmişlerdir.

Anurag Chaudhry ve arkadaşlarının [99] fotolitografi yöntemi yardımı ile KOH çözeltisini kullanarak p-tip SOI altlığı kimyasal aşındırmaya tabi tutarak Si elektrotlar oluşturup bu elektrotlar arasına CVD metodu ile Si nanotel büyütmüşlerdir. Si nanotelleri büyütmek için, SiH_4, HCl gazları ile Si nanotelleri p-tip yapmak için (B_2H_6) (diborane) gazı kullanılmıştır. Farklı çaplarda büyütülen Si nanotelleri ile yüksek katkılı Si elektrotlar arasındaki kontak dirençleri incelenmiş ve kontak direncinin nanotellerin çaplarına oldukça bağlı olduğu rapor edilmiştir.

Jong Soo Lee ve çalışma arkadaşları [100] ZnO nanotelleri VSS metodu ile önceden desenlendirilmiş ve 10-13 um kalınlıkta, 2-6 um genişlikteki Si elektrotlar arasına direk büyütüp rezistör ölçümlerini inceledikleri çalışmalarında ZnO nanotellerin tek aşamalı ve katalisit kullanılmadan büyüttüklerini belirtmişlerdir. ZnO kaynak materyali için sıcaklık değeri 1450 ^{0}C iken Si altlıkların yerleştirildiği bölgelerdeki sıcaklık değerlerinin 600 ile 850 ^{0}C arasında değiştiklerini belirtmişlerdir. Büyütülen nanotellerin çaplarının 20 ile 150 nm arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Üretilen aygıtların karanlık ve UV ışık altında elektriksel ölçümleri yapılmış ve sonuçta ZnO nano tellerin UV ışığa oldukça duyarlı olduğu belirtilmiştir.

Jong Soo Lee ve arkadaşlarının [101] yaptıkları çalışmada fotolitografi yardımıyla desenlendirdikleri SOI altık üzerindeki Si elektrotlar arasına ZnO nanoteller büyütmüşlerdir. Tek aşamada büyüttükleri ZnO nanoteller için herhangi bir katalisit kullanılmadığını belirtmişlerdir. ZnO nanotellerinin büyütülmesi için yüksek sıcaklık fırının kullanıldığı çalışmada ZnO kaynağının sıcaklık değerinin 1450 ^{0}C iken Si altlıkların yerleştirildikleri sıcaklık değerinin 850 ^{0}C olduğu belirtilmiştir. Köprü şeklinde büyütülen ZnO nanotellerden üretilen rezistör aygıtın karanlık ve UV ışık altında elektriksel ölçümleri yapılmış ve UV ışık altında geçen akımın karanlık altında geçen akımdan yaklaşık 160 kat daha büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca ZnO nanotellerinin UV ışığa maruz kaldıktan sonra nanotellerden geçen akımın zamanla tekrar eski haline döndüğü gözlemlenmiştir.

Hanying Li ve arkadaşlarının [102] çözelti bazlı ürettikleri tek kristal C_{60} iğne ve şerit şekilli yapılardan FET ler imal edilmiş olup yapılan elektriksel ölçümlerde maksimum 11 cm^2/V.s yük haraketliliği elde edilmiş olup be değerin n-tip organik FET lerde elde edilen en yüksek değer olduğunu belirtmişlerdir. C_{60} tek kristalleri elde etmek için m-xylene ve karbon tetraklorid (CCl_4) kullandıklarını ve ayrıca tüm elektriksel ölçümlerin eldivenli kabin (Glove box) içerisinde yaptıklarını belirtmişlerdir.

Kuan-Yi Wu ve çalışma arkadaşlarının [103] yaptığı çalışmada C_{60} tek kristal nanotel yapılar üretip FET ölçümlerini incelemişlerdir. Tek kristallerin büyütülmesi için m-xylene, CS_2 ve ODCB gibi çözücüler kullanılmıştır. FET ölçümlerinde n-tip transistör davranışı gözlemlenmiştir. Elde edilen maksimum yük haraketliliğinin 1,7 cm^2/V.s olduğunu belirtmişlerdir.

Yukarıda C_{60} tek kristalleri ile ilgili verilen iki çalışmadan biri 2012 diğer de 2015 tarihli dir ve çalışmalarda kullanılan çözeltiler bir miktar benzerlik göstermektedir. Buna rağmen her iki çalışma da yüksek etki değerli dergilerde yayımlanmıştır. Bizim tez konumuzun bu çalışmalarda kullanılan C_{60} ile aynı olması yanında bizim kullandığımız solventler bu çalışmalarda kullanılanlardan tamamen farklıdır. Ayrıca bu tez çalışması ile aynı dönemlere denk gelen 2012 yılındaki çalışmadan tamamen habersiz yaptığımız çalışmalar da elde ettiğimiz C_{60} kristalleri bu çalışmalarda üretilenler ile boy ölçüşebilecek kalitededir. Ayrıca Alq3 molekülünden FET imaline rastlanmamakla beraber rezistör çalışmaları literatürde mevcut olup birkaçı aşağıda özetlenmiştir.

Jin-Song Hu ve çalışma arkadaşları [104] çözelti bazlı büyüttükleri Alq3 nano çubukların alan emisyonu üzerine yaptıkları araştırmada çubukların düşük voltaj değerlerinde alan emisyonu gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Burada eşik alan değeri 3,1 V/µm olarak gözlemlenmiştir.

Shih-Shou Lo ve arkadaşları [105] çözelti bazlı büyüttükleri mikron altı Alq_3 tellerde yaptıkları elektriksel karakterizasyon sonucunda Schottky türü akım-voltaj karakteristiği elde ettiklerini belirtmişlerdir. Ayrıca elde edilen akım-voltaj karakteristiğinde akımın belli bir voltaj değerinden sonra hızla azalmaya başladığı yani aygıtın negatif direnç özelliği gösterdiği belirtilmiştir. Diyotun açma geriliminin 4 V ve bozulma (breakdown) geriliminin 12 V olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca aygıtın UV (365 nm) ışık altında elektriksel ölçümü yapılmış olup elde edilen davranışın normal davranış ile aynı olduğu fakat bozulma geriliminin 9,4 V a düştüğü görülmüştür.

Yong Sheng Zhao ve çalışma arkadaşları [106] adsorban-destekli (adsorbent-assisted) fiziksel buhar yığma metodu (physical vapor deposition) ile büyüttükleri tek kristal Alq3 nanotellerin oldukça düzgün olduklarını belirtmişlerdir. TGA (Thermogravimetric Analysis) analiz sonuçlarının adsorbanların Alq3 ün ağırlık kaybını azalttığını ve süblimleşme sıcaklığını düşürdüğünü ve bunların oluşan ürünün kalitesini arttırdığını belirtmişlerdir. Yapılan soğurma analizleri Alq3 nanotellerin çaplarının küçülmesi ile absorpsiyon soğurma bandlarında maviye doğru kayma oldu gözlemlenmiştir. Yapılan J-V ölçümleri Alq3 nanotellerin diyot gibi davrandıklarını ve nanotellerin artan çaplarına bağlı olarak akım yoğunluğunun azaldığını gözlemlediklerini belirtmişlerdir.

Bu tez çalışması kapsamında iki farklı malzeme grubu ile nano ve mikro yapılar üretilmiştir. İnorganik nanotellerin üretimi için ZnO, SnO_2 ve In_2O_3 malzemeleri kullanılmış ve bunlardan iki farklı nanotel üretilmiştir: Bunlar yukarıda da bahsedildiği gibi ilk defa köprü şeklinde büyütülen ITZO (indium-tin-zinc-oxide) ve Zn katkılı In_2O_3 nanotellerdir. Bu nanoteller, transistör, rezistör ve memristör elektrotları arasına direk büyütülmüştür. Dolayısıyla, nanotellerin ikinci bir kez transferine gerek kalmadan doğrudan iki silikon elektrot arasına köprü şeklinde büyütülmüştür. Bu literatürde henüz çok yeni ve geliştirilmeye açık olan bir yöntemdir. Bahsi geçen aygıtları imal etmek için kullandığımız oldukça yüksek katkılı (heavily doped) SOI altlıklar önceden optik litografi yöntemi ile desenlendirilerek silikon elektrotlar oluşturulmuş, daha sonra bu silikon elektrotlar transistörler için source ve drain elektrot olarak kullanılmıştır. Elde edilen bu transistörlerin elektriksel ölçümleri numune istasyonu kullanılarak hava ortamında yapılmıştır. Ölçümler sonucunda ITZO nanotelli FET ler p-tipi davranış gösterirken Zn katkılı In_2O_3 olan FET n-tipi iletim davranışı göstermiştir. Ayrıca üç farklı ITZO nanotellerde memristör davranışları gözlemlenmiştir. Daha önce de değinildiği gibi köprü şeklinde büyütülen bu nanollerden yaptığımız aygıtlar literatüre ilk kez kazandıralacak çalışmalardır. Bunun yanında tüm aygıtların rezistör ölçümleri de yapılarak elektriksel davranışları incelenmiştir. Organik materyallerden ilk defa, düşük sıcaklıklarda buharlaşan çözücüler (aseton, kloroform, ethanol, metanol, hegzan) kullanılarak mikrotel/çubuk ve çeşitli geometrilerde (üçgen, altıgen, kare gibi) mikro yapıların üretimi gerçekleştirilmiştir. Özellikle organik malzemelerle nano veya mikro yapı üretmenin inorganik muadillerine nazaran çok daha zor olduğu görülmüştür. Bunun birkaç nedeni vardır: İlki inorganik malzemelerle nano mikro yapı üretmek için kullanılan yöntemlerin büyük bir kısmı organik malzemelere uygulanamadığı için organik malzemelerle bu yapıları üretmek için yeni yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir. İkincisi ise kristalik organik moleküllerin sentezinin zor olmasından kaynaklanmaktadır. Elde edilen nano ve mikro tellerin SEM, EDX, XRD ve optik mikroskop yöntemleriyle analizi yapılmıştır. Organik materyal olarak C_{60}, Alq3 ve H2Pz molekülleri kullanılmıştır. Bunlardan C_{60} ve Alq3 ticari olarak temin edilmiş olup H2Pz molekülü YTÜ Kimya Bölümünden Dr. Bahadır KESKİN tarafından ilk defa sentezlenmiştir. Bu moleküllerden C_{60} ve Alq3 moleküllerinden elde edilen mikrotellerden FET ler imal edilip elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. Elde edilen

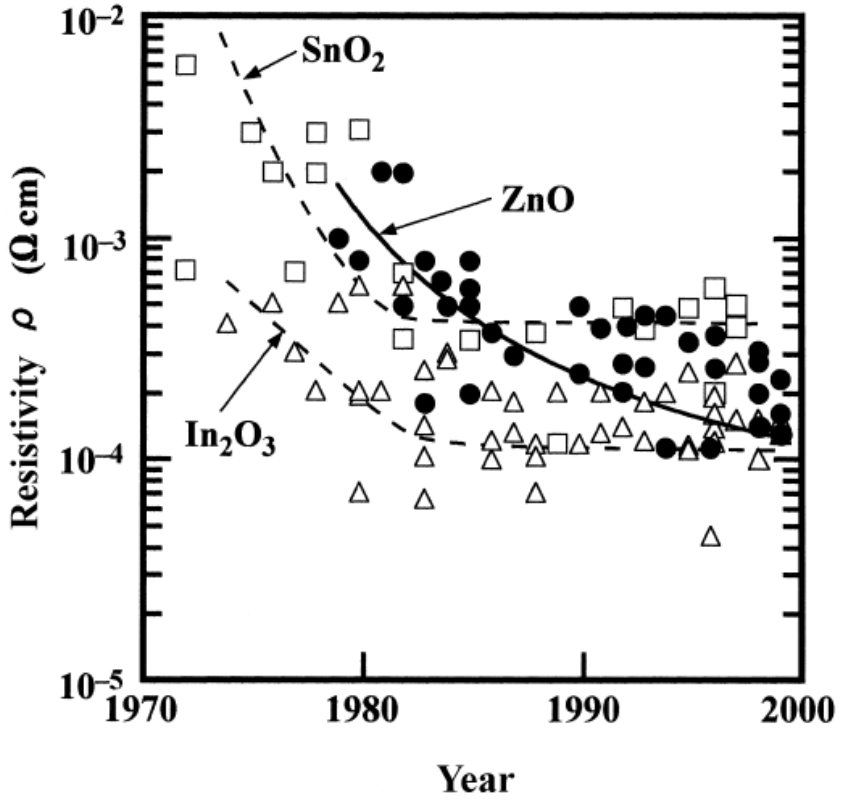
sonuçlarda her iki molekülünde p-tip transistör davranışı sergilediği görülmüştür. Organik moleküllerden FET imalinin oldukça zor olmasından dolayı istenilen verim elde edilememiştir. Bunun nedeni organik tellerin oldukça kırılgan olmasından kaynaklanmaktadır.

1.1 GENEL BİLGİLER

1.1.1 Şeffaf İletken Oksitler (TCO)

Metal-oksit malzemeler görünür bölgedeki optik geçirgenlikleri, geniş band aralıkları, yüksek yük haraketlilikleri, yüksek orandaki kristallenme oranları vb. gibi eşsiz fiziksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı gaz sensörleri [107], UV sensörleri [108], biyosensörler [109], güneş pilleri [110], ışık yayan diyotlar [111], alan etkili transistörler [112], lityum iyon pilleri [113], memristörler [114], vb. gibi elektronik ve opto elektronik aygıtlar için umut verici malzemelerdir. Bu malzemeler literatürde geniş bant aralıklı saydam iletken oksit (transparent conductive oxide (TCO)) materyaller olarak adlandırılmaktadır [115]. TCO materyaller ilk önce SnO_2 ve In_2O_3 gibi ikili bileşikler şeklinde fiziksel ve kimyasal buhar yığma metotları kullanılarak sentezlenmiştir [116]. İkili bileşiklere ek olarak, Cd_2SnO_4, $CdSnO_3$ ve $CdIn_2O_4$ gibi üçlü bileşikler 1980 li yıllarda geliştirilmiştir [116]. TCO filmler göreli olarak düşük direnç değerlerine sahiptir. Şekil 1.1' de geçmiş yıllarda rapor edilmiş ikili TCO filmlerin özdirenç grafikleri verilmiştir.

Şeffaf iletken oksitlerin nanotel şeklinde büyütülmesi amacıyla birçok metot geliştirilmiştir. Bu metotlardan bazıları buhar-sıvı-katı (vapor-liquid-solid (VLS)), buhar-katı-katı (vapor-solid-solid (VSS)), lazer ablasyon (laser ablation), şablon destekli (template assisted) yöntem, hidrotermal (hydrothermal), sonokimyasal (sonochemical) yöntemdir. TCO'ların nano yapılarının oluşturulmasında kullanılacak yöntem başlangıç malzemesinin seçimine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Örneğin TCO materyallerinin toz halini (powder) kullanarak nanotel büyütmek için VLS ve VSS metotları genel itibari ile uygun yöntemlerdir. TCO materyallerini toz halde buharlaştırmak için çok yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulduğundan, vakum ortamında yüksek sıcaklıkta taşıyıcı bir gaz yardımıyla bu maddelerin uygun altlıklar üzerine biriktirilmesi ile nano yapıları oluşturmak mümkündür. TCO materyallerinin tuz formları kullanılarak nanotel büyütmek için hidrotermal ve sonokimyasal yöntemler daha uygun yöntemlerdir.

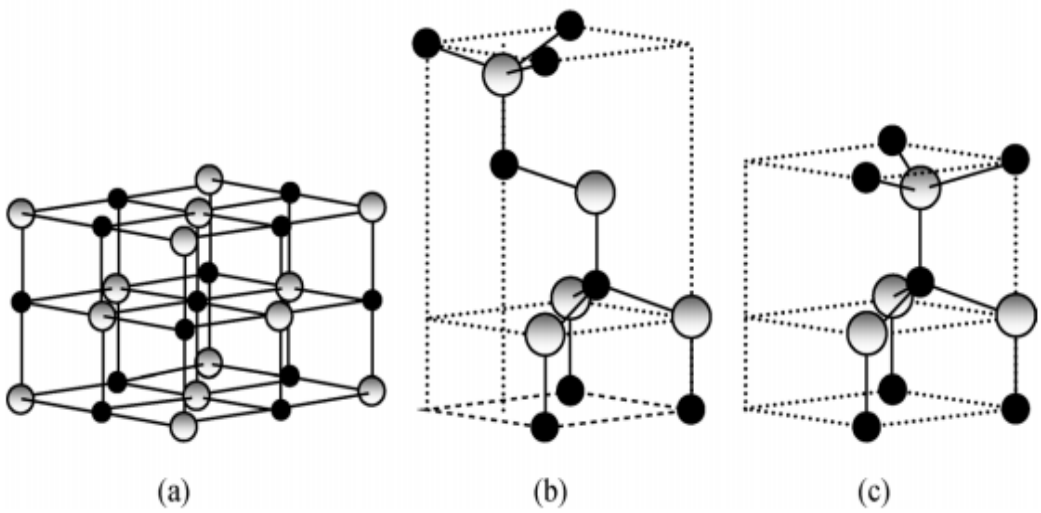


Şekil 1.1 1970–2000 yılları arasında rapor edilmiş ikili şeffaf iletken oksitlerin özdirenç değerleri [116].

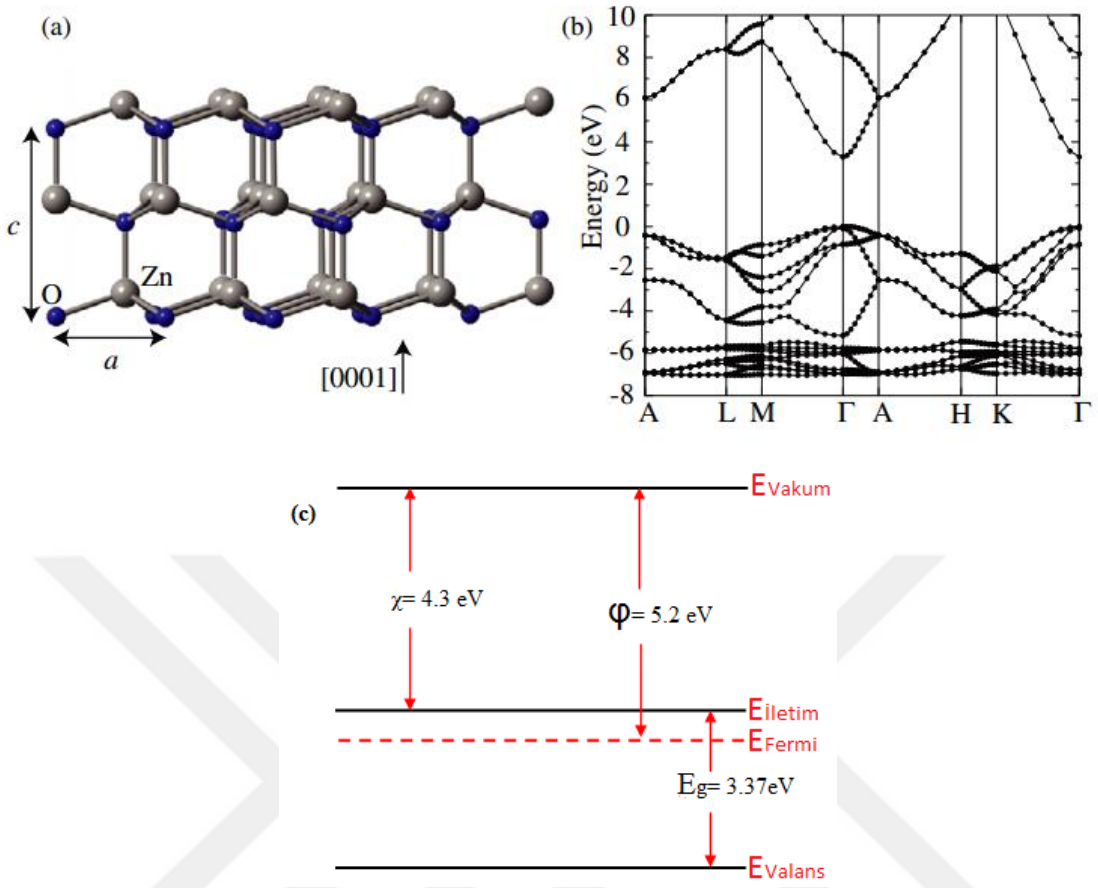
1.1.1.1 Çinko Oksit (ZnO)

Çinko oksit oda sıcaklığında geniş enerji band aralığına (3.37eV), yüksek eksiton bağlama enerjisine (60 meV) sahip II-VI grubu n-tipi ikili bir metal-oksit yarıiletken malzemedir. ZnO materyali kaya tuzu (rocksalt), çinko karışım (zinc blend) ve wurtzite hegzagonal (hexagonal wurtzite) kristalik yapısı (Şekil 1.2), yüksek elektron yük hareketliliği ve yüksek ısıl iletkenliği, şeffaf, piezoelektrik ve biyo uyumluluk gibi eşsiz özelliklerinden dolayı gerek elektronik ve gerekse de optoelektronik aygıt uygulamaları için önemli bir malzemedir [117-119]. Atmosfer koşullarında hegzagonal yapı termodinamik açısından en kararlı yapı olduğundan çalışmalarda daha çok bu yapı tercih edimektedir [123]. Zinc blend yapısı sadece kübik kristal yapıya sahip altlıklar üzerinde büyütüldüğünde kararlı haldedir [123]. Rock salt yapısı genel itibariyle göreceli olarak yüksek sıcaklıklarda elde edilmektedir [123]. Özellikle yüksek kırılma (Breakdown) voltajına sahip olması sayesinde (Neredeyse GaAs'ın dört katı) son

zamanlarda üzerinde çok fazla çalışılan malzemelerden birisidir. Şekil 1.3 (a) da hegzagonal yapıya ait a ve c örgü parametreleri ile (b) de, nümerik metotla hesaplanmış enerji band şekli verilmiştir. Şekil 1.3 (c) de ZnO materyalinin enerji-band diagramı ile birlikte yasak enerji aralığı (E_g), valans (E_V) ve iletkenlik bandı (E_C), fermi enerjisi seviyesi (E_F), elektron alınganlığı (χ) ve iş fonksiyonu (φ) değerleri verilmiştir. Hegzagonal kristalik yapının örgü parametreleri a= 3.2469 Å ve c= 5.2069 Å (şekil 1.3) ile en yaygın ve hava ortamında en kararlı yapı olmasından dolayı en çok tercih edilen yapıdır [123]. ZnO aynı zamanda güneş yanıkları ve ultraviyole (UV) ışığın neden olduğu deri hasarlarına karşı kullanılan kremlerin içeriğinde kullanılmaktadır [120]. Son zamanlarda ZnO'nun antibakteriyel uygulamalarda kullanılabileceği rapor edilmiştir [121]. Bugün farklı yöntemlerle üretilen ZnO nano teller alan etkili transistörler, ışık yayan diyotlar, güneş pilleri, gaz sensörleri, UV detektörler, memristörler gibi birçok aygıt uygulamalarında kullanılmaktadır [122].



Şekil 1.2 ZnO kristal yapılar: (a) Kübik kayatuzu (cubic rocksalt), (b) kübik çinko blende (cubic zinc blende), ve (c) hegzagonal wurtzite (hexagonal wurtzite). Büyük gri küreler Zn siyah küçük küreler O atomlarını temsil etmektedir [123].

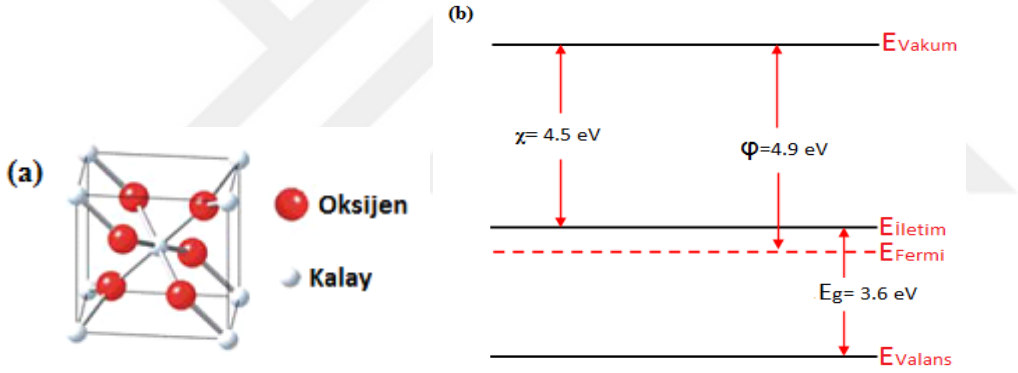


Şekil 1.3 Wurtzite kristal yapısına sahip ZnO nun örgü parametrelerinden a ve c nin gösterimi (a) HSE (Heys, Scuseria and Ernzerhof functional) hibrit fonksiyonu kullanılarak hesaplanan enerji-band yapısı (b) [124]. ZnO ya ait enerji band diagramı (c)

1.1.1.2 Kalay Dioksit (SnO_2)

Kalay dioksit (stannic oxide (SnO_2)) geniş direk bant aralığı (3.6eV), görünür bölgede yüksek orandaki optik geçirgenlik, infrared (IR) bölgede yüksek yansıtıcılık ve düşük elektriksel direnç gibi özelliklerinden dolayı diğer metal oksit materyaller arasında önemli bir yere sahip olan n-tipi bir yarıiletkendir [125,126]. Kristal yapısı dörtgensel rutil yapı olarak bilinen "cassiterite" yapısıdır (Şekil 1.4 (a)) ve örgü parametreleri a=b= 4.731 Å, c= 3.189 Å dur [127]. Yine Şekil 1.4 (b) de enerji-band diyagramı verilmiştir. SnO_2, gaz sensörlerinde, güneş pillerinde, lityum iyon pillerde, ışık yayan diyotlarda, alan etkili transistörlerde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [128-132]. Kimyasal orantılı (stoichiometric) yüzey özelliğinden dolayı Sn^{+4} iyonu Sn^{+2} indirgenerek veya SnO_2 yapısı SnO yapısına dönüşerek elektronik yapı değişir. Bu özelliğinden dolayı

SnO_2 gaz sensörü uygulamaları içinde eşsiz adaylardan biri olarak yer almaktadır [133]. Bununla beraber SnO_2 yüksek teorik kapasite değerinden dolayı (781 mAh/g) lityum iyon pil uygulamaları için silikondan sonra en iyi materyallerden biri olarak bilinmektedir [134]. İndiyum (In) ile katkılandığında indiyum kalay oksit (ITO) gibi, halihazırda dünya üzerinde ışık yayan diyotlar, güneş pilleri gibi uygulamalar için elektrot olarak kullanılan rakipsiz şeffaf iletken bir materyale dönüşür. Tantalyum (Ta) katkılı SnO_2 nanotel ile yapılan FET çalışmalarında max. 400 $cm^2/V.s$ yük haraketliliğideğerine ulaşıldığı belirtilmiştir [135]. Bunun yanında SnO_2 ince film transistörlerde yapılan çalışmalarda elde edilen yük hareketliliği değeri 2 $cm^2/V.s$ olarak rapor edilmiştir [136]. Buradan da anlışıldığı üzere nanotellerin kullanıldığı FET lerde elde edilen yük haraketliliği ince film FET lerde elde edilen yük haraketliliğinden oldukça yüsektir.

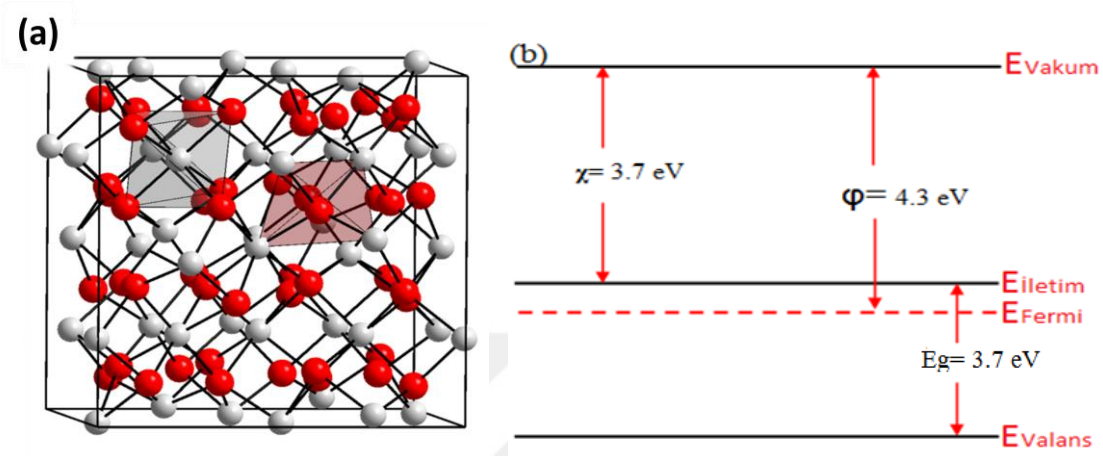


Şekil 1.4 (a) Rutil SnO_2 nin birim hücresi [127]. (b) SnO_2 nin enerji band diyagramı.

1.1.1.3 İndiyum Oksit (In_2O_3)

İndiyum oksit (In_2O_3) geniş bant aralığına sahip (direk bant aralığı 3.7 eV ve direk olmayan bant aralığı 2.6 eV) şeffaf iletken oksit ailesinin önemli bir üyesi olmasının yanı sıra elektronik, opto elektronik aygıtlarda, düz panel displaylerde, gaz sensörlerinde ve fotokatalsislerde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [137]. In_2O_3'in kübik (bixbyite) (Şekil 1.5 (a)) ve hegzagonal (corundum) gibi iki farklı kristal fazına sahip olduğu bilinmektedir [138]. In_2O_3'in enerji-band diyagramı şekil 1.5 (b) de verildiği gibidir. İndiyum oksitin geniş bant aralığına sahip olması onu optik açıdan

yüksek şeffaf hale getirmektedir ve bu da onu TCO materyalleri arasında çok önemli kılmaktadır. Ayrıca düşük sıcaklık değerlerinde de gaz algılama özelliklerinin iyi olmasından dolayı gaz sensörleri için önemli bir materyal olarak düşünülmektedir [139-141].



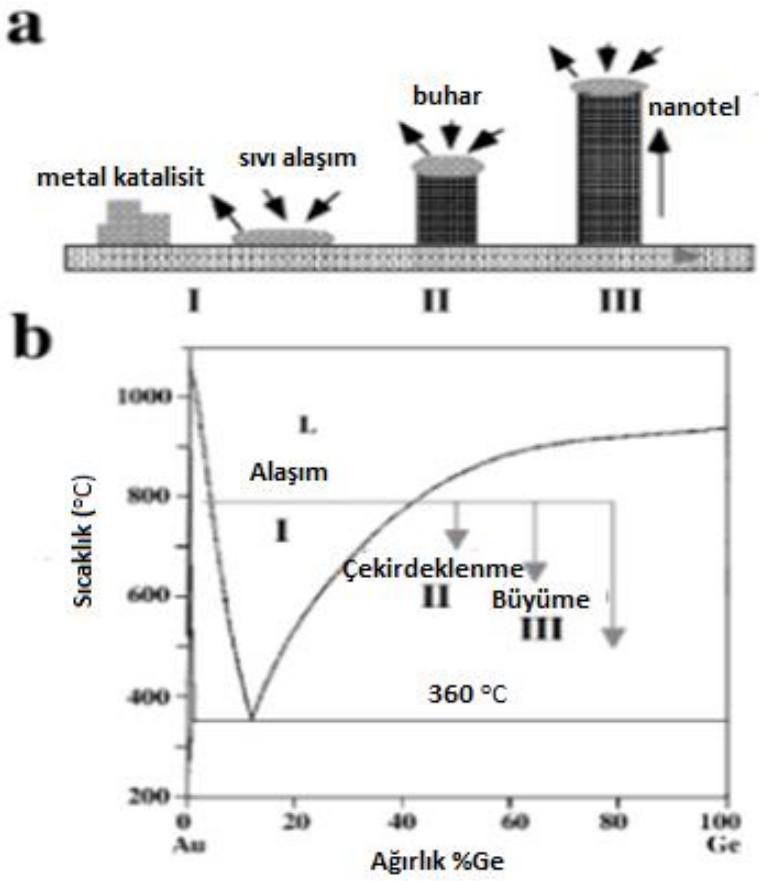
Şekil 1.5 In_2O_3 in kübik kristal yapısı (a) [142] ve enerji band yapısı (b).

1.1.2 Nanotel Büyütme Yöntemleri

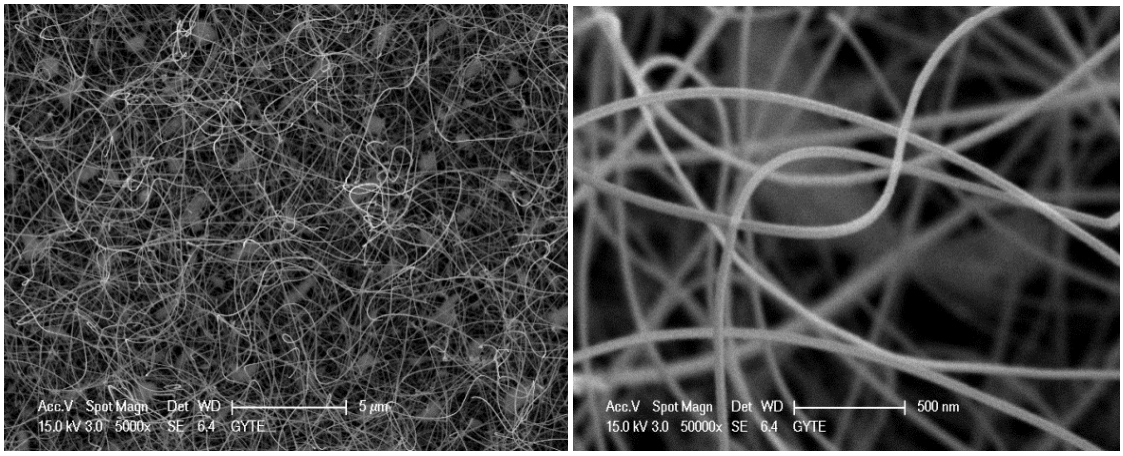
1.1.2.1 Vapor-Liquid-Solid (VLS) Metodu

VLS metodu ilk defa Ellis ve Wagner tarafından 1964 yılında geliştirilmiştir [143]. Birçok nanotel büyütme yöntemi arasında VLS metodu en çok kullanılanıdır ve prosesi en iyi oturtulmuş olanıdır. VLS metodu üç aşamalı bir prosestir (Şekil 1.6): İlk aşamada erimeye başlayan metal katalisit gelen kaynak buharını absorbe etmeye başlar (Şekil 1.6 a I). Bu aşamada metal katalisit ile kaynak materyali bir alaşım şeklindedir ve bu şekil 1.6 b de I.kısımda gösterilmiştir (Alloying). İkinci aşamada gelen kaynak buharının absorbe edilmesiyle beraber metal katalisit ile kaynak materyalinden oluşan alaşım yavaş yavaş süper doyum noktasına ulaşmasya başlar. Buradaki doyumdan kasıt, sürekli gelen kaynak materyalinin buharının metal katalisitin içerisine diffuze olmasıyla kaynak materyali metal katalisit içerisinde kritik bir yüzde değerine ulaşır. Artık bu noktadan sonra (süper doyum) kaynak materyali metal katalisit içerisinde çekirdeklenmeye başlayarak nanotel oluşumunun ilk aşamasına geçer (Şekil 1.6 a II). Üçüncü ve son basamak, oluşan bu kristal çekirdekten nanotellerin belli bir yönde büyümesi olayıdır. Bu basamakta sürekli gelen kaynak materyalinin buharı metal

katalisit içerisinde oluşan çekirdeklenmenin üstüne yığılarak nanotel büyümeye başlar (Şekil 1.6 a III). Metal katalisit bu yöntemin en önemli parametresidir; öyleki ara yüzeysel enerjiyi, oluşan nanotellerin çapını ve büyüme yönünü belirlemektedir. Bu yüzden uygun metal katalisitin seçimi son derece önemlidir. Metal katalisitlerin kalınlığı oldukça incedir. Sıcaklık, vakum seviyesi, taşıyıcı gaz, altık kristalinin kesim yönelimi nanotel oluşumuna etki eden önemli parametrelerdir [144]. VLS metodu ile elde ettiğimiz ZnO nanotellerin SEM görüntüleri Şekil 1.7 de verilmiştir.



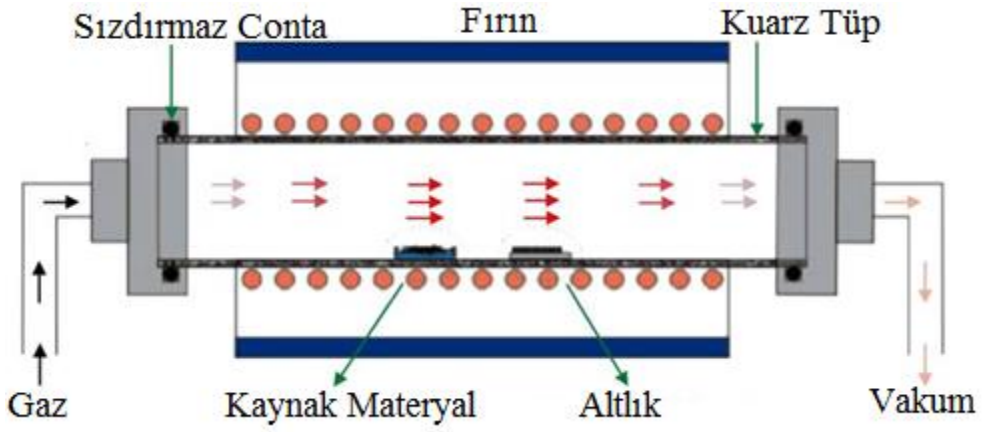
Şekil 1.6 (a) VLS metodu ile üç aşamada nanotel büyütmeyi gösteren şematik bir gösterim (I) alaşım (alloying), (II) çekirdeklenme (nucleation), ve (III) yönsel büyüme (axial growth). Bu üç aşama altın-germanyum (Au-Ge) ikili faz diyagramı için verilmiştir. (b) nanotellerin büyütme süreci boyunca faz ve içeriksel gelişimin gösterilmesi [145].



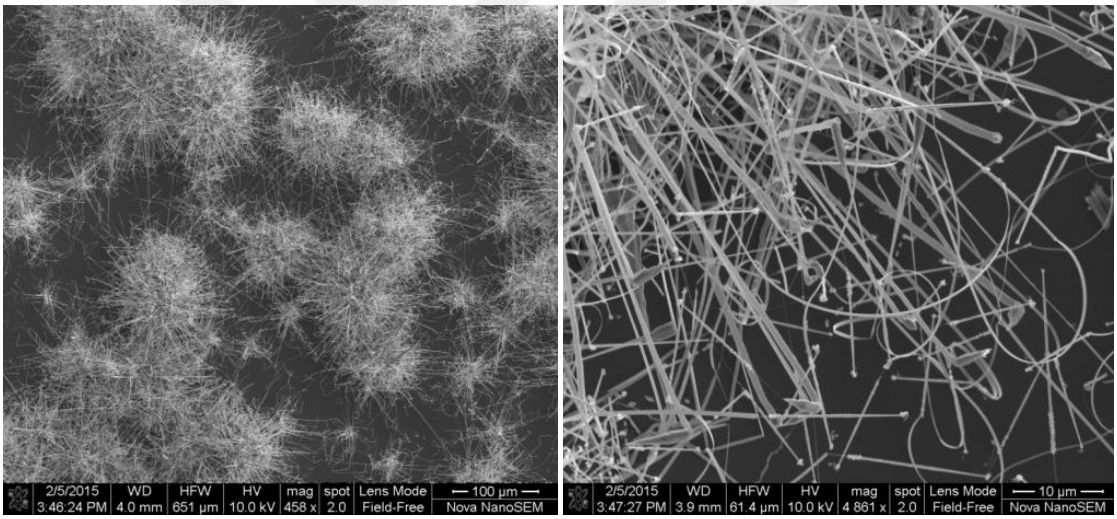
Şekil 1.7 5 nm altın kaplı silikon altlıklar üzerine VLS metodu ile büyüttüğümüz ZnO nanotellerin SEM görüntüleri.

1.1.2.2 Vapor-Solid-Solid (VSS) Metodu

VSS metodu VLS metodu ile neredeyse aynı basamakları içermektedir. VLS metodundan farklı olan tarafı herhangi bir metal katalisitin kullanılmamasıdır [144]. Burada kaynak materyali yüksek sıcaklık bölgesine yerleştirildikten sonra nanotelleri büyütülecek altlık VLS metodunda olduğu gibi, düşük sıcaklık bölgesine yerleştirilir. Daha sonra sıcaklık değerlerinin ayarlanmasından sonra yüksek sıcaklık bölgesinde oluşan buhar direk altlık üzerine birikir. VLS metodu ile karşılaştırıldığında oluşan nanoteller genellikle daha uzun ve daha büyük çaplara sahiptir. Bu yöntemde altlık üzerine gelen ilk buhar katalisit görevi görür dolayısıyla malzeme buharı nerede daha çok yoğunlaşmışsa nanoteller o bölgede daha çok oluşur. Ayrıca bu yöntemde metal katalisit kullanılmadığı için oluşan nanotellerin çapını kontrol etmek çok zordur. Bu metot için kullanılan yüksek sıcaklık fırının ve nanotel büyütme işlemini gösteren bir diyagram şekil 1.8 de verilmiştir. Şekil 1.9 da VSS metodunu kullanarak elde ettiğimiz ITZO nanotellerin SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 1.8 Tipik bir yüksek sıcaklık fırının şematik gösterimi. VLS (ve VSS) metodu ile nanotellerin nasıl büyütüldüğünü özetlemektedir [146].



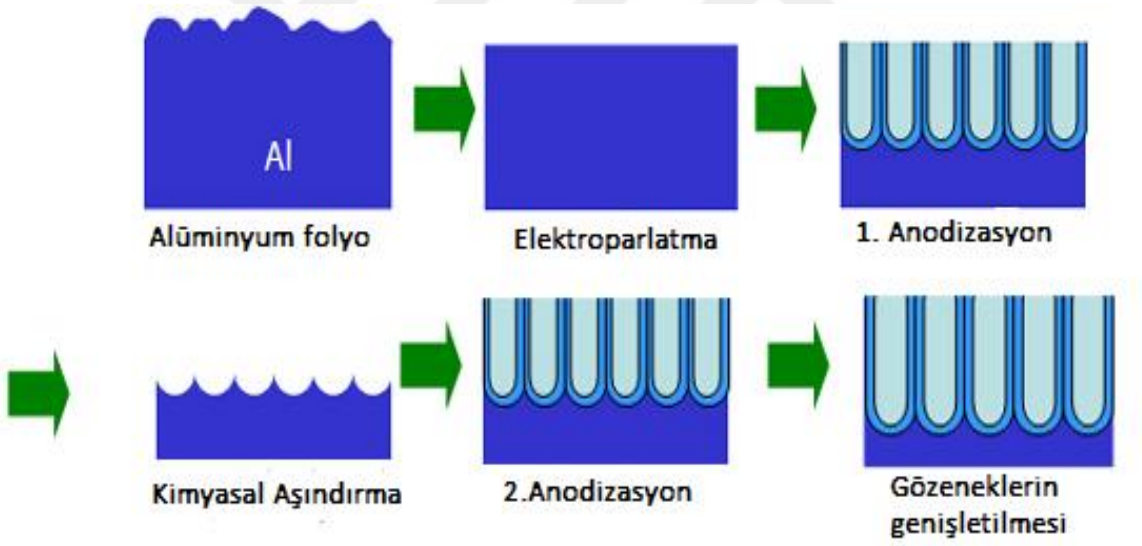
Şekil 1.9 Silikon altlıklar üzerine VSS metodu ile büyütülmüş olduğumuz ITZO nanotellerin SEM görüntüleri.

1.1.2.3 Anodik Alümina Oksit (AAO) Kalıp Destekli Yöntem

AAO kalıp destekli nanotel büyütme yöntemi, bir alüminyum folyo üzerinde anodik yöntemle oluşturulan nano gözeneklerin uygun yöntemlerle (elektrokimyasal yöntem ençok tercih edilen yöntemdir) doldurulması esasına dayanmaktadır. İlk altıgen şekilli anodik alümina oksit kalıplar 1953 yılında rapor edilmiştir [147]. Takip eden yıllarda bu yöntemin temel mekanizmaları ve daha ileri ve daha düzgün altıgen şekilli AAO

kalıpların elde edilmesi ile devam etmiştir [148,149]. Temelde bir alüminyum plakanın çeşitli kimyasal süreçlerden geçirilmesi ile elde edilen bal peteği (hexagonal) şekilli gözeneklerin (pore) dış bir elektrik alan yardımıyla veya ince film büyütme yöntemleri ile içlerinin doldurulması ile bir boyutlu nanoyapıların elde edilebileceği gösterilmiştir [150]. AAO kalıplarla bir boyutlu nano yapıların üretilmesi birden fazla basamaktan oluştuğu için zaman yönünden ekonomik değildir. Ayrıca üretilen kalıpların hassas ve kırılgan olması oldukça dikkat gerektirmektedir.

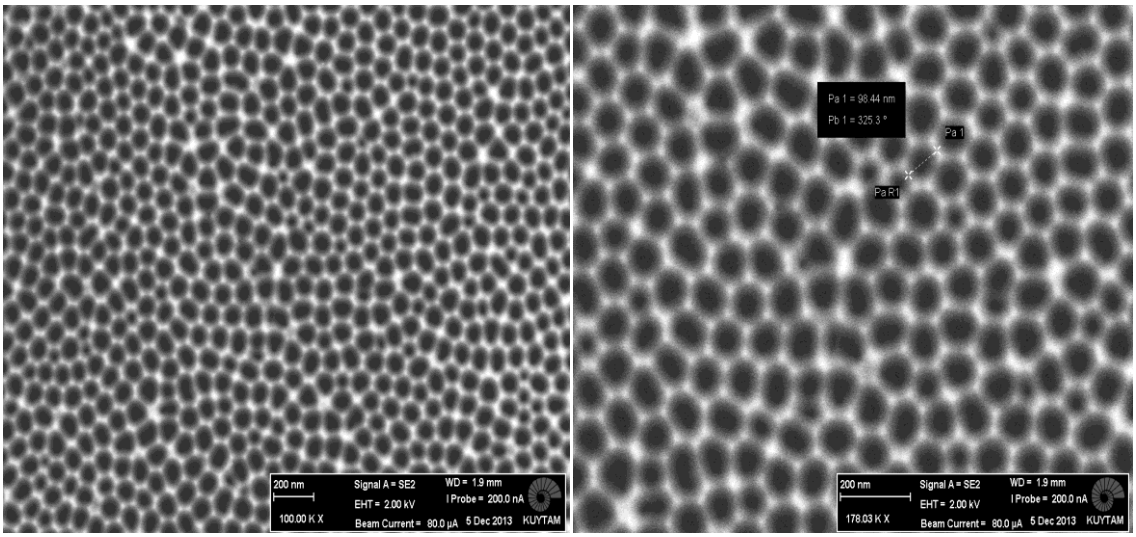
AAO kalıpların oluşturulması temelde iki aşamadan oluşan bir anodizasyon işlemidir. Bu anodizasyon işlemlerinin temel parametreleri oluşan AAO kalıpların morfolojisi ve düzeni üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Bir AAO kalıbın oluşturulması esnasında izlenen basamaklar Şekil 1.10 da verilmiştir. Aşağıda bir AAO kalıbın oluşturulması esnasında izlenen basamaklar ayrıntılı olarak açıklanmıştır.



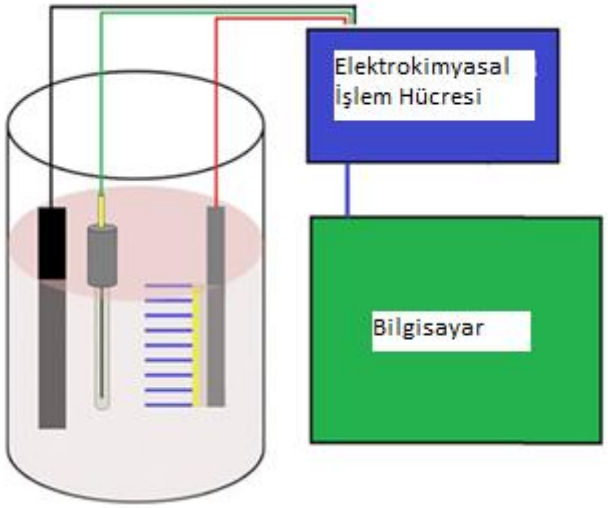
Şekil 1.10 Bir AAO kalıbın oluşturulması esnasında izlenen basamaklar [151].

Anodik alümina oksit kalıplar yüksek saflıktaki (%99.999) alüminyum levhanın çeşitli kimyasal süreçlere tabi tutulması ile elde edilen oksitli bir yapıdır. Yüksek saflıktaki alüminyum folyo önce yaklaşık 500 ^{o}C da 3-4 saat tavlandıktan sonra kimyasal temizleme işlemi ile organik kirlerinden arındırılır. Alüminyum levha temizlendikten sonra yüzey pürüzlülüğünü azaltmak için elektro parlatma işlemine tabi tutulur. Elektroparlatma $HClO_4$:CH_3CH_2OH (1:4) (perklorik asit: etanol) çözeltisi içerisinde

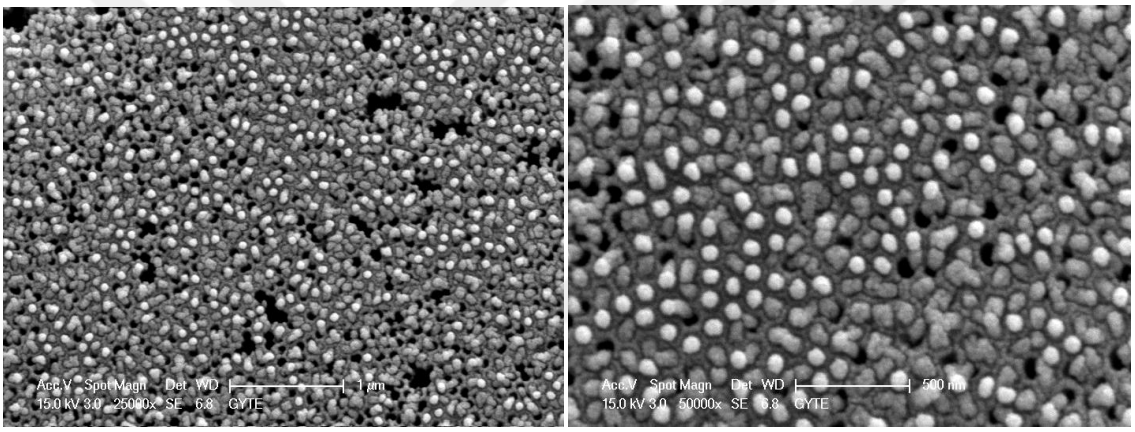
sabit akım altında gerçekleştirilir. Sonra levha deiyonize su ile durulanır. Elektroparlatma işlemi neticesinde alüminyum levhanın yüzeyindeki pürüzler neredeyse tamamen giderilmiş olacaktır. Bu işlemden sonra anodizasyon işlemine geçilir. Anodizasyon işlemi birinci ve ikinci anodizasyon olmak üzere iki aşamalı olarak gerçekleştirilir. Birinci anodizasyon işleminde alüminyum folyo H_2SO_4 (sülfürik asit) içerisinde sabit gerilim altında anodize edilir. Daha sonra oluşan oksit tabakası H_3PO_4 (Fosforik asit) ve H_2CrO_4 (Kromik asit) içerisinde aşındırılır. Bu işlemden sonra ikinci anodizasyon basamağına geçilir. Bu basamakta folyo H_2SO_4 ve $C_2H_2O_4$ (oksalik asit) çözeltileri içerinde 0 ^{0}C da sabit gerilim altında anodize edilir. Bu aşamada istediğimiz kalıplar oluşmuş olacaktır fakat kalıpların alt kısmında bir miktar alüminyum tabakası kalacaktır. Bu tabakayı aşındırmak için kalıp doymuş HgCl (Civa klorür) içerisinde bir süre bekletilip daha sonra de iyonize su içerisinde temizlenerek hazır hale getirilir. Şekil 1.11 de kendi laboratuarımızda yaptığımız AAO kalıpların SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 1.12 de ZnO nanotelleri büyütmek için kullandığımız deneysel düzeneğin şekli ve Şekil 1.13'te ise AAO kalıp kullanılarak üretilen ZnO nanotellerin SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 1.11 Laboratuarımızda yaptığımız bazı AAO kalıpların SEM görüntüleri.



Şekil 1.12 Elektrokimyasal yöntemin şematik gösterimi [152]

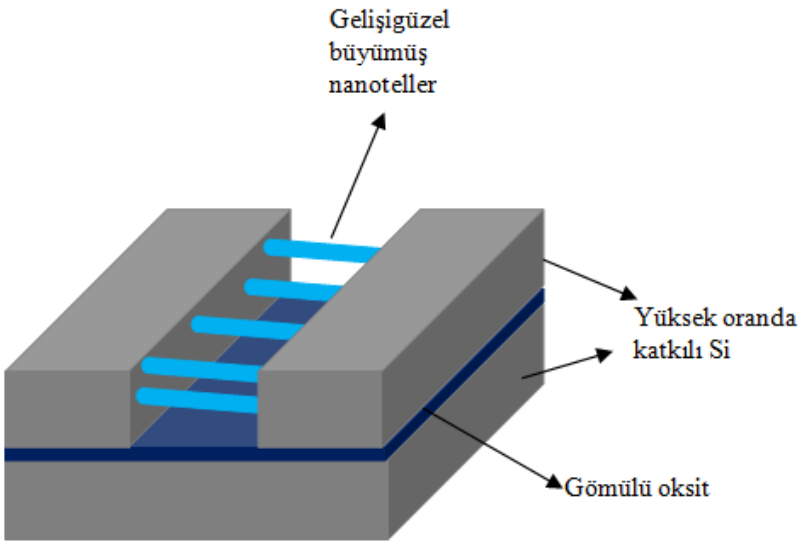


Şekil 1.13 AAO kalıpların içinin ZnO ile doldurulması ile elde edilen nanotellerin SEM görüntüleri. Bu yöntemle nanotel üretmek için 0.01M Zinc nitrate hexahydrate ($Zn(NO_3)_2.6H_2O$) çözeltisi kullanılmıştır. Depozisyon işlemi -1.5V geriliminde ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

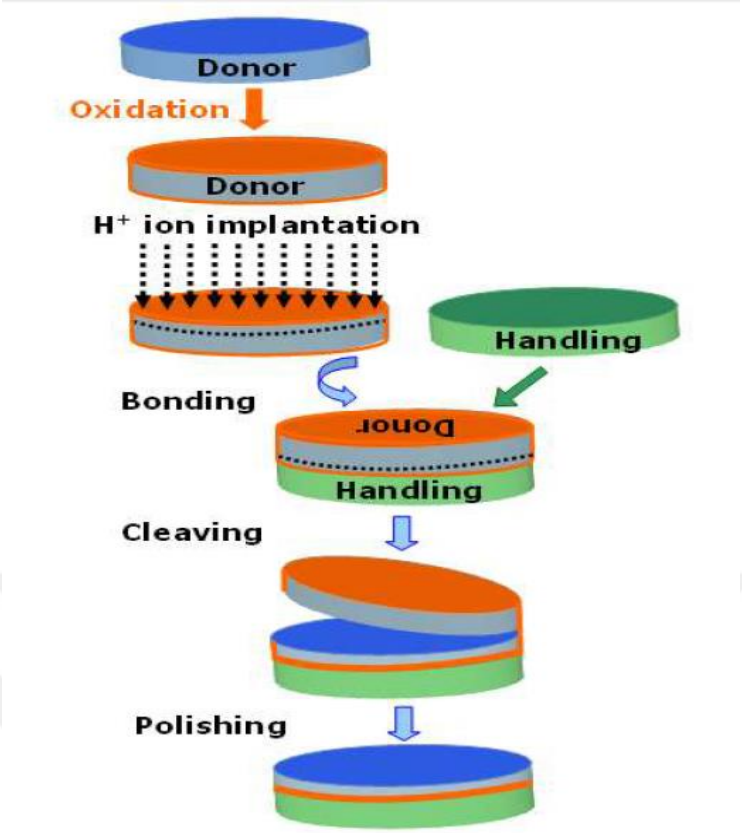
1.1.3 Silicon-on-Insulator (SOI) Altlık

Silicon-on-insulator (SOI) altlık teknolojisi IBM tarafından geliştirilmiş bir teknolojidir. SOI teknolojisi silikon teknolojisi ile karşılaştırıldığında düşük parasitik kapasitansı, 3 boyutlu devrelere uygulanabilirliği, radyasyona karşı direnç gibi birçok önemli avantajlara sahiptir [153]. Bu nedenlerden ötürü SOI teknolojisi yüksek hız, yüksek sıcaklık ve düşük güç elektroniğinde tercih edilmektedir. Tipik bir SOI altlık iki silikon

tabaka arasına bir yalıtkan tabakanın (SiO_2) sandviç edilmesi ile oluşturulur (Şekil 1.14). SOI altlık üretmek için en çok kullanılan yöntemlerden biri "smartcut (veya nanocleave)" teknolojisidir. Bu yöntemin akış diyagramı şekil 1.15 te verilmiştir. Burada önce verici (donor) bir silisyum altlık yüzeyinde yüksek sıcaklıkta SiO_2 büyütülür. Daha sonra bu verici silisyum altlığın içerisine H^+ iyonları aşılanır. Bu H^+ iyonlarının silisyumun içerisinde diffuze olduğu derinlik aşılama enerjisi ile kontrol edilir. Daha sonra ikinci bir silisyum altlık (taban) üzerine monte edilir. H^+ iyonlarının olduğu bölgeden üst silisyum mekanik yolla yarılır. Daha sonra yüzeyde oluşan pürüzlülükler parlatma işlemi ile giderilerek SOI altlığın fabrikasyonu tamamlanmış olur.



Şekil 1.14 Köprü şeklinde büyütülmüş nanotellerin SOI altlık üzerinde 3 boyutlu gösterimi**.**

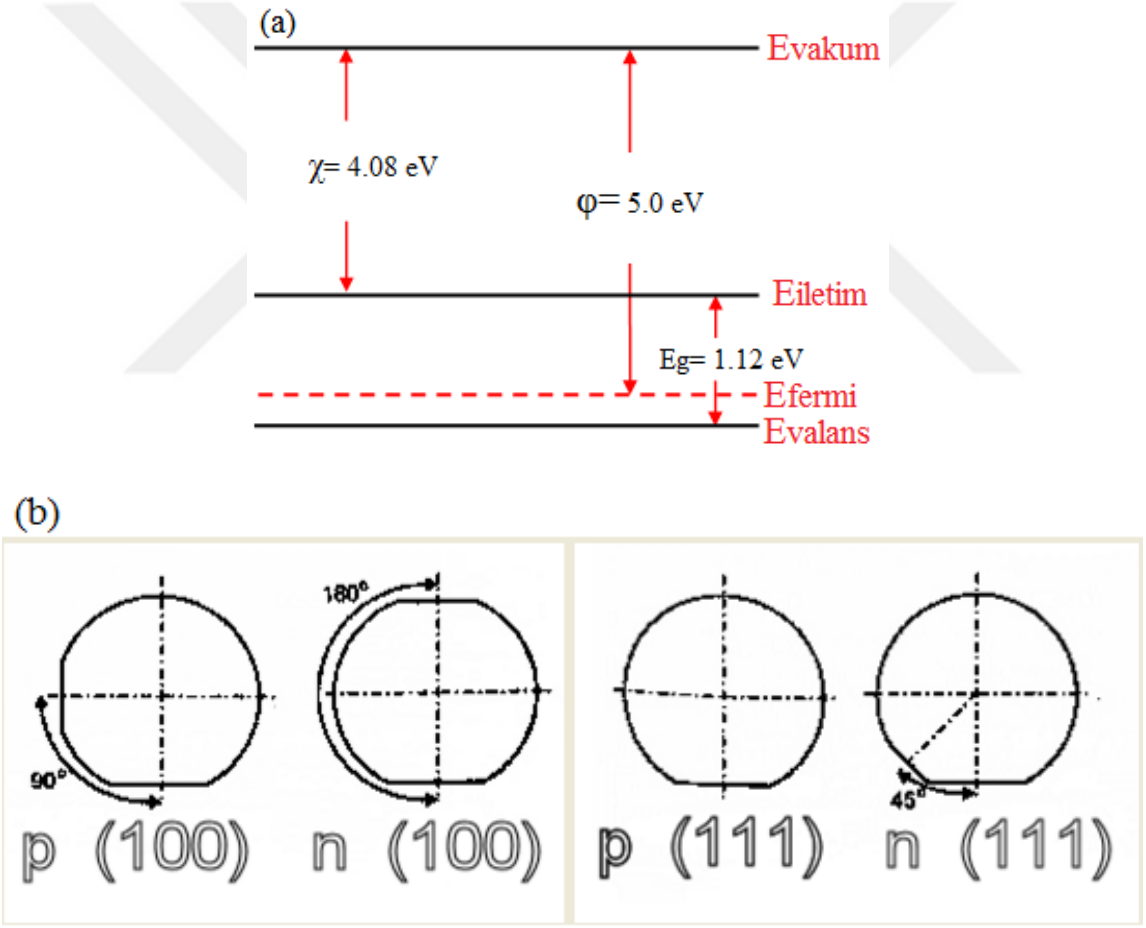


Şekil 1.15 SOI altlık üretiminde kullanılan Smartcut (Nanocleave) yönteminin akış diyagramı [154].

1.1.4 Silisyum (Si) Yarıiletken

Silisyum (Si) yeryüzünde en çok bulunan ikinci elementtir. Doğal halde yeryüzünde bulunmamakla birlikte yeryüzü kabuğunda genelde silika tuzları (SiO_2) şeklinde oldukça bol miktarda bulunmaktadır (Yaklaşık % 28 oranında). Günümüz modern elektronik teknolojisi neredeyse tamamen silisyum üzerine kuruludur ve hâlihazırda herhangi bir alternatifi bulunmamaktadır. Periyodik tablonun dördüncü grubunda yer alan silisyumun atom numarası 14 tür. Silisyum son yörüngesinde 4 elektron bulunduran 4A grubu elementidir. Silisyumun içine 3A grubu elementleri (Bor gibi) katkılandığında oluşan yapıda silisyumun bir elektronuna karşılık bir boşluk (hole) oluşur ve bu sistemin elektron alma eğilimi yüksek olduğu için bu yapı p-tip yarıiletken olarak adlandırılır. Bu yapıda boşluk konsantrasyonu elektron konsantrasyonundan fazladır. Silisyuma 5A grubu elementleri (Fosfor gibi) katkılandığında katkılanan elementin bir elektronu boşta kalır ve bu sistem elektron verme eğiliminde olduğu için

bu yapı da n-tip yarıiletken olarak adlandırılır. Bu yapıda elektron konsantrasyonu boşluk yoğunluğundan daha büyüktür. Katkılanan atomlara alıcı (acceptor) veya verici (donor) atomlar denir [155]. Silisyumun elektron ve deşik yük hareketlilik değerleri sırasıyla yaklaşık 1400 cm^2/V.s ve 400 cm^2/V.s dir. Yüksek yük hareketliliği silisyumun hali hazırda halen entegre devre teknolojisinin vazgeçilmez materyali yapmaktadır. Silisyum direk olmayan band aralığına sahip bir yarıiletken olup band aralığı 1.12 eV (Şekil 1.16 (a)), dielektrik sabiti de yaklaşık 12 dir. Şekil 1.16 da da gösterildiği gibi silisyum genellikle ticari olarak iki farklı yönelimde kesilmektedir. Silisyumun tipine ve yönelimine göre bu kesimler değişmektedir. Ticari ve araştırma amaçlı en çok kullanılan türler şekil 1.16 da verildiği gibidir.



Şekil 1.16 a) p-tip silisyumun enerji-band diyagramı, b) ticari olarak kullanılan silisyum yarıiletken altlıkların tiplerine göre kesim yönelimleri [156].

1.1.5 Organik Yarıiletkenler

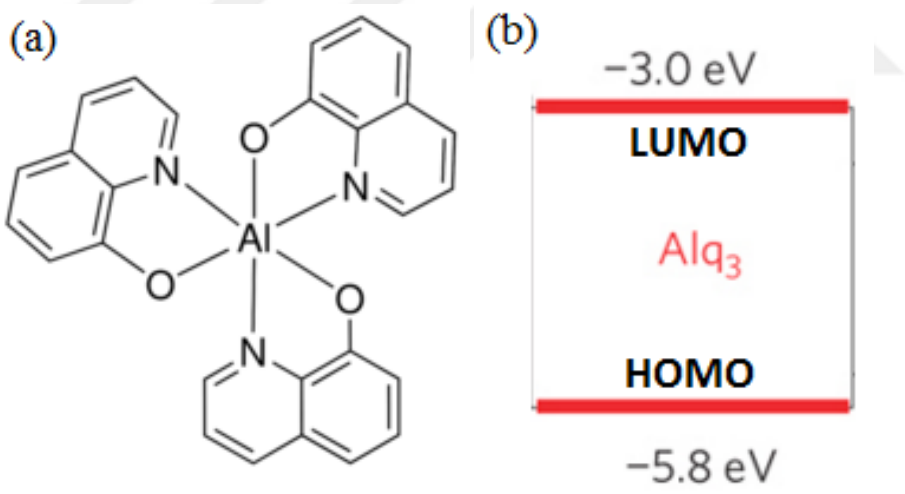
Bir organik materyal olan poliasetilenin katkılanmak suretiyle iletken hale geldiğinin gözlemlenmesinden sonra organik malzemelere olan ilgi artmış ve "*organik elektronik*" olarak isimlendirilen yeni bir araştırma alanın doğmasına neden olmuştur. Bu araştırmacılar yaptıkları bu çalışma ile 2000 yılında nobel kimya ödülünü paylaşmışlardır [157]. Organik materyaller inorganik muadillerine göre bazı avantajlara sahiptir. Bu avantajlar; yüksek ısıl işlem gerektirmemeleri, ucuz altlıkların kullanılmasına olanak sağlamaları (plastik gibi), birim maliyetin inorganiklere göre daha az olması, molekül yapılarında yapılacak küçük değişimlerle oldukça farklı fiziksel özelliklerde malzemelerin sentezlenmesine imkân vermeleri şeklinde sıralanabilir [158]. Bu avantajlar bugün özellikle bükülebilir ve esnek elektronik aygıtların üretimi için önemli bir fırsat sunmaktadır [159]. Organik materyal tabanlı aydınlatma teknolojisi yani organik ışık yayan diyotlar ticari olarak hayatımıza girmiş bulunmaktadır. Hali hazırda piyasada satışa sunulan kavisli ekrana sahip televizyonların ekran teknolojisi buna dayanmaktadır. Bunun yanında organik transistörlerin halen ticarileşmemiş olmasının nedenleri arasında organik materyallerin inorganiklere nazaran daha düşük yük haraketliliğine sahip olması, atmosfer koşullarında kararsız olmaları gibi nedenler sıralanabilir [160]. Sıralanan bu problemlerin çözülebilmesi halinde organik tabanlı elektronik aygıtların hâlihazırda kullanılan inorganiklere rakip olacağı aşikârdır.

Organik materyaller genel itibariyle amorf yapıda olup iletkenlikleri düşüktür. Dolayısıyla bu materyallerin iletkenliklerini iyileştirmek maksadıyla sentez aşamasında molekülün ana iskelet yapısına çeşitli gruplar bağlanmakla birlikte kristal organik moleküllerin sentezi üzerinde de yoğun olarak çalışılmaktadır. Kristallenebilen organik moleküllerin sentezi organik nanotel/çubuk, mikrotel/çubuk veya nano/mikro yapıların üretimini mümkün hale getirmiştir. Bu alanda yapılan çalışmalar literatürde oldukça kısıtlıdır. Bunun en öenmli nedeni kristallenebilen organik moleküllerin sentezinin zor olmasıdır. Organik materyallerden nano/mikro yapıların üretimi ve aygıt uygulamaları ince film aygıt uygulamalarından daha iyi sonuçlar verdiği ileri sürülmüş nitekim yapılan çalışmalar da bunu ispatlamıştır [30]. Bunun nedeni nano/mikro yapılı aygıtlarda yük taşıyıcılarının hareketini sınırlayan tanecik sınırlarının (grain boundary)

etkisinin ince filmlere nazaran daha küçük olmasıdır [30].

1.1.5.1 Tris (8-hydroxyquinolinato) aluminium (Alq3)

Alq3 küçük moleküllü organik bir malzemedir. Alq3'ün moleküler yapısı şekil 1.17 (a) da enerji seviyeleri de şekil 1.17 (b) de gösterilmiştir. Özellikle organik ışık yayan diyotlarda kullanılan bu molekül, görünür bölgede yeşil ile kırmızı renkler arasındaki dalga boylarında ışık yaymaktadır [161,162]. Alq3 molekülü kullanılarak üretilen ilk OLED ten bu yana bu molekül optoelektronik uygulamalarında ciddi manada kullanılmaya başlanmıştır [163]. Alq3 molekülü kloroform içerisinde iyi çözünebildiğinden bu molekülden ince film veya çözelti bazlı nano/mikro tel büyütmek oldukça kolaydır. Bunun yanında termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak da ince film yapmaya oldukça uygun bir moleküldür. Alq3 molekülü ince film halinde oldukça düşük bir yük hareketliliğine sahiptir [164]. Nanotel veya mikrotel halinde sahip olduğu yük hareketliliği hakkında literatürde herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

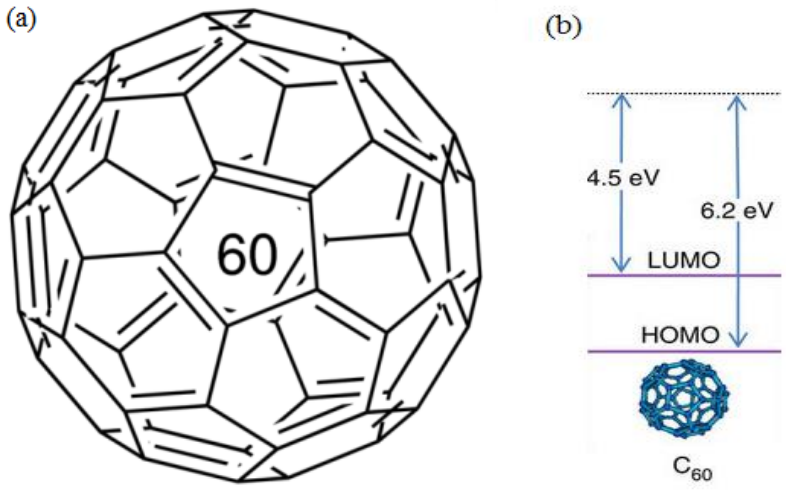


Şekil 1.17 a) Alq3 molekülünün moleküler yapısı ve b) enerji seviyeleri [165,166].

1.1.5.2 Fulleren (C_{60})

Fulleren (C_{60}) 1960 lı yıllarda bir grup kimyacı tarafından keşfedilmiş olup bu keşif 1985 yılında bu araştırmacılara nobel kimya ödülünü kazandırmıştır [167]. Fulleren

karbon atomunun bilinen allotroplarından birisidir. Bilindiği gibi karbonun birçok allotropu mevcut olup bunlar; grafit, karbon nanotüp, grafen, C_{60}, C_{70} vb. gibi yapılardır. Karbonun bu allotroplarının keşfi ile beraber aygıt uygulamaları üzerinde çok ciddi çalışmalar yapılmış olup halen artan bir ivme ile devam etmektedir [168-170]. 2010 yılında nobel fizik ödülüne layık görülen çalışmalar grafen üzerine yapılan çalışmaları içermekte idi. Fulleren materyalinin literatürde güneş pillerinde [171], alan etkili transistörlerde [172], ışık yayan diyotlarda [173] kullanıldığı bilinmektedir. Fulleren organik çözücülerde çok iyi çözünmeyen veya bu molekülü çözebilecek sınırlı çözücülerin olmasından dolayı çözelti bazlı çalışmalarda ince film büyütmek ile ilgili zorluklarla karşılaşılabilir. Özellikle çözelti bazlı nano/mikro yapıların oluşturulması durumunda kullanılan çözücülerin (klorobenzen gibi) yüksek kaynama noktasına sahip olmaları karşılaşılan bir başka zorluktur. Literatürde yapılan çalışmalardan bildiğimiz kadarıyla C_{60} nanotel aktif katmanlı transistörlerde elde edilen maksimum yük hareketliliğinin 11 cm^2 /V.s değerine ulaştığı rapor edilmiştir [102]. Fullerenin molekül yapısı ve enerji band diyagramı sırasıyla şekil 1.18 (a) ve (b) de verildiği gibidir.

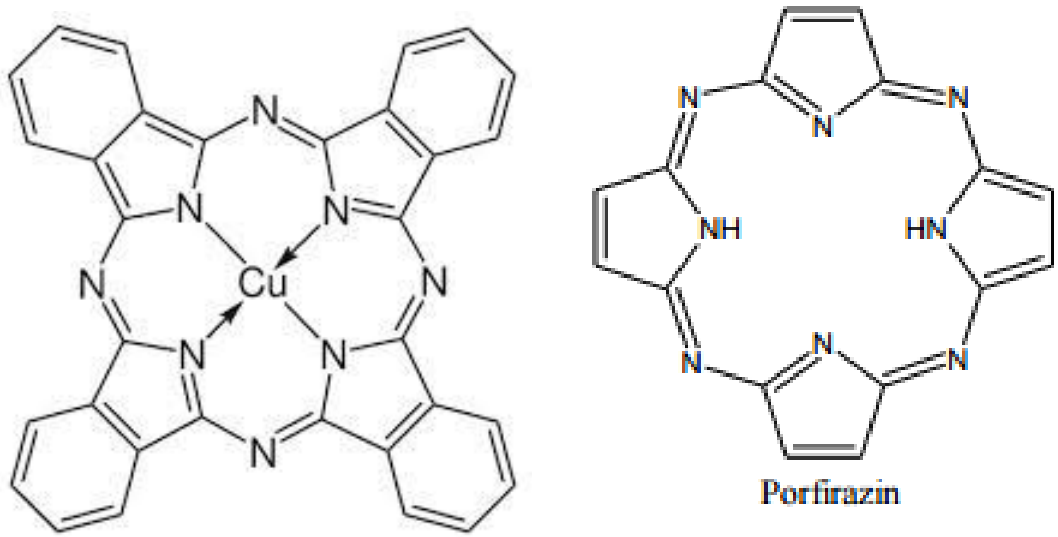


Şekil 1.18 a) Fulleren molekülünün molekül yapısı ve b) enerji band diyagramı [174,175].

1.1.5.3 Ftalosiyaninler (Pc) ve Porfirazinler (Pz)

Ftalosiyaninler 1900 lü yıllarda keşfedildiğinden bu yana dikkat çeken organik malzeme gruplarından birini oluşturmuştur. Genellikle mavi-yeşil renkli toz halinde sentezlenirler. Özellikle elektron transfer özelliklerinden dolayı üzerinde yoğun bir şekilde çalışılan organik malzemeler arasında yeralır. Ftalosiyaninler moleküler elektronik, optoelektronik ve fotonik gibi birçok alanda uygulama alanı bulmaktadırlar. Ftalosiyaninler metalli ve metalsiz olmak üzere ikiye ayrılır. Metalli fitalosiyaninler MPc ve metalsizler ise H2Pc olarak sembolize edilirler [176,177]. Porfirazinler (Pz) 1930 lu yıllarda keşfedilmiş olup bu yapılar klorofil, hemoglobin miyoglobin gibi yapıların fonksiyonel kısımlarında yeraldığından dolayı ilgi çekici organik bileşiklerdir. Fitalosiyaninlerle karşılaştırıldığında daha iyi çözünürlük göstermeleri nedeniyle son yıllarda artan bir hızla üzerinde çalışılan moleküller arasındadır. Yine fitalosiyaninler gibi metalli (MPz) ve metalsiz (H2Pz) olmak üzere iki grupta toplanabilirler. Pekçok yönüyle fitalosiyaninlere benzemekle beraber metalsiz porfirazinler porfirin ve fitalosiyanin arasında özellik taşırlar.

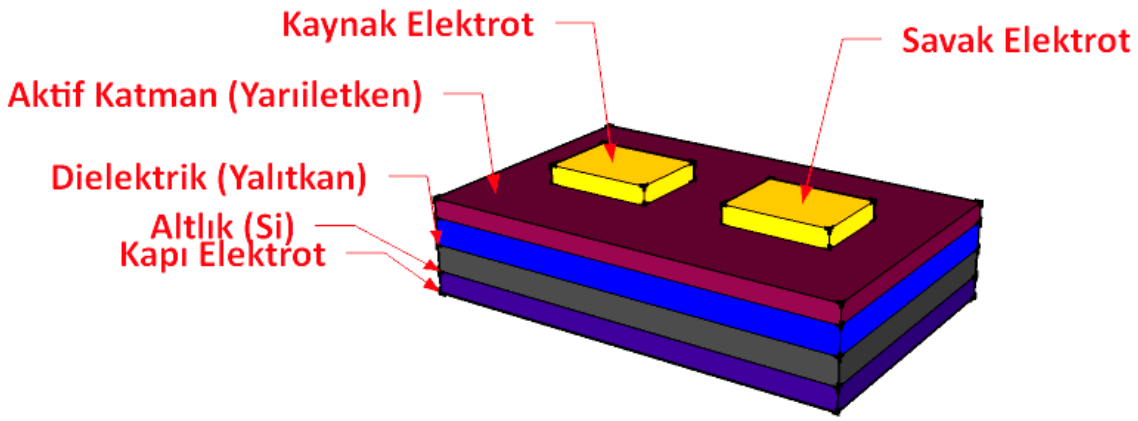
Şekil 1.19 da metalli ftalosiyanin ile metalsiz porfirazine ait moleküler yapı verilmiştir.



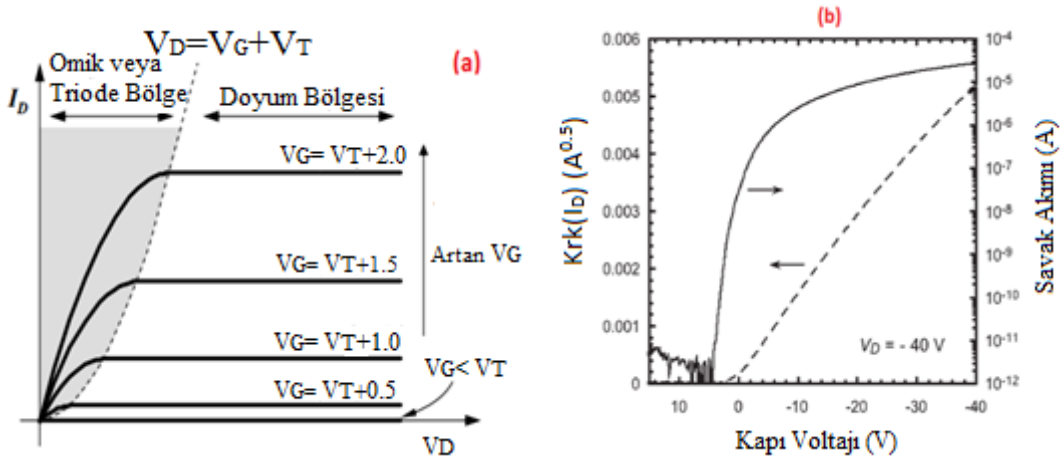
Şekil 1.19 Metalli ftalosiyanin ve metalsiz porfirazin moleküllerine ait molekül yapılar.

1.1.6 Alan Etkili Transistörler (FET)

Transistörler modern elektronik devrelerin temel yapı taşlarından biridir. Transistörler modern elektronik devrelerde genellikle sinyal yükselteçler, elektronik kapı ve anahtarlama olarak kullanılmaktadır. Günümüz modern entegre devrelerin baskın elemanı olan alan etkili transistörler ilk 1930 yılında Lilienfeld tarafından Bell Laboratuarlarında keşfedilmiş ve ilk teorik tanımları Shockley tarafından 1952 yılında ortaya konulmuştur [178,179]. FET ler genel itibariyle iki grupta toplanabilir: ilki eklem alan etkili transistör, ikincisi metal-oksit- yarıiletken alan etkili transistör dür. Bir alan etkili transistör temelde üç kısımdan oluşmaktadır: ilki aktif katman olarak adlandırılan ve kullanılan malzemenin cinsine bağlı olarak organik veya inorganik malzeme grubuna ait ince film şeklinde büyütülmüş bir yarıiletken tabaka, ikincisi transistörün kaynak (source), savak (drain) ve kapı (gate) elektrotları ve üçüncüsü yarıiletken aktif katman ile gate elektrotunu birbirinden izole eden yalıtkan katmandır [180]. Alan etkili transistörler genel itibariyle iki farklı akım-gerilim ölçümü ile karakterize edilirler: bunlardan ilki çıkış karakteristiği (output characteristic) denilen ve sabit bir kapı gerilimi için kaynak-savak akımının (I_D) kaynak-savak gerilimi (V_D) ile değişiminin ölçülmesini, ikincisi ise transfer karakteristiği denilen ve sabit bir kaynak-savak gerilimi için I_{SD} akımının kapı gerilimi ile değişiminin ölçümünü kapsar. Bir alan etkili transistörün şematik gösterimi Şekil 1.20 de, çıkış ve transfer karakteristiği de Şekil 1.21 de verilmiştir.

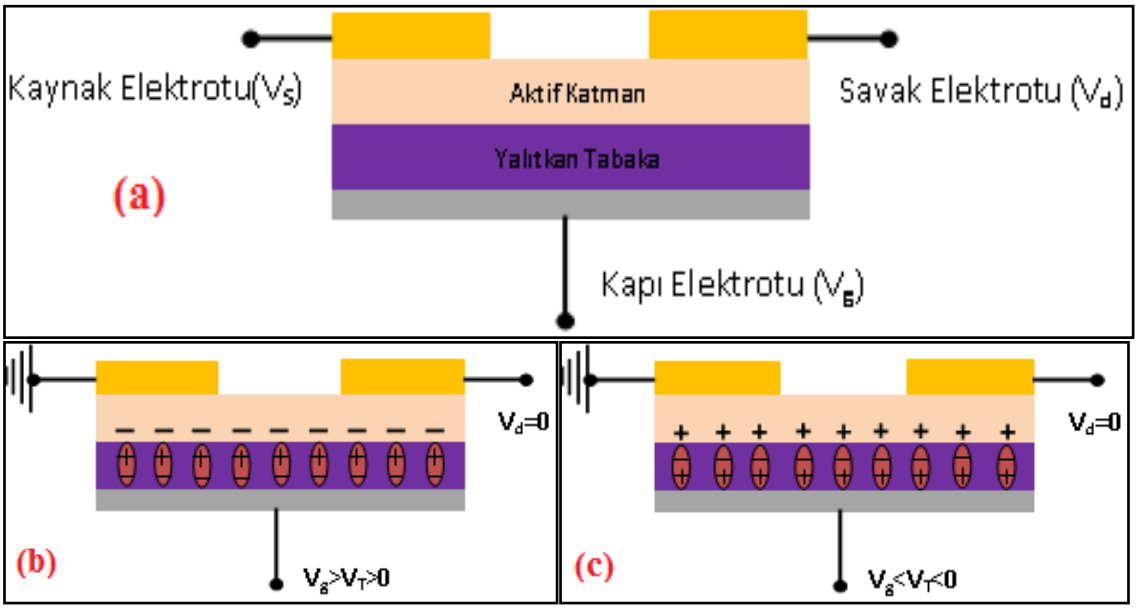


Şekil 1.20 Alan etkili transistörün yapısının üç boyutlu şematik gösterimi.



Şekil 1.21 n-kanallı alan etkili transistörün a) çıkış ve b) transfer karakteristikleri [181,182].

Alan etkili transistörlerde temel hedef kaynak-savak akımının (I_D) kapı elektrotuna uygulanan elektrik alan ile kontrol edilmesidir. Bir FET'de kapı ile kaynak arasına bir gerilim uygulandığında, bu elektrik alan öncelikle yalıtkan dielektrik tabaka içerisinde yüklerin kutuplanmasını yani dipoller oluşturur ve bu dipoller transistörün dielektrik-yarıiletken aktif katman arayüzeyine yakın kısımda yarıiletken aktif katman içerisinde kulomb kuvveti yardımıyla yük taşıyıcılarının yığılmasını (accumulation) sağlar (Şekil 1.22 (b,c)).

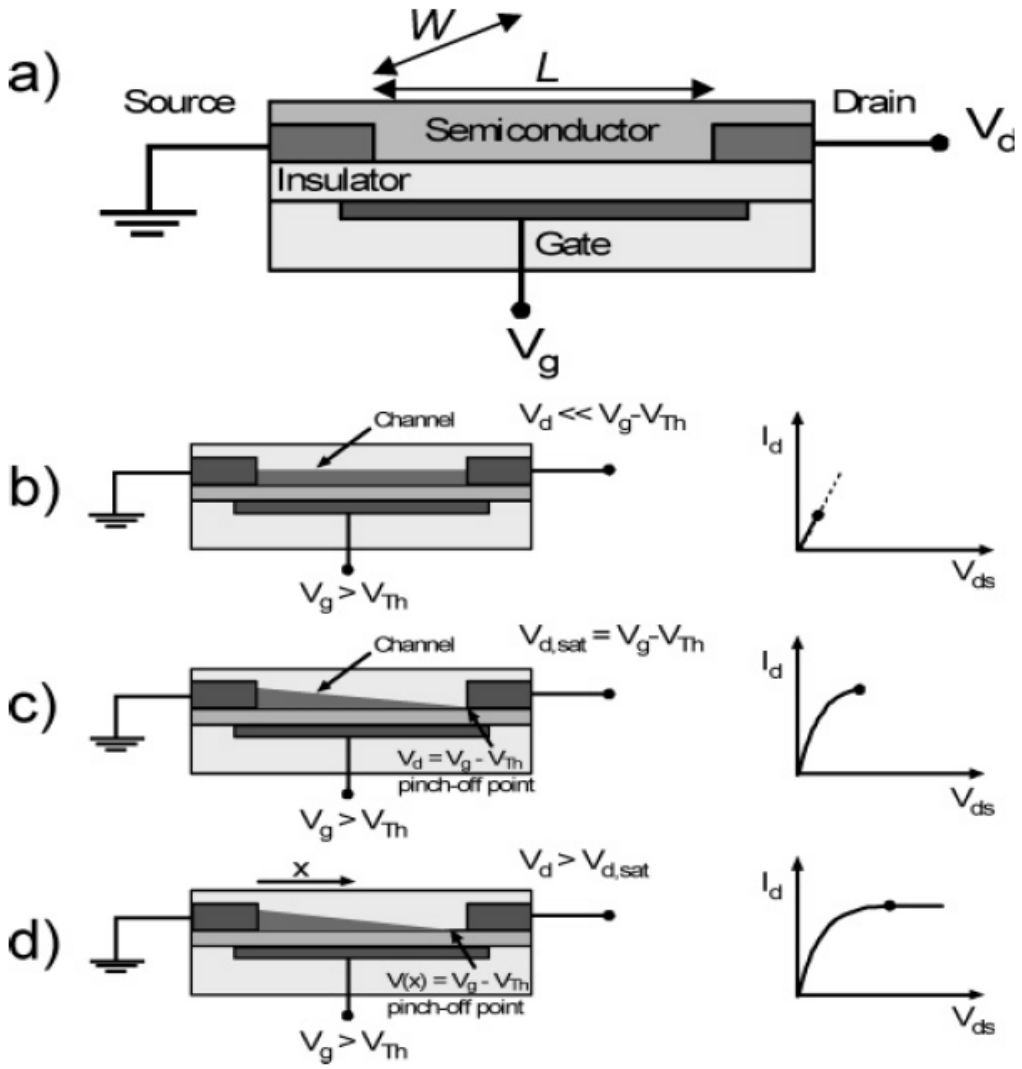


Şekil 1.22 a) Alan Etkili Transistörün elektrotlarına gerilim uygulanmamış haldeki iki boyutlu görüntüsü. b) Sadece kapı elektrotuna pozitif bir gerilim uygulandığında

yalıtkan tabaka içerisinde dipollerin oluşumu ve yarıiletken tabaka içerisinde n-tipi transistör kanalının oluşumu. c) Sadece kapı elektrotuna negatif bir gerilim uygulandığında yalıtkan tabaka içerisinde dipollerin oluşumu ile yarıiletken tabaka içerisinde p-tipi transistör kanalının oluşumu.

Yığılan bu yükler yarıiletken aktif katmanın bu kısmını daha iletken hale getirir. Dolayısıyla bu kısım transistörün iletim kanalı (conduction channel) olarak adlandırılır [182] (Şekil 1.22 b,c). Kapı elektrotuna uygulanan gerilimin değeri iletim kanalı içerisinde yığılan yüklerin miktarını değiştirecektir. Dolayısıyla transistörün kaynak-savak elektrotları arasında akan akımın değeri kapı elektrotu tarafından kontrol edilir. Bu olay ***"alan etkisi (field effect)"*** olarak adlandırılır. Yarıiletken aktif katman olarak kullanılan materyaller bu iletim kanalından ya elektronların (n-tip yarıiletken) ya da hollerin (p-tip yarıiletken) geçişine izin verirler. Yarıiletkenlerin iletim kanalı boyunca yığılan yük taşıyıcıların tipi aynı zamanda transistörün kanalının hangi tip olduğunu belirler. Kaynak elektrotuna herhangi bir gerilim uygulanmamakla birlikte (ya da topraklanır) bu elektrot transistörün yük taşıyıcılarının kaynağı olarak görev yapmaktadır. Transistörlerin tipine bağlı olarak p-kanallı transistör için yarıiletken aktif katman içinde holleri iletim kanalına yığmak için kapı (ve savak) elektrotuna negatif işaretli gerilim uygulanırken (Şekil 1.22 (c)) n-kanallı transistörlerde yarıiletken aktif katman içinde elektronları iletim kanalına yığmak için kapı (ve savak) elektrotuna pozitif işaretli gerilim uygulanır (şekil 1.22 (b)). İletim kanalının oluşması için gate elektrotuna uygulanan gerilimin minimum değeri eşik voltajından (threshold voltage (V_T)) büyük olmak zorundadır. Kapı elektrotuna V_G gerilimi uygulandığında iletim kanalına düşen etkin gerilimin değeri (V_G-V_T) değeri kadardır. Transistörün kapı elektrotuna uygulanan bu gerilim savak elektrotuna gerilim uygulanmadığı durumda iletim kanalı içerisinde ve tüm kanal boyunca düzgün bir dağılıma sahip yük taşıyıcılarının oluşmasını sağlar (şekil 1.23 (b)). Bu düzgün yük dağılımı savak elektrotuna uygulanan gerilim ile kanal boyunca değişmeye başlar. Kaynak elektrotundan savak elektrotuna doğru bu dağılımın yoğunluğu azalmaya başlar (Şekil 1.23 (c)). Savak elektrotuna uygulanan V_{SD} gerilimi kanala düşen etkin gerilim değerinden (V_G-V_T) küçük olduğu (V_D<V_G-V_T) zaman ölçülen akım-gerilim grafikleri lineerdir (şekil 1.23 (b)). Transistörün çıkış karakteristiğinde bu bölge lineer, omik veya

triode bölge olarak adlandırılır (Şekil 1.21 (a)). Savak elektrotuna uygulanan gerilim, kanala düşen etkin gerilime eşit veya büyük olduğu anda ($V_D \geq V_G$-V_T) kaynak-savak akımı doyuma ulaşır. Bunun nedeni savak elektrotundan itibaren yarıiletken aktif katman içerisinde bir tükenim bölgesinin (depletion region) veya yükten arındırılmış bir bölgenin oluşmaya başlamasıdır. Bu yükten arındırılmış bölgenin oluşmasının temel sebebi bu noktaya düşen toplam potansiyel farkın (kapı ve savak elektrotundan kaynaklanan potansiyeller) 0 (sıfır) olmasıdır. Bu noktada kanal kıstırılmaya (pinch-off) başlanır yani yük yoğunluğu bu bölgede sıfırlanır (Şekil 1.23 (c)). Artık bu drain gerilimi değerinden itibaren kaynak-savak akımı doyuma ulaşmaya başlar ve akım sabit bir değere ulaşır. Transistörün çıkış karakteristiğinde bu bölge doyum bölgesi (saturation region) olarak adlandırılır (Şekil 1.21 (a)). Doyum bölgesinde değişen kapı voltajına bağlı olarak kaynak-savak akımı değişim göstermektedir. Transistörün kaynak-savak akım değeri doyuma ulaştıktan sonra artık drain geriliminden bağımsız hale gelir. Akım doyum noktasına ulaştıktan sonra savak gerilimi arttırılmaya devam edilirse akımda herhangi bir değişiklik olmayacaktır [182]. Savak geriliminin arttırılması tükenim bölgesinin genişlemesine yani kıstırılma noktasının kaynak elektrotuna doğru kaymasına neden olacaktır (Şekil 1.23 (d)). Bu durumda transistörün kanal uzunluğu değişecektir. Bu durum literatürde ***"kanal modülasyonu (channel modulation)"*** olarak adlandırılır. Eğer tükenim bölgesinin genişliği Δl ise yani kıstırılma noktası savak elektrotundan Δl kadar uzaklaşmışsa kanalın yeni uzunluğu (l-Δl) olarak alınmalıdır.



Şekil 1.23 a) Alan etkili transistörün iki boyutlu gösterimi, b) lineer bölge, c) kıstırılma (pinch-off), d) doyum bölgesi [183].

1.1.6.1 Alan Etkili Transistör Parametrelerinin Matematiksel Çıkarımları

Alan etkili transistörlerin bazı temel parametreleri aşağıda tanımlanmıştır. Bu parametrelerden bazıları ince film transistörler için bazıları da nanotel aktif katmanlı transistörler için elde edilecektir [180,183-185].

Transistörün iletim kanalında yığılan yüklerin miktarı yalıtkan tabakanın kapasitesi ile kanala düşen etkin potansiyele bağlıdır ve bu yük miktarı;

$$Q = C_i(V_G - V_T) \tag{1.1}$$

ifadesi ile verilir. Burada Q kanala yığılan yük miktarı, C_i kapı dielektrik tabakanın kapasitesi, V_G kapı gerilimi ve V_T eşik voltajıdır. Bu ifade savak elektrotuna herhangi bir gerilim uygulanmadığı zamanki yük ifadesidir. Savak elektrotuna herhangi bir gerilim uygulandığında kanala düşen potansiyel ve dolayısıyla yük dağılımı da değişir. Bu durumda yeni yük ifadesi;

$$Q = C_i(V_G - V_T - V(x)) \tag{1.2}$$

ile verilir. Burada $V(x)$ savak elektrotunun kanal içerisinde oluşturduğu potansiyeldir. Kaynak-savak akımı için (I_D) ve elektrik alan (E) ifadeleri aşağıdaki eşitlikler ile verilir.

$$I_D = W\mu QE \tag{1.3}$$

$$E = \frac{dV}{dx} \tag{1.4}$$

Burada W transistörün kanal genişliği E elektrik alan, μ yük hareketliliğidir. Yük ve elektrik alan ifadesi (I_D) akımı ifadesinde yerine yazılırsa;

$$I_D dx = W\mu C_i(V_G - V_T - V(x))dV \tag{1.5}$$

ifadesi elde edilir. Eşitliğin her iki tarafının integrali alınırsa;

$$I_D = \frac{WC_i\mu}{l}\left(V_G - V_T - \frac{V_D}{2}\right)V_D \ , \qquad V_D < V_G - V_T \ \text{(lineer bölge)} \tag{1.6}$$

ifadesi elde edilir. Buradaki l kanal uzunluğudur. Bu ifade lineer bölge için akım ifadesidir. Doyum bölgesi için akım ifadesini elde etmek için eşitlik 1.6 da kaynak-savak gerilimi yerine;

$$V_D = V_G - V_T \tag{1.7}$$

yazılırsa doyum bölgesi için akım ifadesi;

$$I_D = \frac{WC_i\mu}{2l}(V_G - V_T)^2 \ , \qquad V_D \geq V_G - V_T \quad \text{(doyum bölgesi)} \tag{1.8}$$

olarak elde edilir.

Alan etkili transistörler eğer ince film şeklinde imal edilirlerse dielektrik tabakanın kapasite ifadesi paralel plakalı kapasite ile verilir.

Transistörün aktif katmanının nanotellerden oluşması durumunda, kapasite ifadesi silindirik bir telin kapasitesi olarak düşünülür ve aşağıdaki gibi verilir;

$$C_i = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{Cosh^{-1}\left(\frac{R+h}{R}\right)} \quad \text{(F)} \tag{1.9}$$

Burada R, h ve ε_r sırasıyla nanotelin yarıçapı, dielektrik tabakanın kalınlığı ve nanotelin dielektrik sabitidir. Aşağıdaki matematiksel eşitliğin yardımıyla silindirik kapasite ifadesi yeniden yazılabilir.

$$Cosh^{-1}(x) = ln\left(x + \sqrt{x^2 - 1}\right) \tag{1.10}$$

$x \gg 1$ için ise bu ifade aşağıdaki gibi yazılabilir;

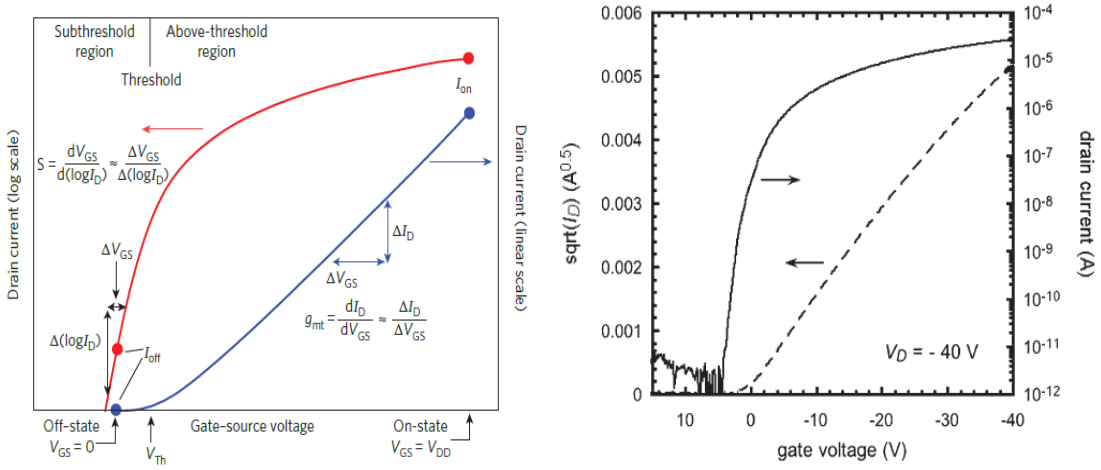
$$Cosh^{-1}(x) \approx ln(2x) \tag{1.11}$$

özdeşliği kullanılarak denklem (1.11) $h \gg R$

$$C_i = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r l}{ln\left(\frac{2h}{R}\right)} \tag{1.12}$$

olarak yeniden yazılabilir.

Alan etkili transistörü tanımlayan parametreler genel itibarıyla transistörün transfer karakteristiğinden elde edilir. Şekil 1.24 te de gösterildiği gibi bu parametrelerden bazıları grafiklerin üzerinde belirtilmiştir.



Şekil 1.24 Alan etkili Transistörlerin transfer karakteristikleri ve temel parametreleri [186,182].

Bir transistörün en önemli parametrelerinden ilki yük haraketliliğidir (μ). Bir malzemenin yük haraketliliği o malzemenin bir elektrik alan altındaki yüklerinin hareketinin bir ölçüsüdür. Yükler elektrik alan altında sürüklenme hareketi yaparlar ve sürüklenme hızı ile yük haraketliliği arasında

$$V_d = \mu E \tag{1.13}$$

ilişkisi vardır. Burada V_d sürüklenme hızını temsil etmektedir. Bu eşitliğe göre yük haraketliliğinin birimi ($\frac{cm^2}{V.s}$) olarak bulunur. Transistörün yük haraketliliğini elde etmek için doyum bölgesi akımının kapı voltajına göre türevinin alınması gerekmektedir. Ayrıca Şekil 1.24 te transfer karakteristiğinin lineer bölgesinin eğiminden yük haraketliliği hesaplanabilir. Buna göre yük hareketliliği,

$$\mu = \left(\frac{2l}{WC_i}\right)\left(\frac{d\sqrt{I_D}}{dV_G}\right)^2 \tag{1.14}$$

ifadesi ile verilir. Eşitlik (1.14) ifadesi genellikle ince film FET'ler için kullanılan matematiksel bir ifadedir. Nanotel aktif katmanlı FET'ler için yük haraketliliğinin hesaplanması için literatürde kullanılan matematiksel ifadenin çıkarılışı aşağıda ara işlemleri birlikte verildiği gibidir. Eşitlik 1.18 de verilen Ci kapasite değerinin birimi F/cm^2 dir ve bu ifade incefilm FET'ler için kullanılmaktadır. Nanotel aktif katmanlı

FET'ler için yazdığımız kapasite ifadesi için eşitlik 1.14 te verilen ifade kullanılacaktır.

Eşitlik 1.8 in türevi alınıp yük haraketliliği değeri yalnız bırakılırsa aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\mu = \left(\frac{dI_D}{dV_G}\right)\frac{l}{WC}\frac{1}{(V_G - V_T)} \tag{1.15}$$

Buradaki kapasite değeri C birim yüzey başına kapasite değeridir ve birimi F/cm^2 dir.

$$C = \frac{C_i}{W.l}\,(\mathrm{F/cm^2}) \tag{1.16}$$

ifadesi yazılmalıdır. Çünkü C_i ifadesi toplam kapasite değeridir ve birimi Farad olarak verilmektedir.

C_i için yazdığımız ifadeyi ve doyum bölgesi için $V_D = V_G - V_T$ ifadesini eşitlik 1.15 te yerine yazarsak aşağıdaki ifadeyi elde ederiz;

$$\mu = \left(\frac{dI_D}{dV_G}\right)\frac{l^2}{C_i V_D} \tag{1.17}$$

Eşitlik (1.17) ifadesi aktif katmanı nanotellerden oluşan FET'lerde yük hareketliliğini hesaplamak için kullanılan matematiksel eşitliktir [184]. Eğer ürettiğimiz nanotel aktif katmanlı aygıtta N tane nanotel varsa toplam kapasite ifadesi $C_{toplam}=NxC_i$ olarak alınır.

Transistörün diğer önemli parametrelerinden biri eşik voltajıdır (V_T). Bu değer transistörü çalıştırmak (on) için gereken minimum gerilim değeridir. Bu gerilim değerinin altındaki gate gerilimlerinde transistör çalışmaz (cut-off). Doyum bölgesindeki akım denkleminde kaynak-savak akımının değeri sıfır alındığında eşik voltajı bu değer için uygulanan kapı voltajına eşit olur. Şekil 1.24 te verilen transfer karakteristiğinin lineer bölgesinin gerilim eksenini kestiği nokta bize eşik voltajını verecektir. Eşik voltajı ile dielektrik tabakanın kapasite değeri arasında ters orantılı bir ilişki vardır. Dolayısıyla eşik voltajını düşürmek için dielektrik tabakasının kapasite değeri arttırılabilir. Bunun için ya dielektrik sabiti yüksek materyaller kullanılmalı veya dielektrik tabakanın kalınlığının küçültülmesi mantıklı olacaktır.

Transistörün önemli parametrelerinden bir diğeri eşik altı salınımı (subthreshold swing (SS)) olarak tanımlanan transistörün kapalı (off) durumdan, açık (on) duruma ne kadar

keskin bir şekilde geçtiğidir. Bu keskinlik log (I_{SD}) vs V_{GS} grafiğinde eşik voltajının altında kalan lineer bölgenin eğiminden elde edilir. Eğim ne kadar büyükse transistörün SS değeri o kadar küçük demektir. SS nin değeri (V/decade) veya (mV/decade) olarak verilir. SS nin matematiksel ifadesi aşağıda verildiği gibidir.

$$SS = \frac{dV_G}{d(log(I_D))} \tag{1.18}$$

SS değerini etkileyen en önemli parametrelerden biri yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde bulunan arayüzey durumlarının varlığıdır. SS ile arayüzey durumları arasındaki ilişki aşağıda verildiği gibidir;

$$SS = \ln(10)\frac{kT}{q}\left(1 + \frac{C_D + C_{it}}{C_g}\right) \tag{1.19}$$

Burada, k boltzman sabiti, T mutlak sıcaklık, q elektronun yükü, C_D tükenim bölgesinin kapasitansı, C_g yalıtkan dielektrik tabakanın kapasitansı ve C_{it} arayüzey durumlarından kaynaklanan kapasitans değeridir. Transistörlerde bir diğer önemli parametre geçiş iletkenliğidir (transconductance, g_m). Geçiş iletkenliği transistörün çıkış akımı ile giriş gerilimi arasındaki ilişkidir ve transistörün kazanımı olarak da düşünülebilir. Geçiş iletkenliği

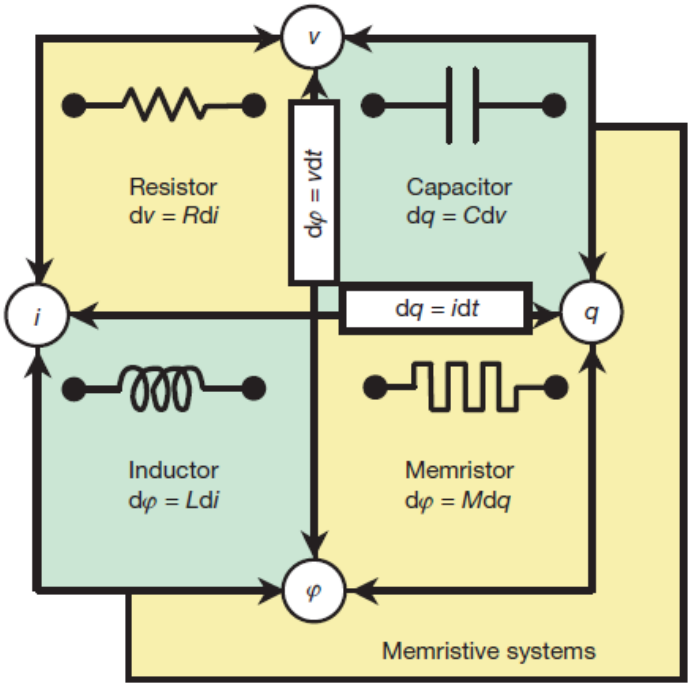
$$g_m = \left|\frac{dI_D}{dV_G}\right|_{V_{SD=Sbt.}} \tag{1.20}$$

olarak tanımlanır.

1.1.7 Memristör

Memristor, dördüncü pasif devre elemanı olarak tanımlanmaktadır. Bu dördüncü pasif devre elemanının hafıza ve direnç özelliklerini beraber barındırdığı ileri sürülmektedir [187]. Memristörün varlığı teorik olarak 1970 li yıllarda Berkeley Üniversitesi, Elektrik Mühendisliğinde devre dizaynı profesörü olan Leon Chua tarafından ortaya konmuştur [188]. Fakat Profesör Chua o zaman sadece teorik modellemeler ve formülasyonlar üzerinde çalışmalar yapmakla beraber aygıtın yapısına dair herhangi bir fikir öne sürmemiştir. Leon Chua memristörün keşfini, pasif devre elemanları olan direnç (R),

kapasitör (C) ve indüktör (L) ile devre değişkenleri olan akım (I), yük (Q), manyetik akı (φ) ve potansiyel (V) arasındaki ilişki üzerine yaptığı inceleme ile ileri sürmüştür. Chua yukarıda verilen pasif devre elemanları ile devre değişkenlerini bir tablo ile aralarındaki ilişkileri ortaya koymak istemiş ve Şekil 1.25 te gösterilen tabloyu oluşturmuştur.



Şekil 1.25 Temel pasif devre elemanları ve devre değişkenleri ile olan ilişkilerini gösteren tablo [189].

Bu tabloya baktığımızda manyetik akı ve yük arasındaki kısım önce boş kalmıştır. Chua bu toplam 4 farklı devre değişkenin 6 farklı ikili kombinasyonunun olması gerektiğini fakat tabloda toplam 5 adet ikili denklemin olduğunu ve 6. denklemin eksik olduğunu fark etmiştir. Bu yeni denklemin manyetik akı ile yük arasında bir bağ oluşturduğunu ve bu bağı veya ilişkiyi tanımlayacak yeni bir pasif devre elemanının da olması gerektiğini ileri sürmüştür. Chua bu yeni 4. devre elemanının kayıp eleman olduğunu ifade etmiştir [188]. Prof. Chua 1971 yılında manyetik akı ile yük arasındaki matematiksel ilişkinin;

$$v(t) = M\big(q(t)\big)i(t) \tag{1.21}$$

$$M(q) = d\varphi(q)/dq \tag{1.22}$$

şeklinde olduğunu göstermiştir. Burada ilk ifade aslında ohm yasasının bir formudur ve dikkate edilirse parametreler değişkenlere bağlı olarak verilmiştir. Akım ve gerilim zamanın bir fonksiyonu iken manyetik akı yükün fonksiyonudur. Burada M(q) pasif devre elemanının "memriztansı" olarak adlandırılır. Prof. Chua yukarıda verilen ifadeleri akı kontrollü memristor sistemleri için ileri sürmüştür. Akı kontrollü memristörün yanı sıra akım kontrollü (veya yük kontrollü) memristör sistemleri de mevcuttur. Akım kontrollü bir memristör için matematiksel ifade aşağıda verildiği gibidir [189];

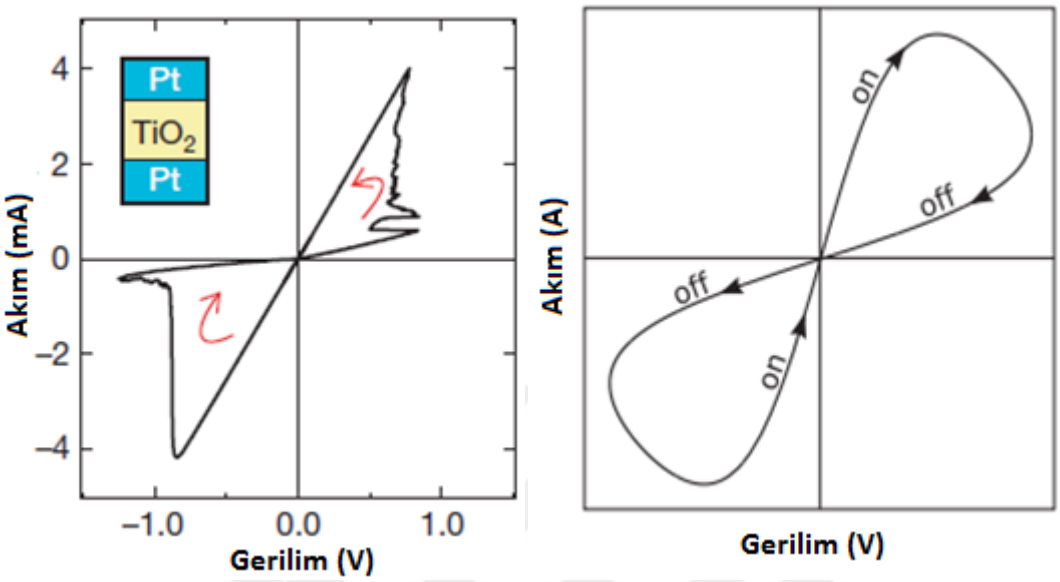
$$V = R(w, i)i \tag{1.23}$$

$$\frac{dw}{dt} = f(w, i) \tag{1.24}$$

Aslında bu ifade de yukarıda verilen ifade gibi ohm yasasının daha ayrıntılı ifade edilmiş bir halidir. Burada w durum değişkeni, i akım, R direnç (memristance), V gerilimdir. Fakat buradaki direnç (memristance) dikkat edilirse iki değişkene bağlı bir fonksiyon gibi davranmaktadır. Dolayısıyla akım-voltaj grafiği lineer olmayacaktır.

Bu matematiksel ilişkiye bağlı olarak kayıp 4. elemanının adını "memristor" olarak belirlemiştir. Bu adı vermesinin nedeni bu yeni elemanın manyetik akı ve yük değişkenlerine bağlı olarak hem direnç (resistance) hem de hafıza (memory) özelliği göstermesi gerektiğini öngörmüş ve bu formülasyonda manyetik akı ile yük arasındaki oran yukarıda da belirtildiği gibi "memriztans (memristance (M(q)))" olarak adlandırılmıştır. Ayrıca bu yeni pasif devre elemanının hem manyetik akı hem de yük değişkenlerinden dolayı akım-voltaj karakteristiğinin lineer olamayacağını öne sürmüştür. 1971 yılından 2008 yılına kadar araştırmacılar memristörün fiziksel özelliği hakkında araştırmalar yapmasına rağmen herhangi bir fikir öne süremişlerdir. 2008 yılında yani Prof. Chua' nın teorik olarak memristörü keşfettiği yıldan yaklaşık 40 yıl sonra HP laboratuarlarında R. Stanley Williams ve ekibi tarafından uzun bir araştırmanın ardından kayıp 4. devre elemanı olan memristörün keşfedildiği ileri sürüldü [189]. Keşfedilen bu memristör akım kontrollü memristör olup temelde iki platin elektrot arasına sandviç şeklinde büyütülmüş oldukça ince (3 nm) titanyum dioksit (TiO_2) tabakasından oluşmaktadır (Şekil 1.26). Bu yapı aslında hemen herkesin aşina olduğu metal-yalıtkan-metal (Metal-Insulator-Metal (MIM)) yapısıdır. Fakat bu

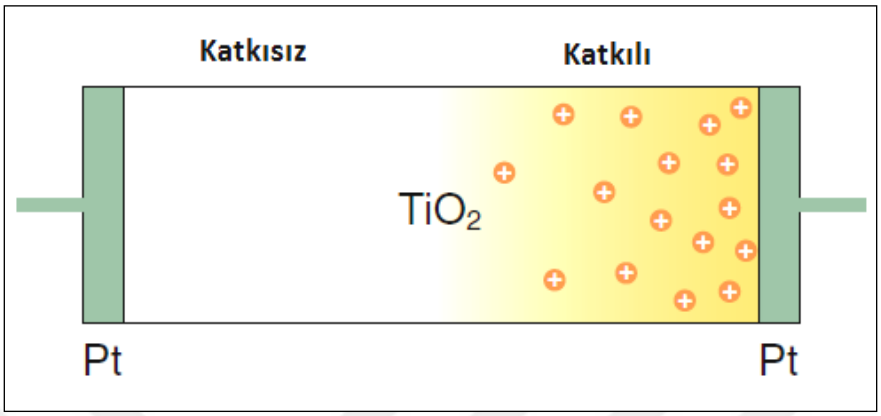
yapıda kullanılan yalıtkan tabakanın aşırı ince olması işin püf noktasını oluşturmaktadır. İleride de değineceğimiz gibi sistemin memriztansı ile yalıtkan tabakanın kalınlığı doğrudan ilişkilidir [189].



Şekil 1.26 a) Memristör (analog tipi) aygıtının teorik (I-V) karakteristiği [190]. b) HP laboratuarında keşfedilen memristör (dijital tipi) aygıtının deneysel (I-V) karakteristiği ve aygıtın şekli [189].

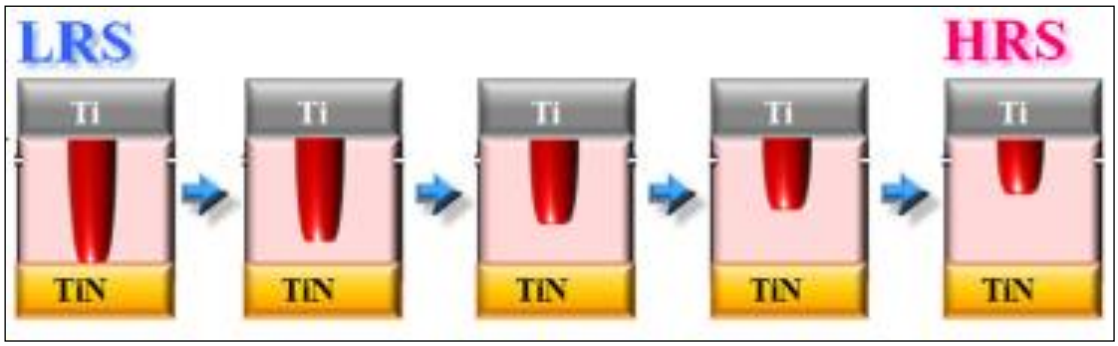
Bu grubun (HP grup) keşfettiği memristör aygıtının temel de çalışma prensibi şu şekildedir: İki platin elektrot arasına sandviç edilen TiO_2 tabakasına (aktif katman) uygulanan gerilimden dolayı aktif katman içerisinde yüksek bir elektrik alan meydana gelir. Bu elektrik alan aktif katmanın yani TiO_2 yapısında bulunan pozitif oksijen boşluklarını sürüklemeye başlar. Zamanla oksijen boşluklarının yapı içerisinde yayılmaya başlaması ile aktif katmanın yapısı değişmeye başlayacaktır. Oksijen boşluklarının yayıldığı bölgeler katkılı bölge olarak adlandırılır ki burada aktif katman TiO_{2-x} yapısındadır (Şekil 1.28). Oksijen boşluklarının ulaşmadığı veya olmayan bölgeler katkısız bölge olarak adlandırılır ve aktif katman TiO_2 yapısındadır. Dolayısı ile artık memristörün aktif katmanı TiO_2 ve TiO_{2-x} olmak üzere iki kısımdan oluşacaktır. Daha önce de bahsedildiği üzere yapının TiO_{2-x} kısmı yoğun oksijen boşluklarından dolayı katkılı kısım olarak adlandırılır buna ek olarak yoğun oksijen boşlukları bu kısmın iletkenliğini arttıracağından bu kısmın direnci diğer kısma göre (TiO_2) daha düşük değerdedir. TiO_2 ya da yani katkısız kısmın direnç değeri TiO_{2-x} kısmına göre çok

daha yüksektir ve dolayısı ile daha düşük iletkenliğe sahiptir. Yapı içerisinde oksijen boşluklarının ileri veya geri hareketleri katkılı kısım ile katkısız kısım arasındaki sınırı daima değiştirecek ve bu durum sistemin direncinin değişmesine yol açacaktır.



Şekil 1.27 Bir memristör aygıtın çalışma anında katkılı ve katkısız bölgelerini gösteren iki boyutlu gösterim. Turuncu daireler oksijen boşluklarını temsil etmektedir [191].

Şekilde gösterildiği gibi iki platin elektrot arasına sandviç şeklinde büyütülen TiO_2 tabakası harici bir elektrik alana maruz kaldıktan sonra kimyasal kompozisyonu değişecektir. Boşluklar aktif katman içerisinde sürüklenme hareketi ile hareket etmeye başlarlar ve elektronların hareketi ile karşılaştırıldığında hızları oldukça düşüktür. Bu durumdan dolayı oluşan akımda oksijen boşluklarının katkısı ihmal edilebilecek kadar küçüktür ve dolayısıyla oluşan akım elektronların hareketinin sonucu olacaktır [191]. Ayrıca literatürde oksijen boşluklarının vaya metal iyonlarının hareketine bağlı olarak bir tarafa yığılan oksijen boşluklarının ya da metal iyonlarının yığılmaya bağlı olarak iletken bir yol oluşturarak iki elektrot arasında bir bağlantının olacağı öngörülmektedir [192]. Bu iletken yol "flament" olarak adlandırılmaktadır. Elektrik alanın yönüne bağlı olarak oksijen boşlukları ya da metal iyonlar önce elektrotların birinden diğerine doğru yığılırken elektrik alanın yönünün ters dönmesiyle tekrar eski konumlarına hareket etmeye başlarlar. Oluşan oksijen boşlukları ya da metal iyonları memristörün direncini değiştirerek aygıtın I-V karakteristiğinde bir histerezis oluşmasına neden olur. Dolayısıyla aygıtın direnç değeri açık ve kapalı durumlara göre farklı olacağından aygıt bir anahtar gibi çalışmaya başlar. Bu durumu anlatan bir akış diyagramı Şekil 1.29 da verilmiştir.



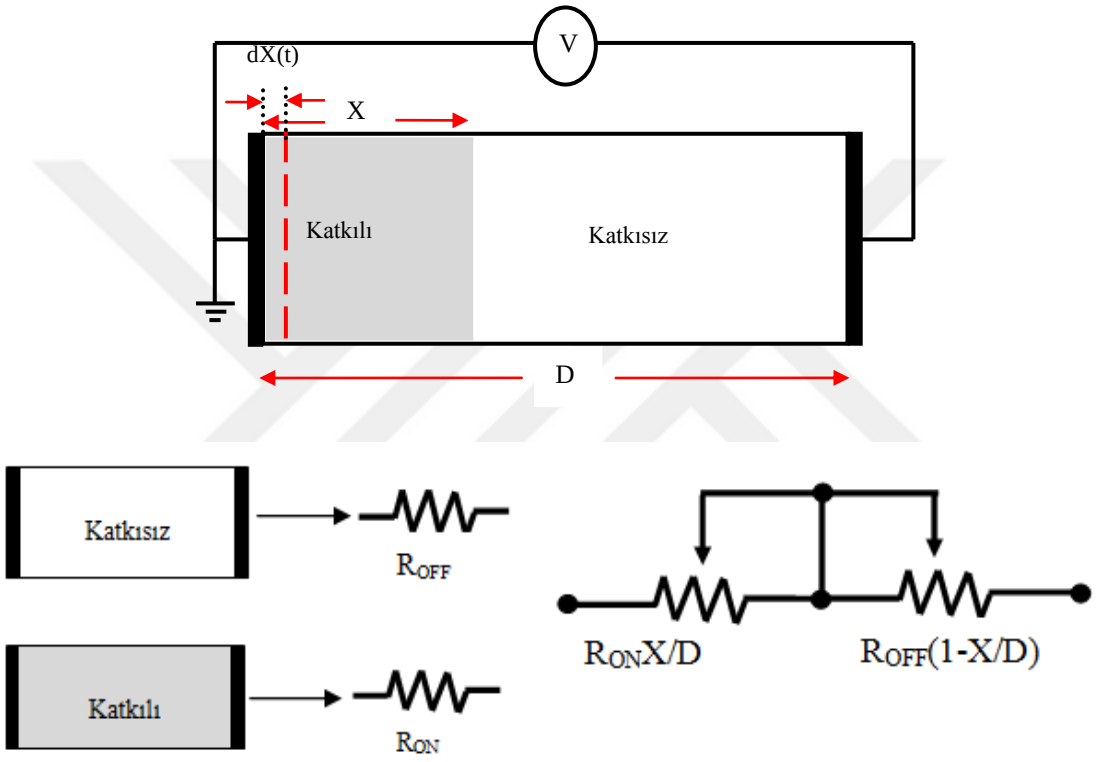
Şekil 1.28 İletken flametin, aygıtın iki elektrotu arasında oluşumunu gösteren akış diyagramı. Oklar aygıtın açık durumdan kapalı duruma doğru gidişini göstermektedir. [192].

Şekilde gösterildiği gibi eğer oksijen boşlukları veya metal iyonlar aktif katman içerisinde hareket ederken her iki elektrot arasında iletken yolu tamamlamışlarsa aygıttan geçen akım değeri en yüksek değerdedir. Bu durum aygıtın açık (on) durumu veya düşük direnç durumu (low resistance state (LRS)) olarak adlandırılır. Elektrik alanın yön değiştirmesi ile oksijen boşlukları ya da metal iyonlar zamanla tekrar geriye itilmeye başlanır elektrotlardan temasları kesilir ve her iki elektrot arasındaki iletken yol ortadan kalkar bu durumda aygıttan kısmen çok daha düşük akım geçmeye başlar. Bu durum aygıtın kapalı durumu (off) veya yüksek direnç bölgesi (high resistance state (HRS)) olarak adlandırılır. Aygıtın açık durumdan kapalı duruma veya tam tersi duruma geçmesi genel itibariyle keskin olmaktadır. Yani akım-voltaj karakteristiklerine bakıldığında belli bir voltaj değerinde akımın aniden arttığı veya azaldığı görülür (Şekil 1.26). Literatürde bu tür memristörler "dijital tip memristör" olarak adlandırılır [193]. Bunun yanında akım değişimi dijital tipi memristörler'e göre daha yavaş değişen memristörler de mevcuttur ve bu tür memristörler "analog tip memristörler" olarak adlandırılır [193].

1.1.7.1 Memristör Parametrelerinin Matematiksel Çıkarımları

Memristör için temel matematiksel ifadeleri elde etmek veya ispatları yapmak için aşağıdaki şekilde verilen çizimler kullanılacaktır. Bu çizimlerde bir memristörün memriztans değerini elde etmek için bazı varsayımlar yapılacaktır. Bu varsayımlar şöyle özetlenebilir: Önce memristör aygıtının D uzunluklu aktif katmanı tamamen katkısız

iken tüm direnç değeri R_{OFF}, aktif katmanın tamamının katkılı olduğu durumdaki direnç değeri R_{ON} olarak alınacaktır. Fakat memristör çalıştığı zaman bu iki direnç değerini de bünyesinde barındıracaktır. Bu durumu tasvir etmek için Şekil 1.30 da verilen eşdeğer devre kullanılacaktır. Şekilden de görüleceği üzere eğer memristör aygıtının herhangi bir anındaki katkılı kısmının uzunluğu X ile verilirse geriye kalan (D-X) kısmı katkısız kısım olacaktır. Bu kısımlara düşen direnç değerleri şekilde verildiği gibi olacaktır.



Şekil 1.29 Memristörün matematiksel eşitliklerini çıkarmak için kullanılan şekiller ve eşdeğer devre.

Daha önce de belirttiğimiz gibi memristör için kullanılan formüller ohm yasasına uymaktadır. Aşağıdaki matematiksel ifadeler HP laboratuarlarında keşfedilen ve akım kontrollü memristör için türetilmiş ifadelerdir [189]. Memristörün iki ucuna uygulanan gerilim ile akım arasındaki ilişkinin

$$V(t) = R(q)i(t) \tag{1.25}$$

olarak yazılabileceğini biliyoruz. Burada q durum değişkeni olarak ifade edilir ve zamana göre türevi aşağıdaki ifade ile verilir;

$$\frac{dq(t)}{dt} = i(t) \tag{1.26}$$

Şekil 1.30 da verilen çizimlere göre memristörün tamamen kapalı durumu için direnç ifadesini R_{OFF} ve tamamen açık durumdaki direnç ifadesini R_{ON} olarak düşünüyoruz. Şekil 1.30 da verildiği gibi sistemin herhangi bir anındaki katkılı bölgenin genişliği X ile verilirse katkısız bölgenin genişliği (D-X) olacaktır. Burada X zamana bağlı değişen bir fonksiyon gibi davranır (X→X(t)). Çünkü X oluşan oksijen boşluklarının hareketi sonucunda oluşmaktadır. Memristörün çalışması sırasında herhangi bir anda sistemin toplam direnç değeri (memriztansı) Şekil 1.30 yardımıyla aşağıdaki gibi olacaktır;

$$(R(q))=(R_{ON}\frac{X(t)}{D} + R_{OFF}(1 - \frac{X(t)}{D}) \tag{1.27}$$

Bu durumda Denklem (1.25) aşağıdaki gibi olacaktır.

$$V(t) = (R_{ON}\frac{X(t)}{D} + R_{OFF}(1 - \frac{X(t)}{D}))i(t) \tag{1.28}$$

Katkılı bölge için aşağıdaki gibi bir yaklaşım kullanılacaktır. Daha önce de belirtildiği üzere bu bölge oksijen boşluklarının hareketi sonucu oluştuğu için çok küçük bir zaman aralığı için (dt) katkılı bölgenin genişliği dX(t) olarak alınırsa;

$$dX(t) = v(t)dt \tag{1.29}$$

$v(t)$ oksijen boşluklarının sürüklenme hızıdır ve katıhal fiziğinden iyi bildiğimiz ve eşitlik 1.13 te verdiğimiz gibi bu ifade $v(t) = \mu E(t)$ ile verilir. Burada $E(t)$ katkılı kısımdaki elektrik alan ve μ ise oksijen boşluklarının yük haraketliliğidir. Burada elektrik alan için aşağıdaki ifadeyi yazabiliriz:

$$E(t) = \frac{dV'(t)}{dX(t)} \tag{1.30}$$

Burada $dV'(t)$ sonsuz küçük katkılı bölgeye (dX(t)) düşen gerilim değeridir. Bu ifadeler ışığında bu sonsuz küçük katkılı bölge için de ohm yasasını yazabiliriz:

$$dV'(t) = \frac{R_{ON}}{D} dX(t)i(t) \quad (1.31)$$

Eşitlik 1.31, eşitlik 1.30 da yerine yazılırsa elektrik alan ifadesi aşağıdaki gibi olacaktır.

$$E(t) = \frac{R_{ON}}{D} i(t) \quad (1.32)$$

Eşitlik 1.32, eşitlik 1.15 te yerine yazıldığında bu kez sürüklenme hızı.

$$v(t) = \mu \frac{R_{ON}}{D} i(t) \quad (1.33)$$

Sürüklenme hızı ifadesi eşitlik 1.29 da yerine yazılıp bu ifade tekrar düzenlenirse aşağıdaki ifade elde edilir.

$$X(t) = \mu \frac{R_{ON}}{D} \int i(t)dt \quad (1.34)$$

İntegralin içindeki ifade için eşitlik 1.26'nın kullanılmasıyla;

$$X(t) = \mu \frac{R_{ON}}{D} q(t) \quad (1.35)$$

olarak bulunur. Şimdi bu ifade eşitlik 1.28 de yerine yazılırsa;

$$V(t) = (R_{ON}\mu \frac{R_{ON}}{D} q(t) + R_{OFF}(1 - \mu \frac{R_{ON}}{D^2} q(t)))i(t) \quad (1.36)$$

elde edilir. Bu ifade biraz daha düzenlenirse;

$$V(t) = (\frac{R_{ON}}{D^2} \mu q(t)(R_{ON} - R_{OFF}) + R_{OFF})i(t) \quad (1.37)$$

elde edilir. Bu ifadeyi biraz daha kısaltmak için aşağıdaki yaklaşım kullanılacaktır:

$$R_{ON} \ll R_{OFF} \quad (1.38)$$

Dolayısıyla eşitlik 1.37 deki ifade daha sade hale gelecektir ve bu ifade aşağıda yazıldığı gibi olacaktır.

$$V(t) = R_{OFF}(1 - \frac{R_{ON}}{D^2} \mu q(t))i(t) \quad (1.39)$$

Burada akım değerinin önündeki ifade bizim aradığımız ifadedir ve memristörün

“memristansı” olarak ifade edilir.

$$M(q) = R_{OFF}(1 - \frac{R_{ON}}{D^2}\mu q(t)) \tag{1.40}$$

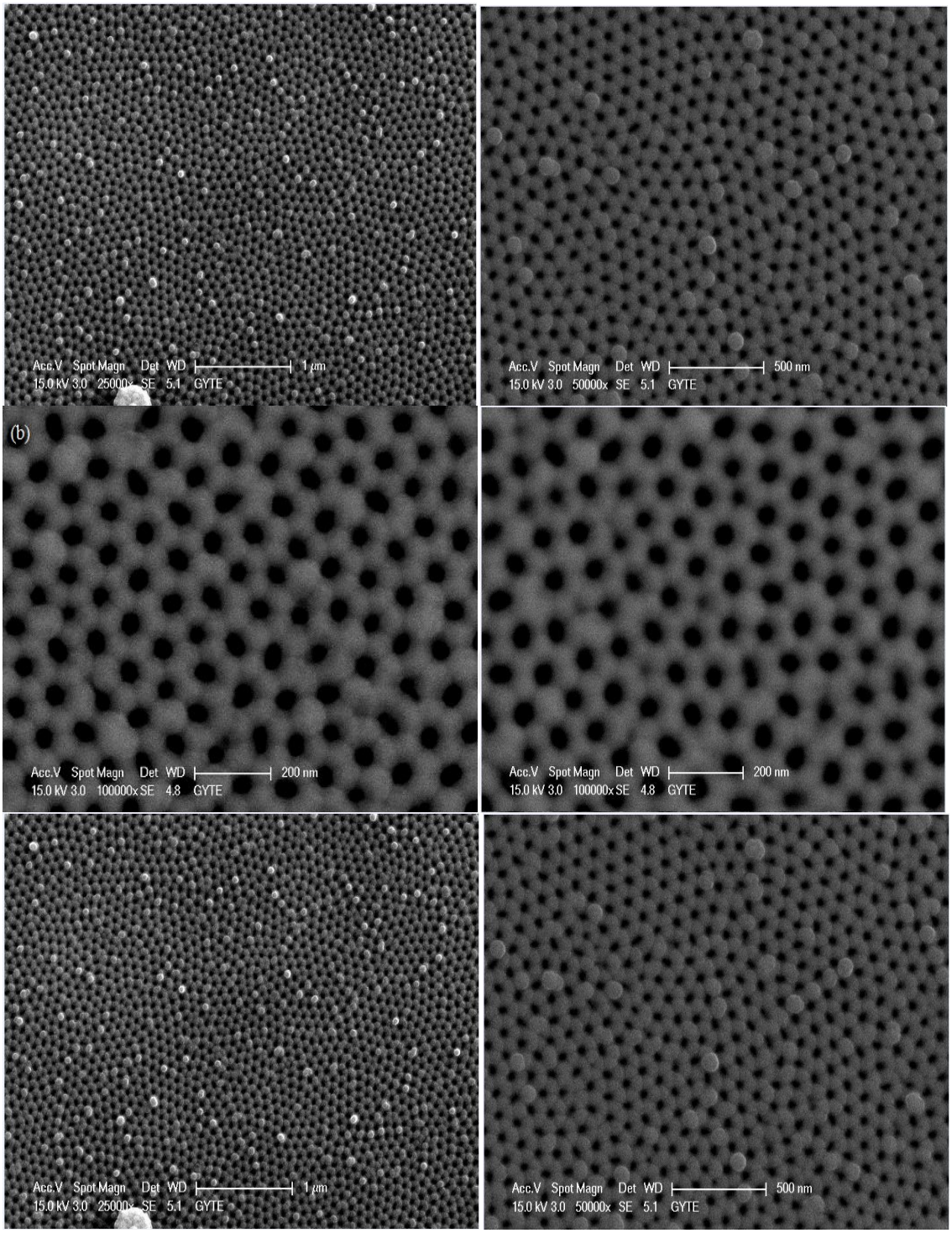
Bu ifadeden de anlaşılacağı üzere memriztans ifadesi aygıtın boyutlarına oldukça bağlıdır. Bu ters orantılı bağlılık nano boyut ile mikro boyut arasında bir milyon kat olarak karşımıza çıkmaktadır. Dolayısıyla aygıtın ebatları daha doğrusu aktif katmanın kalınlığı azaldıkça memristör etkisi daha iyi görülecektir.

2 MATERYAL VE YÖNTEM

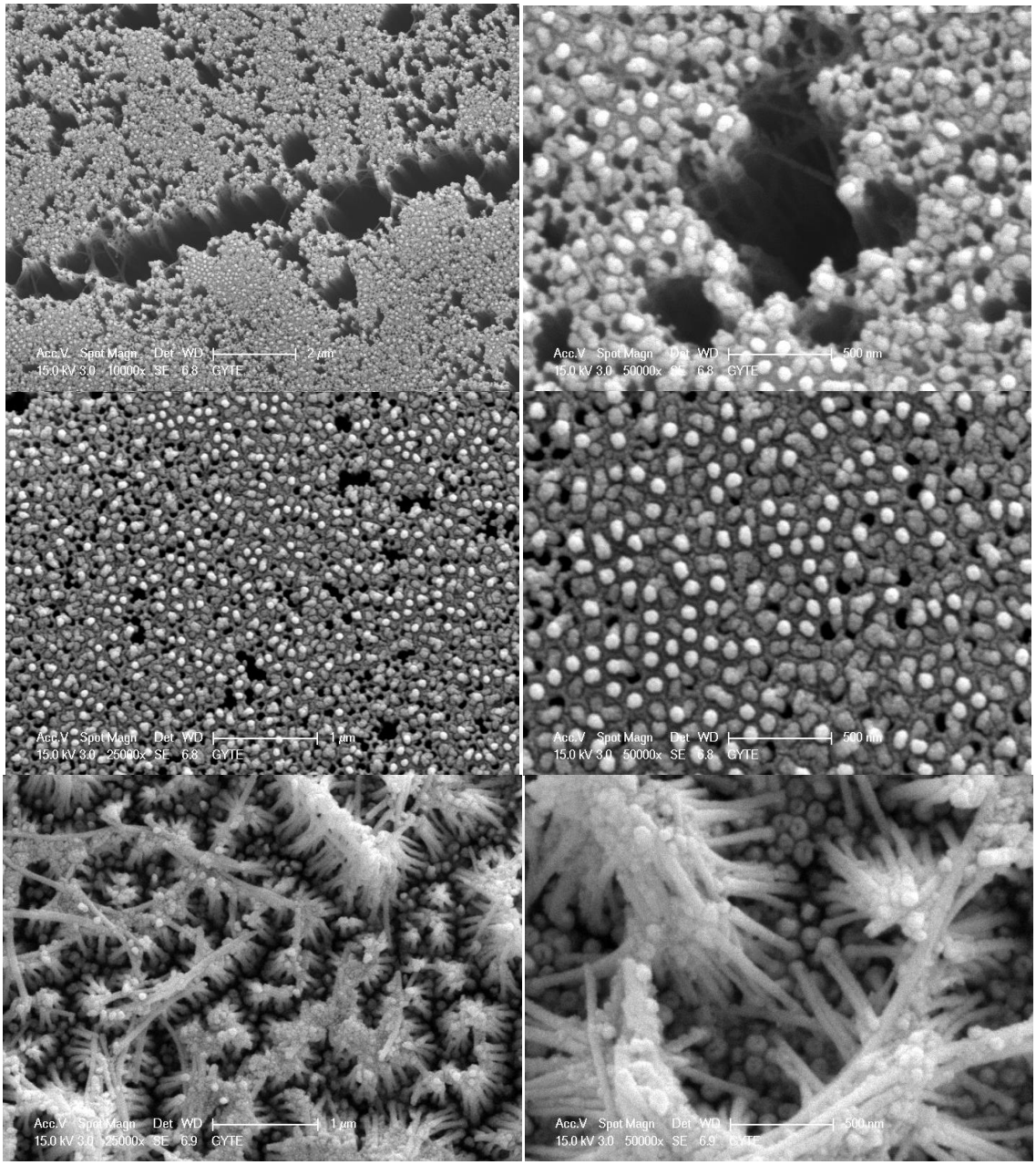
Bu tez kapsamında kullanılan materyaller ve metotlar genel itibariyle üç grup altında toplanacaktır. Bunlar fabrikasyon, karakterizasyon ve analiz şeklindedir. Bu grupların her biri ayrıntılı olarak ileriki kısımlarda verilecektir.

2.1 AAO Kalıpların Oluşturulması ve Nanotellerin Büyütülmesi

AAO kalıpların oluşturulması için ticari olarak temin edilmiş yüksek saflıkta (%99.999) alüminyum (Al) folyo kullanılmıştır. Al folyo önce kimyasal temizleme işlemine tabi tutulmuş (aseton, isopropil alkol ve deiyonize su) daha sonra kuru azot (N_2) ile kurutularak 500 ^{0}C sıcalıkta 3-4 saat tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bundan sonra Al folyonun yüzeyinde nano gözenek açmak için anodizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Anodizasyon işlemi ve kullanılan düzenek hakkında ayrıntılı bilgi 1.bölümde verildiğinden burada sadece sonuçları vereceğiz. Elde edilen kalıpların SEM görüntüleri Şekil 2.1 de verilmiştir. AAO kalıpların yapım çalışmalarının bir kısmı Yüksek Lisans öğrencisi Fatma KUTLU ile beraber yapıldığından, bu çalışmalara ait SEM görüntüleri Fatma KUTLU'nun Yüksek Lisans tezindeki görüntüler ile aynı görüntülerdir [194]. Elde edilen AAO kalıpların içerisine istenilen materyallerin elektrodepozisyon metodu ile doldurulması ile nanoteller elde edilir. Yaptığımız çalışmada ZnO materyali deiyonize su içerisinde çözüldükten sonra elektrodepozisyon yöntemi ile kalıplar doldurularak ZnO nanoteller elde edilmiştir. Elde edilen ZnO nanotellerin kalıp içerisinde ve kalıp aşındırıldıktan sonraki hallerine ait SEM görüntüleri Şekil 2.2 de verilmiştir.



Şekil 2.1 Yaptığımız AAO çeşitli kalıpların SEM görüntüleri

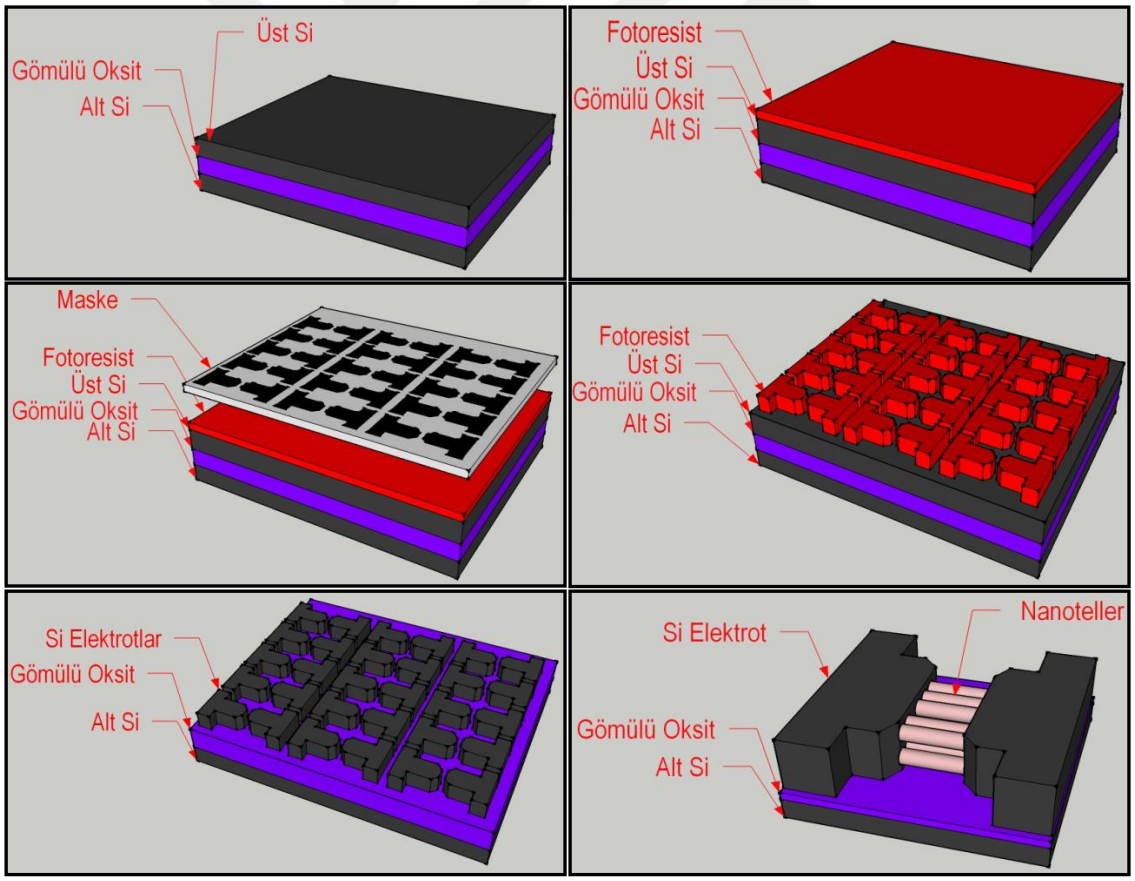


Şekil 2.2 AAO kalıp kullanılarak elektrodepozisyon yöntemi ile ZnO nanotellerin oluşturulması

2.2 SOI Altlıkların Desenlendirilmesi

Bu tez kapsamında kullanılan ticari olarak temin edilmiş bor katkılı (5-7x10^{18} cm^{-3}) (110) yönelimde p^+-SOI altlıklar ilk önce fotolitografi yöntemiyle kimyasal işlemlere maruz bırakılarak silisyum elektrotlar oluşturulmuştur. Silisyumu aşındırmak için potasyum hidroksit (KOH) çözeltisi kullanılmıştır. Bu aşındırma işleminin akış

diyagramı şematik olarak Şekil 2.3 te verildiği gibidir. Önce SOI altlık üzerine spin kaplama yöntemi ile fotorezist kaplanıp 5 dakika yaklaşık 100 °C de ısıl işleme tutulur. Daha sonra bir maske yardımıyla kaplanan fotorezist belli bir süre U.V. lamba altında 30 saniye ışığa maruz bırakılır. Foto maskeden geçen ışık fotorezistin belli kısımlarına ulaşır ve bu kısımın polimerize olmasına neden olur. Daha sonra uygun çözelti içerisinde ışığın geçmediği kısımlar temizlenip uzaklaştırılır. Sonuçta kalan kısım bizim istediğimiz desende SOI altlığın üzerinde kalır. Son işlemde SOI altlık 80 °C deki %30 luk KOH çözeltisine yaklaşık 2 dakika maruz bırakılır. KOH çözeltisi fotorezist haricinde kalan açık kısımlarda silikonu aşındırıp yüzeyden uzaklaştırmaya başlar. Aşındırma işlemi tamamlandıktan sonra SOI altlık deiyonize su ile yıkanıp temizlenir. En son aşamada kalan fotorezist aseton ile uzaklaştırılıp SOI altlıklar kullanıma hazır hale getirilir.



Şekil 2.3 SOI altlıkları desenlendirmek için kullanılan fotolitografi metodunun işlem basamakları.

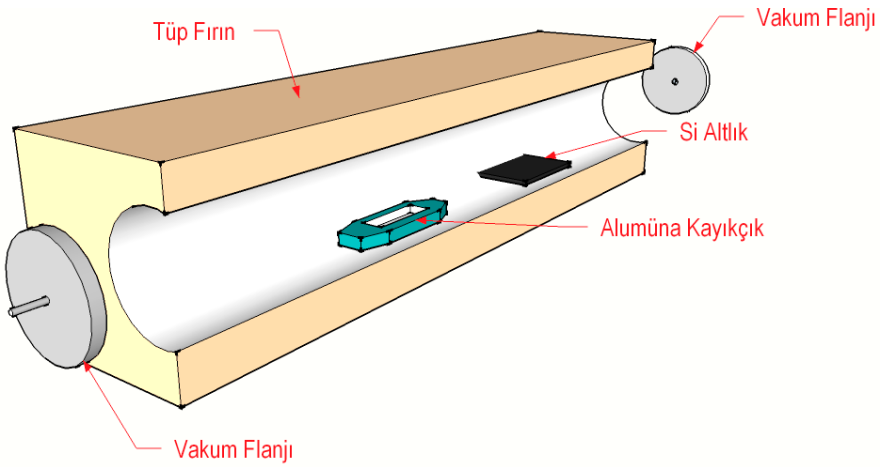
2.3 Metal-Oksit Nanotellerin Büyütülmesi

Metal-oksit nanotellerin büyütülmesi için ticari olarak temin edilmiş ZnO, SnO_2 ve In_2O_3'ün toz halleri kullanılmıştır (Şekil 2.4). Bu maddelerin çeşitli oranlarındaki karışımları ile temelde iki grup nanotel büyütülmüştür. Bunlardan ilki ZnO ve In_2O_3 karışımını içeren nanoteller diğeri de her üç metal-oksitin karışımını içeren nanotellerdir. Her üçünün karışımını içeren nanoteller indiyum-kalay-çinko oksit (indium-tin-zinc oxide (ITZO)) olarak adlandırılacaktır. Bilindiği gibi metal-oksit gibi yüksek sıcaklıkta buharlaşan materyallerden nanotel büyütmek için yüksek sıcaklığa çıkabilen ve vakumlanabilen fırınlar kullanılır. Bu fırınların yapısı basitçe Şekil 2.5 te verildiği gibidir. Nanotelleri büyütmek için tek ısıtma bölgeli hassas sıcaklık kontrollü yüksek sıcaklık MTI marka tüp fırını kullanılmıştır (Şekil 2.6). Metal-oksit kaynak tozu tüp (alümina) fırının merkezine yerleştirildikten sonra silisyum altlıklar da tüp fırınının merkezinden daha uzak bir bölgeye yerleştirilmiştir. Tüp fırının merkez sıcaklığı 1225 ^{0}C ye ayarlanırken silisyum altlıkların olduğu bölgenin sıcaklığı daha önceden bir termoçift yardımıyla 600 $^\circ$C olarak belirlenen bölgeye yerleştirilmiştir. Nanoteller büyütülürken tüp fırının vakum düzeyi yaklaşık 0.7 atm değerinde sabit tutulurken buharlaşan metal-oksit tozun silisyum altlıklar üzerine taşınması için sadece vakumun çekiş gücünden faydalanılmıştır dolayısıyla herhangi bir taşıyıcı gaz kullanılmamıştır. Ayrıca nanotelleri büyütmek için herhangi bir metal katalisit kullanılmadığı için bu yöntem buhar-katı-katı (vapor-solid-solid (VSS)) metodu olarak adlandırılmaktır. Yüksek sıcaklık fırınları yardımı ile nanotel büyütme işlemlerini anlatan şematik bir gösterim Şekil 2.5 te verilmiştir.



Şekil 2.4 Metal-oksit nanotelleri büyütmek için kullandığımız kaynak materyaller.

Burada kaynak materyalimizi alümina bir kayıkçığın içerisine yerleştirip fırının yüksek sıcaklık bölgesine yerleştirilirken silisyum altlıklar daha düşük sıcaklık bölgesine yerleştirilir. Sistem çalışırken vakum pompası yardımı ile vakum seviyesi mümkün olduğunca düşük seviyelere indirilir. Bu metot ile nanotel büyütülürken taşıyıcı gazın kullanılıp kullanılmayacağı isteğe bağlı olarak değişir.



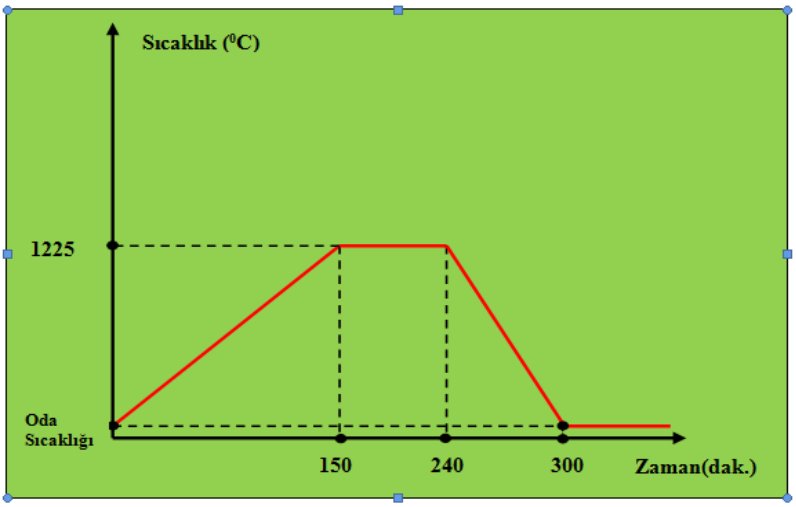
Şekil 2.5 VSS veya VLS metodu ile nanotel büyütmek için kullanılan yüksek sıcaklık fırınına ait kesit.



Şekil 2.6 Nanotelleri büyütmek için kullandığımız tek ısıtma bölgeli yüksek sıcaklık fırını vakum pompası ve flanj bağlantıları ile görünümü.

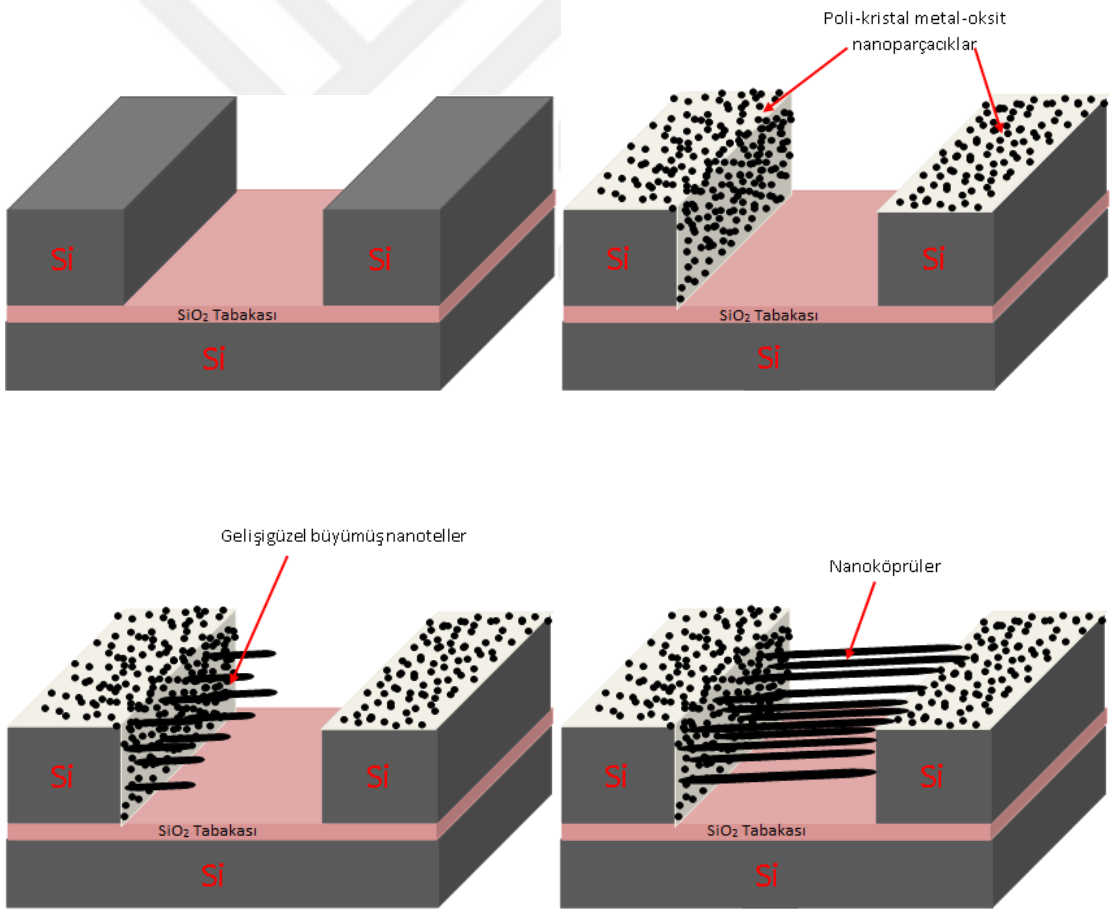
2.4 Nanotellerin Köprü Şeklinde Büyütülmesi

Daha önceden desenlendirdiğimiz ya da silisyum elektrotlarını oluşturduğumuz SOI altlıklar aseton, IPA ve deiyonize su ile temizlendikten sonra kuru azot ile kurutulmuştur. Alümina kayıkçığın içerisine yerleştirilen metal-oksit kaynak materyali tüp fırının tam merkezine yerleştirilmiştir. SOI altlıklar tüp fırının daha önceden sıcaklık kalibrasyonu yapılmış merkezinden daha uzak bir mesafedeki bir bölgeye yerleştirilmiştir. Sistemin vakum flanjları iyice sıkıldıktan sonra vakum pompası açılıp vakum düzeyi yaklaşık 0.7 atm değerine düşene kadar sistem vakumlanmıştır. Fırının merkez sıcaklığının zamana bağlı değişimi Şekil 2.7 de verilmiştir.



Şekil 2.7 Nanotelleri büyütmek için kullandığımız tüp fırının merkezi sıcaklığının zamana bağlı değişimi.

Nanotellerin SOI altlık üzerindeki silisyum elektrotlar arasında köprü şeklinde büyümesi şu şekilde gerçekleşmektedir: Fırının sıcaklığı yükselip belli bir değere ulaştığında kaynak materyal buharlaşmaya başlar. SOI altlık üzerindeki silisyum elektrotlara gelen ilk buhar partikülleri katalisit görevi görmeye başlar. Bundan sonra vakumun emiş gücü ile altlıklara doğru gelen buhar yüzey enerjisi daha büyük olan belli bölgelerde (ilk gelen buharın olduğu bölgeler) daha fazla yoğunlaşmaya başlar ve bu bölgelerde nanoteller büyümeye başlar. VLS metodu ile karşılaştırıldığında VSS metodu ile büyütülen nanoteller genellikle daha büyük çaplara sahip olmaktadır. Bunun nedeni çapı kontrol etmek için herhangi bir metal katalisitin kullanılmamasıdır. VLS metodunda metal katalisit kullanıldığı için büyütülen nanoteller hem daha düzgün hem de daha küçük çapa sahiptir.

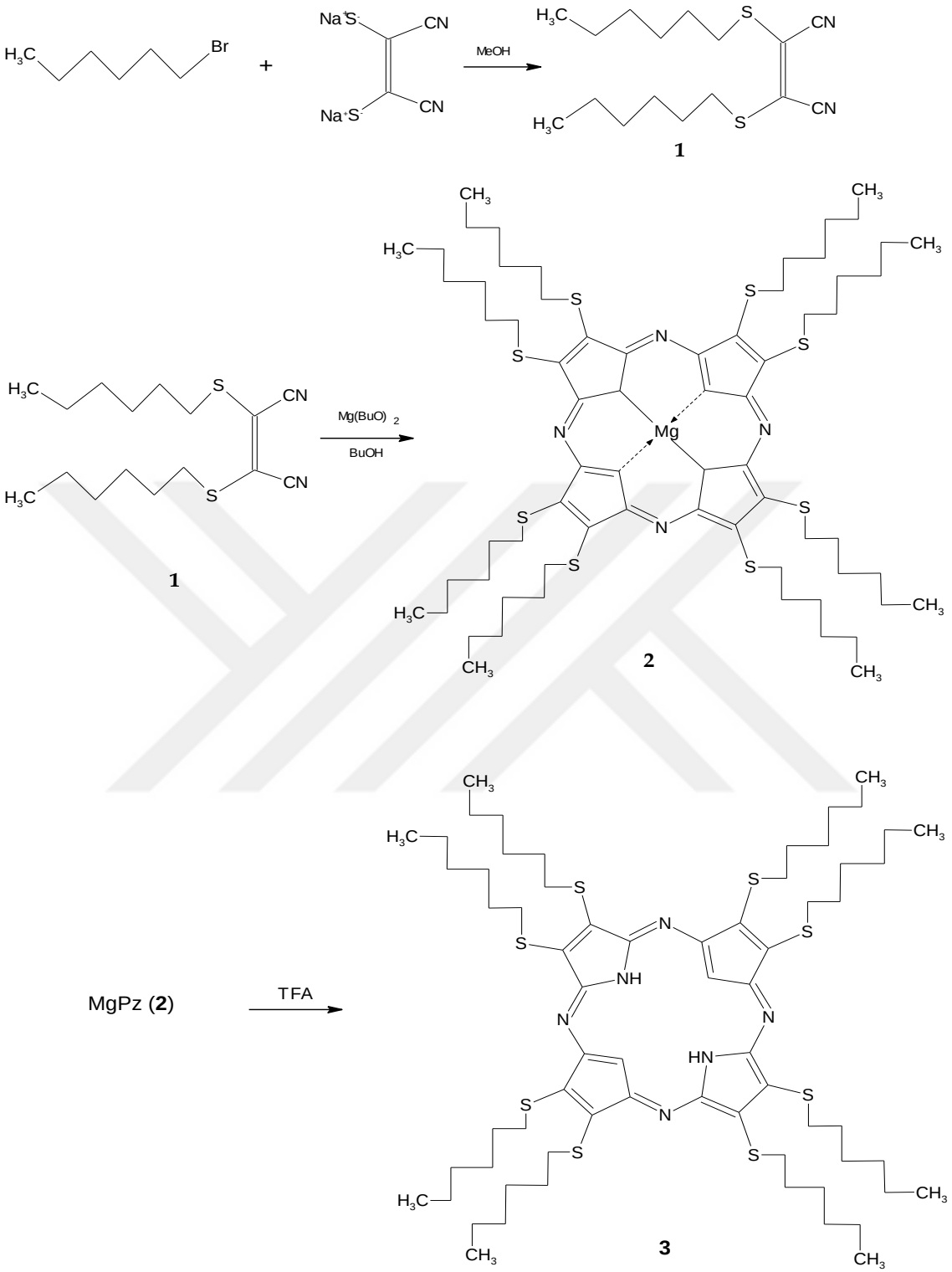


Şekil 2.8 SOI altlık üzerinde desenlendirilen silisyum elektrotlar arasına metal-oksit nanotellerin direk büyütülmesini özetleyen üç boyutlu gösterim.

Şekil 2.8 de nanotellerin Si elektrotlar arasına direk büyütülmesini özetleyen bir şematik akış diyagramı verilmiştir. Burada silisyum elektrotların olduğu basamak şeklindeki kısımların kenarları yüzeye göre daha yüksek yüzey enerjisine sahip olduğundan kaynak materyalinin buharı bu kısımlarda daha çok yoğunlaşır. Bunun nedeni gelen kaynak buharındaki nanoparçacıklar bu yüzeyin enerjisini düşürmeye çalışır. Dolayısıyla nanotellerin oluşumu ilk bu bölgelerden başlar.

2.5 H2Pz Molekülünün Sentezi

Bu tez çalışması kapsamında kullanılan metalsiz fitalosiyanin molekülü yani diğer adıyla porfirazin molekülü (H2Pz) daha önce giriş kısmında da belirtildiği gibi Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Bölümü (Dr. Bahadır KESKİN) tarafından sentezlenmiştir. Sentezlenen molekülün işlem basamakları aşağıdaki şekilde verilmiştir. Bu molekülün ayrıntılı sentez aşamaları veya kullanılan kimyasallar uygulanan prosesler bu tezin konusu kapsamında olmadığından burada ayrıntı verilmeyecektir. Şekil 2.9'da kullanılan H2Pz'nin sentez aşamaları gösterilmiştir.



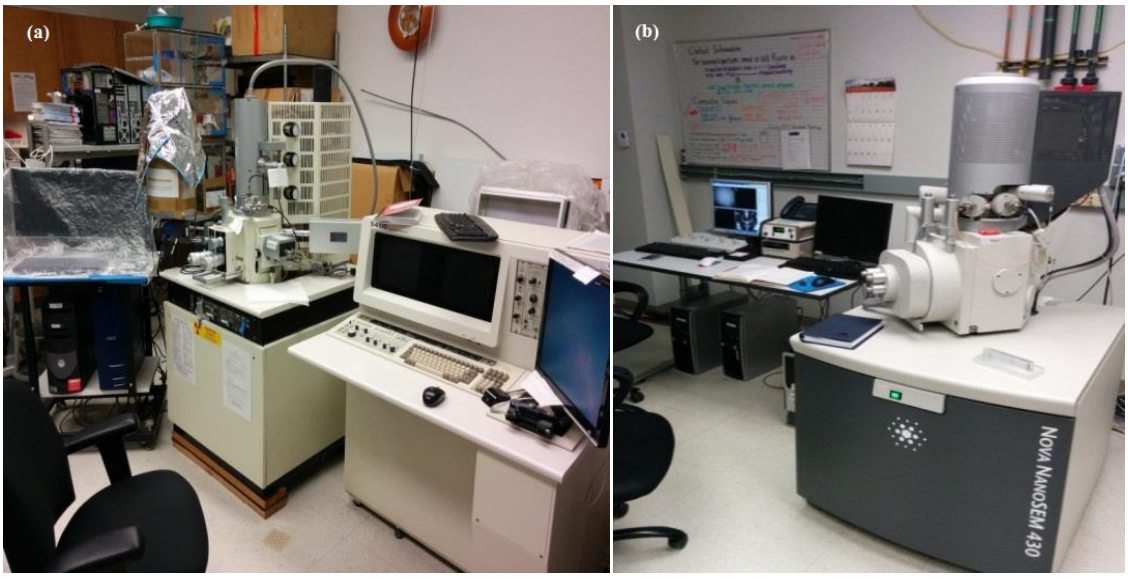
Şekil 2.9 Kullandığımız (**3**) H2Pz molekülünün sentez basamakları.

2.6 Organik Mikro tellerin/kristallerin Büyütülmesi

Bu tez kapsamında üç farklı organik materyalden mikro kristaller büyütülmüştür. Bu materyaller ticari olarak temin edilmiş olan C_{60} ve Alq3 ile sentezlenmiş olan H2Pz molekülüdür. Bu organik materyallerden mikro yapıların büyütülmesi için çözelti bazlı (solution process) yöntem kullanılmıştır. Bunun için önce, gerek ticari olarak temin edilen C_{60} ve Alq3 gerekse sentezlenen H2Pz malzemeleri uygun çözücülerde çözülerek belirli bir konsantrasyonda çözeltileri hazırlanmıştır. Daha sonra, bu çözeltilerin içerisine bu malzemeleri çözmeyen solventler ilave edilip karışım titreşimi olmayan bir yerde buharlaşmaya bırakılmıştır. Alq3 molekülünden genellikle çok iyi mikroteller elde edilirken C_{60} molekülünden mikroteller ile birlikte mikro yapıda üçgen, altıgen, kare, yamuk, küre gibi farklı geometrilere sahip yapılar ve H2Pz molekülünden de mikro çubuk şeklinde yapılar elde edilmiştir.

2.7 Nanotellerin Analizleri

Üretilen nanotellerin analizleri için SEM, EDX sistemleri kullanılmıştır. SEM cihazı ile üretilen nanotellerin boyutları belirlenmiştir. EDX ölçümleri ile üretilen nanotellerin içeriğinin tespiti yani elementel analiz yapılmıştır. Şekil 2.10 da bu analiz cihazları verilmiştir.



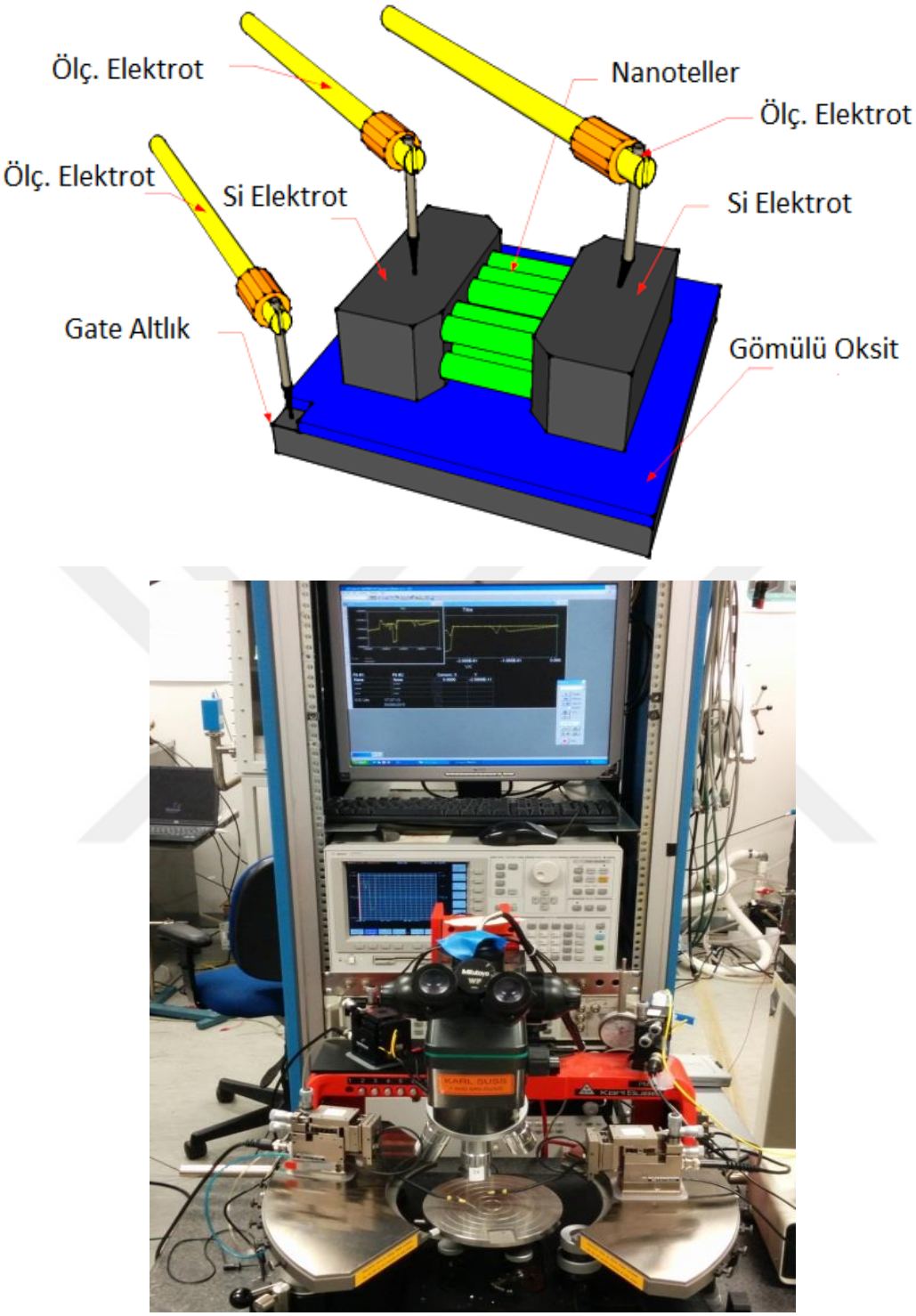


Şekil 2.10 Analizleri için kullanılan SEM (a, b), EDX (a), XRD (c) ve Optik mikroskop (d) cihazları.

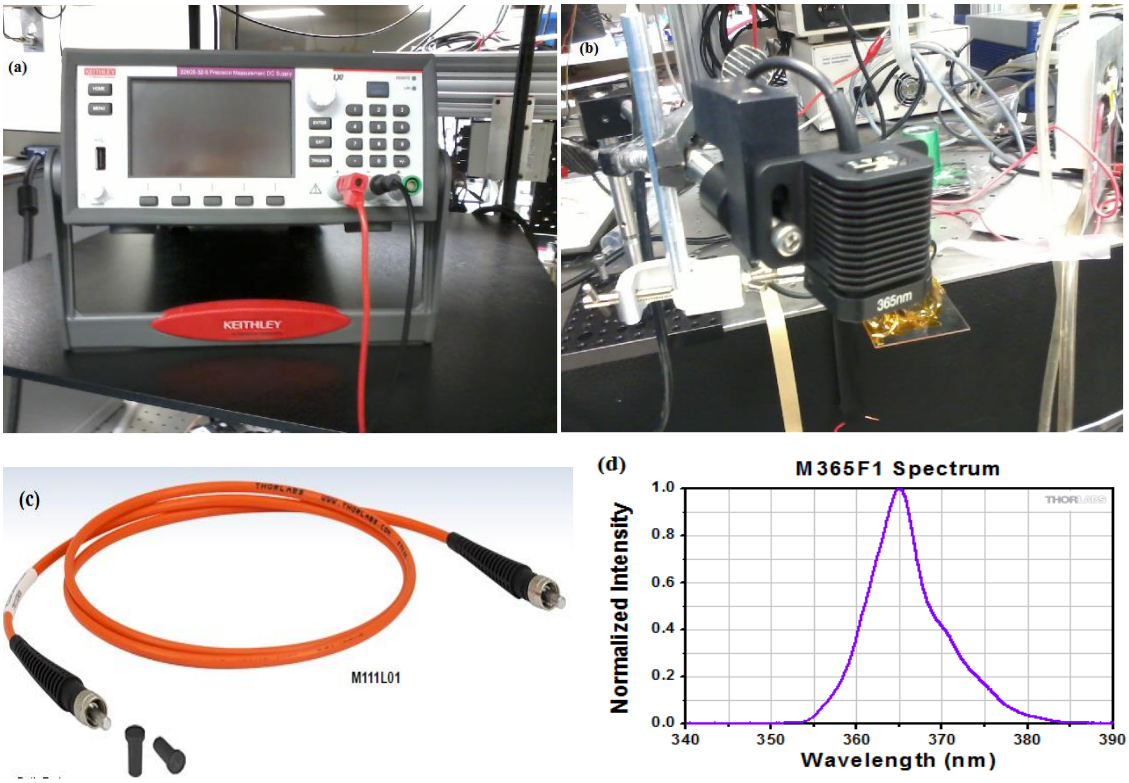
2.8 Elektriksel Karakterizasyon

Silisyum elektrotlar arasına direkt köprü şeklinde büyütülen nanotellerden üretilen aygıtlarda FET, memristör ve UV duyarlık ölçümleri olmak üzere üç farklı ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler atmosfer koşullarında ve karanlık ortamda gerçekleştirilmiştir. Nanotellerin büyütüldüğü SOI altlık yüksek katkılı olduğu için elektrotlar için herhangi bir metal kullanılmayıp direk silisyum elektrot olarak kullanılmıştır. Üretilen aygıtlarda FET, resistör ve memristör ölçümleri Agilent marka model 4156-C yarıiletken karakterizasyon cihazı ve buna bağlı Karll Suss marka numune istasyonu kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.11).

UV duyarlık ölçümleri için kullanılan UV ışık kaynağının kendisi ve fiber kablosu ile UV ışık kaynağının spektrumu Şekil 2.12'de gösterilmiştir. UV ışık kaynağı Thorlab şirketinden temin edilmiş olup fiber kablodan çıkış gücü 750 uW olarak ölçülmüştür.



Şekil 2.11 Elektriksel karakterizasyon için elektriksel bağlantıları ve aygıtın son aşamasını gösteren 3 boyutlu şematik gösterim (yukarıdaki) ile kullanılan numune istasyonu ve yarıiletken karakterizasyon cihazının görünümleri (aşağıda).

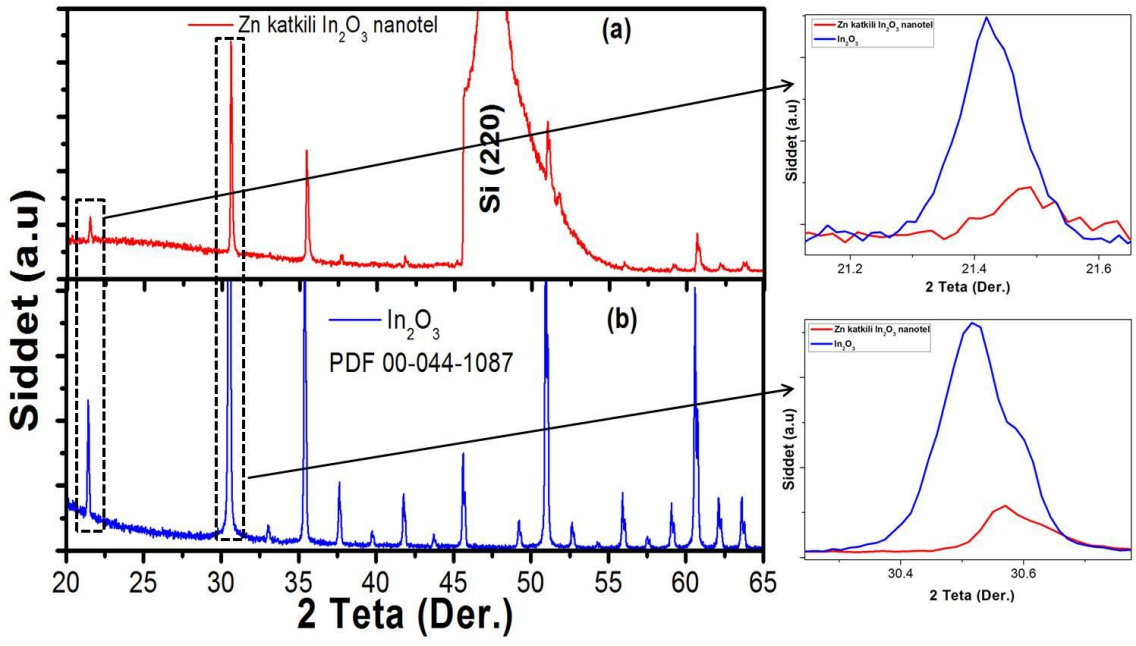


Şekil 2.12 Rezistör aygıtların UV ışığa tepkilerini ölçmek için kullandığımız UV ışık kaynağının güç kaynağı (a) ve kendisi (b) ile fiber kablosu (c) ve UV ışık kaynağının dalga boyunu veren emisyon spektrum (d) ölçümünün verileri.

3 BULGULAR

Bu tez çalışmasında nanotellerin elektrotlar arasına köprü şeklinde büyütüldüğü üç farklı aygıt üretimi gerçekleştirilerek yapısal ve elektriksel karakterizasyonları yapılmıştır. Bu bölümde, üretilen aygıtların yapısal ve elektriksel karakterizasyonlarından elde edilen sonuçlar verilecektir. Bütün aygıtların elektriksel karakterizasyonları atmosfer koşullarında yapılmıştır.

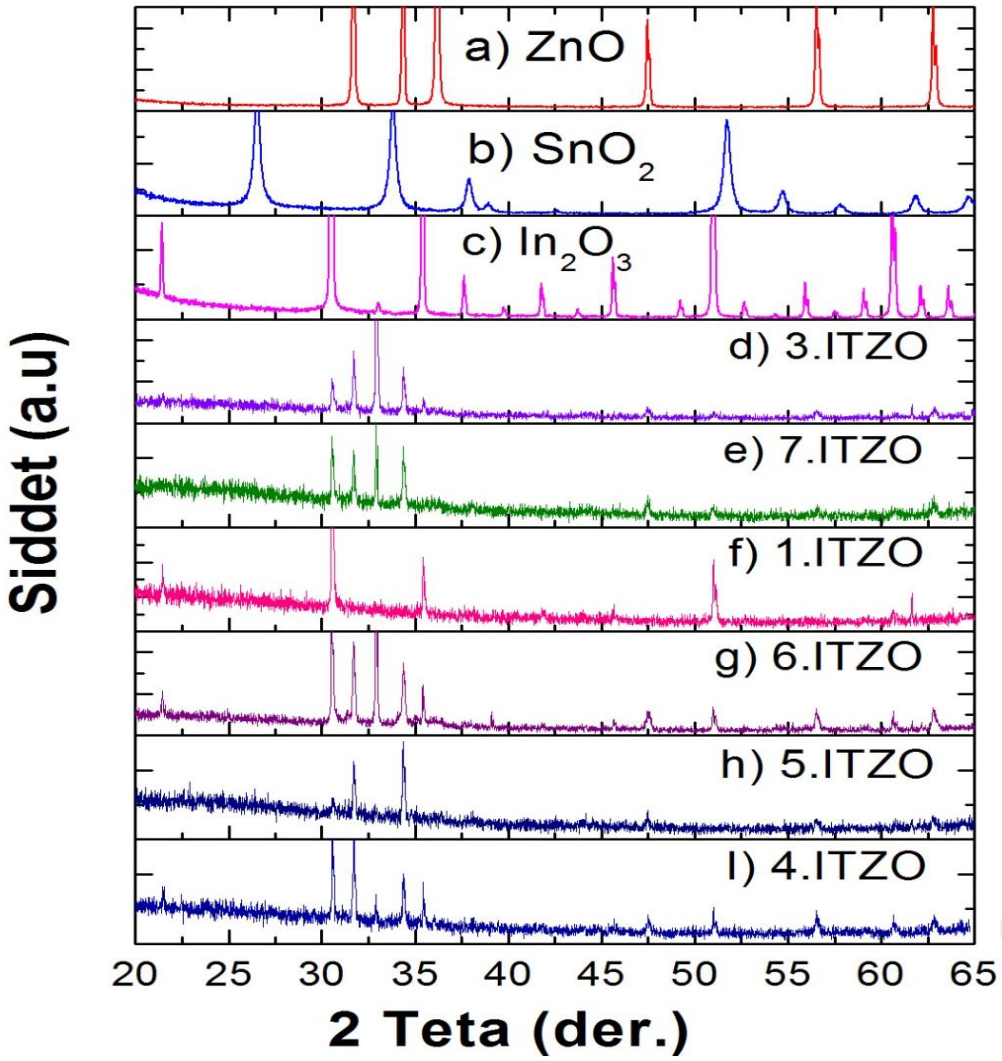
Öncelikle üretilen nanotellerin XRD analizleri yapılmış olup, Tablo 3.1 de verilen aygıtlardan Zn katkılı In_2O_3 ve ITZO nanotellere ait XRD analizlerinin sonuçları sonuçları sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 de verilmiştir. Zn katkılı In_2O_3 nanotellerin XRD pikleri kullanılan kaynak materyali olan In_2O_3 toz ile uyumlu çıkmıştır. Yine Şekil 3.1 den de görüldüğü üzere nanotellere ait piklerde toz materyale göre hafif kaymalar tespit edilmiş olup bu durum katkı elemeti olan Zn nin In elementinin yerini işgal ettiğini ve dolayıs ile katkılam işleminin başarılı bir şekilde gerçekşetiğini ispatlamaktadır. Bu durum literatür ile de uyumluluk göstermektedir [195].



Şekil 3.1 a) PDF 01-089-1397 cart numaralı ZnO' ya ait XRD verileri.b) PDF 00-044-1087 cart numaralı In_2O_3'de ait XRD verileri. c) Ürettiğimiz Zn katkılı In_2O_3 nanotellere ait XRD verileri.

Katkılama işlemlerinde XRD piklerinde meydana gelen kaymaların nedeni katkılanan elementin iyonik yarıçapı ile ana materyaldeki elementin iyonik yarıçaplarının farklı olmasının bir sonucudur [196]. Kullandığımız $In^{2}O^{3}$ materyalinde In^{+3} iyonunun yarıçapı 0,80 Å iken katkılanan Zn^{+2} iyonu 0,74 Å atomik yarıçapa sahiptir. Zn^{+2} iyonu In^{+3} iyonunun yerini işgal etmeye başladığında kristal örgüde küçülmeye neden olacaktır. Bu küçülme Bragg yasasına göre piklerin daha yüksek açılara kaymasını gerektirmektedir [195,196].

Üretilen ITZO nanotellerin XRD sonuçları kullanılan kaynak materyallerle beraber Şekil3.2 de verilmiştir. ITZO nanotellerin pikleri genel itibari ile kullanılan kaynak materyallerin pikleri ile uyumluluk göstermektedir. Jun Ni ve arkadaşları [197] ITZO incefilm üzerine yaptıkları çalışmada elde ettikleri XRD piklerinin baskın materyalin XRD pikleri ile örtüştüğünü dolayısı ile baskın materyalin veya materyallerin fazını gösterdiğini bildirmişlerdir. Yaptığımız çalışma bu durum ile tamamen uyumluluk göstermektedir. Çünkü ürettiğimiz nanotellerin kompozisyonlarına baktığımızda kullanılan kaynak materyalinden hangisi daha baskın ise XRD pikleri o materyale veya materyallere ait çıkmıştır [197].



Şekil 3.2 a) PDF 01-089-1397 kart numaralı ZnO' ya ait XRD verileri.b) PDF 01-070-4175 kart numaralı SnO_2' ye ait XRD verileri c) PDF 00-044-1087 cart numaralı In_2O_3'de ait XRD verileri. d,e,f,g,h,ı) Tablo 3.1 de verilen aygıtlardan ITZO nanotele ait XRD verileri.

3.1 Metal-Oksit Nanotel Köprülü Aygıtlar

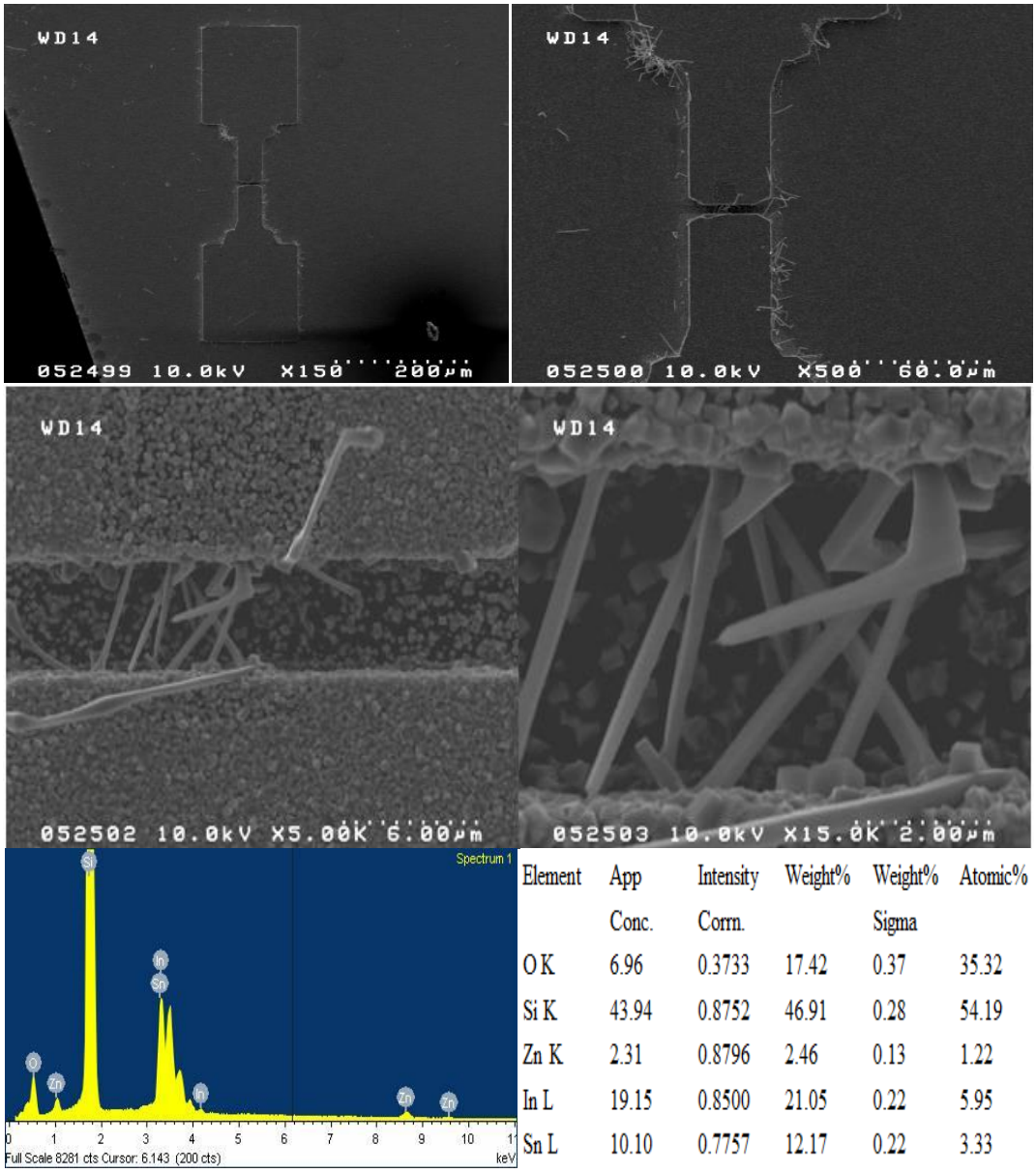
Metal-Oksit nanotel köprülü aygıtlar olarak rezistör, memristör ve alan etkili transistör ler imal edilmiştir. Elde edilen aygıtların SEM, EDX ve elektriksel karakterizasyonlarından elde edilen sonuçları aşağıda verilmiştir.

3.1.1 Rezistör Ölçümleri

Bu bölümde, 7 tanesi ITZO 1 tanesi de Zn katkılı In_2O_3 nanotelli olmak üzere toplam 8 adet nanotel köprülü rezistör'lerin analiz ve elektriksel ölçüm sonuçları verilmiştir.

3.1.1.1 Birinci ITZO Aygıt

Desenlendirilmiş SOI altlıklar üzerine büyütülmüş ITZO nanotellerin farklı büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri ile EDX sonuçları Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	6.96	0.3733	17.42	0.37	35.32
Si K	43.94	0.8752	46.91	0.28	54.19
Zn K	2.31	0.8796	2.46	0.13	1.22
In L	19.15	0.8500	21.05	0.22	5.95
Sn L	10.10	0.7757	12.17	0.22	3.33

Şekil 3.3 1. ITZO aygıtın SEM görünlürei ve EDX analiz sonuçları.

SEM görüntüleri ITZO nanotellerin iki silikon elektrot arasına köprü şeklinde başarılı bir şekilde büyütüldüğünü göstermektedir. Her iki silisyum elektrota temas eden nanotel sayısı açıkça görülmektedir (6 adet). Nanoteller silindirden ziyade şerit şekillidir ve yüzey morfolojisi oldukça iyi gözükmektedir. Bu kapsamda üretilen tüm aygıtların EDX analizlerinden elde edilen Zn/Sn, An/In ve In/Sn atomik oranlar (At. O) ile ağırlık oranları (Ağ. O.) tablo 3.1'de verilmiştir. Atmosfer koşullarında üretilen bu aygıtta karanlık ve UV aydınlatma altında akım-gerilim (I-V) karakteristikleri ölçülmüştür. ± 4 volt aralığında gerçekleştirlen I-V ölçümlerinden elde edilen sonuçlar Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Şekil 3.4'den görüleceği gibi gerek karanlık gerekse UV aydınlatma altında ölçülen I-V karakteristikleri ohmik karakterlidir. Yine Şekil 3.4'ten açıkca görülebileceği gibi UV aydınlatmanın bu aygıtın I-V karakteristiği üzerinde fazlaca bir etkisinin bulunmadığı gözlemlenmiştir.

Tablo 3.1 Nanotel köprülü rezistör aygıtların EDX analiz sonuçlarını kullanarak ikili atomik oranları.

	Zn/Sn		**Zn/In**		**In/Sn**	
	At. O.	Ağ. O.	At. O.	Ağ. O.	At. O.	Ağ. O.
1. ITZO	0.37	0.20	0.20	0.12	1.85	1.73
2. ITZO	2.36	1.33	0.16	0.09	14.75	14.4
3. ITZO	0.93	0.50	0.20	0.11	4.65	4.47
4. ITZO	16.63	9.16	7.02	4.02	2.37	2.28
5. ITZO	2.62	1.48	1.31	0.76	2.00	1.96
6. ITZO	8.89	4.85	7.35	4.2	1.21	1.15
7. ITZO	0.85	0.47	0.20	0.11	4.25	4.12
Zn_In_2O_3	-	-	0.18	0.10	-	-

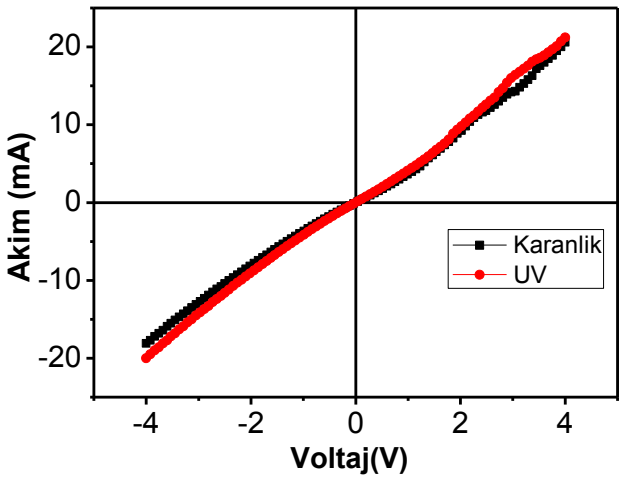
Aygıt karanlık ve UV aydınlatma altında ölçülen I-V karakteristiklerinden hesaplanan direnç değerleri sırasıyla 222,2 Ω ve 204 Ω olarak bulunmuştur. Aygıtın elektrotları arasında yeralan 6 adet nanoteli özdeş kabul edip herbir nanotele ait direnç değerlerini hesapladığımızda elde edilen direnç değeri 1333,2 Ω olarak elde edilir. Nanoteller birbirlerine paralel bağlı olduğundan dolayı eşdeğer direnç;

$$R_{eşdeğer} = \frac{R}{6} = 222{,}2\ \Omega$$

ifadesi ile verilebilir. Burada R tek bir nanotelin direnci olup

$$R = \rho \frac{L}{A} \ (\Omega)$$

ifadesi ile verilir. Burada ρ nanotellerin özdirenci, L uzunluğu ve A nanotellerin kesit alanıdır. Şekil 3.3 te verilen SEM görüntülerinden bulunan şerit şeklindeki nanotellerin ebatları Şekil 3.5 (a) daki gibidir. Ayrıca daha önce de belirtilidiği gibi Si elektrotlar arasında yeralan 6 nanotel birbirine paralel olduğundan bunun eşdeğer devresi de Şekil 3.5 (b) de verilmiştir.

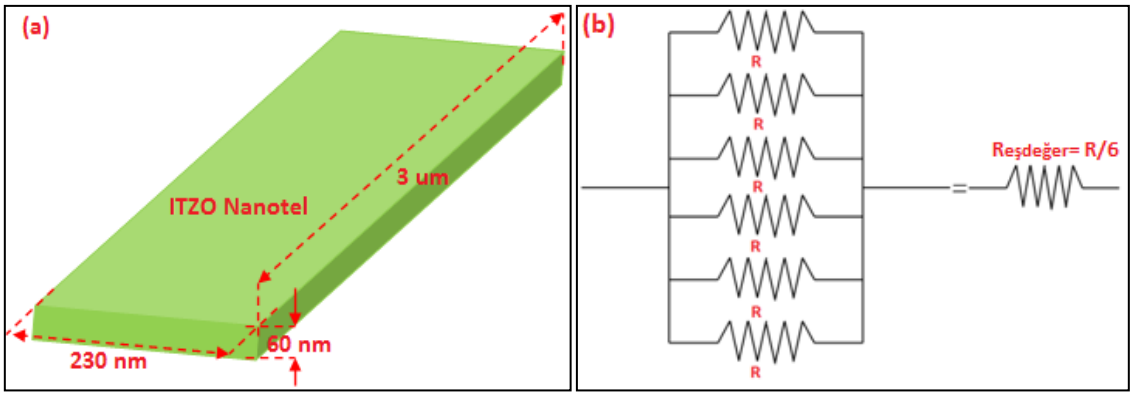


Şekil 3.4 1. ITZO aygıtın I-V karakteristikleri

Şekil 3.5 te verilen değerler doğrultusunda tek bir nanotelin özdirenç değeri ρ=6,13x10^{-4} Ω.cm olarak bulunmuştur. Nanotellerin iletkenliği ve öziletkenliği aşağıda verilen ifadeler yardımıyla hesaplanmıştır.

$$G = \frac{1}{R} \ (\frac{1}{\Omega} = S)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \ (\frac{1}{\Omega . cm} = \frac{S}{cm})$$

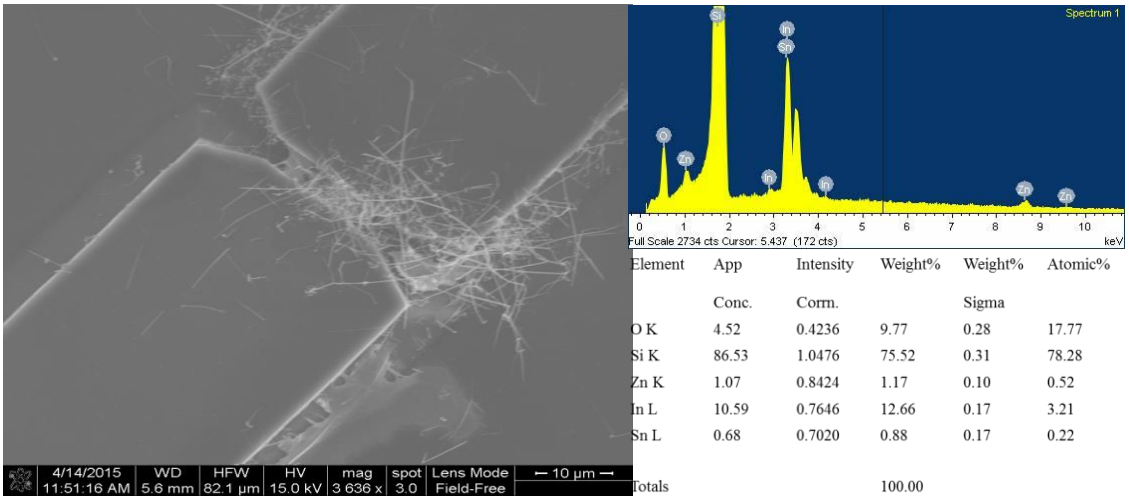


Şekil 3.5 a) 1.ITZO aygıta ait nanotellerin şekli ve ebatları, b) aygıtın eşdeğer devresi.

Buna göre aygıtın toplam iletkenlik değeri $G_{toplam} = 4{,}5x10^{-3}$ (S), sadece tek bir nanotelin iletkenlik değeri $G = 7{,}5x10^{-4}$ (S) ve bir nanotelin öziletkenlik değeri $\sigma = 1{,}63x10^{3}$ $(\frac{S}{cm})$ olarak elde edilmiştir.

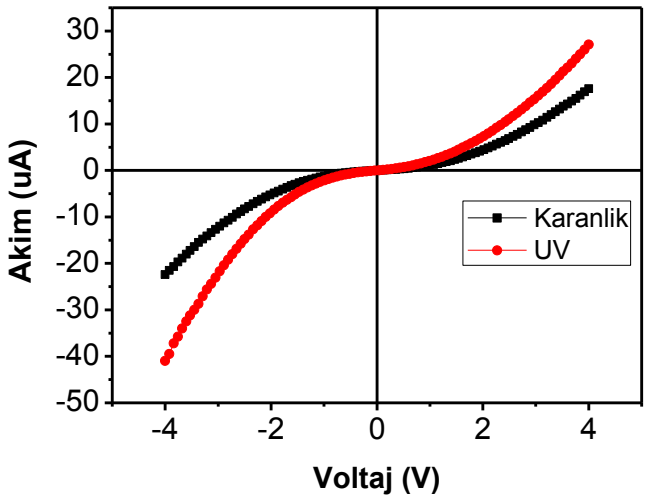
3.1.1.2 İkinci ITZO Aygıt

Farklı Zn/Sn (2.36), Zn/In (0.16) ve In/Sn (14.75) atomik oranlarında üretilen aygıta (2. ITZO) ait SEM görtüntüleri Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Birinci örnek ile karşılaştırıldığında daha fazla fakat genel itibariyle daha düzensiz nanoteller elde edilmiştir. Elde edilen nanotellerin kompozisyonu EDX analizleri ile belirlenmiş ve sonuçlar Şekil 3.6'da gösterilmiştir. İndiyum oranı bakımında zengin olan bu aygıtta gerek karanlık gerekse UV aydınlatma altında ölçülen I-V karakteristiklerinin doğrultucu karakterde olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.7). Şekil 3.7'nin dikkatlice incelenmesinden karanlık ortamda ölçülen I-V karakteristiği neredeyse simetrik iken UV aydınlatma altında ölçülen I-V karakteristiğinin simetrik olmadığı görülmüştür (Uygulanan gerilimin negatif değerlerinde gözlemlenen akımın gerilimin, pozitifi değerleri için ölçülen akımdan daha büyüktür).



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	4.52	0.4236	9.77	0.28	17.77
Si K	86.53	1.0476	75.52	0.31	78.28
Zn K	1.07	0.8424	1.17	0.10	0.52
In L	10.59	0.7646	12.66	0.17	3.21
Sn L	0.68	0.7020	0.88	0.17	0.22
Totals			100.00		

Şekil 3.6 2. ITZO aygıtın SEM ve EDX analiz sonuçları.

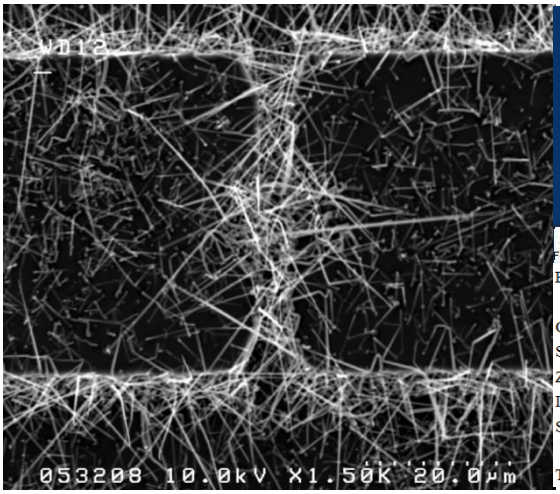


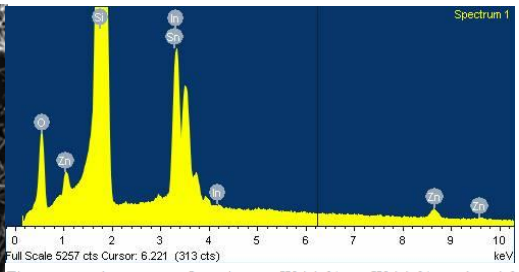
Şekil 3.7 2. ITZO aygıtın I-V karakteristikleri.

3.1.1.3 Üçüncü ITZO Aygıt

Üretilen üçüncü ITZO rezistör aygıtın SEM görüntüsü Şekil 3.8 de verilmiştir. SEM görüntüsünden de görüldüğü üzere oldukça yoğun nanotel oluşumu söz konusudur. Elde edilen tellerin çapları yaklaşık 300 nm olarak hesaplanmıştır. Tellerin boyları genel itibariyle mikron uzunlukta olup oldukça uzun teller de görülmektedir. Ayrıca tellerin sivri uçlara sahip olduğu da görülmektedir ve bu In_2O_3 materyalinden kaynaklanmaktadır [198]. EDX analizlerinden elde edilen sonuçlara baktığımız zaman çinko (Zn) ve kalay (Sn) atomlarının oranları birbirine çok yakın olmakla beraber

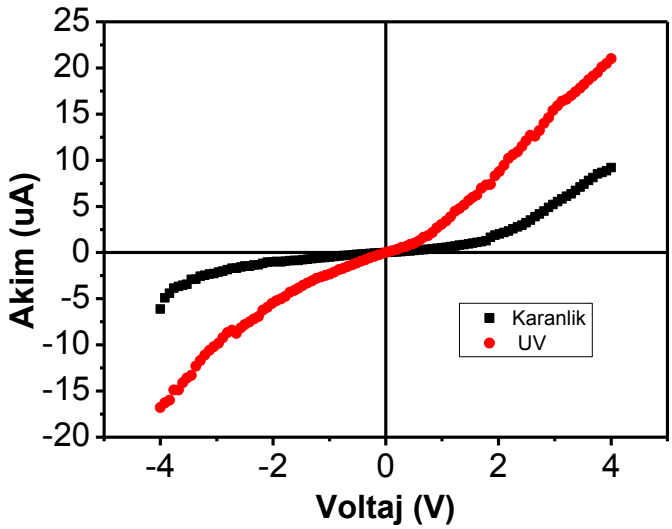
indiyum (In) atomlarının oranı yaklaşık bunlardan 5 kat daha yoğun olduğu anlaşılmıştır. Aygıtın I-V karakteristiği incelendiğinde (Şekil 3.9), lineer bir davranış gözlenmemektedir bu durum nanoteller ile silisyum elektrotlar arasındaki enerji bariyerine atfedilebilir. Ayrıca aygıtın UV ışığa tepkisi önceki aygıtlar mertebesinde olduğu gözlemlenmiştir.





Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	5.87	0.4273	11.11	0.19	20.05
Si K	94.64	1.0369	73.84	0.21	75.94
Zn K	1.32	0.8423	1.27	0.07	0.56
In L	10.69	0.7677	11.27	0.11	2.83
Sn L	2.19	0.7046	2.52	0.11	0.61
Totals			100.00		

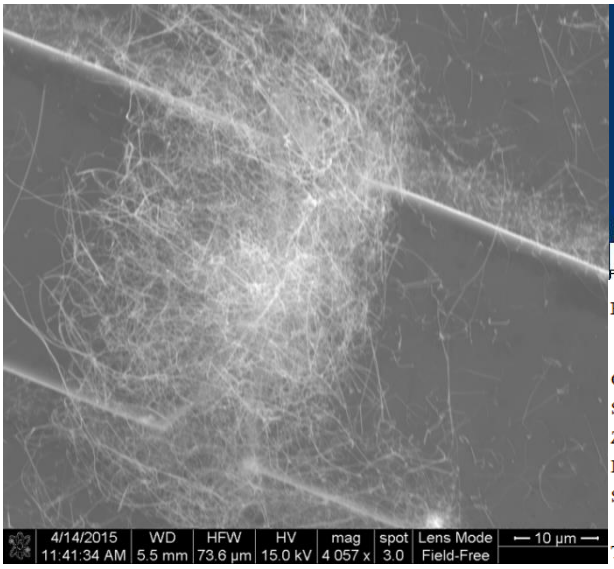
Şekil 3.8 3. ITZO rezistör aygıtın SEM, EDX analiz sonuçları.

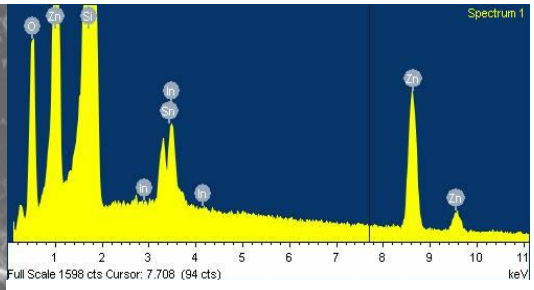


Şekil 3.9 3. ITZO rezistör aygıtın elektriksel ölçümlerinin sonuçları.

3.1.1.4 Dördüncü ITZO Aygıt

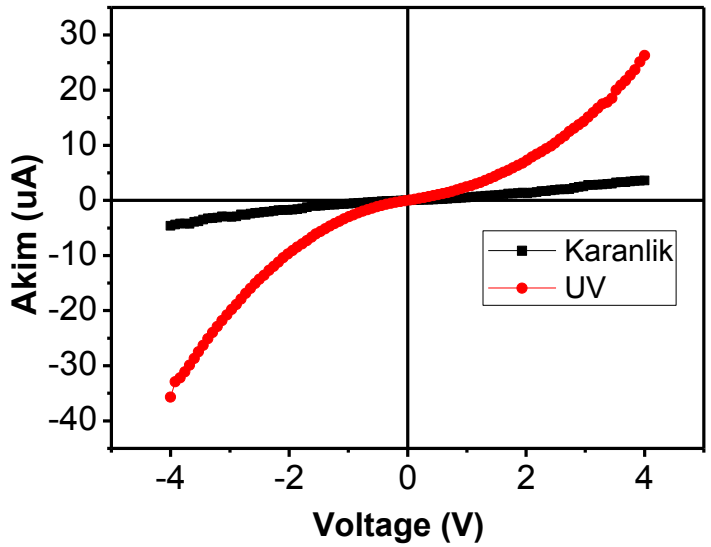
Dördüncü ITZO rezistör aygıtının Şekil 3.10 da verilen SEM görüntüsünden görüldüğü üzere nanoteller yumak şeklinde elektrotlar arasında yığılmış vaziyettedir. Elde edilen tellerin çaplarının yaklaşık 230 nm olduğu, uzunlukları tam olarak seçilemese de yumak şeklinde dolandığından oldukça uzun tellerin oluştuğu anlaşılmaktadır. EDX analizinden elde edilen sonuçlara göre Zn yönünden zengin olan bu tellerin In ve Sn atomlarının kütlece eşit olduğu görülmektedir. Zn nin yoğun olması UV ışığa tepkiyi de arttırmış durumdadır. Bilindiği ZnO (3.37 eV), In_2O_3 (3.7 eV) ve SnO_2 (3.6 eV) ye göre daha dar bir band aralığına sahiptir. Dolayısıyla UV ışığa en iyi tepkiyi verebilecek durumda olan ZnO dur. Şekil 3.11 de verilen aygıtın I-V karakteristiği incelendiğinde tam lineer bir davranış görülmemektedir.





Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	7.71	0.5172	11.87	0.24	21.00
Si K	86.45	0.9507	72.46	0.26	73.00
Zn K	12.16	0.8394	11.54	0.16	4.99
In L	2.72	0.7537	2.87	0.11	0.71
Sn L	1.10	0.6926	1.26	0.11	0.30
Totals			100.00		

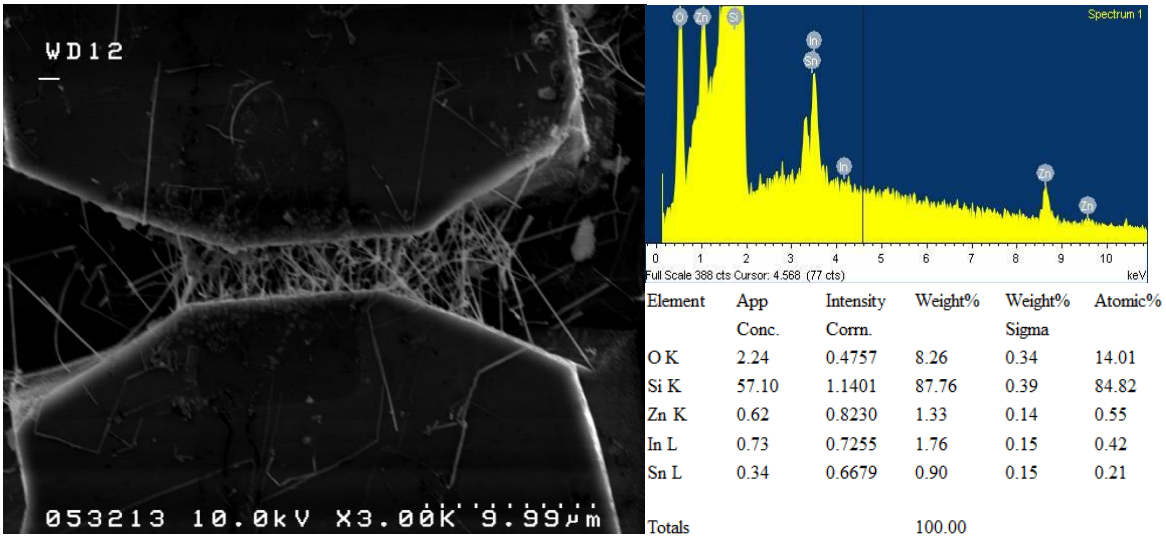
Şekil 3.10 Dördüncü ITZO rezistör aygıtının sırasıyla SEM, EDX analiz sonuçları.



Şekil 3.11 Dördüncü ITZO rezistör aygıtının elektriksel karakterizasyonun sonuçları.

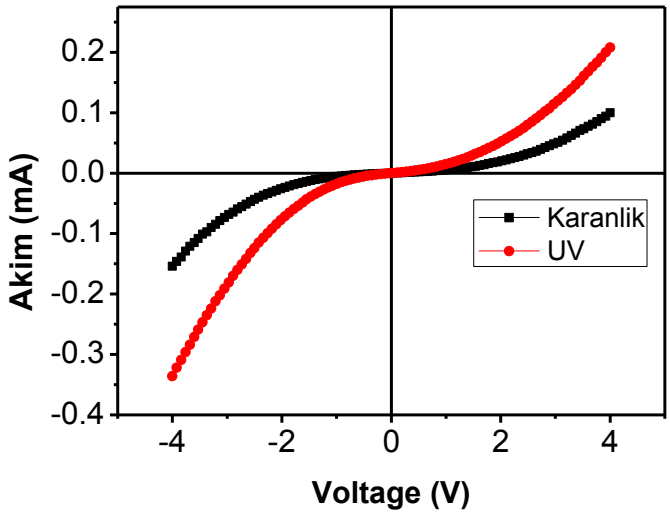
3.1.1.5 Beşinci ITZO Aygıt

Beşinci ITZO aygıtın SEM görüntüsü Şekil 3.12 de verilmiştir. Kısmen daha az yoğun nanoteller elde edilmiş olup, elde edilen tellerin ortalama çapları 250 nm olarak belirlenmiştir. Nanoteller silisyum elektrotlar arasında hem paralel olarak hem de hafif dikey ve çapraz şekillerde büyümüştür. Bu durum metal-katalisit kullanılmadığı için buharlaşan kaynak materyalin her bölgede eşit derecede yoğunlaşmamasından ve dolayısıyla tellerin her bölgede büyümemesinden kaynaklanmaktadır. Aygıtın EDX analizlerinden elde edilen sonuçlara göre Zn atomik olarak en çok yüzdeye sahip olup Sn en düşük yüzdeye sahip olduğu görülmektedir. Fakat bu yüzdelerin veya oranların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bir önceki örnek ile karşılaştırıldığında Zn oranı büyük oranda düşmüştür ve durum UV ışığa tepkide de kendini göstermiştir. Burada In ve Sn oranlarının bir önceki örneğe göre artmış olması nanotellerin band aralıklarının artmasına neden olmuş olup UV ışığa tepkide azalmaya neden olmuştur. Bu aygıtta da I-V karakteristiği (Şekil 3.13) tam lineer olmayıp bu durum diğer örneklerde olduğu gibi nanoteller ile silisyum elektrotlar arasındaki enerji engeline atfedilebilir.



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	2.24	0.4757	8.26	0.34	14.01
Si K	57.10	1.1401	87.76	0.39	84.82
Zn K	0.62	0.8230	1.33	0.14	0.55
In L	0.73	0.7255	1.76	0.15	0.42
Sn L	0.34	0.6679	0.90	0.15	0.21
Totals			100.00		

Şekil 3.12 Beşinci ITZO rezistör aygıtın sırasıyla SEM, EDX analizlerinin sonuçları.

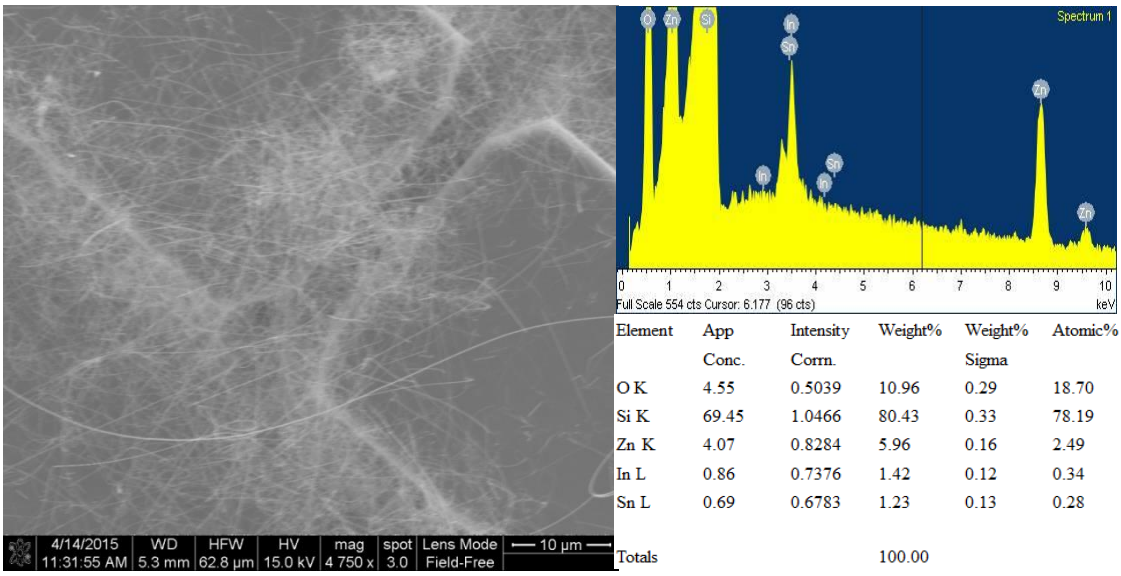


Şekil 3.13 Beşinci ITZO rezistör aygıtın elektriksel karakterizasyon sonuçları.

3.1.1.6 Altıncı ITZO Aygıt

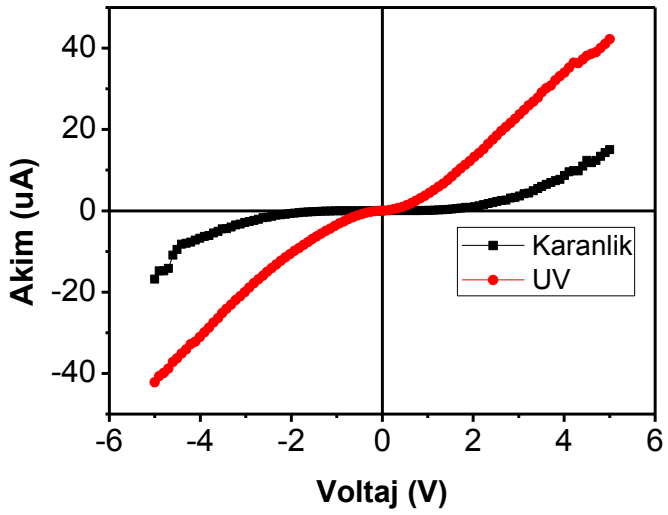
Ürettiğimiz ITZO rezistör aygıtlardan bir diğerinin SEM görüntüsü Şekil 3.14 te verilmiştir. Bir önceki örneğe göre biraz daha yoğun bir nanotel oluşumu olduğu görülmüştür. Elde edilen nanoteller diğer aygıtlarda da olduğu gibi uzun denilebilecek boylara sahiptir. SEM görüntüsünden de görüldüğü üzere S şeklinde kıvrılmış bir tel görülmektedir. Elde edilen tellerin çaplarının ortalama 180 nm civarında olduğu anlaşılmıştır. Tellerin gelişigüzel yönlerde büyümesinin nedeni daha önce de belirtildiği

gibi herhangi metal katalisitin kullanılmamasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi metal katalisit nanotellerin çaplarını kontrolü üzerinde önemli bir rol oynamasının yanı sıra kısmen tellerin daha düzenli bir şekilde sağlamaktadır. Ayrıca VSS metodunda altlık üzerine gelen ilk kaynak materyalin buharı katalisit veya çekirdek (seed) görevi gördüğü için gelen bu buhar materyalin yoğunlaşma bölgeleri nanotellerin yoğun olduğu bölgeleri oluşturur. Aygıtın EDX analizleri Zn nin atomik yönden daha yoğun olduğunu göstermektedir. In ve Sn atomik yönden birbirine çok yakın olmakla birlikte Zn bunlardan ortalama 8 kat daha fazla atomik yoğunluğa sahiptir. Dolayısıyla UV ışıkta önceki örnekte olduğu gibi kısmen yüksek bir tepki olduğu görülmüş ve bu durum Zn nin atomik olarak daha fazla olduğu aygıtlardaki UV tepkisinden daha fazla olduğu görülmüştür. Lineer olmayan I-V karakteristiği (Şekil 3.15) diğer aygıtlarda olduğu gibi bu aygıtta da görülmüştür.



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	4.55	0.5039	10.96	0.29	18.70
Si K	69.45	1.0466	80.43	0.33	78.19
Zn K	4.07	0.8284	5.96	0.16	2.49
In L	0.86	0.7376	1.42	0.12	0.34
Sn L	0.69	0.6783	1.23	0.13	0.28
Totals			100.00		

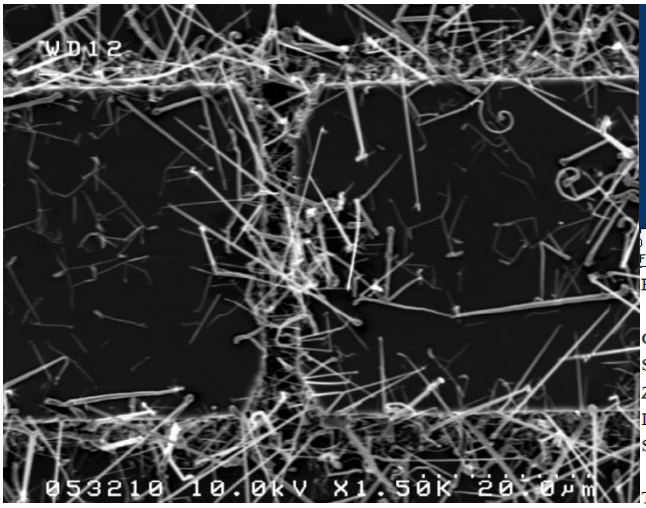
Şekil 3.14 Altıncı ITZO rezistör aygıtının SEM, EDX ve elektriksel karakterizasyon analizlerinin sonuçları.

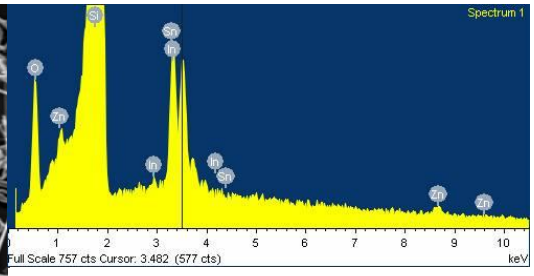


Şekil 3.15 Altıncı ITZO rezistör aygıtının SEM, EDX ve elektriksel karakterizasyon analizlerinin sonuçları.

3.1.1.7 Yedinci ITZO Aygıt

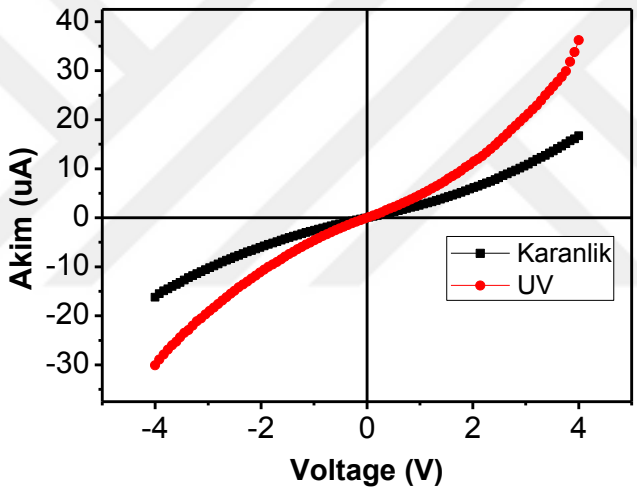
Yedinci ITZO aygıtın SEM görüntüsüne (Şekil 3.16) bakıldığında oldukça yoğun nanotel oluşumuna rastlanmaktadır. Elde edilen nanotellerin bir kısmının diğer aygıtlarınkinden farklı olarak iğne şeklinde sivri uçlara sahip olması göze çarpmaktadır. Sivri uçlu nanoyapılar daha önce de değinildiği gibi indiyum materyalinin yoğunluğunun diğerlerine oranla daha baskın olmasından yani indiyumun kendisinden kaynaklanmaktadır [198]. Elde edilen nanotellerin ortalama çapları 325 nm olarak belirlenmiştir. Dikkat edilirse ürettiğimiz bütün aygıtlarda çapı 100 nm altında olan veya daha küçük çaplı nanotel nereyse hiç yoktur. Bunun nedeni daha öncede literatürde belirtildiği üzere VSS metodu ile üretilen nanotellerin kısmen büyük çaplara sahip olmalarındandır. Nanotellerin EDX analizleri (Şekil 3.16) bu tellerin içeriğinin In atomu bakımından zengin olduğunu göstermektedir. Zn ve Sn atomlarının oranı neredeyse aynı (Zn/Sn oranı 0.85) iken In atomunun bunların 5 katı olduğu görülmektedir. Nanotellerin sivri uçlara sahip olması da In atomunun baskın olmasına atfedilebilir. Nitekim In_2O_3 daha geniş enerji band aralığına sahip olduğu için UV ışığa tepkisi Zn atomunun baskın olduğu aygıtlarınkinden daha az olduğu göze çarpmaktadır. Bu aygıtın I-V karakteristiğinde (Şekil 3.17) doğrusal olmadığı gözlemlenmiştir.





Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	2.51	0.4476	8.23	0.33	14.40
Si K	63.66	1.1126	83.89	0.39	83.57
Zn K	0.37	0.8306	0.66	0.12	0.28
In L	2.93	0.7397	5.81	0.18	1.41
Sn L	0.65	0.6803	1.41	0.18	0.33
Totals			100.00		

Şekil 3.16 Yedinci ITZO rezistör aygıta ait SEM, EDX analizlerin sonuçları.

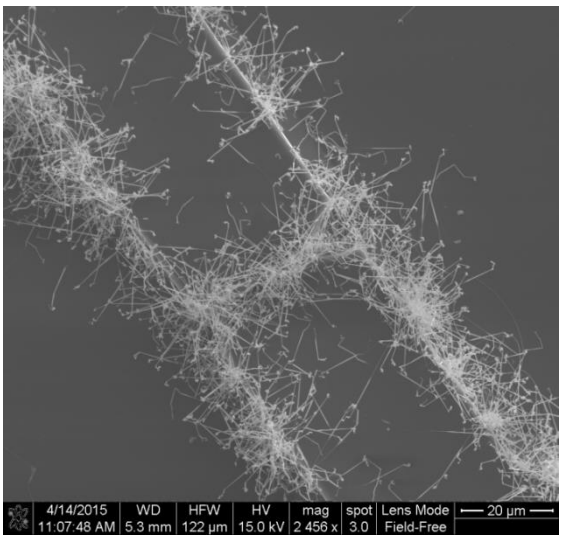


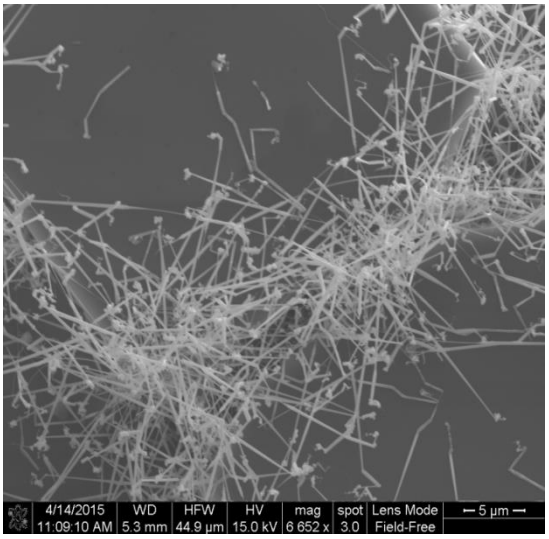
Şekil 3.17 Yedinci ITZO rezistör aygıta ait elektriksel karakterizasyon sonuçları.

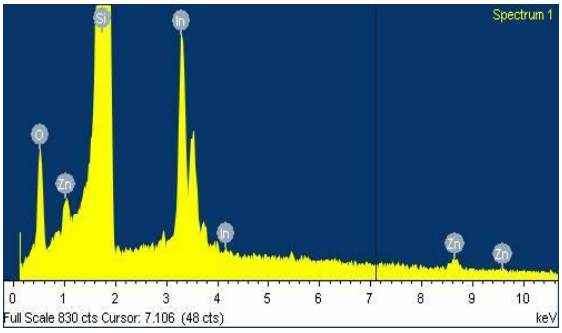
3.1.1.8 Zn Katkılı In_2O_3 Aygıt

Zn katkılı In_2O_3 nanotel köprülü aygıtın Şekil 3.18 de verilen SEM görüntüsü incelendiğinde oldukça yoğun bir nanotel oluşumu gözlemlenmektedir. Nanoteller silisyum elektrotlar arasında karşılıklı olarak büyüyüp bu aralığı tamamıyla doldurmuş vaziyettedir. Elde edilen nanotellerin çapları ortalama 140 nm olarak hesaplanmıştır. In atomu bakımından baskın olduğu sivri uçlu nanotel oluşumu bu aygıtta da gözlemlenmiştir. EDX analizlerinden (Şekil 3.18) In/Zn oranının 5 ten daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan UV ölçümleri neticesinde elde edilen tepki daha önceki

In atomu yönünden baskın olan aygıtlardakine benzer bir davranış sergilemiştir. Aygıtın I-V (Şekil 3.19) karakteristiği incelendiğinde diyot türü davranış açık bir şekilde görülmektedir.

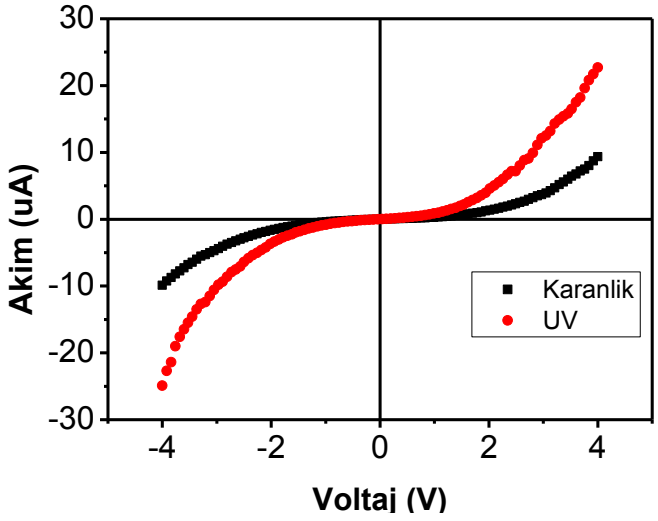






Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	1.93	0.4378	9.56	0.39	16.98
Si K	39.19	1.0752	79.06	0.41	80.01
Zn K	0.41	0.8362	1.05	0.16	0.46
In L	3.59	0.7531	10.33	0.23	2.56
Totals			100.00		

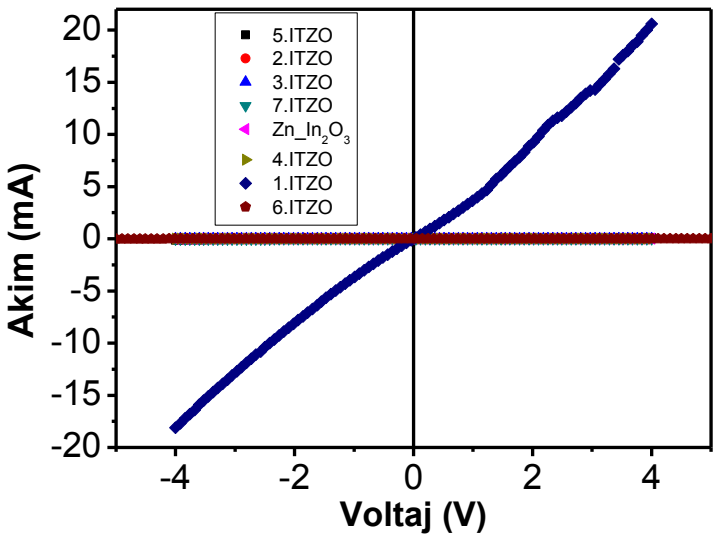
Şekil 3.18 Zn katkılı In_2O_3 nanotel köprülü aygıtın SEM, EDX analiz ölçüm sonuçları.



Şekil 3.19 Zn katkılı In_2O_3 nanotel köprülü aygıtın elektriksel ölçüm sonuçları.

3.1.1.9 Tüm Rezistör Aygıtların Karşılaştırmalı Analizi

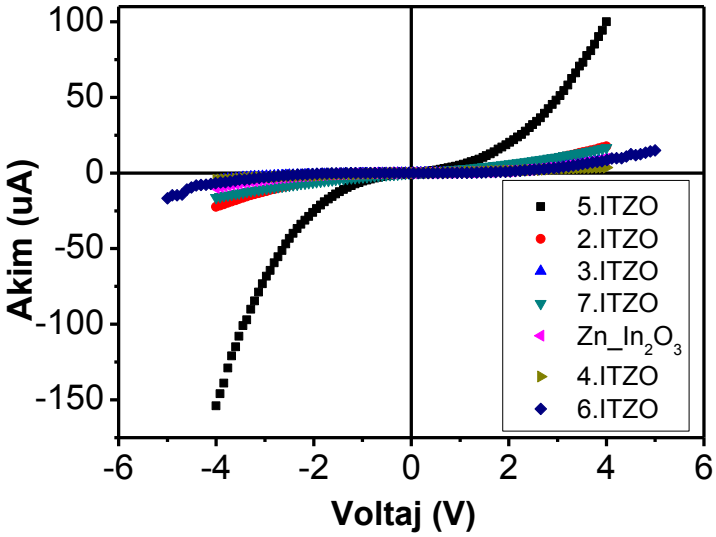
Elde ettiğimiz tüm rezistör aygıtların karanlık ortamda ölçülen I-V karakteristikleri tek bir grafik üzerinde gösterilerek aygıtlar arasındaki karşılaştırma nanotellerin kompozisyonlarından faydalanılarak yorumlanıp değerlendirilecektir. Şekil 3.20 den de görüleceği üzere 1. ITZO aygıtın neredeyse iletken olmasından dolayı diğer aygıtların akım değerleri ile karşılaştırılamamaktadır. Bunun için 1.ITZO aygıt bu gruptan çıkarılarak diğer aygıtlar için tekrar bir I-V grafiği çizilmiştir. Şekil 3.21 de bu grafiklerin toplu gösterimi verilmiştir. Grafikten de görüleceği üzere 5. ITZO aygıt akım değeri olarak diğerlerine oranla daha baskın durumdadır. Dolayısıyla 5. ITZO aygıt elektriksel iletkenlik açısından bakıldığında tüm grup içerisinde 2. durumdadır. Burada 1. ve 5. aygıtta In/Sn atomik oranının birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. 5. ITZO aygıttaki Zn atomunun In ve Sn ye oranları 1.ITZO ile karşılaştırıldığında 5-6 kat arttığı ve dolayısıyla iletkenliği düşürdüğü gözlemlenmiştir. Aynı zamanda 1. ITZO aygıt ile karşılaştırıldığında 5.ITZO aygıtın akım-voltaj karakteristiğinin lineerden saptığı görülmektedir.



Şekil 3.20 Tüm rezistör aygıtların I-V karakteristiklerinin toplu halde gösterimi.

Şekil 3.22 de verilen grafiklerden 2. ve 7. ITZO aygıtların I-V karakteristikleri karşılaştırıldığında maksimum akım değerlerinin pozitif bölgede neredeyse aynı iken negatif bölgede 2. aygıt bir miktar yüksek akım değerine sahip olduğu görülmektedir. Her iki aygıtın I-V karakteristikleri incelendiğinde 2. aygıtın daha büyük bir enerji

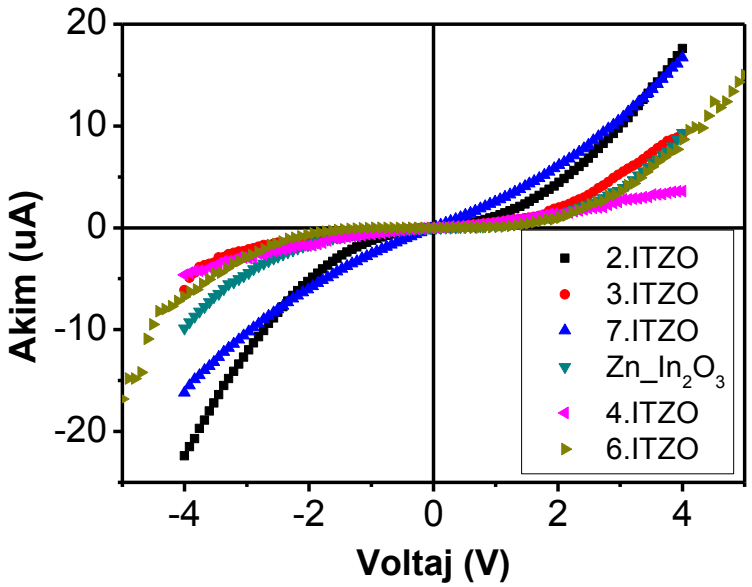
engeline sahip olduğu bu aygıtın diyot tipi davranışından anlaşılmaktadır. Tablo 3.1 den bu iki aygıtın atomik oranlarına baktığımızda In/Sn oranı 2. aygıt için 14,75 iken 7. aygıt için bu değer 4,25 olarak görmekteyiz ki bu da 2. aygıtın oldukça yüksek oranda In atomu içerdiğini göstermektedir. Zn/In oranının her iki aygıt için neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu oranlar için bir yorum yapmamakla birlikte Zn/Sn oranları için bir yorum yapılabilir. Zn/Sn oranı 2. aygıt için 2,36 iken 7. aygıt için 0,85 değerinde kalmaktadır. Buradan ikinci aygıtın Zn yönünden daha zengin olduğunu göstermektedir. 2. aygıtın I-V karakteristiğine bakıldığında düşük voltaj değerlerinde hatta pozitif bölgede 3V ile negatif bölgede -2V bölgeleri arasında daha düşük iletkenliğe sahip olduğu görülmektedir. Bu durum 2. aygıtta Zn nin daha yoğun olmasına atfedilebilir. 7. aygıtın daha düşük bir enerji engeline sahip olması In/Sn oranının bu aygıt için daha düşük olması aygıtın ITO gibi yakın bir kompozisyonuna getirmiş olmasına atfedebiliriz.



Şekil 3.21 1 numaralı aygıtın gruptan çıkarılması ile elde edilen diğer rezistör aygıtların karanlıktaki I-V karakteristiklerinin gösterimi. Bu durumda 6 numaralı diğerlerine oranla daha baskın durumdadır.

Diğer aygıtlardan 3.ITZO, 6. ITZO ve Zn katkılı In_2O_3 ($Zn_In_2O_3$) aygıtların I-V davranışları yaklaşık birbirlerine benzemektedir. Pozitif bölgede bu aygıtların akım değerleri neredeyse aynı değerde iken negatif bölgede $Zn_In_2O_3$ aygıtının akım değeri bir miktar yüksektir. Her üç aygıt tipik diyot davranışına sahip olup maruz kaldıkları

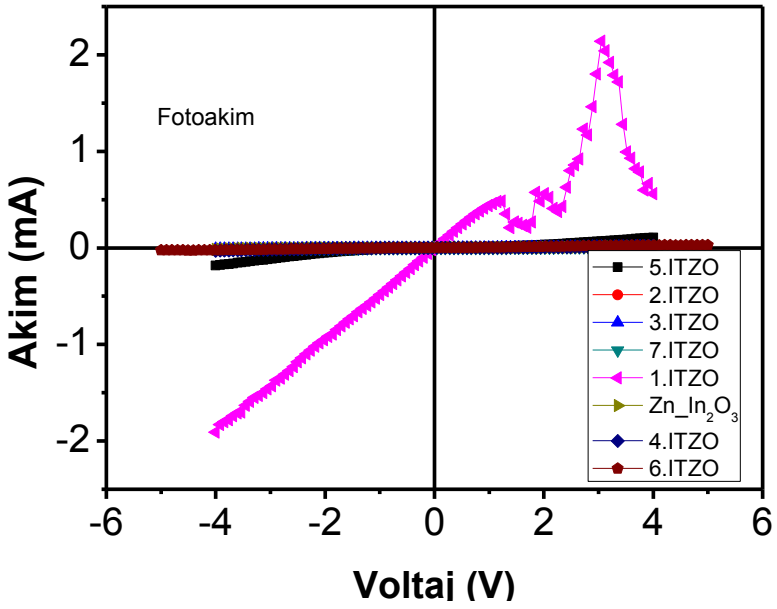
enerji bariyeri neredeyse aynı gibidir. Bu aygıtlardan 4.ITZO aygıt en düşük akım değerine sahip görünmektedir. Diğer aygıtlarla karşılaştırıldığında (3., 6. ITZO ve Zn_In_2O_3) 4.ITZO aygıtın I-V karakteristiğinin daha doğrusal olduğu görülmektedir. Bu durum daha önce de belirttiğimiz gibi 1. ve 7. ITZO aygıtta olduğu gibi In/Sn oranının kısmen daha düşük olması ve bu aygıtları ITO gibi bir kompozisyona sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu aygıtın en düşük akım değerine sahip olması da daha önce belirttiğimiz gibi yüksek oranda Zn ye sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Nitekim Zn/In oranı 7,02 ve Zn/Sn oranı 16,63 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.22 Bir önceki grafikten 6 numaralı örneğinde çıkarılması elde edilen I-V karakteristikleri. Bu grupta yer alan aygıtlar için karşılaştırmalı olarak yorum yapılabilecek bir durum söz konusudur.

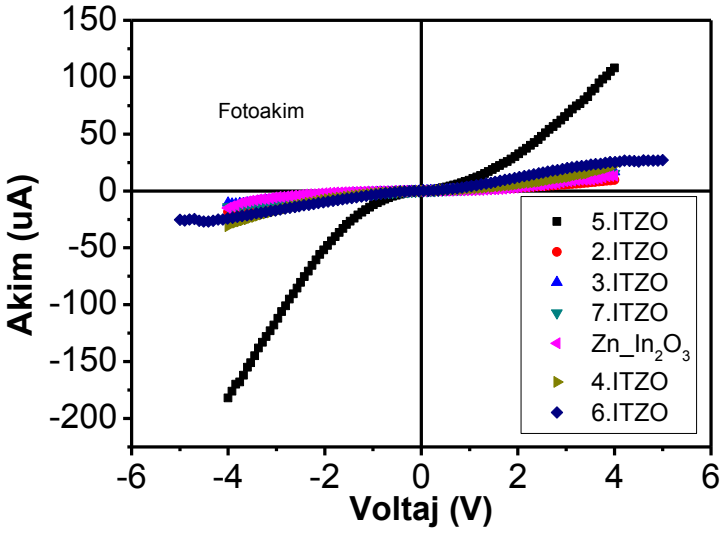
Bilindiği gibi bu aygıtların UV ışığa tepkileri de ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlardan aygıtların fotoakımlarının gerilime bağlı değişimleri aşağıdaki grafiklerde verilmiştir. Şekil 3.23 te tüm aygıtların fotoakım grafikleri beraber verilmiştir. Fakat 1. ITZO aygıtın yüksek iletkenliğe sahip olmasından dolayı, bu grafik diğer aygıtların grafiklerini bastırdığından sırasıyla önce 1. ve sonra da 5.ITZO aygıtlar bu grafiklerden çıkarılıp diğerlerinin de grafikleri ortaya çıkarılıp kendi içlerinde karşılaştırmaları sağlanmıştır. Şekil 3.24 te verilen grafikten de görüleceği üzere 7. ve 2. ITZO aygıtlar

1.ve 5.ITZO aygıtlardan sonra en yüksek fotoakım değerlerine sahip görünmektedir. Elde edilen değerlerden UV ışığa bağlı elde edilen tepki oranları bize hangi aygıttan daha iyi kazanç elde edildiğini verecektir.



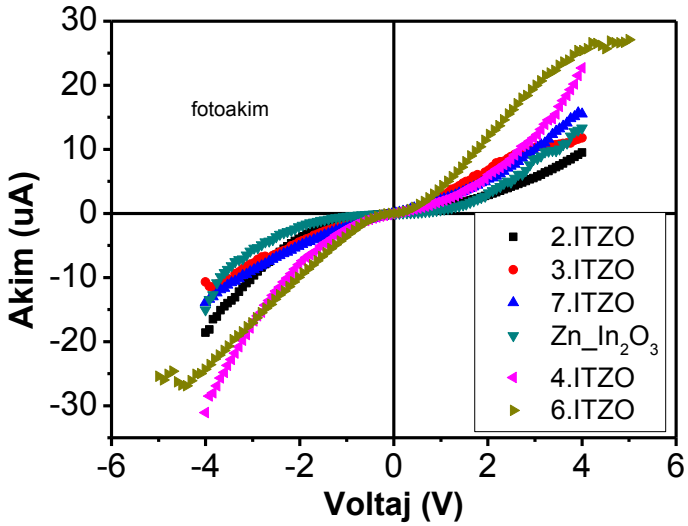
Şekil 3.23 Tüm rezistör aygıtların fotoakım değerlerinin gerilime bağlı değişimi.

Buna göre en yüksek ilk iki tepki oranı sırasıyla 4. ITZO aygıtta, onu takiben 6.ITZO aygıtta elde edilmiştir. Bu iki aygıtın EDX analiz sonuçlarından kompozisyonları incelendiğinde bu aygıtlarda Zn konsantrasyonunun yüksek olduğu göze çarpmaktadır. Zn nin yüksek konsantrasyona sahip olması ZnO' nun kısmen daha dar bir enerji aralığına sahip olmasından dolayı UV ışık daha fazla yük taşıyıcısını iletim bandına uyarmaktadır.



Şekil 3.24 Tüm rezistör aygıtlardan 1. aygıtın verileri çıkarıldıktan sonra kalan aygıtların fotoakım değerlerinin gerilime bağlı değişimleri

Elde edilen fotoakım grafiklerinden en düşük fotoakım kazancı 2. ITZO aygıtta elde edilmiştir. Bu aygıtın içeriğine baktığımızda In yönünden oldukça zengin olduğu görülmektedir. In_2O_3 kullandığımız metal-oksit materyaller içerisinde en geniş band aralığına (3.7 eV) sahip olduğu için UV ışık yeterince elektronu iletim bandına uyaramamıştır. Nitekim bu aygıtın 1. ITZO aygıttan sonra en düşük UV ışığa tepki oranına sahip olduğu rahatlıkla görmekteyiz .



Şekil 3.25 5.aygıtın verileri çıkarıldıktan sonra kalan aygıtların fotoakım değerlerinin gerilime bağlı değişimleri.

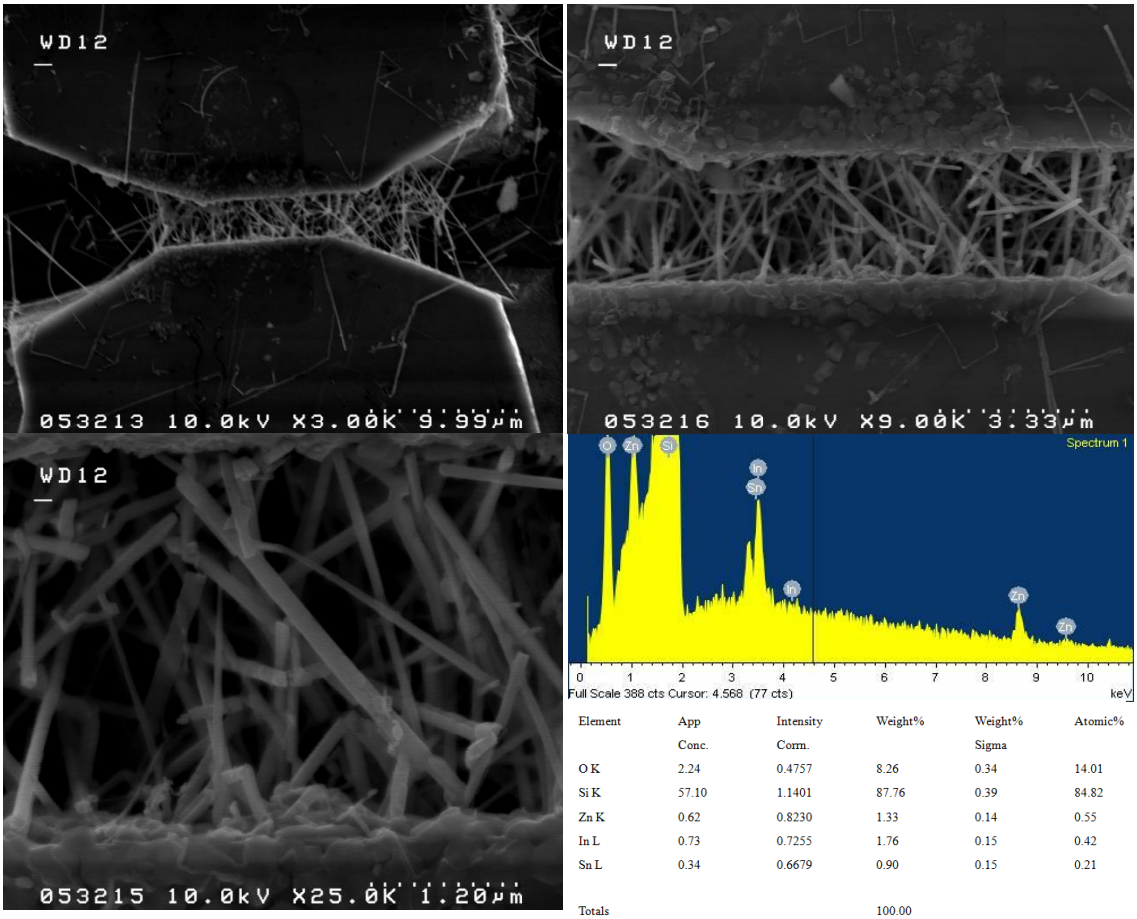
3.1.2 Alan Etkili Transistör (FET) Ölçümleri

Alan etkili transistörlerin (FET) üretim ve karakterizasyonu rezistör ölçümlerinde olduğu gibi aynı koşullar kullanıldığı için tekrar bu işlemlerin ayrıntıları yazılmayacaktır. Gerek elektriksel karakterizasyondan ve gerekse yapısal ve kimyasal analizlerden elde edilen bulgular her bir FET aygıtı için ayrı ayrı verilecektir.

3.1.2.1 Birinci ITZO FET

ITZO nanotellerin üretimi için ZnO, SnO_2 ve In_2O_3 materyallerinin farklı oranlardaki karışımlarından elde edilen nanotellerin ve bunlardan üretilmiş FET lerin SEM, EDX ve elektriksel ölçüm sonuçları sırasıyla aşağıda gösterilmiştir. 5 farklı ITZO nanotel FET ile bir Zn katkılı In_2O_3 nanotel FET olmak üzere toplamda 6 farklı kompozisyona sahip nanotel köprülü FET imal edilmiştir. Daha önce de bahsedildiği üzere tüm nanoteller aynı ortam koşulları ve yine aynı büyütme parametreleri altında elde edilmiştir. FET'lerin karakterizasyonu yapılırken ITZO aygıtlar için çıkış karakteristikleri değişken olmakla beraber genellikle farklı negatif kapı gerilimleri altında (genellikle 0 ile -40 V arası) düşük kaynak-savak voltajı (genellikle 4V) uygulanarak akım değerleri ölçülmüştür. Zn katkılı In_2O_3 aygıtı için kaynak-savak voltajı 16 V ve kapı gerilimleri 0V ile 40 V arasında değişmektedir.

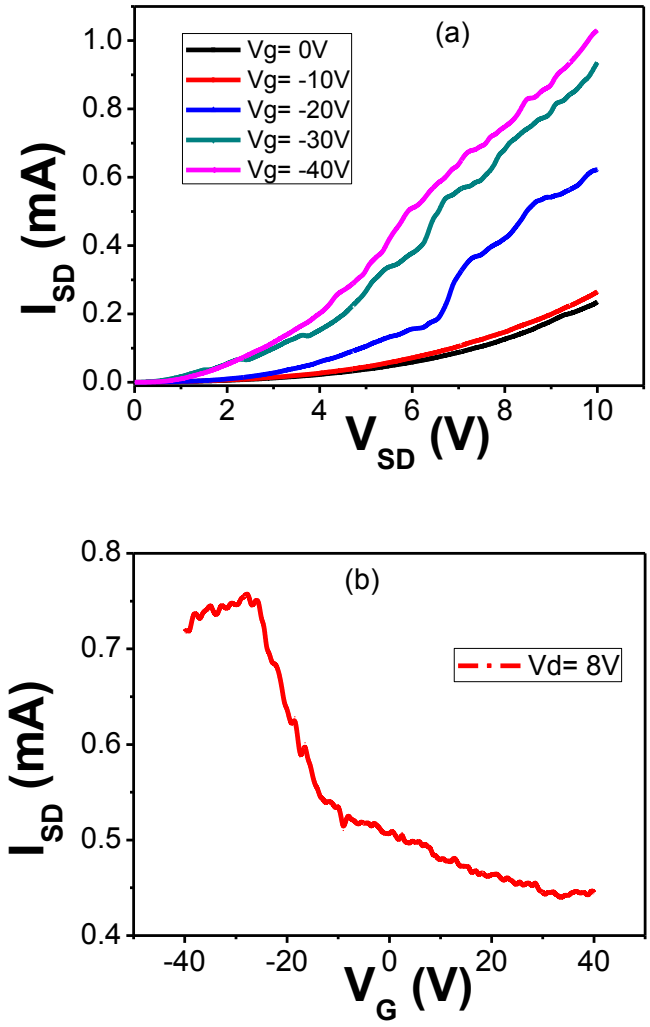
Şekil 3.26 dan da görüldüğü üzere 1. ITZO nanotel aktif katmanlı FET in SEM, EDX ve elektriksel ölçümlerin sonuçları sırasıyla verilmiştir. SEM görüntülerinden nanotellerin büyük oranla düzgün bir şekilde yöneldiği görülmektedir. Elde edilen nanotellerin çapları kabaca 125 nm olarak tespit edilmiştir. Nanotellerin yöneldiği kanalın uzunluğu daha önce de belirtildiği üzere 3 μm uzunluğundadır. Silisyum elektrotlar arasında oluşan nanotellerin SiO_2 yalıtkan yüzeyine en yakın olan nanoteller sadece kapı elektrotundan uygulanan elektrik sinyalinden etkilenirken daha yukarıda olan nanoteller bu elektrik sinyalinden neredeyse hiç etkilenmezler. Yani kapı elektrotuna uygulanan bir elektrik alan yalıtkan tabakanın yüzeyine yakın konumdaki nanotellerde bir kanal oluşumu meydana getirebilir yalıtkan tabakanın yüzeyinden daha uzaktaki nanotellerde uygulanan bu elektrik alan nanotellerde kanal oluşturmaya yetmeyecektir. Çünkü nanoteller yüzeyden uzaklaştıkça nanotellerin içerisinde transistör kanalı oluşturmak için kapı elektrotuna uygulanacak olan elektrik sinyalinin değeri daha da artacaktır.



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	2.24	0.4757	8.26	0.34	14.01
Si K	57.10	1.1401	87.76	0.39	84.82
Zn K	0.62	0.8230	1.33	0.14	0.55
In L	0.73	0.7255	1.76	0.15	0.42
Sn L	0.34	0.6679	0.90	0.15	0.21
Totals			100.00		

Şekil 3.26 1. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının SEM ve EDX analiz sonuçları.

Dolayısıyla transistörün çalışmasına katkıda sağlayacak nanoteller hesaplanırken bir istatistik uygulanacaktır. Bu istatistik şöyle yapılacaktır: Kanalda oluşan nanotellerin üst kısmı ile alt kısmının aynı şekilde konumlandığını farz edeceğiz. Yani kanalın üst kısmında yüzeydeki nanoteller kabaca hesaplanarak alt kısmının da aynı şekilde olduğunu kabul edeceğiz Biz yüzeyde yer alan nanotellerden faydalanarak, yüzeyde birim genişlik başına düşen nanotelleri hesaplayacağız. Transistörün yüzeyindeki nanotellerin sayısını alt kısmındaki nanotellerin sayısına eşit olduğunu düşünerek transistörün çalışmasına katkı sağlayan telleri tespit edeceğiz.



Şekil 3.27 1. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının elektriksel ölçüm sonuçları. a)çıkış karakteristiği, b) transfer karakteristiği.

Transistörün çalışmasına katkı sağlayacak nanotellerin sayısı kabaca 90 olarak tespit edilmiştir. Transistör parametreleri için daha önce 1. Bölümde alan etkili transistörler kısmında verdiğimiz formülleri kullanarak gerekli parametreler hesaplanacaktır. Elde edilen değer gerek bu transistöre ait olsun gerek diğerlerine ait olsun hepsi toplu halde tablo 3.2 de verilmiştir.

İmal edilen aygıtların transistör ölçümleri için numune istasyonuna entegre yarıiletken karakterizasyon sistemi kullanılmıştır (Şekil 2.8). Tüm transistör aygıtların elektriksel karakterizasyonları hava ortamında ve aynı koşullarda yapılmıştır. Birinci ITZO

transistör aygıtının çıkış ve transfer karakteristikleri Şekil 3.27 (a) ve (b) de verilmiştir.

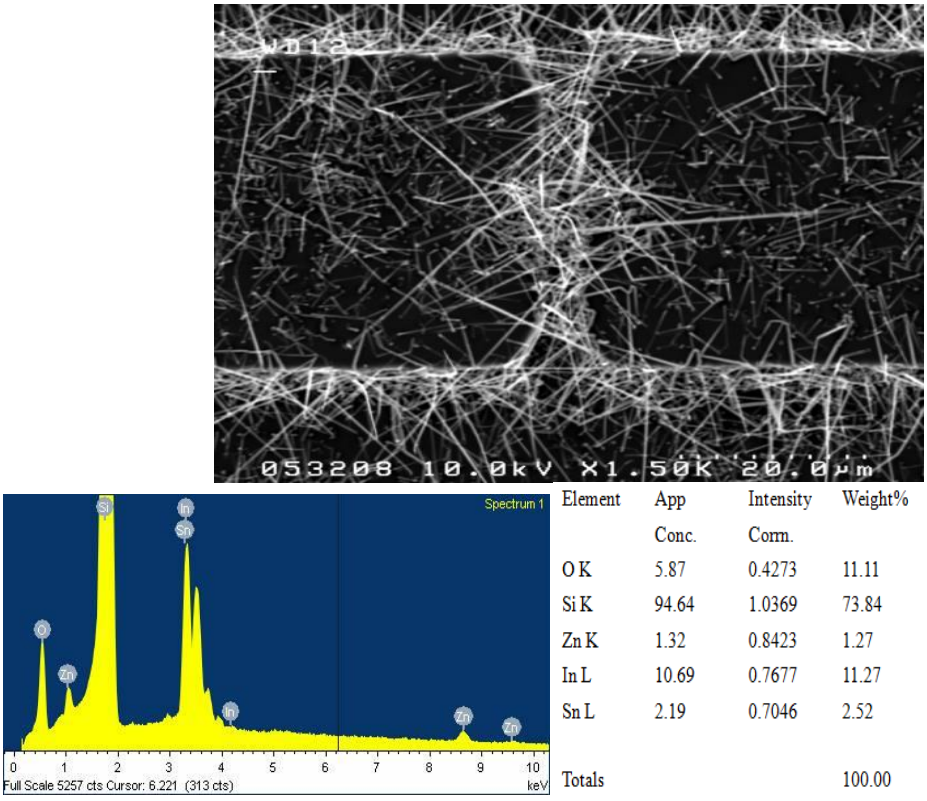
Transistörün çıkış karakteristiğinden p-kanallı transistör gibi çalıştığı görülmektedir. Yine çıkış karakteristiğine baktığımızda transistör diyot şeklinde akım-gerilim ilişkisine sahiptir. Literatürde diyot tipi transistörler rapor edilmiştir [199]. Transistörlerin karakteristik parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan matematiksel ifadeler önceki bölümlerde verildiği için burada tekrarlanmayacaklardır.

Yukarıda verilen formüllerden ve transistörün transfer karakteristiğinden faydalanarak transistörün geçiş iletkenliği (g_m) 20 μS olarak hesaplanmıştır. Yine bu transistörün toplam kapasite değeri $2{,}04 \times 10^{-14}$ F olarak hesaplanmıştır. Bu iki değer mobilite için yazılmış formülde yerine yazıldığında mobilite değeri 11 $cm^2/V.s$ olarak elde edilir. Aslında bu değer köprü şeklindeki bir geometriye sahip bir transistör için oldukça iyi bir değerdir. Çünkü nanotellerin büyük bir kısmının yalıtkan tabakanın yüzeyinden uzak olması transistörün kanalının açılmasını zorlaştırmaktadır ve bunun için çok daha yüksek voltaj değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Yine transfer karakteristiğinden on/off oranının oldukça küçük (on/off < 2) olduğu ve bunun nedeninin yukarıda belirttiğimiz gibi nanotellerin havada olmasından dolayı kanalın açılması için çok yüksek voltaj değerlerine ihtiyaç duyulması nedenine atfedilebilir. Son olarak bu transistöre ait eşik voltajı transfer karakteristiği yardımıyla hesaplanmış olup 64 V olarak bulunmuştur. Bu da göstermektedir ki yukarıda bahsettiğimiz gibi nanotellerin içerisinde kanalı aktif hale getirmek için veya kanalı oluşturmak için gereken gate voltajının eşik değerinin (minimum) oldukça yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Bu transistör için kullanılan formüller bundan sonraki transistörler için de kullanılacak olup formüller tekrar tekrar yazılmayacaktır. Sadece hesaplamaların sonuçları verilecektir. Tüm transistörlerin parametre değerleri tablo 3.2 de verilmiştir.

3.1.2.2 İkinci ITZO FET

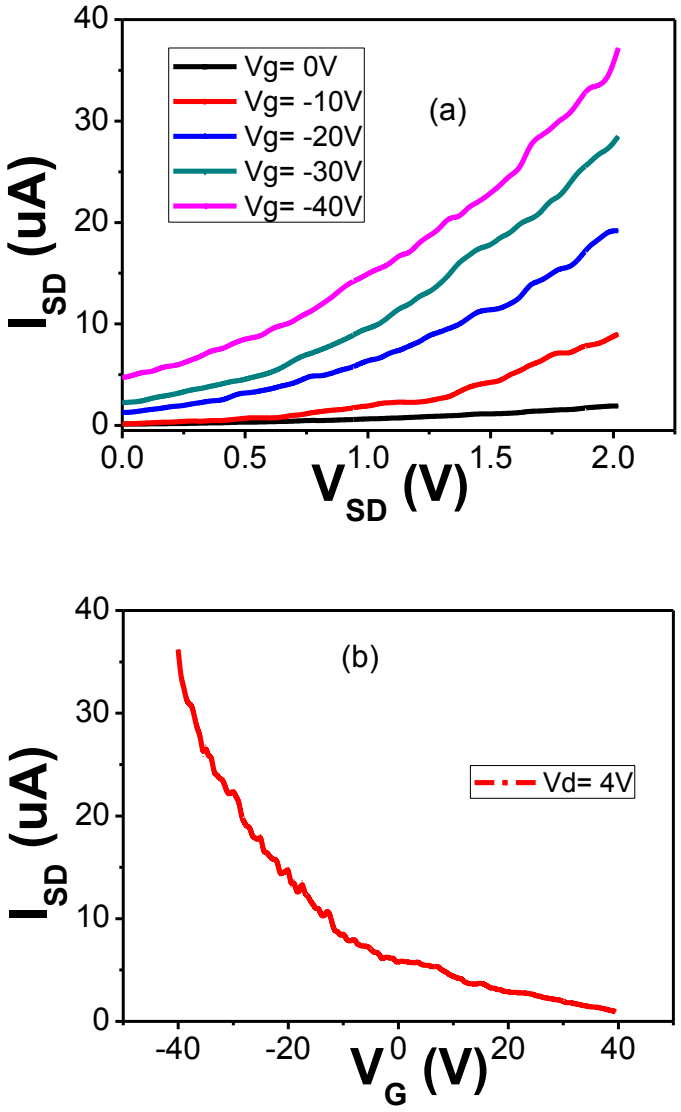
İkinci ITZO (Zn/In/Sn 0,56/2,83/0,61) FET'e ait SEM görüntüsü şekil 3.28 de verildiği gibidir. Oldukça yoğun bir nanotel oluşumu gözlemlenen bu aygıtta elde edilen nanotellerin çapları yaklaşık olarak 300 nm olarak belirlenmiştir. Ayrıca silisyum elektrotlar üzerinde oldukça uzun ve sivri şekilli nanotellerin oluştuğu göze çarpmaktadır. Sivri uçlu nanotellerin oluşumu nanotellerin içeriğinin In yönünden zengin olduğunu göstermektedir [200]. Nitekim EDX sonuçları bu durumu

kanıtlamaktadır ki In atomları Zn ve Sn atomlarının yoğunluklarından ortalama 5 kat daha fazladır. İlk aygıtta olduğu gibi bu aygıtta da birim genişlik başına nanotel sayısı hesaplanmış olup bu sayı ortalama 80 nanotel olarak hesaplanmıştır. Bu yapının kapasite değeri $2{,}62 \times 10^{-14}$ F olarak belirlenmiştir. Transistörün şekil 3.29 (b) de verilen transfer karakteristiğinden aygıtın geçiş iletkenliği 0,7 μS olarak hesaplanmıştır. İlk aygıt ile karşılaştırıldığında bu değerin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu değerler kullanılarak yük hareketliliği 0,6 $cm^2/V.s$ olarak hesaplanmıştır. İlk aygıt ile karşılaştırıldığında bu değerin de oldukça düştüğü görülmektedir. Yine transistörün transfer karakteristiğinden faydalanarak aygıtın eşik voltajı 23 V olarak hesaplanmıştır. Bu değer ilk aygıtın eşik voltajından daha küçük bir değerdir. Transistörün on/off oranı 20 olarak bulunmuştur.



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	5.87	0.4273	11.11	0.19	20.05
Si K	94.64	1.0369	73.84	0.21	75.94
Zn K	1.32	0.8423	1.27	0.07	0.56
In L	10.69	0.7677	11.27	0.11	2.83
Sn L	2.19	0.7046	2.52	0.11	0.61
Totals			100.00		

Şekil 3.28 2. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının SEM, EDX analiz sonuçları.

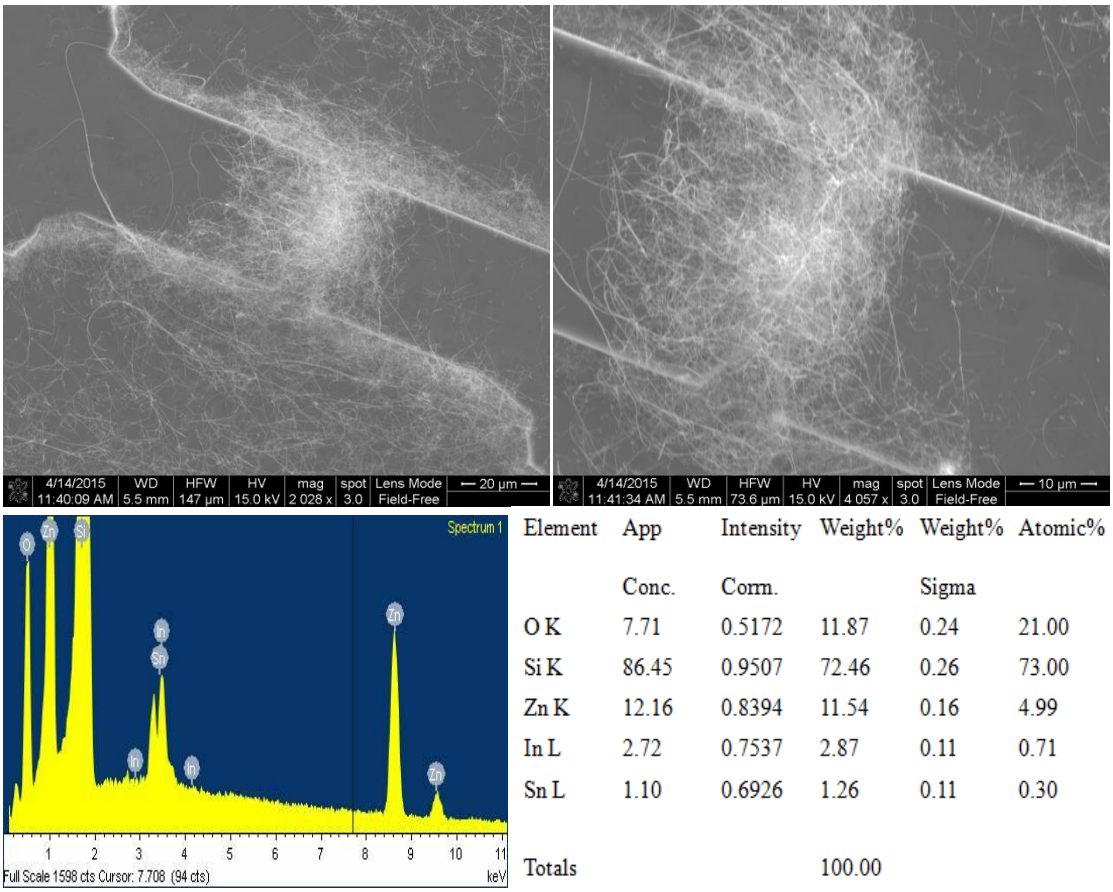


Şekil 3.29 2. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının elektriksel ölçüm sonuçları. a) çıkış karakteristiği, b) transfer karakteristiği.

3.1.2.3 Üçüncü ITZO FET

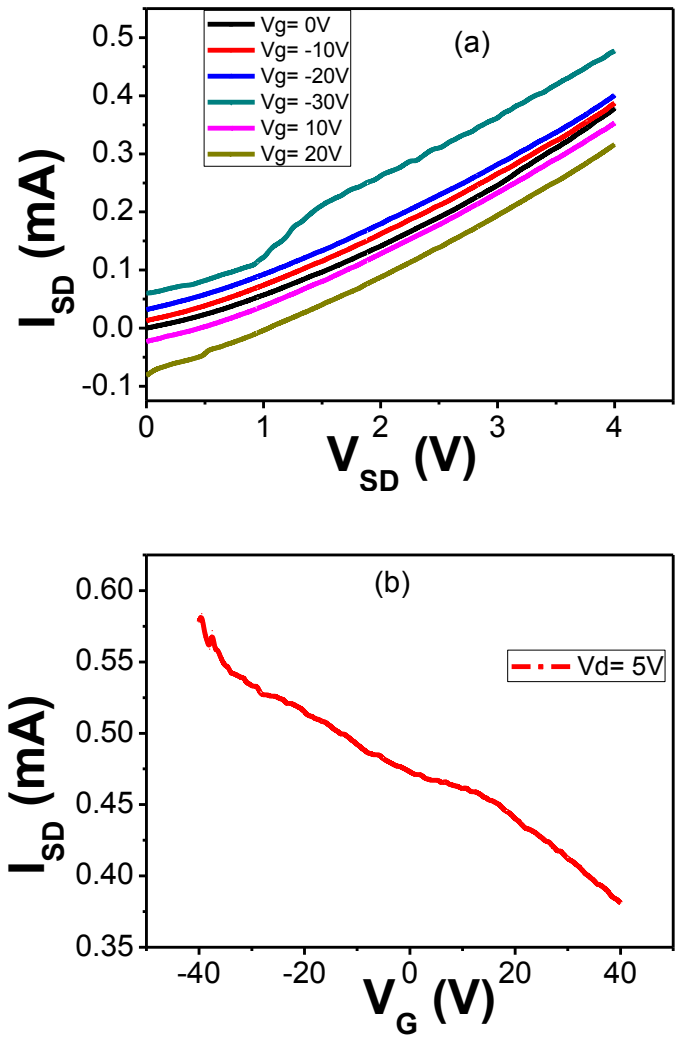
Üçüncü ITZO FET aygıtının Şekil 3.30 daki SEM görüntüsünden de görüldüğü üzere nanoteller bir yumak gibi silisyum elektrotlar arsında oluşmuş vaziyettedir. Nanotellerin bu hali fiber görünümünü andırmaktadır ve tellerin yumak şeklinde olması boylarının oldukça uzun olduğunu göstermektedir. Tellerin çapları yaklaşık olarak 230 nm olarak ölçülmüştür. Nanotellerin bu şekilde yani yumak şeklinde oluşması silisyum elektrotlar arasında kaç tane nanotelin olduğunu belirlemeyi imkânsız hale getirmektedir. Dolayısı

ile bu transistör için nanotel hesabı yapılamadığından bu aygıta ait parametreler de hesaplanamamıştır. Sadece transistörün elektriksel ölçümleri ile birlikte oluşan nanotellerin kompozisyonunu gösteren EDX analiz sonuçları verilecektir. Transistörün Şekil 3.31 (a) da verilen çıkış karakteristiğinden görüldüğü üzere p-kanallı transistör özelliği gözlemlenmektedir. Transistörün transfer karakteristiğinden on/off oranın oldukça düşük olduğu ve bu da silisyum elektrotlar arasında oluşan nanotellerin yalıtkan tabakanın yüzeyinden uzak olduğu anlamını taşımaktadır.



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	7.71	0.5172	11.87	0.24	21.00
Si K	86.45	0.9507	72.46	0.26	73.00
Zn K	12.16	0.8394	11.54	0.16	4.99
In L	2.72	0.7537	2.87	0.11	0.71
Sn L	1.10	0.6926	1.26	0.11	0.30
Totals			100.00		

Şekil 3.30 3. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının SEM görüntüleri ve EDX analiz sonuçları.

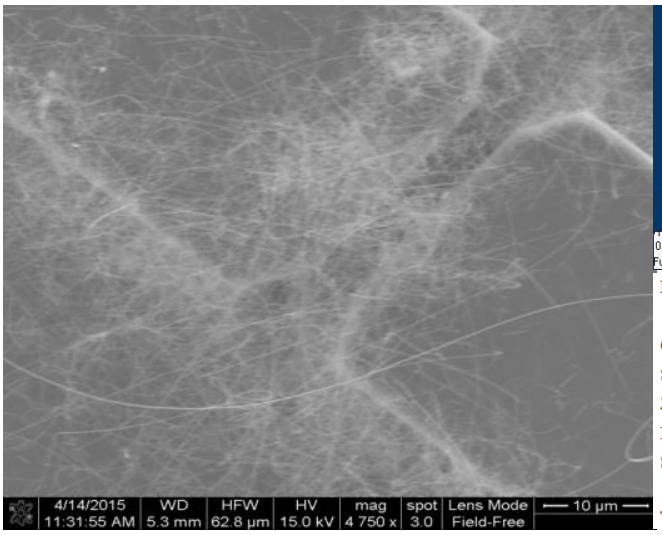


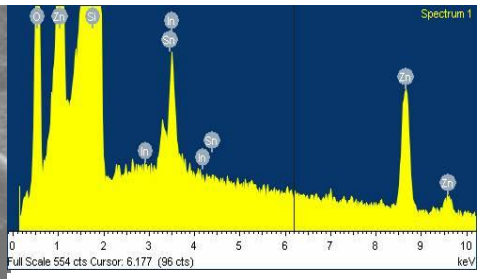
Şekil 3.31 3. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının elektriksel ölçüm sonuçları. a) çıkış karakteristiği, b) transfer karakteristiği.

3.1.2.4 Dördüncü ITZO FET

Fabrikasyonunu yaptığımız dördüncü ITZO transistörün Şekil 3.32 de verilen SEM görüntüsünden görüleceği gibi, önceki aygıtlara nazaran, nanotel oluşumunun daha az yoğun olduğu ve bu tellerin gelişigüzel yöneldiği görülmüştür. Oluşan tellerin boylarının çok uzun olduğu silisyum elektrotlar üzerinde S şeklinde kıvrılmalarından anlaşılmaktadır Birim genişlik başına düşen nanotel sayısı hesaplanmış ve ortalama 50 olarak bulunmuştur. Bu nanotel sayısına göre aygıtın toplam kapasite değeri $1{,}27 \times 10^{-14}$ F olarak hesaplanmıştır. Aygıtın transfer karakteristiğinin (Şekil 3.33 (b)) lineer

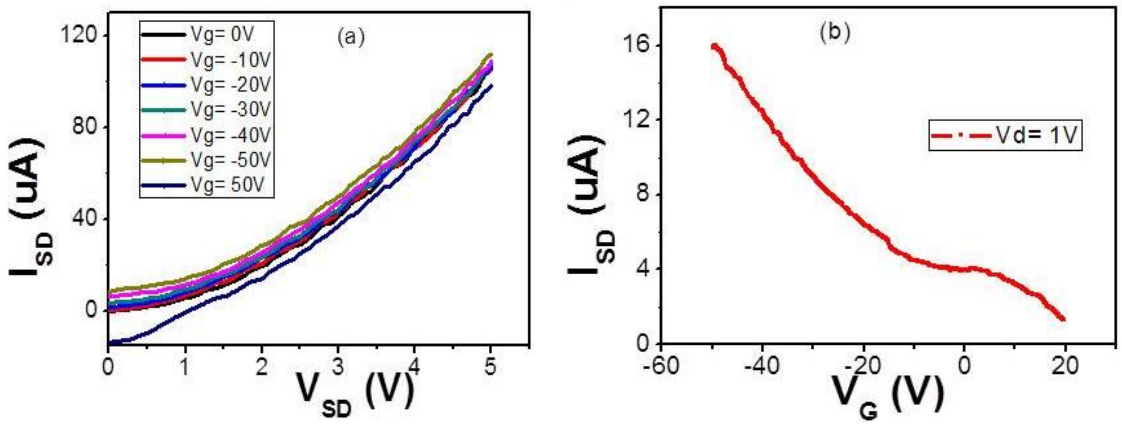
kısmından geçiş iletkenliği yaklaşık 0,2 µS olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerlerin ışığında aygıtın mobilite değeri 1,42 $cm^2/V.s$ olarak hesaplanmıştır. Transistörün eşik voltajı 30 V olarak hesaplanmış olup on/off oranı yaklaşık 4 tür.





Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	4.55	0.5039	10.96	0.29	18.70
Si K	69.45	1.0466	80.43	0.33	78.19
Zn K	4.07	0.8284	5.96	0.16	2.49
In L	0.86	0.7376	1.42	0.12	0.34
Sn L	0.69	0.6783	1.23	0.13	0.28
Totals			100.00		

Şekil 3.32 4. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının SEM, EDX analiz sonuçları.

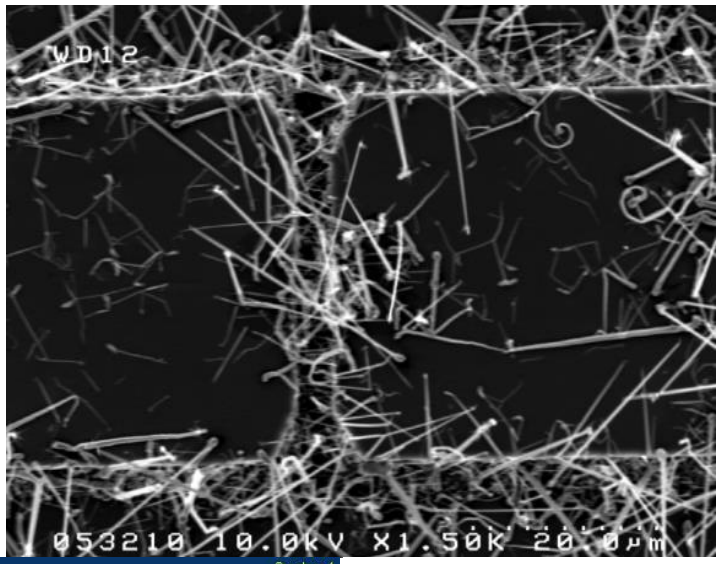


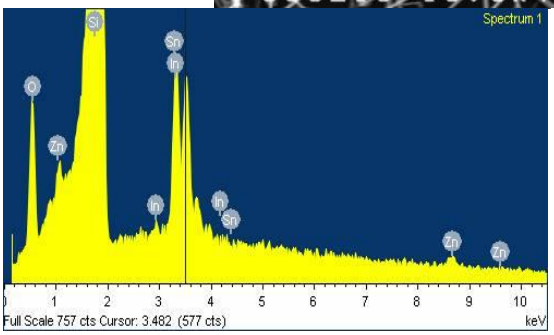
Şekil 3.33 4. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının elektriksel ölçüm sonuçları. a) çıkış karakteristiği, b) transfer karakteristiği.

3.1.2.5 Beşinci ITZO FET

ITZO transistörlerinden beşincisine ait SEM görüntüsü Şekil 3.34 te verilmiştir. SEM görüntüsünden oluşan nanotellerin sivri uçlara sahip olduğu açık bir şekilde

görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi bu durum nanotellerin içerik yönünden fazla In atomu içerdiğini göstermektedir. Bu durumu EDX sonuçları da açıkça göstermektedir. Elde edilen tellerin çapları ortalama 325 nm olarak tespit edilmiştir. Elde edilen nanotellerden silisyum elektrotlar arasında transistörün çalışmasına katkı sağlayacakların sayısı 60 olarak bulunmuştur. Transistörün çıkış karakteristiği bize aygıtın p-kanallı transistör gibi çalıştığını göstermektedir.

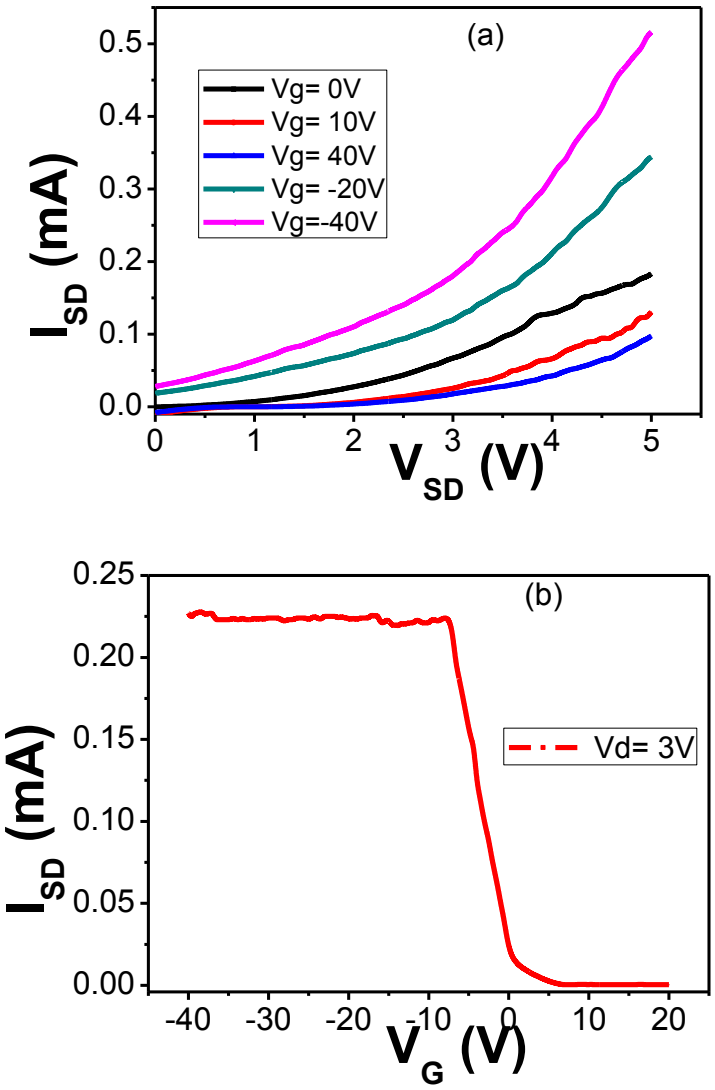




Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	2.51	0.4476	8.23	0.33	14.40
Si K	63.66	1.1126	83.89	0.39	83.57
Zn K	0.37	0.8306	0.66	0.12	0.28
In L	2.93	0.7397	5.81	0.18	1.41
Sn L	0.65	0.6803	1.41	0.18	0.33
Totals			100.00		

Şekil 3.34 5. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının SEM, EDX analiz ölçüm sonuçları.

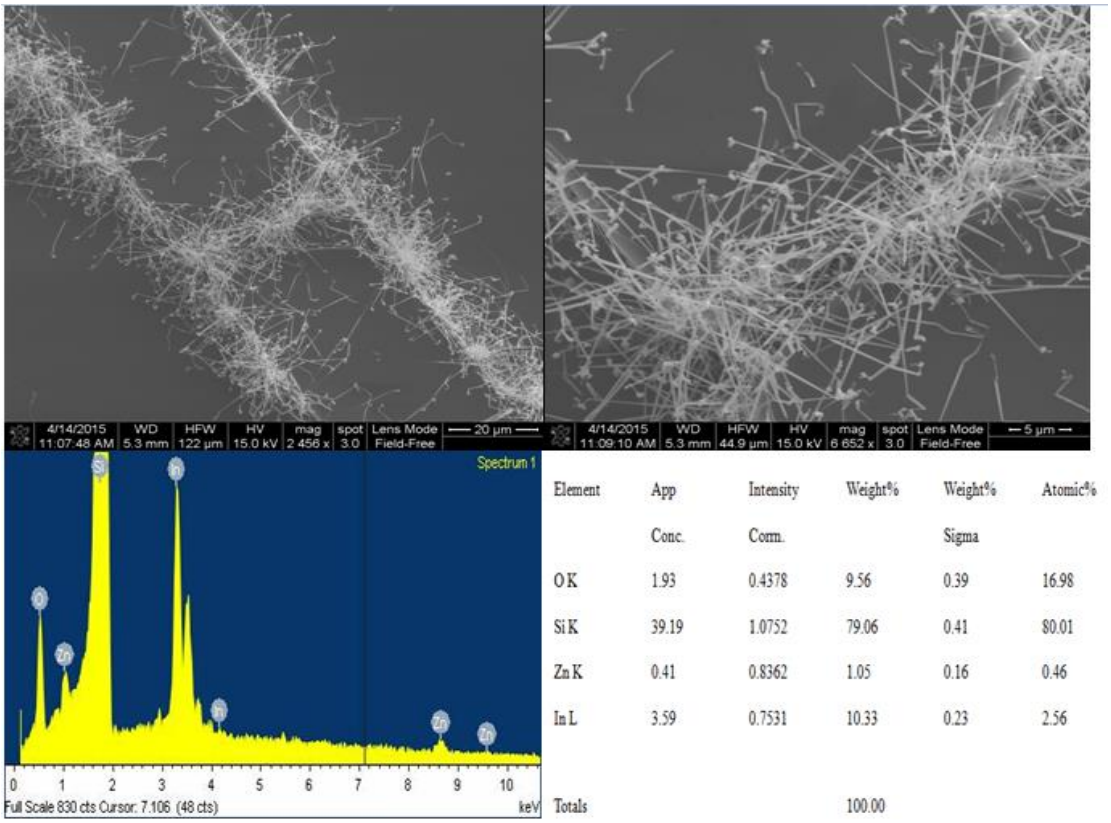
Transistörün transfer karakteristiği nedenini anlamadığımız bir durumdan dolayı beklediğimiz gibi bir sonuç vermedi (Şekil 3.35). Transistör belli bir kapı voltajından sonra keskin bir şekilde sabit bir akıma sahip olmaktadır. Aygıtın çıkış karakteristiği her bir kapı voltajında akım değerinde sürekli bir artış olduğu görülmektedir. Bu durumdan dolayı bu transistöre ait parametreler de hesaplanmamıştır.



Şekil 3.35 5. ITZO nanotel aktif katmanlı FET aygıtının elektriksel ölçüm sonuçları. a) çıkış karakteristiği, b) transfer karakteristiği.

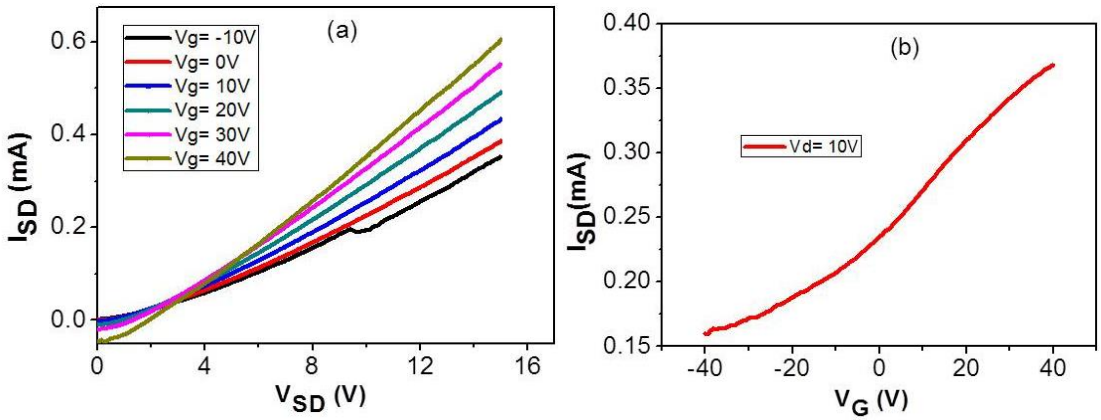
3.1.2.6 Zn Katkılı In_2O_3 nanotel Aktif Katmanlı FET

ZnO ve In_2O_3 materyallerinin belli bir oranda karıştırılması ile elde edilen nanoteller ile imal edilmiş FET in SEM görüntüleri ve nanotellerin EDX analizi ile aygıtın elektriksel ölçüm sonuçları Şekil 3.36 da verilmiştir.



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	1.93	0.4378	9.56	0.39	16.98
Si K	39.19	1.0752	79.06	0.41	80.01
Zn K	0.41	0.8362	1.05	0.16	0.46
In L	3.59	0.7531	10.33	0.23	2.56
Totals			100.00		

Şekil 3.36 Zn Katkılı In_2O_3 nanotel aktif katmanlı FET aygıtına ait SEM ve EDX ölçüm sonuçları.



Şekil 3.37 Zn Katkılı In_2O_3 nanotel aktif katmanlı FET aygıtına ait elektriksel karakterizasyon sonuçları. a) çıkış karakteristiği, b) transfer karakteristiği.

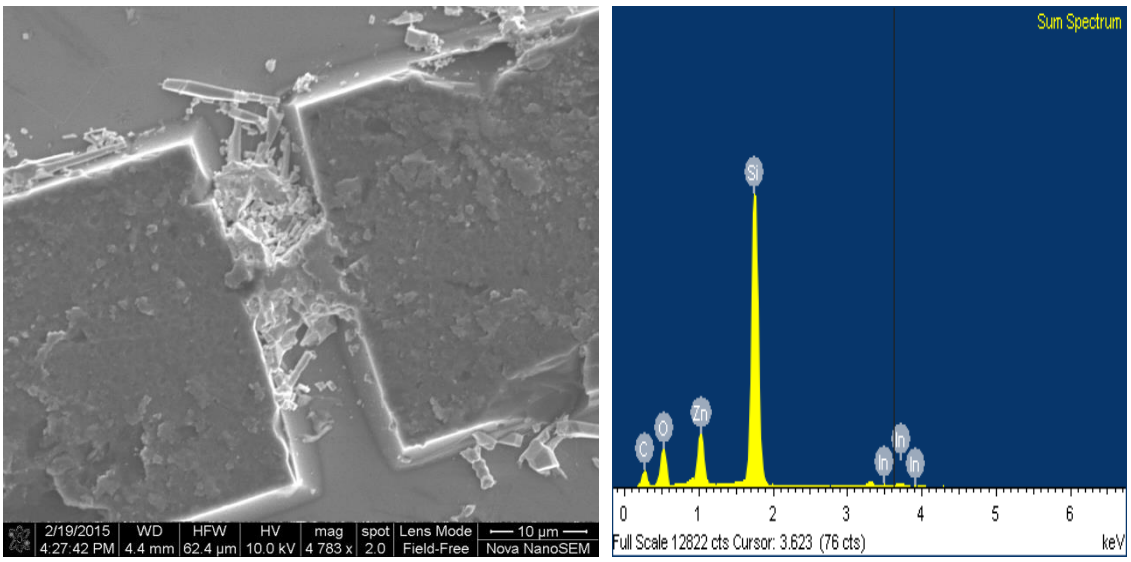
Elde edilen nanoteller oldukça yoğun bir şekilde silisyum elektrotlar arasına paralelden ziyade hafif çapraz şekilde oluştukları gözlemlenmiştir. In atomu ağırlıklı içeriğinden dolayı bu tellerin de uçları sivri bir şekle sahiptir. Transistörün çıkış ve transfer karakteristikleri incelendiğinde transistörün bundan önceki ITZO transistörlerin aksine n-tip kanala sahip olduğu yani n-tip transistör gibi çalıştığı görülmektedir. Bu bulgular literatürle uyumludur. [201]. Elde edilen nanotellerin çaplarının ortalama 140 nm olduğu tespit edilmiştir. Transistörün çalışmasına katkıda bulunacak nanotellerin sayısı ise 140 bulunmuştur. Bu verilere göre transistörün toplam kapasite değeri $3{,}32x10^{-14}$ F olarak hesaplanmıştır. Transfer karakteristiğinin (Şekil 3.37 (b)) lineer kısmının eğiminden geçiş iletkenliği 4 μS olarak belirlenmiştir. Transistörün hesaplanan bu değerleri kullanılarak mobilite değeri hesaplanmış ve 1,1 $cm^2/V.s$ olarak bulunmuştur. Transistörün eşik voltajı -153 V olarak hesaplanmış olup bu kadar yüksek eşik voltajı nanotellerin silisyum elektrotlar arasına çapraz şekilde büyümesine dolayısıyla, yalıtkan tabakanın yüzeyinden uzak kalmış olmalarına yorumlanmıştır. Nanotellerin yüzeyden uzaklıkları ne kadar artarsa eşik voltajının değeri de orantılı bir şekilde artmaktadır. Elde edilen tüm transistörlere ait parametreler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3.2 Tüm FET aygıtlara ait parametreler.

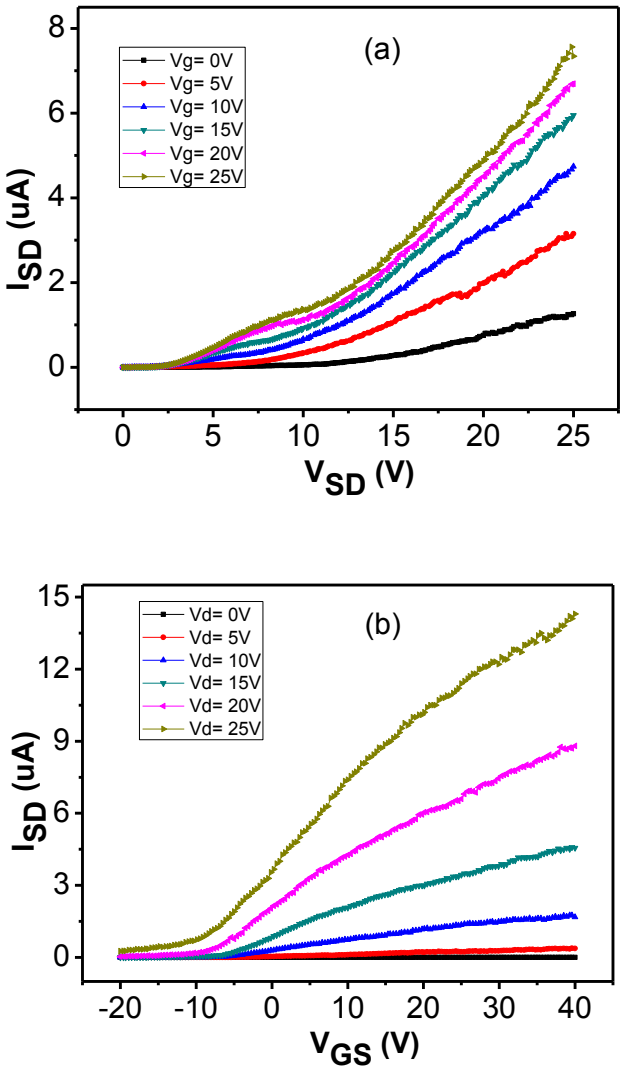
Aygıt Adı	Nanotel Sayısı	Çap (nm)	Toplam Kapasite Değeri $x10^{-15}$ (F)	Mobilite ($cm^2/V.s$)	Eşik Voltajı (V)	On/Off	Geçiş İletkenliği (uS)
1.ITZO (FET)	90	125	20.4	11	64	<2	20
2.ITZO (FET)	80	300	26.2	0.6	23	20	0.7
3.ITZO (FET)	----	230	------	----------	------	------	------
4.ITZO (FET)	50	170	12.7	1.42	30	4	0.2
5.ITZO (FET)	60	325	20.5	----------	-------	---------	--------
Zn_In_2O_3 (FET)	140	140	33.2	1.1	-153	2.5	4

Şekil 3.38 de ZnO ve In_2O_3 materyallerinin karışımından oluşan yığın (bulk) halindeki materyalin silisyum elektrotlar arasındaki SEM görüntüsü ve EDX analizi verilmiştir. EDX analizinden Zn yoğunluğunun daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Öncelikle

literatür ile uyum içerisinde olarak her iki aygıtın n-kanallı transistör olarak çalışması ölçümlerde bir sorun olmadığını belirtmektedir (Şekil 3.39). Sonuçta ITZO nanotelli transistörlerin hepsi p-tip transistör özelliği gösterirken bu iki aygıtın n-tip olması bu iki aygıtın hem EDX analizlerinin hem de elektriksel karakterizasyonları yönüyle ITZO nanotelli transistörlerden farklı olduğunu göstermektedir. Başka bir karşılaştırma ince film şeklindeki bir transistör ile nanotel köprülü bir transistörün özellikle transfer karakteristiklerinin ne kadar farklı olduğunu açıkça göstermektedir. İnce film transistörlerde on/off oranın nanotel köprülü transistörlerdeki on/off oranı ile karşılaştırılamayacak kadar büyük olduğunu göstermektedir ki bu da yarıiletken materyalin yalıtkan gate materyaline temasının transistörlerin kanalını göreceli olarak daha düşük voltajlarda açılabileceğini ve yine iyi bir anahtarlama oranının (yüksek on/off oranı) elde edileceğini ispatlamaktadır.



Şekil 3.38 Yığın halde bulunan Zn katkılı In_2O_3 materyalinin Si elektrotlar arasındaki SEM görüntüsü ve buna ait EDX ölçüm sonucu.



Şekil 3.39 Yığın şeklinde silisyum elektrotlar arasında büyüyen Zn katkılı In_2O_3 ince film şeklindeki (yığın halde) FET aygıtının; a) çıkış ve b) transfer karakteristiklerinin sonuçları.

3.1.2.7 Transistörlerle ile İlgili Genel Bir Değerlendirme

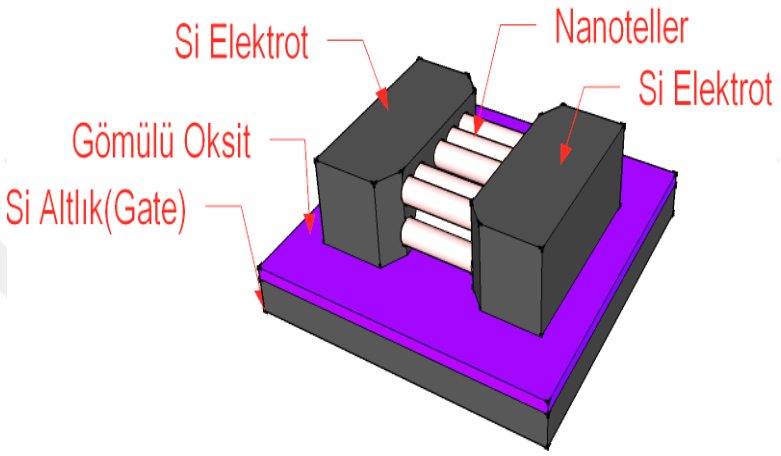
Fabrikasyonunu yaptığımız transistörlerden elde edilen verilere göre iki tip transistör söz konusudur. Normalde Zn katkılı In_2O_3 nanotellerinden imal edilen transistörlerde uygun metal elektrot kullanıldığında (iyi omik kontak olan elektrot) genel itibari ile n-tip gibi davranmaktadır. Nitekim bizim yaptığımız çalışmada Zn katkılı In_2O_3 köprülü nanotel transistörde metal elektrot yerine yüksek katkı konsantrasyonuna sahip

yarıiletken silisyum elektrotlar (p^+) kullanılmış ve yine yukarıda da verilen sonuçlara göre n-tip davranış elde edilmiştir. Bu durum literatür ile uyum içerisinde olduğumuzu göstermekle beraber elde ettiğimiz transistör parametrelerini en azından karşılaştırmak için literatürde yapılmış benzer bir çalışma bulunmadığından fazla yorum yapma şansımız kalmamaktadır. Fakat ITZO nanotellerden imal ettiğimiz diğer FET lerin tamamında p-tip davranış gözlemlenmiştir. Fakat literatürden bildiğimiz kadarıyla ince film şekline büyütülmüş ITZO FET lerde metal elektrot kullanılmak şartıyla elde edilen sonuçların tamamında n-tipi transistör özelliği elde edilmiştir [202]. Yine yukarıda bahsettiğimiz gibi yüksek katkılı Si yarıiletkeninin elektrot olarak kullanıldığı FET çalışmasına literatürde rastlanmamıştır bu sebebten dolayı literatür ile kıyaslamada elimizde yeterli bir bilgi bulunmamaktadır. Bu tür çalışmalarda kullanılan elektrotun malzemenin davranış tipine etki ettiğini de yine literatürden bildiğimizden dolayı [203] silisyum elektrotlara sahip köprü şeklinde büyütülmüş nanotel aktif katmanlı FET çalışma literatürde en azından bizim bildiğimiz kadarıyla söz konusu değildir. Dolayısı ile bu yönden literatür ile bir karşılaştırma yapmamız olanak dışı kalmaktadır. Literatürde böyle bir çalışmaya benzer bir makale [204] bize bu durumu izah etmede yolumuzu aydınlatacaktır. Bu durumun izahı 4. bölümdeki tartışma kısmında verilecektir.

3.1.3 Memristör Aygıtların Fabrikasyonu ve Karakterizasyonu

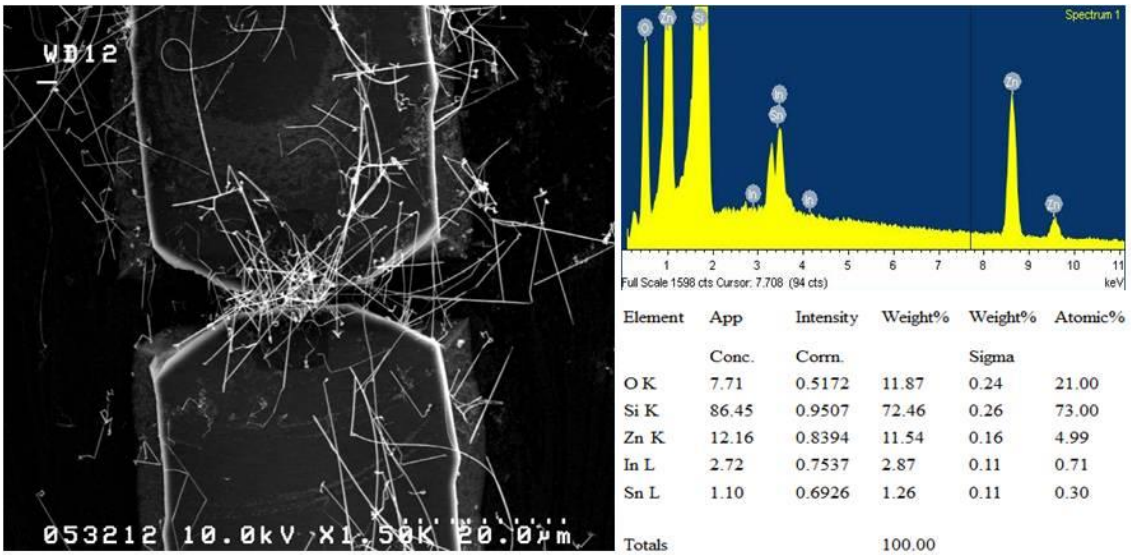
ZnO, SnO_2 ve In_2O_3 kaynak materyalleri kullanılarak üç farklı içerikte ITZO nanotel köprülü memristör aygıtlar imal edilmiştir. Litografi yöntemi ile desenlendirilmiş yüksek katkılı p^+-tip SOI altlık üzerinde silisyum elektrotlar oluşturulmuştur. SOI altlık kimyasal temizlemeden sonra kuru azot (N_2) ile kurutulup yüksek sıcaklık fırınına yerleştirilmiştir. Memristör aygıtları ile FET aygıtları aynı koşullarda büyütülmüştür. Bu koşulları kısaca özetlemek gerekirse: Kaynak materyalinin yerleştirildiği fırının merkez kısmının sıcaklığı 1225 ^{0}C iken altlıkların yerleştirildiği kısmın sıcaklığı 600 ^{0}C olarak ayarlanmıştır. Büyütme işlemi 90 dakika olarak ayarlanmış olup sistem yaklaşık 700 mmHg basınç altında gerçekleştirilmiştir. Büyütme işlemi tamamlandıktan sonra fırın doğal olarak soğumaya bırakılmış ve soğuma süresi boyunca sistem sürekli vakum altında tutulmuştur. Sistem soğuduktan sonra altlıklar üzerinde grimsi renkte nanoteller

elde edilmiştir. SEM ve EDX analizlerinden nanotellerin çapları ve kompozisyonları tespit edilmiştir. Aygıtların elektriksel karakterizasyonu daha önce de belirtildiği gibi Agilent 4156-C yarıiletken karakterizasyon sistemi ve buna entegre Karl Suss numune istasyonu kullanılarak yapılmıştır (Şekil 2.8). Aygıtların elektriksel karakterizasyonları atmosfer koşullarında ve karanlık ortamda yapılmıştır. Köprü şeklinde büyütülmüş ITZO nanotel memristörlerin 3 boyutlu şematik gösterimi Şekil 3.40 ta gösterilmiştir.



Şekil 3.40 Memristör aygıtının üç boyutlu gösterimi.

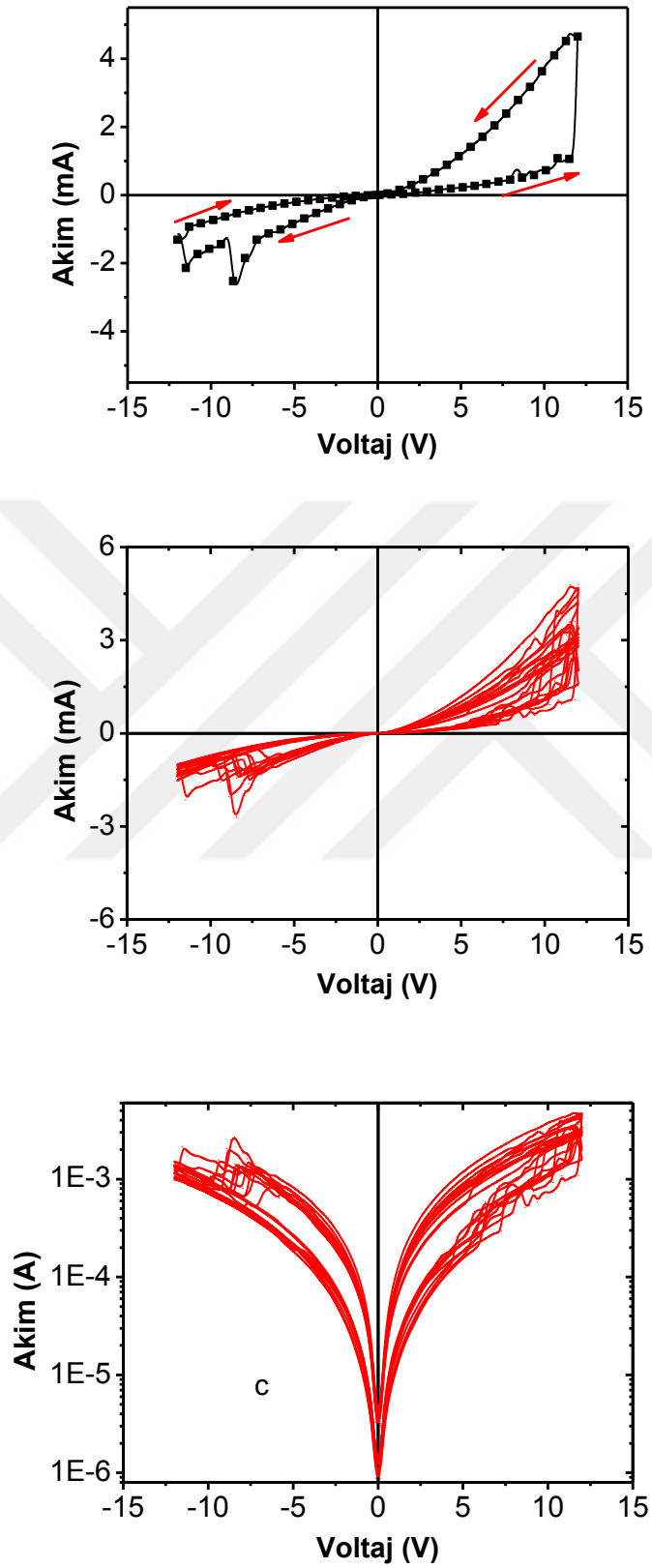
Memristör'lerin I-V karakteristiği ölçümleri esnasında ilk önce karakterizasyon cihazının maksimum akım değeri 1mA (current compliance) değerine ayarlanmıştır. Aygıtların I-V ölçümleri yapılırken voltaj değeri şu şekilde taranmıştır: 0 V-pozitif voltaj, pozitif voltaj-0 V, 0 V-negatif voltaj, negatif voltaj-0 V şeklinde tam bir çevrim yapılarak elde edilmiştir.



Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	7.71	0.5172	11.87	0.24	21.00
Si K	86.45	0.9507	72.46	0.26	73.00
Zn K	12.16	0.8394	11.54	0.16	4.99
In L	2.72	0.7537	2.87	0.11	0.71
Sn L	1.10	0.6926	1.26	0.11	0.30
Totals			100.00		

Şekil 3.41 1. köprülü ITZO nanotel memristör aygıtının SEM ve EDX analiz sonuçları.

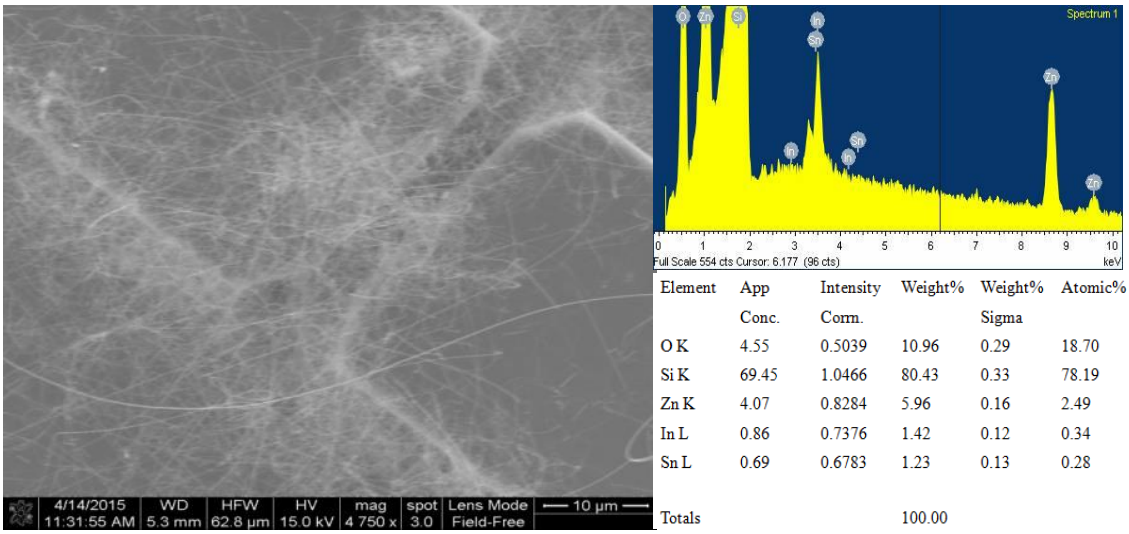
Memristörlerin elektriksel karakterizosyonları yapılırken aygıtların davranışları şu şekilde gözlemlenmiştir: pozitif bölgede çalışırken önce kapalı durumdan yani yüksek direnç durumundan (high resistance state (HRS)) düşük direnç durumuna (low resistance state (LRS)) yani açık duruma geçer, bu durum yani aygıtın açık durumu negatif bölgede de bir müddet devam ettikten sonra nihayet yine negatif bölgede kapalı duruma geçerek sıfır voltajına doğru tarama yapıp tam sıfır voltta bir tam çevrimi tamamlamış olur. Bu çevrimler herbir aygıt için I-V grafiklerinde oklarla gösterilmiştir.



Şekil 3.42 Birinci köprülü ITZO meristör aygıtına ait I-V karakteristikleri: (a) Tek çevrim (b) Çoklu çevrim (lineer ölçek), (c) Çoklu çevrim (logaritmik ölçek).

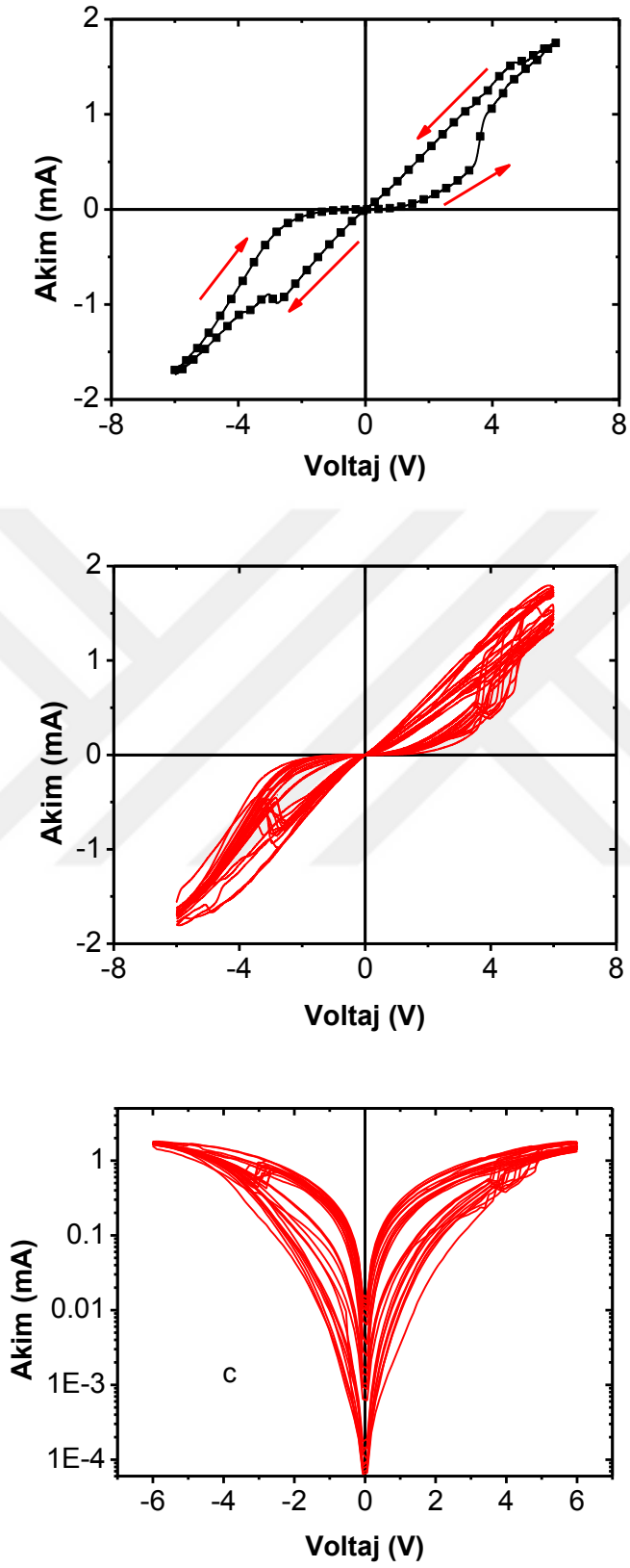
Bu tez çalışmasının bir bölümünü oluşturan memristör aygıtlar için toplamda üç farklı kompozisyonda nanotel köprülü memristör aygıt üretilmiş ve elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. Her bir aygıta ait tipik memristör I-V karakteristikleri sırasıyla Şekil 3.42, Şekil 3.44, Şekil 3.46 da verilmiştir. Her aygıta ait I-V karakteristikleri tek ölçüm (a), 25 çevrim sonucu elde edilen toplu ölçümlerin lineer (b) ve logaritmik ölçekteki sonuçları (c) ayrı ayrı yine bahsi geçen şekillerde verilmiştir. Her üç aygıt tipinde bipolar anahtarlama (switching) tipi gözlemlenmiştir. Diğer iki aygıt ile karşılaştırıldığında ilk aygıt daha yüksek SET (~12 V) ve RESET voltajlarına (~-12 V) sahiptir. Bu voltaj değerleri açık bir şekilde Şekil 3.42 de görülmektedir.

Aygıt 25 çevrim boyunca çalıştırılmış ve sonuçta aygıtın her çevrimde anahtarlama özelliğini gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu da gösteriyor ki aygıt iyi bir yaşam ömrüne ve veri saklama süresine sahiptir. Diğer iki aygıtın anahtarlama veya SET voltajları yaklaşık olarak 4 V değerindedir. Bu iki aygıt ta ilk aygıt gibi yapılan çevrimler sonucu iyi yaşam ömrü ve veri saklama süresi sergilemiştir. Bu üç aygıt içerisinden ikinci aygıt birinci ve üçüncü aygıta göre daha yüksek kalay Sn oranına sahiptir.



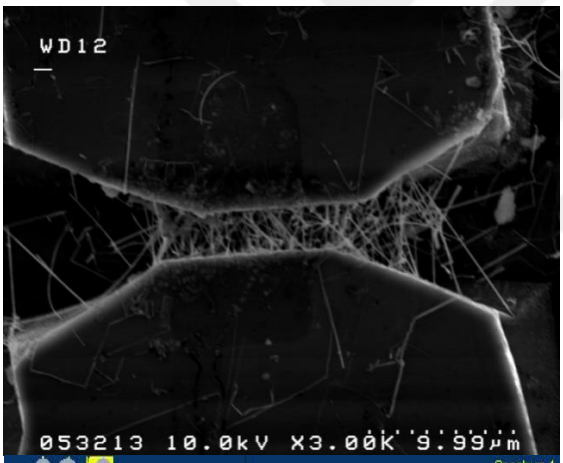
Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	4.55	0.5039	10.96	0.29	18.70
Si K	69.45	1.0466	80.43	0.33	78.19
Zn K	4.07	0.8284	5.96	0.16	2.49
In L	0.86	0.7376	1.42	0.12	0.34
Sn L	0.69	0.6783	1.23	0.13	0.28
Totals			100.00		

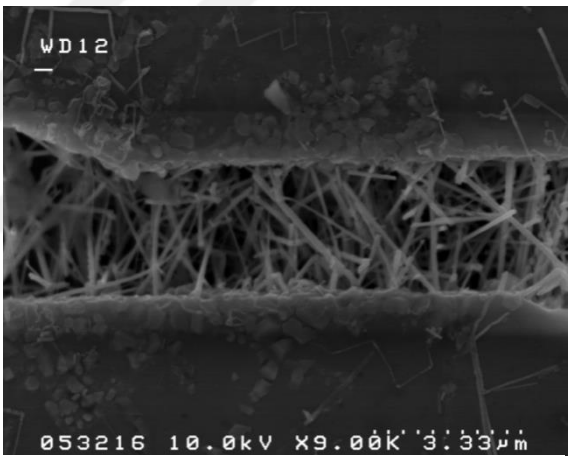
Şekil 3.43 İkinci köprülü ITZO nanotel memristör aygıtının SEM ve EDX analiz sonuçları.

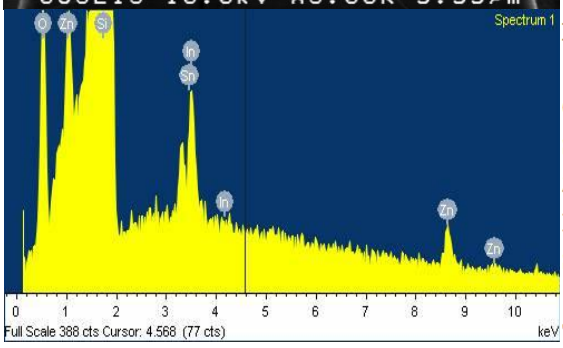


Şekil 3.44 Birinci köprülü ITZO meristör aygıtına ait I-V karakteristikleri: (a) Tek çevrim (b) Çoklu çevrim (lineer ölçek), (c) Çoklu çevrim (log. ölçek).

Bu özellik bu aygıtta diğerlerine nazaran daha yumuşak bir anahtarlama özelliği göstermiştir ki bu literatürde analog tipi memristör olarak geçmektedir. Diğer iki aygıt literatürde dijital tip memristör olarak adlandırılan çok keskin bir anahtarlama özelliği göstermişlerdir. Bu durum Sn^{+2} ile Sn^{+4} nin beraber bulunması ve bu iki iyonun aygıtın kademeli bir geçişe veya çok basamaklı bir geçişe izin vermesine atfedilebilir. Düşük voltajlardaki I-V karakteristiği diyot türü bir davranış sergilemektedir bu durum metal-oksit nanoteller ile silisyum elektrot arasındaki Schottky bariyer engelinden kaynaklanmaktadır. Aygıtların yüksek direnç durumu (HRS) ve düşük direnç durumu (LRS) değerleri arasında anahtarlama (switching) (veya geçiş) yapması daha önce de literatürde belirtilen ZnO gibi metal-oksitlerin doğasında olan ve yapılan çalışmalardan da anlaşıldığı üzere oksijen boşluklarına atfedilmektedir [205]. Bipolar anahtarlama olayı metal-oksit içerisinde oluşan iletken filamentin voltaj taramasına bağlı olarak oluşup tekrar ortadan kalkmasına atfedilebilir [206,207].





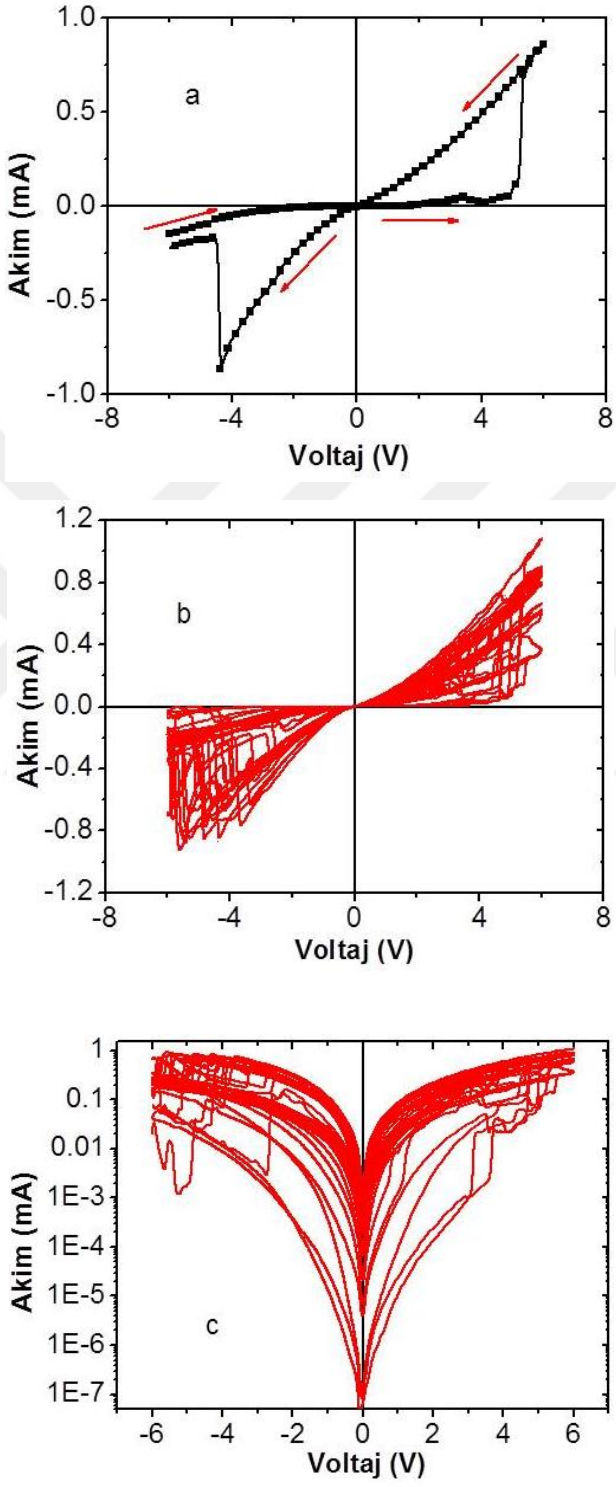


Element	App Conc.	Intensity Corrn.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
O K	2.24	0.4757	8.26	0.34	14.01
Si K	57.10	1.1401	87.76	0.39	84.82
Zn K	0.62	0.8230	1.33	0.14	0.55
In L	0.73	0.7255	1.76	0.15	0.42
Sn L	0.34	0.6679	0.90	0.15	0.21
Totals			100.00		

Şekil 3.45 Üçüncü köprülü ITZO nanotel memristör aygıtının SEM ve EDX analiz sonuçları.

İletken filamentin oluşma süreci birinci bölümde ayrıntılı verilmiştir (Şekil 1.29). İletken filamentin ortadan kalkması (veya bozulması) veya aygıtın düşük direnç

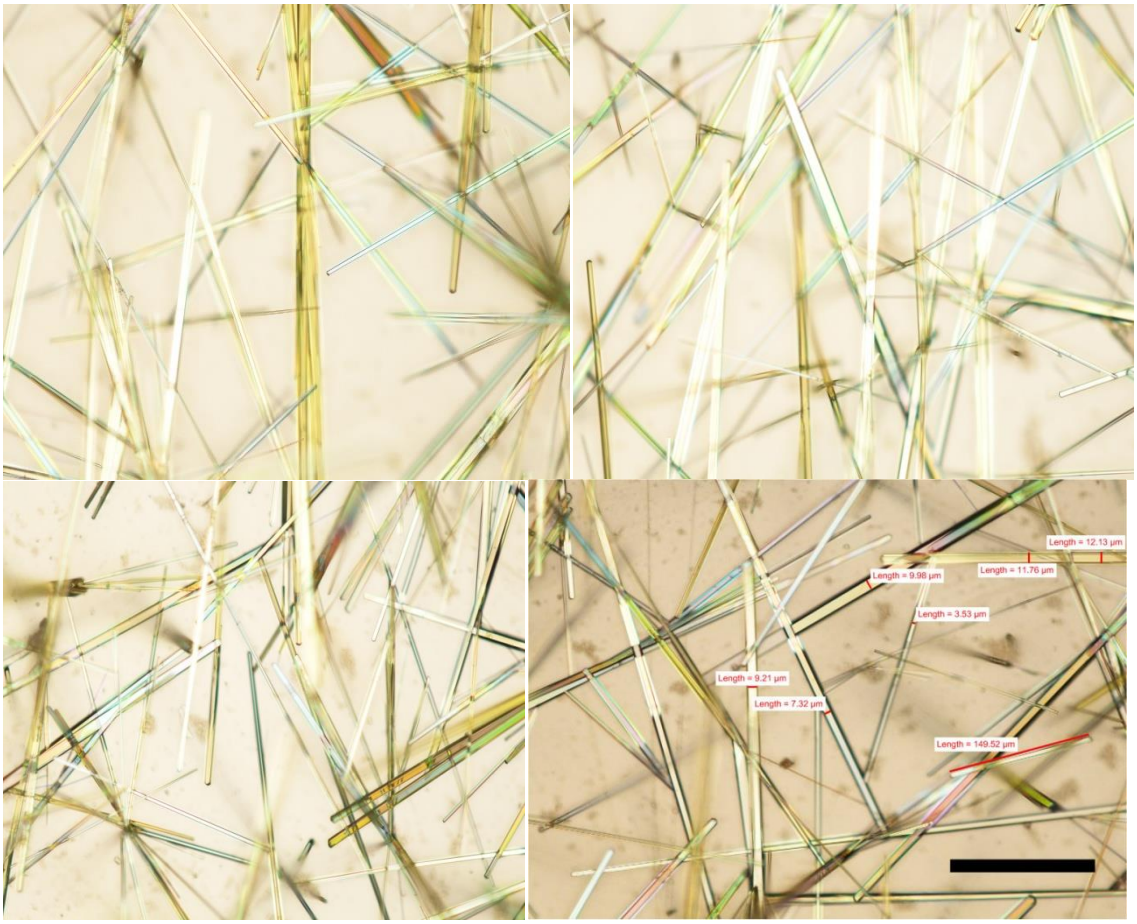
durumundan (LRS) yüksek direnç durumuna (HRS) geçmesi termal olarak veya elektriksel olarak etkilenen oksijen iyonlarının oksijen yönünden fakir veya oksijen konsantrasyonun az olduğu bölgelere doğru harekete geçmesine atfedilmektedir [208].



Şekil 3.46 Birinci köprülü ITZO meristör aygıtına ait I-V karakteristikleri: (a) Tek çevrim (b) Çoklu çevrim (lineer ölçek), (c) Çoklu çevrim (log. ölçek).

3.2 Alq3 mikroteller

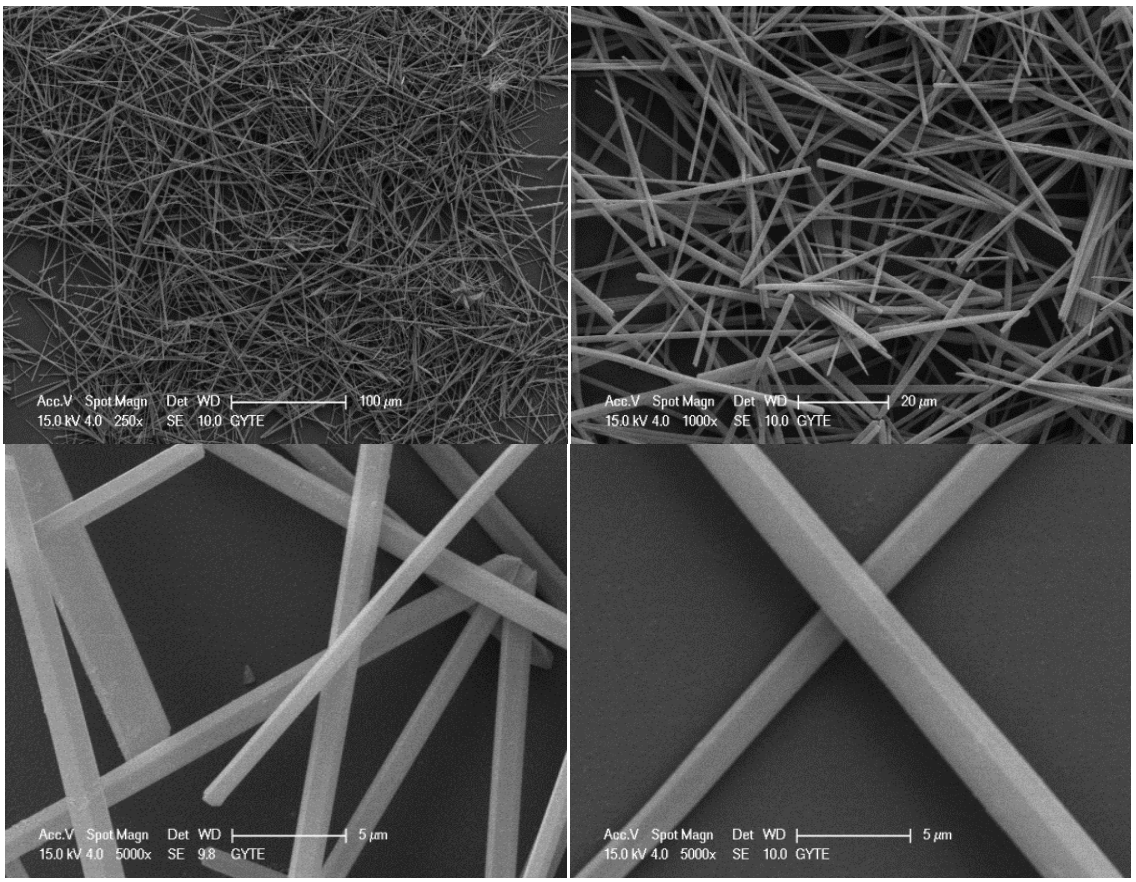
Alq3 mikro tellerin üretimi için ticari olarak temin edilmiş tris (8-hydroxyquinolinato) aluminium kullanılmıştır. Bu madde uygun çözücüler içerisinde çözdürüldükten sonra elde edilen solüsyon cam bir petri kabının içerisine alınıp çözücülerin buharlaşması için titreşimsiz bir ortamda 2 veya 3 gün bekletilmiştir. Çözücülerin tamamı buharlaştıktan sonra çok düzgün mikroteller elde edilmiştir. Elde edilen tellerin optik mikroskop, SEM, fotolüminesans, XRD, absorbsiyon ve elektriksel analiz sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.47 Hexane içerisinde büyütülmüş Alq3 mikrotellerin optik mikroskop görüntüleri. (Siyah ölçek: 150 mikron)

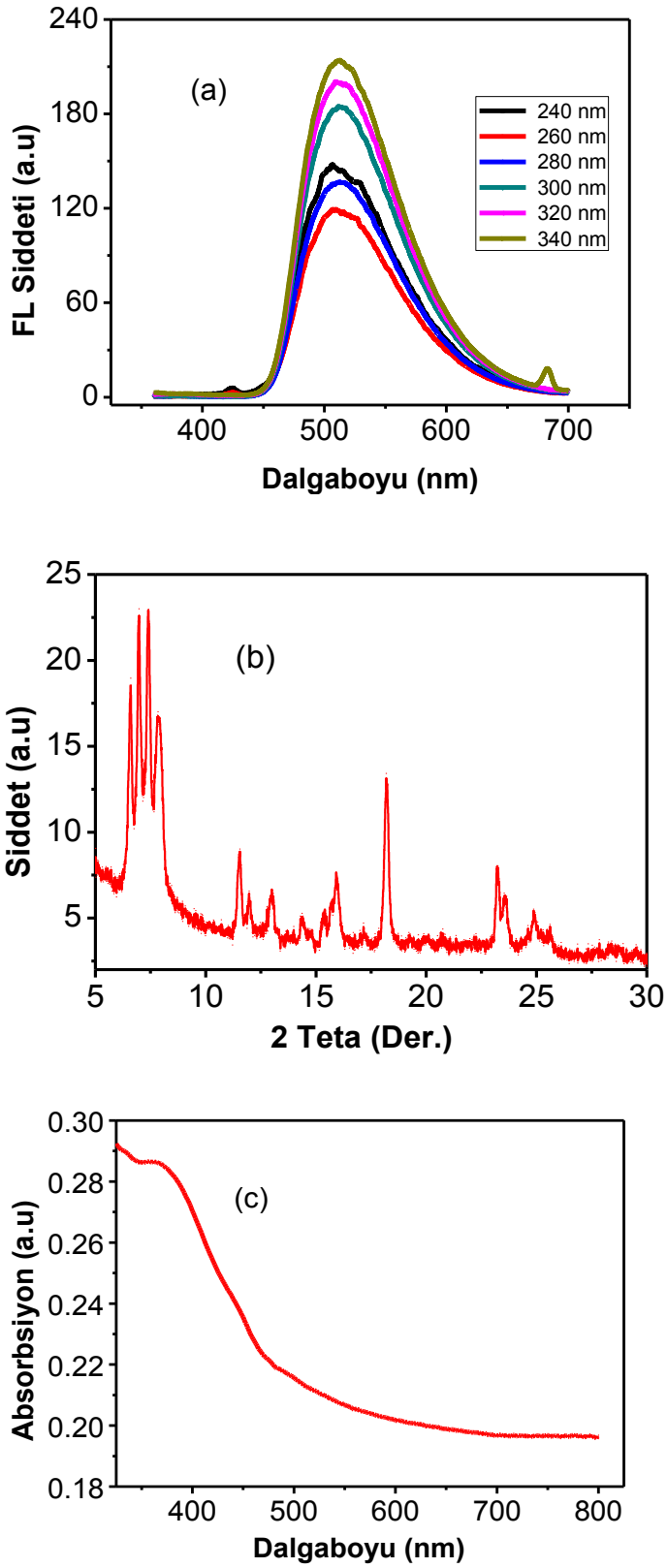
Gerek Şekil 3.47 de verilen optik mikroskop görüntülerinden gerekse de Şekil 3.48 de verilen SEM görüntülerinden de görüleceği üzere elde edilen mikrotellerin

morfolojisinin oldukça düzgündür. Bu durum Alq3 molekülünün kristalik yapısından kaynaklanmaktadır.



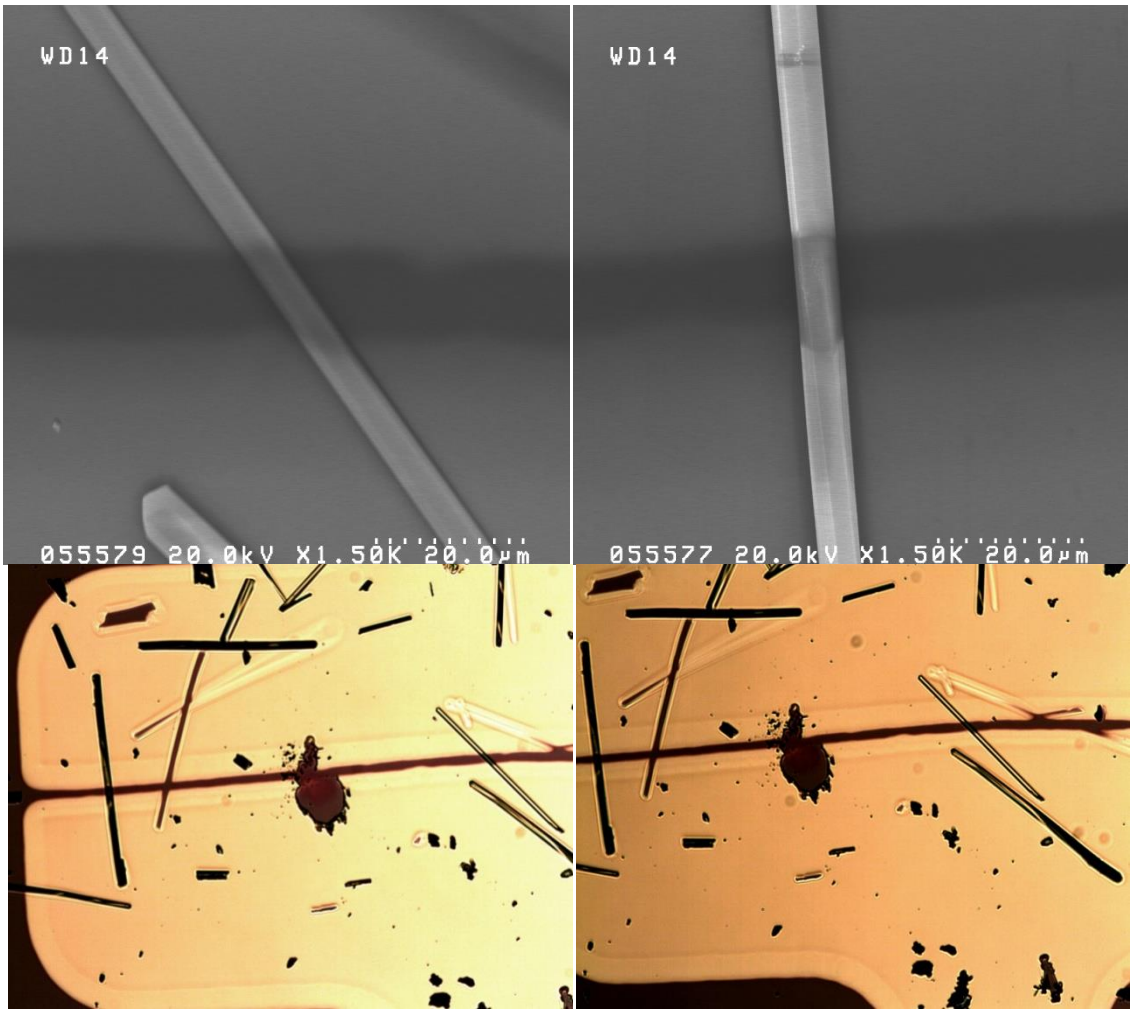
Şekil 3.48 Alq3 mikrotellerin farklı büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri.

Aşağıdaki şekilde (Şekil 3.49) Alq3 molekülünden üretilen mikro tellere ait fotolüminesans, absorbsiyon ve XRD analizlerinin sonuçları verilmiştir. Absorbsiyon ölçümlerinden elde edilen sonuçlara baktığımızda 365 nm de maksimum bir pik elde edilmiştir. Farklı uyarım dalgaboylarında (240-340 nm aralığında) yapılan fotolüminesans grafiğinden elde edilen verilere baktığımızda (Şekil 3.49 a) maksimum fotolüminesans 512 nm civarlarında elde edilmiş olup tartışma kısmında vereceğimiz literatür bilgileri ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür [209]. XRD sonuçlarından elde ettiğimiz sonuçlara göre farklı açı değerlerinde pikler elde edilmiş olup bu sonuç yine tartışma kısmında literatür ile karşılaştırılarak bir kıyaslama yapılacaktır.



Şekil 3.49 Alq3 mikrotellerin sırasıyla (a) fotolüminesans, (b) XRD ve (c) absorbsiyon analiz sonuçları.

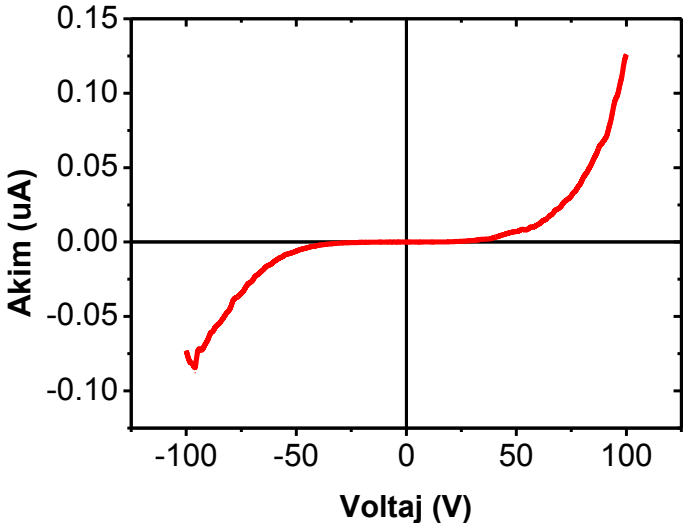
Alq3 mikrotel aktif katmanlı FET imali mikrotellerin aşırı derecede kırılgan olmasından dolayı yeterince aygıt imal edilememekle beraber bir aygıt başarılı bir şekilde imal edilmiş olup SEM ve optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.50 de verilmiştir. SEM ve optik mikroskop görüntüsünden de görüldüğü üzere transistörün kaynak-savak elektrotları arasına sadece iki adet mikrotel tel yerleşmiş vaziyettedir. Transistörün kanal uzunluğu yaklaşık 8.8 µm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.50 Alq3 mikrotel aktif katmanlı FET aygıtının SEM ve optik mikroskop görüntüleri.

Tellerin çapı sırasıyla 6.4 ve 4.8 µm olarak belirlenmiştir. Transistör SiO_2/Si yapısı üzerine imal edilmiş olup SiO_2 nin kalınlığı 550 nm dir. Aygıtın iki elektrotlu rezistör ölçümü yapılmış olup elde edilen sonuç Şekil 3.51 de verilmiştir. Akımın yüksek voltajlarda dahi düşük olması ve diyot şeklindeki davranış açıkça görülmektedir.

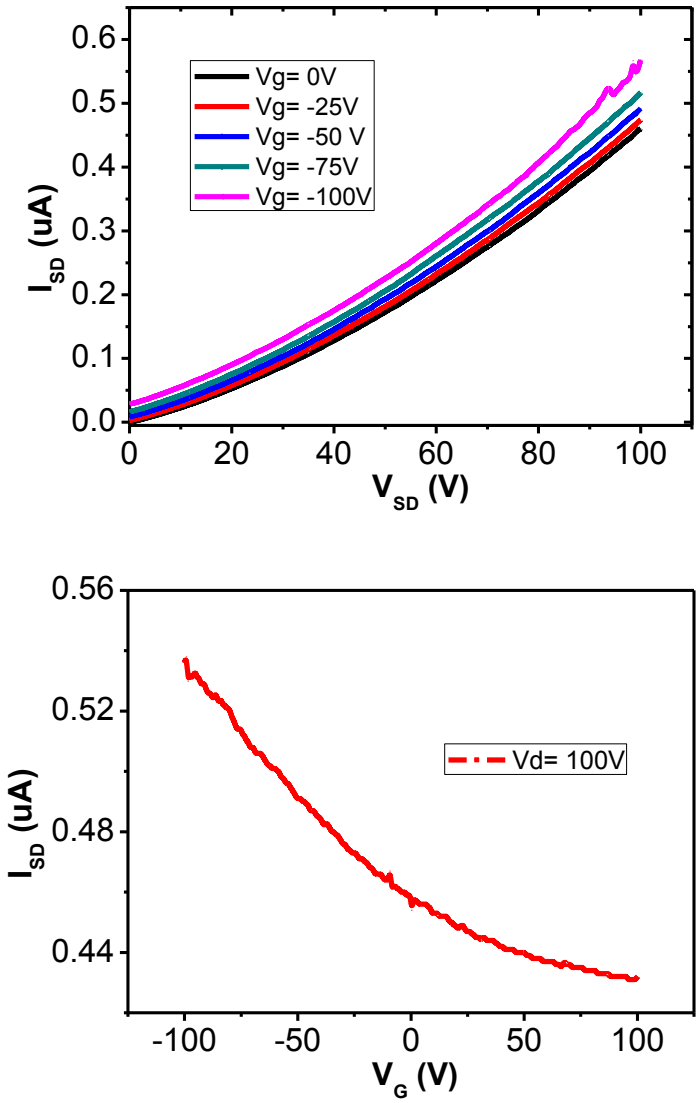
Akımın bu derece düşük olması literatürde de belirtilmiştir [210]. Aygıtın diyot karakteristiği altın elektrot ile Alq3 mikro teller arasındaki engel yüksekliğinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.51 Alq3 mikrotellerin iki elektrotlu rezistör ölçümü.

Aygıtın FET ölçümü yapılmış olup sonuç Şekil 3.52 de verilmiştir. Transistör p-tip transistör özelliği göstermiş olup yeterince akım kazancı sağlanamadığından dolayı farklı gate voltajlarına ait akım değerleri birbirinden net bir şekilde ayrılamamıştır (çıkış karakteristiğinden görülmektedir). Normalde Alq3 molekülü literatürde genel itibari ile OLED aygıtlarda elektron iletim tabakası olarak kullanıldığından [211] n-tipi davranış sergilemesi beklenmektedir. Altlık olarak kullandığımız yüksek katkılı n-Si altlığa uygulanan negatif elektrik sinyalinin Alq3 içerisinde pozitif kanal oluşturmuştur. Ayrıca kaynak-savak elektrotlar için altın (Au) kullanılmış olduğundan ve altının iş fonksiyonu ile Alq3 mikrotellerin HOMO seviyesi birbirine (Şekil 3.53) oldukça yakın olduğundan transistör p-kanallı transisör gibi çalışmıştır. Yani transistörün altın elektrotlarından kaynak sürekli deşik (hole) enjekte etmektedir. Fakat Daha önce de belirttiğimiz gibi Alq3 molekülü elektron iletimi için kullanılan bir molekül olduğundan deşik iletimi bu molekülde sınırlıdır. Dolayısıyla transistörün çıkış karakterisriğinde farklı gate voltajlarına karşılık akım değerleri birbirine çok yakındır veya yeteri derecede akım kazancı elde edilememiştir. Transistörün transfer karakteristiğinden yapılan hesaplamada deşiklerin mobilite değeri 2.91×10^{-4} $cm^2/V.s$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer literatür ile

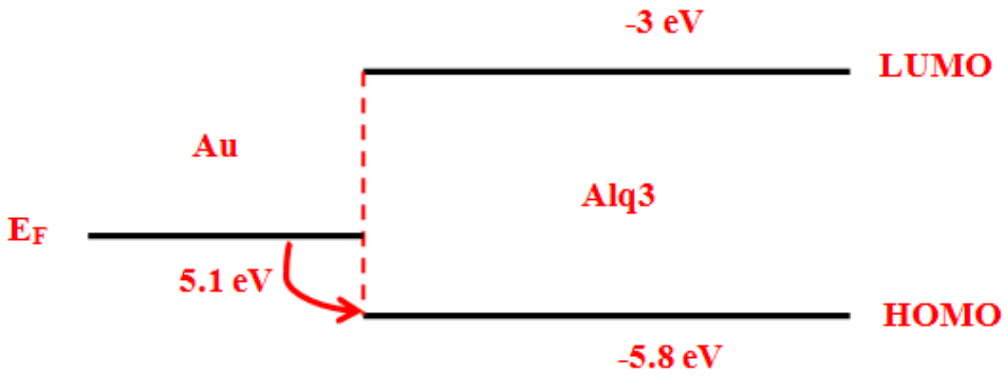
karşılaştırılabilir bir değerdir çünkü literatürden bildiğimize göre Alq3 düşük mobilite değerine sahiptir [164]. Ayrıca yine transfer karakteristiğinden geçiş iletkenliğin değeri hesaplanmış olup bu değer $8x10^{-10}$ S gibi oldukça düşük bir değer olarak bulunmuştur. Aslında bu değer Alq3 molekülünün neden düşük akım değerlerine sahip olduğunu açıkça söylemektedir.



Şekil 3.52 Alq3 mikrotel aktif katmanlı FET aygıtının elektriksel ölçüm sonuçları.

Transistörün çıkış karakteristiğinde akım değerlerinin birbirine çok yakın olması yeteri derecede akım kazancının elde edilemediğini göstermektedir. Bunun nedeni Şekil 3.53 te verilen altın elektrot ile Alq3 molekülünün LUMO seviyesi arasındaki yüksek bariyerden dolayı kaynak elektrotu LUMO seviyesine elektron transfer edememektedir.

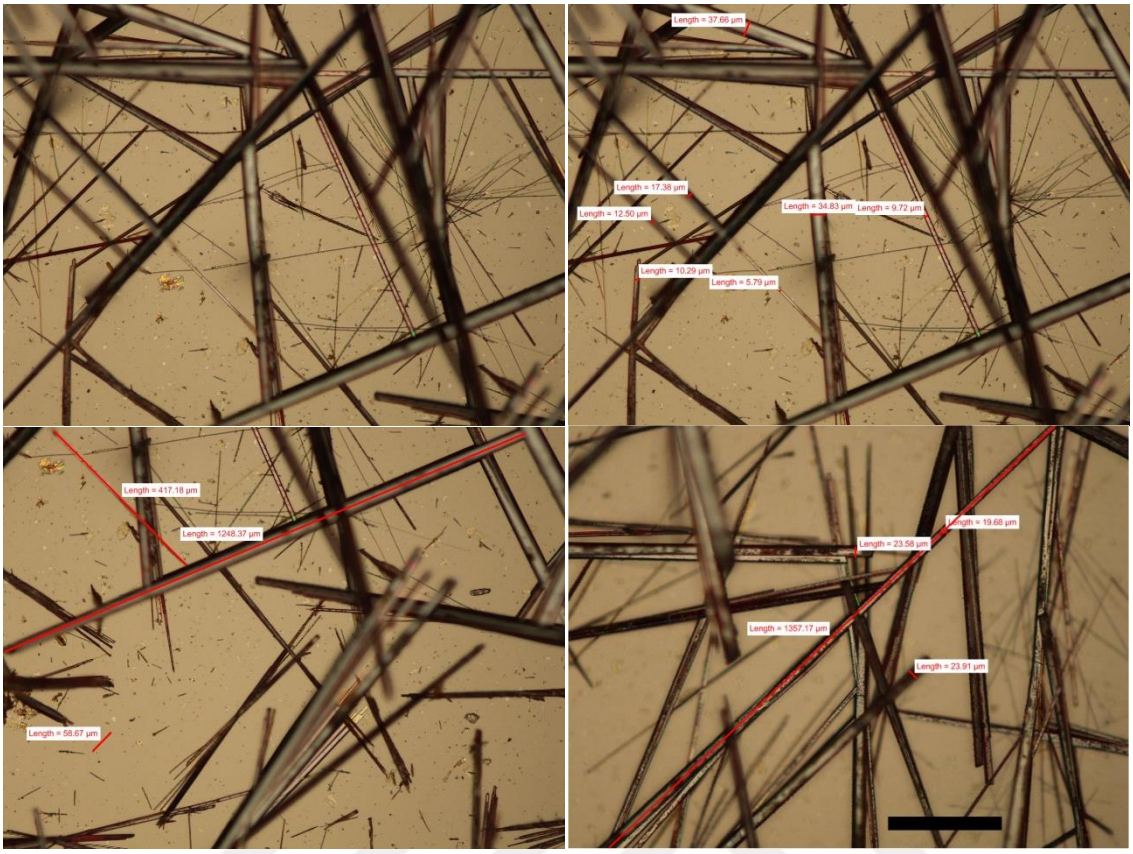
Dolayısıyla transistöre uygulanan negatif gate volatjı ile transistörün p-tip gibi çalışması sağlanmıştır. Bunun nedeni kaynak elektrotunun fermi seviyesi ile Alq3 molekülünün HOMO seviyesi arasında kısmen daha küçük bir engel bariyeri mevcuttur. Fakat bu seferde molekülün kendisi elektron iletimi için uygun olup pozitif yükler için kötü bir malzeme olduğundan pozitif yüklerden kaynaklanan akım değerleri de düşük olmuştur.



Şekil 3.53 Altın (Au) ve Alq3 mikrotellerin enerji band diyagramının gösterilişi. Ok işareti sisteme deşiklerin enjekte edişini göstermektedir.

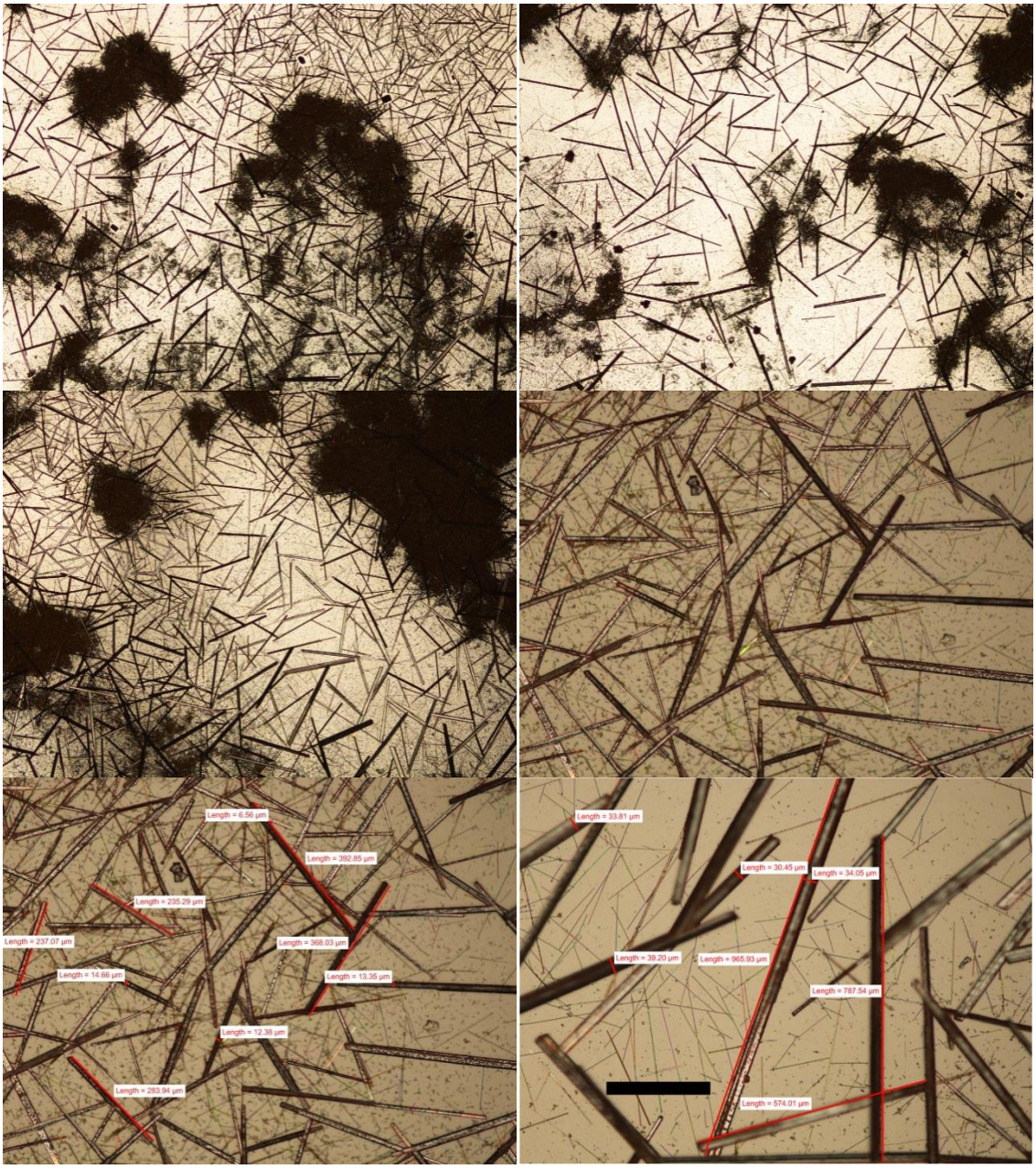
3.3 Fulleren (C_{60}) Mikroteller/Kristaller

C60 materyalinden mikroteller ve mikro yapılar üretmek için Alq3 mikro tellerde kullanılan çözelti bazlı yöntem kullanılmıştır. Alq3 ten farklı olarak farklı solventler denenmiş olup bu solventlerin oluşan mikro yapıların morfolojisine etkisi incelenmiştir. Elde edilen mikro tellerden istenilen FET aygıtları kısıtlı imkânlardan dolayı yapılamamıştır. Toplamda iki farklı tür FET imal edilmiş olup her iki FET de p-tip transistör davranışı gözlemlenmiştir. Literatüre kıyasla çok daha iyi bir morfolojiye sahip mikro kristallerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Toplamda 4 farklı solvent kullanılmış olup bunlardan elde edilen sonuçlar aşağıda sırasıyla verilmiştir. İlk mikroteller klorobenzen içerisinde çözdürülmüş C_{60}'ın içerisine asetonun karıştırılması ile elde edilen mikro kristallerdir. Elde edilen kristallerin veya tellerin boylarının oldukça uzun olması dikkat çekmektedir. Elde edilen bu mikrokristallerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.54 de verilmiştir.



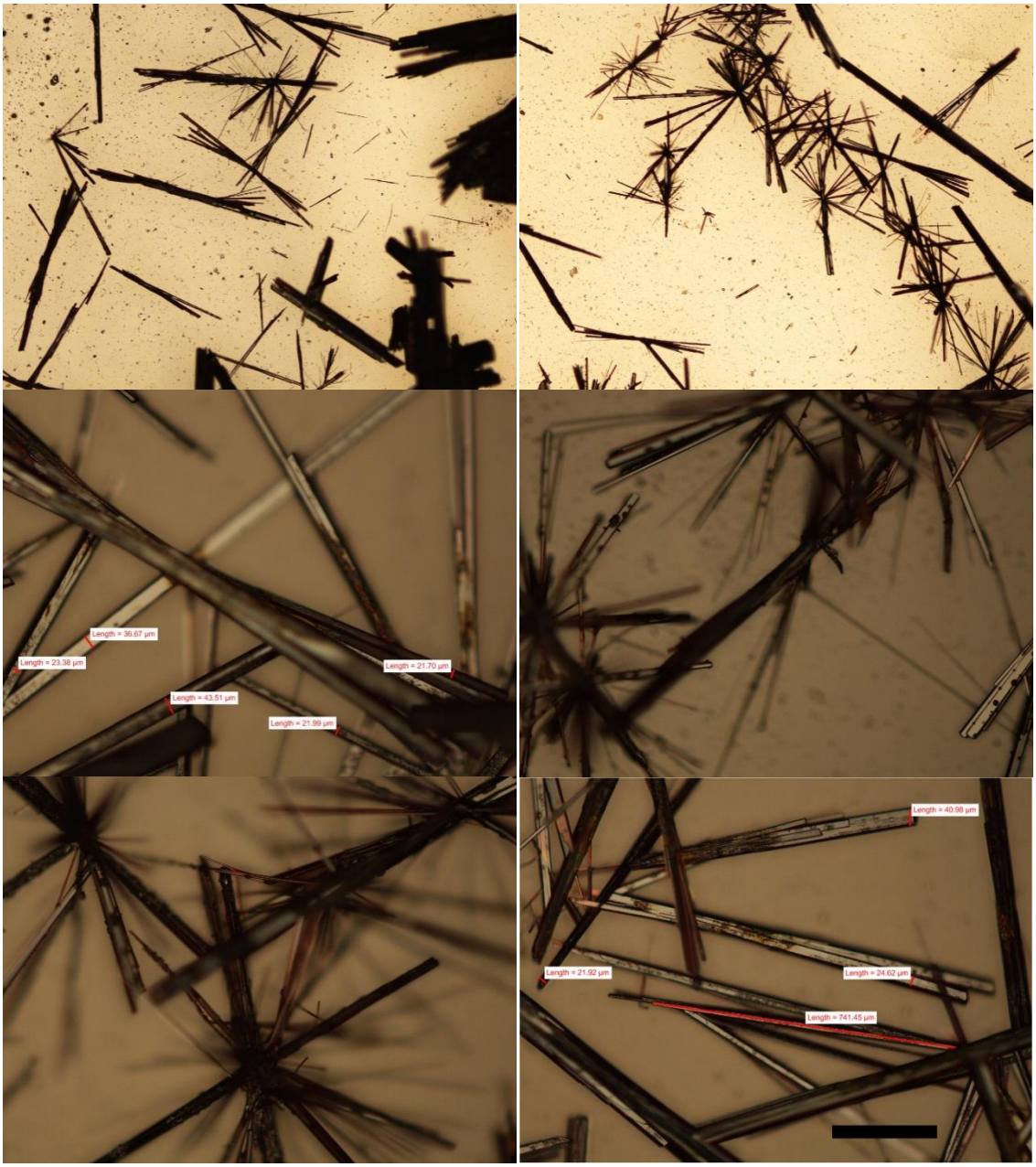
Şekil 3.54 C_{60} mikrotellerin aseton yardımıyla elde edilmiş optik mikroskop görüntüleri. (Siyah ölçek: 250 mikron)

Etanol kullanılarak büyüttüğümüz ikinci farklı mikro kristallerin optik mikroskop görüntüleri aşağıdaki şekilde (Şekil 3.55) gösterilmiştir. Elde edilen tellerin oldukça düzgün olması dikkat çekmektedir. Elde edilen tellerin içerisinde büyük çaplarda teller çoğunlukta olmakla beraber daha yakından çekilen görüntülerine bakıldığında çok daha ince tellerin de olduğu rahatlıkla görülmektedir. Aseton ile karşılaştırıldığında etanol ün kullanıldığı tellerin morfolojisinin çok daha iyi olduğu görülmektedir. Dolayısı ile solventlerin kristal oluşumuna etkisi hem bu örnek hem de bundan sonraki örneklerde net bir şekilde görülecektir.



Şekil 3.55 Etanol kullanılarak oluşturulan C_{60} mikrotellerin optik mikroskop görüntüleri (Siyah ölçek: 250 mikron)

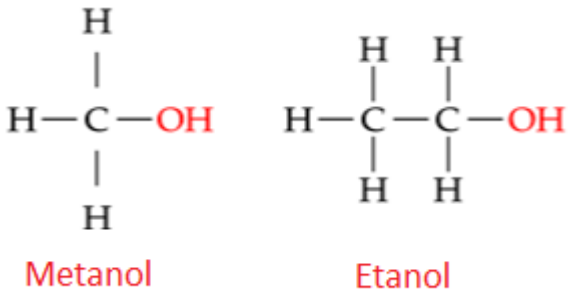
Üçüncü örneğimizde mikro kristal üretmek için C_{60} çözeltisi içerisine kloroform eklenmiş olup elde edilen kristallerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.56 da verilmiştir. İlk iki örneğe nazaran morfoloji olarak çok daha kötü diyebileceğimiz kristal oluşumu gözlemlenmiştir. Özellikle oluşan kristallerin bir çekirdek bölgeden farklı yönlerde büyüdüğü gözlemlenmiştir. Dolayısıyla çekirdek olmayan bölgelerde kristal oluşmadığı görüntülerden de görülmektedir.



Şekil 3.56 Kloroform kullanılarak büyütülen C_{60} mikro tellerinin optik mikroskop görüntüleri (Siyah ölçek: 250 mikron).

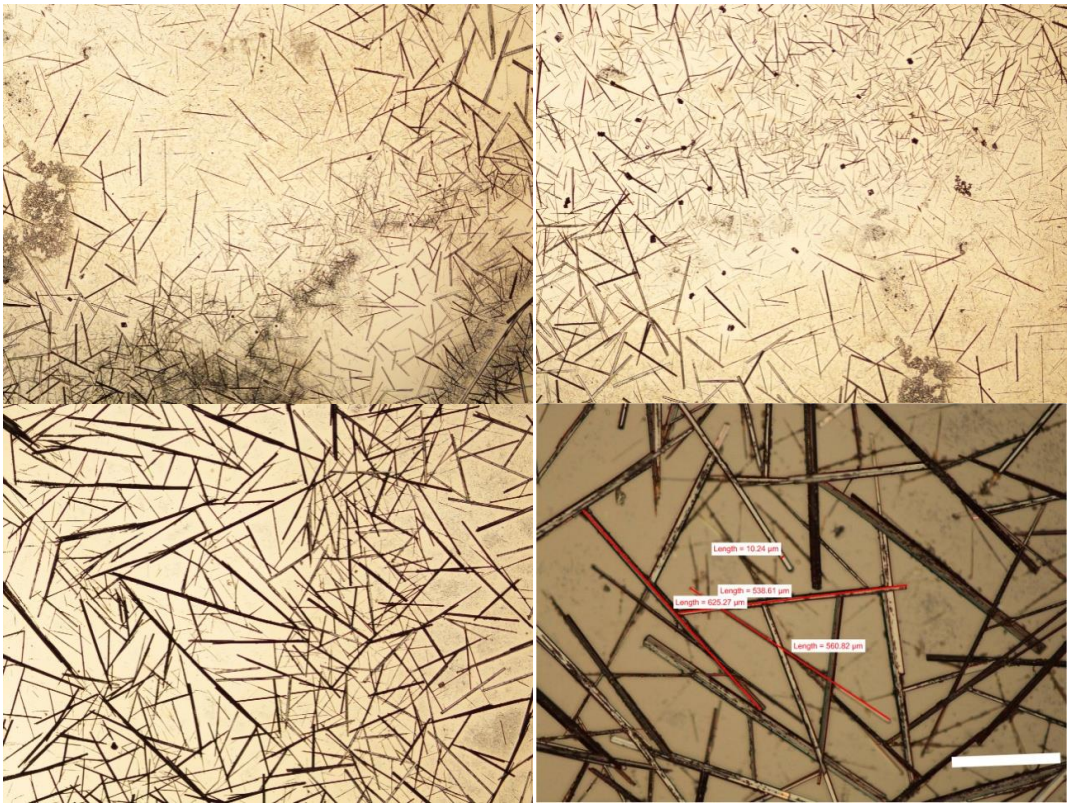
Metanol kullanılarak büyütülen C_{60} kristallerinin aşağıda verilen optik mikroskop görüntülerinden de görüldüğü üzere oluşan tellerin etanol kullanılarak büyütülen tellerle neredeyse aynı görüntüye sahip olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 3.58). Burada kullanılan solventlerin kimyasal olarak birbirine çok benzer olmaları oluşan tellerin morfoloji olarak benzer olmasına neden olduğu söylenebilir. Metanol ve etanol kimyasallarının

birbirinden tek farkı yapıdaki karbon atomları ve bunlara bağlı hidrojen atomlarının sayı olarak farklılık göstermesidir. Aşağıdaki şekilde her iki kimyasalın açık formülleri verilmiştir.



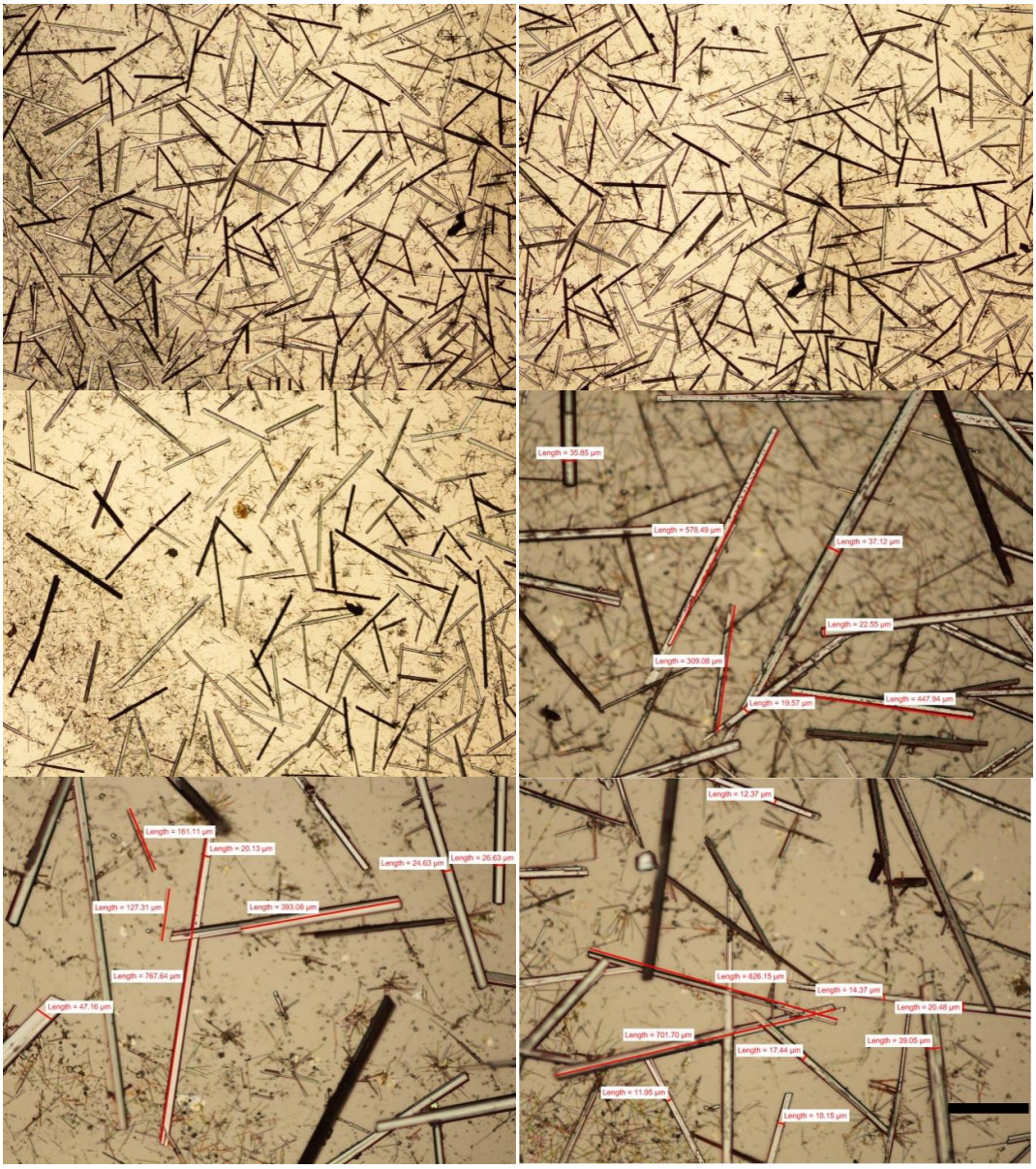
Şekil 3.57 Metanol ve Etanol kimyasallarına ait kimyasal formüller.

Benzer morfolojiyi ileride vereceğimiz n-hegzan kullanılarak büyütülen mikro kristallerde de göreceğiz ki n-hegzan da kimyasal formül olarak metanol ve etanol kimyasallarına benzemektedir.



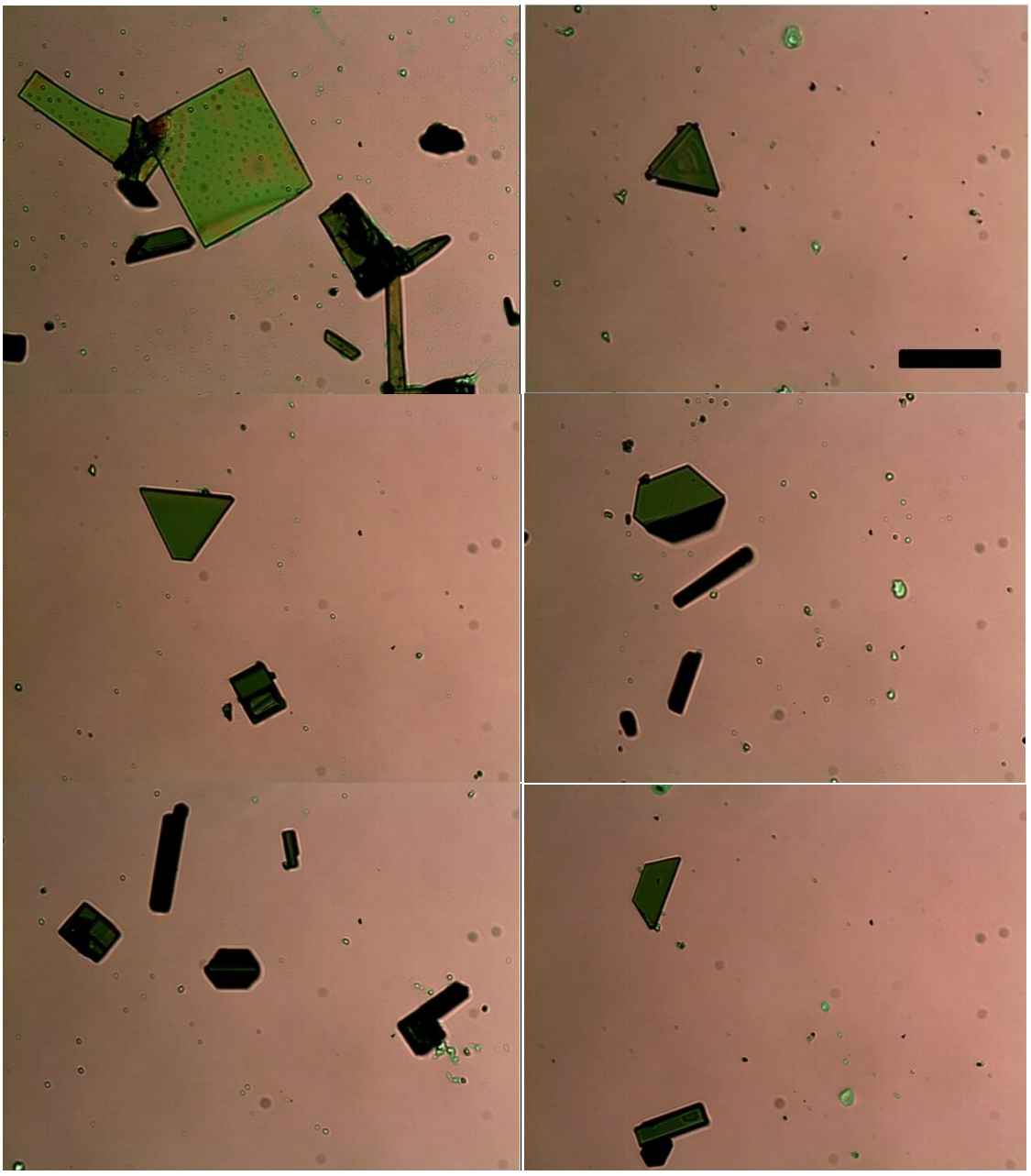
Şekil 3.58 Metanol kullanılarak büyütülen C_{60} mikro kristallerin optik mikroskop görüntüleri (Siyah ölçek: 250 mikron)

n-hegzan kullanılarak büyütülen mikro kristallerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.59 da verilmiştir. Daha önce de bahsedildiği üzere n-hegzan kullanılarak büyütülen bu kristallerin morfolojisi metanol ve etanol kullanılarak büyütülen kristallere oldukça benzemektedir. Şekillerden de görüldüğü üzere mikro tellerin ebatlarının birbirine çok yakın ve boyların neredeyse milimetre (mm) ölçeğinde olduğu görülmektedir. Bu derece iyi kristallerin büyümesi Alq3 gibi C_{60} materyalinin de iyi bir kristalik yapıya sahip olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 3.59 n-hegzan kullanılarak büyütülen C_{60} mikro kristallerin optik mikroskop görüntüleri. (Siyah ölçek: 200 mikron)

C_{60} materyalinden mikrotel kristallerden başka farklı geometrilerde mikro kristaller de büyütülmüştür. Elde edilen kristallerin optik mikroskop görüntüleri çekilmiş olup sonuçlar Şekil 3.60 ta sırasıyla verilmiştir. Elde edilen şekiller sırasıyla kare, üçgen, yamuk, altıgen ve dikdörtgen şekilli parçacıklardır. Dairesel şekilli parçacıklar hariç diğer tüm geometrik şekiller kloroform içerisinde büyütülmüş olup dairesel şekilli parçacıklar etanol içerisinde büyütülmüşlerdir. Farklı geometrik şekillere sahip bu mikro kristallerin morfolojilerinin mükemmele yakın olması C_{60} materyalinin iyi bir kristal olması ve kristalleşmeye elverişli olmasına atfedilebilir. Fakat bu materyalin bu şekillerde kristalleşmesine etki eden parametrelerin net bir şekilde anlaşılması zor bir problemdir. Ayrıca bu kristallerin büyütülmesi esnasında, çözeltilerin buharlaşma hızları, ortamın sıcaklığı, çözeltinin konsantrasyonu, solventlerin hacimce karışım oranları, kristallerin büyütüldüğü altlığın cinsi gibi parametreler kristal oluşumu üzerine etki eden parametreler olarak sıralanabilir. Bu parametrelerden özellikle çözeltinin buharlaşma hızının düşük oranda tutulması kristal morfolojisi üzerinde olumlu etki yaptığı söylenebilir. Çözeltinin buharlaşması esnasında C_{60} materyalinin iyi kristalleşebilmesi için yeterli sürenin olması gerekmektedir ki bu da buharlaşma hızını kontrol etmekle mümkündür.

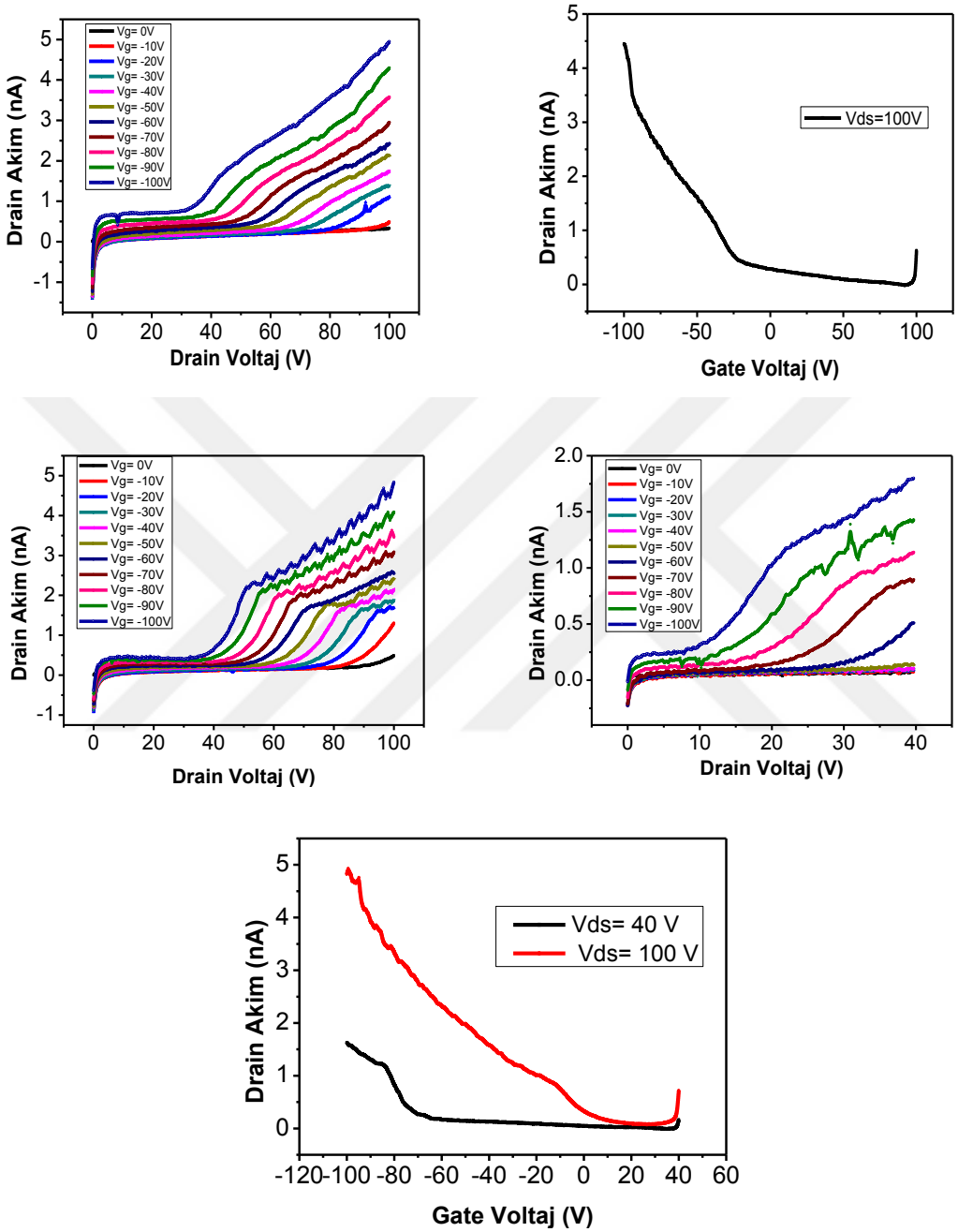


Şekil 3.60 Kloroform C_{60} materyalinden büyütülen farklı geometrik şekillere sahip mikro kristallerin optik mikroskop görüntüleri. (Siyah Ölçek: 200 mikron)

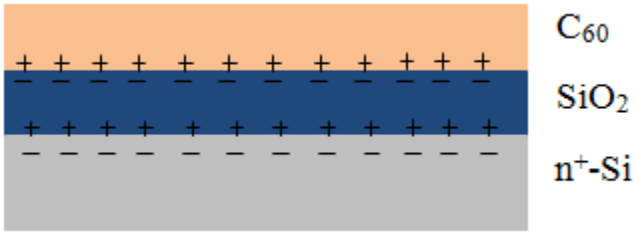
3.3.1 C_{60} Mikrotel Aktif Katmanlı FET lerin İmali ve Karakterizasyonu

Yukarıda bahsettiğimiz C_{60} mikrotellerden iki farklı tür FET imal edilmeye çalışılmış ve elektriksel karakterizasyonu yapılmaya çalışılmıştır. Fakat bu aygıtların ne SEM ne de optik mikroskop görüntüleri elimizde olmadığından bu FET lere ait herhangi bir parametre hesaplanmamıştır. Elde edilen FET lerden biri SiO_2/Si diğeri de

PMMA/SiO_2/n^+-Si yapısı üzerine imal edilmiştir. FET lerin elektriksel karakterizasyon sonuçları aşağıdaki şekilde verilmiştir (Şekil 3.61).



Şekil 3.61 PMMA/SiO_2/n^+-Si üzerine fabrike edilmiş C_{60} mikrotel FET lere ait çıkış ve transfer karakteristikleri.

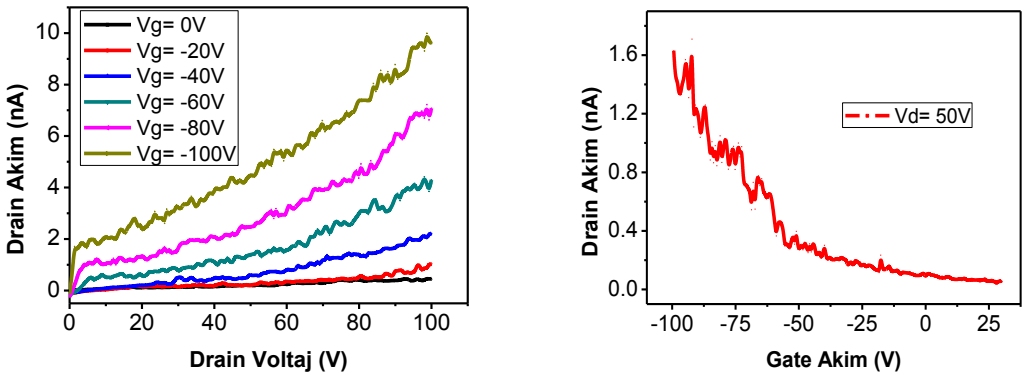


Şekil 3.62 n^+-Si gate elektrot'a negatif elektrik sinyalinin uygulanmasına bağlı olarak transistör kanalının oluşumunu gösteren çizim.

C_{60} mikrotel aktif katmanlı FET ler p-tip transistör gibi çalışmış olup literatürde C_{60} organik yarıiletken materyalinin n-tipi özellik gösterdiği bilinmektedir. Literatürde C_{60} materyalinden yapılan FET lerin hava ortamından izole edilmiş sistemlerde veya vakum ortamlarında yapılan elektriksel karakterizasyonunda transistörlerin n-tip gibi çalıştığı fakat hava ortamında yapılan ölçümlerde oksijenin C_{60} materyaline diffüze olması ile FET lerin hızla bozulmaya başladığı bildirilmiş ve yapılan bazı çalışmalarda hem n hem de p-tip özellik gözlemlenebileceği belirtilmiştir [212]. Dolayısı ile bizim yaptığımız aygıtların özellik değiştirmesinin en büyük nedeni C_{60} mikro tellerin hava ortamında büyütülmeleri ve yine hava ortamında yapılan ölçümlerin neden olduğunu düşünmekteyiz. Bununla beraber gate altlık ve elektrot olarak kullandığımız yüksek katkılı n-tip Si tabakasına uygulanan negatif elektrik sinyali C_{60} materyali içerisinde p-tip transistör kanalının oluşmasına neden olur (Şekil 3.62). Daha öncede değindiğimiz hava ortamındaki oksijen moleküllerinin C_{60} materyaline diffüze olması ile transistörün p-tipi gibi çalışmasına neden olabileceği düşünülmektedir. Bunun yanında altın ile C_{60} materyali arasında belli bir enerji bariyerinin olması ve metal buharlaştırılırken sıklıkla rastlanılan arayüzey tabakasında metalin diffüzyon olması ile organik molekülde konjugasyonun bozulmasından dolayı oluşan ince bir yalıtkan tabakanın da bunda katkısının olduğunu düşünmekteyiz [213]. Nitekim Şekil 3.61 deki çıkış karakteristiklerinden de görüleceği üzere I-V karakteristiğinin lineer kısmında diyot tipi davranışın gözlemlenmesi bu enerji bariyerinin varlığını göstermektedir.

SiO_2/n^+-Si üzerine imal edilen C_{60} mikrotel aktif katmanlı FET'in yapısında yalıtkan tabaka olarak sadece SiO_2 kullanılmış olup PMMA kullanılmamıştır. Yine yukarıdaki FET karakteristiğinde olduğu gibi p-tip transistör tipi gözlemlenmiş ve bunun nedenleri

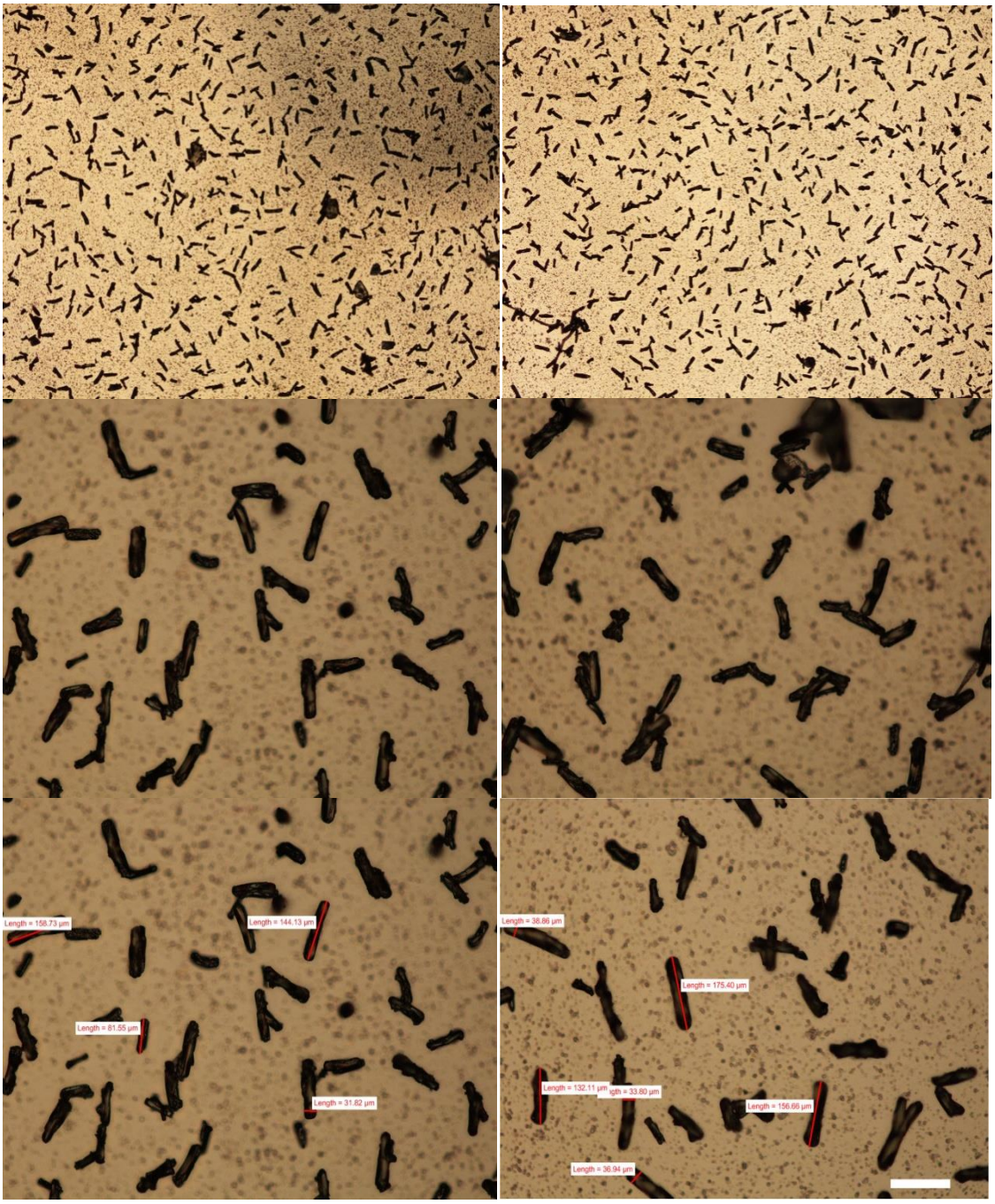
de yukarıda ifade edilmiştir. Burada çıkış karakteristiğine bakıldığında oluşan akımının bir miktar arttığı gözlemlenmiş ki buda beklenen bir durumdur. Çünkü yalıtkan tabakalardan PMMA nın çıkarılması transistör kanalı içerisinde daha fazla yük indükleyeceğinden dolayı oluşan akımın bir miktar daha artması beklenen bir durum olacaktır.



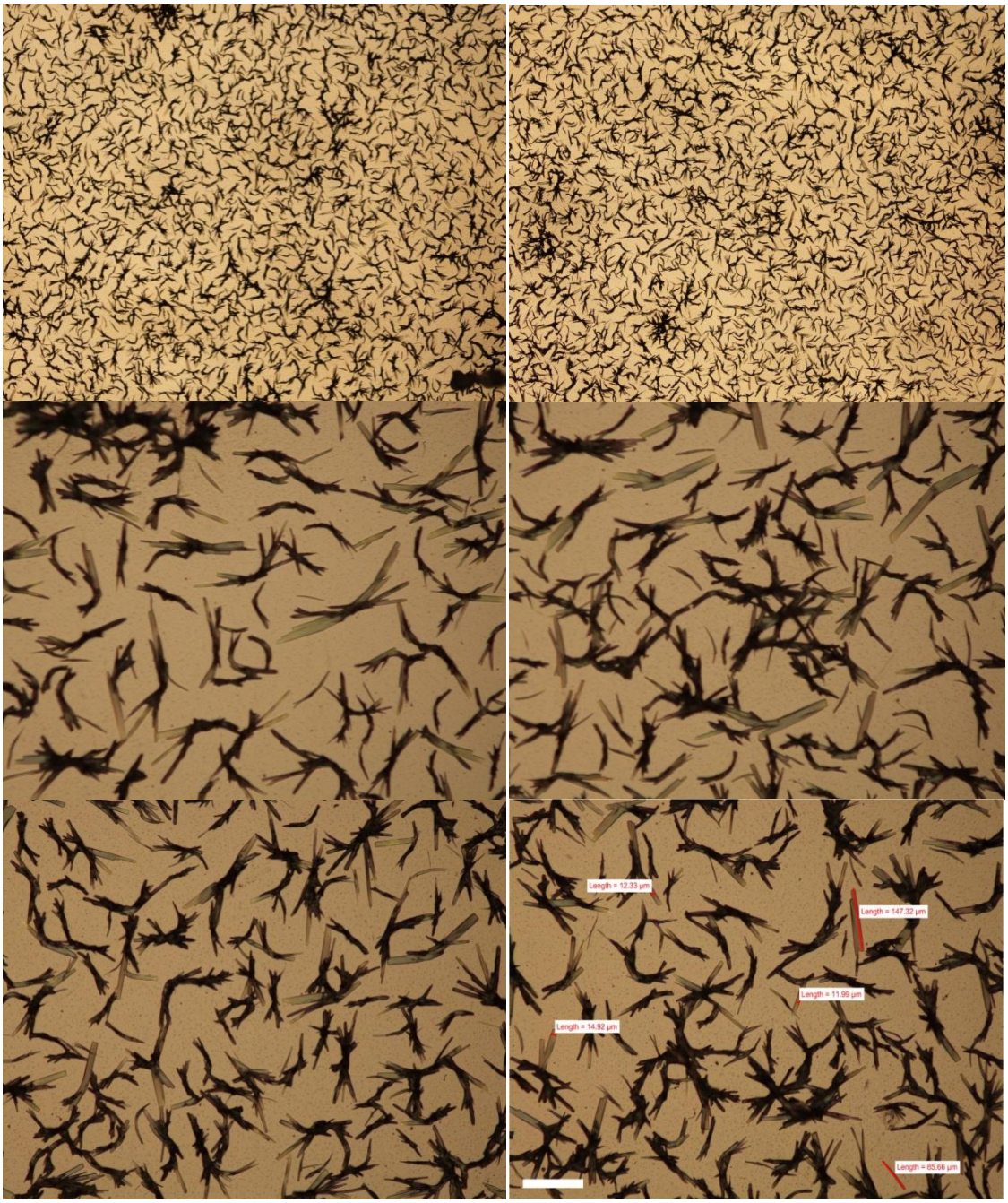
Şekil 3.63 SiO_2/n^+-Si üzerine üretilmiş edilmiş C_{60} mikrotel FET e ait çıkış ve transfer karakteristikleri.

3.4 H2Pz mikro çubukların sentezi

H2Pz molekülü ile elde ettiğimiz mikro çubukların farklı solventlerdeki görüntüleri aşağıdaki şekillerde verildiği gibidir. Bu molekülden herhangi bir FET imal edilememiştir. H2Pz mikro çubukların optik mikroskop görüntülerinden de görüleceği üzere solventlerin oluşan çubukların morfolojisine etkisi açıkça görülmektedir. Etanol içerisinde oluşan çubukların morfolojisinin THF içerisinde oluşanlara nazaran daha düzgün olduğu görülmüştür.



Şekil 3.64 H2Pz materyalinden etanol yardımıyla büyütülen mikro çubukların optik mikroskop görüntüleri (Beyaz ölçek 140 mikron uzunluğundadır.)



Şekil 3.65 H2Pz materyalinden tetrahidrofuran (THF) yardımıyla büyütülen mikro çubukların optik mikroskop görüntüleri (Beyaz ölçek 140 mikron uzunluğundadır.)

4 TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar, bulgular kısmında verilmiştir. Tezin hedefleri arasında nanotel aktif katman içeren alan etkili transistör lerin yanı sıra memristör ve rezistör imali ve elektriksel karakterizasyonları bulunmaktadır. Bu hedef doğrultusunda tezin içeriğini ağırlıklı olarak inorganik materyaller oluşturmasına rağmen bunun yanında organik moleküllerden büyütülmüş farklı geometrik şekillere sahip (çoğunlukla çubuk) mikro yapılar da elde edilmiş olup bunlardan sadece alan etkili transistörler imal edilmiştir. Organik materyallerden ikisi ticari (Alq3 ve C_{60}) olmak üzere biri de yeni sentezlenmiş (H2Pz) olan organik moleküller kullanılmış ve bunlardan sadece ticari olanlardan transistör imal edilmiştir.

Yukarıda yapılan genel bir değerlendirmeden sonra bu çalışmalardan elde edilen sonuçların yorumunu aşağıda maddeler halinde sıralayacağız.

- Nanotel köprülü aygıtların rezistör ölçümlerinde görülen diyot tipi davranışlar metal-oksit nanoteller ile Si elektrotlar arasındaki potansiyel engeline atfedilmiştir. Ayrıca bu aygıtlarda UV ışığa verilen tepkilerin düşük olması iki şekilde açıklanabilir: Birincisi kullanılan metal-oksit materyallerin geniş band aralığına sahip olması ve kullanılan UV ışığın dalgaboyunun (365 nm) ve çıkış gücünün (750 uW) yeterli olmamasına atfedilebilir. İkinci olarak köprü şeklinde konumlanan nanotellerden alt kısımda olanlara UV ışığın ulaşamamış olması veya üst kısımda bulunanların alt kısımdakileri engellemeleri yeteri derecede tepkinin oluşmasını engellediği söylenebilir.
- Nanotel köprülü rezistör ölçümlerinden, artan Zn konsantrasyonunun iletkenliği düşürdüğü gözlemlenmiştir. Bu bulgu literatür ile uyumlu olup [214,215] bu durum Zn^{+2} iyonlarının yapı içerisinde akseptör (elektron almaya meyilli) davranışı ile açıklanmaktadır. Bununla beraber In/Sn oranı düşük olan tellerde daha iyi iletken olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum nanotellerin ITO gibi davranmasına atfedilmiştir.
- Nanotel köprülü memristör aygıtlarda yapılan elektriksel ölçümlerde I-V karakteristikleri hem pozitif hem de negatif bölgede anahtarlama işlevi yaptığı görülmüştür. Bu anahtarlamalar veya kapalı durumdan açık duruma geçişler bazı aygıtlarda çok keskin olurken, daha yumuşak olarak gerçekleşmektedir. Bu durum Sn^{+2} ile Sn^{+4} nin beraber bulunması ve bu iki iyonun aygıtın kademeli bir geçişe veya çok basamaklı bir geçişe izin vermesine atfedilebilir.

- Alan etkili transistörlerde iki farklı nanotel türü kullanılmıştır. Bunlardan biri ITZO diğeri de Zn katkılı In_2O_3 nanotellerdir. Bunlardan ikinci tip nanotellerden, yani Zn katkılı In_2O_3, yapılan alan etkili transistör (FET) tipik n-tipi transistör özelliği göstermiştir. Bu literatürdeki yapılan çalışmalarla da uyumludur. Fakat birinci tip nanotellerden imal edilen FET lerin hepsi (5 adet) p-tipi transistör özelliği göstermiştir. Literatürden ITZO ince film transistörlerin n-tip davranış gösterdikleri bilinmektedir. Dolayısıyla, ITZO nanotellerinde n-tip davranış göstermeleri beklenir. Tez çalışmasında yaptığımız çalışmaya benzer bir çalışma literatürde yapılmış olup ZnO nanotel tabanlı aygıtların p-tip davranış sergiledikleri rapor edilmiştir [204]. Bu çalışmada katkısız ZnO nanoteller transistör kanalı olarak kullanılmış olup transistörün kaynak (source) elektrotu yüksek katkılı p^+-SiC (silicon varbide) diğer elektrot için krom kullanılmıştır. İki farklı gate voltajına bağlı olarak ZnO nanoteldeki iletim tipi gözlemlenmiştir. Bu çalışmada pozitif gate voltajında ZnO n-tipi transistör gibi çalışmış Gate voltajının gegatif değerleri için ZnO nun dieletrik tabakaya yakın olan kısımları tip değiştirmekte ve p-tip kanal (yani pozitif yüklerin sayısı bu bölgede artar) oluşmaktadır. Burada kaynak elektrotu yüksek katkılı ve p-tip bir yarıiletken olduğu için bu kez bu yüksek katkılı p-tip yarıiletken elektrotun çoğunluk taşıyıcıları olan holler bu kanal üzerinden kolay bir şekilde transistörün diğer elektrotuna uygulana elektrik sinyali kanal boyunca iletilir [204]. Bizim çalışmamızda da kullandığımız altlık yüksek katkılı p-tip SOI altlık olduğundan transistörün her üç elektrotu da yüksek katkılı p-tip sislisyum yarıiletken materyaldir. Dolayısı ile gate elektrotuna uygulanan uygun elektrik sinyaline ve kullanılan kaynak elektrotunun cinsine bağlı olarak n-tip yarıiletkenlerde p-tip iletimin gerçekleştiği durumlar gözlemlenebilmektedir [199]. Literatürde kaynak elektrotunun cinsine bağlı olarak n-tipi yarıiletkenlerde p-tip iletimin gözlemlendiği başka çalışmalarda mevcuttur [203]. Yapılan bu çalışmada ZnO ile platin (Pt) elektrotlar arasında oluşan Schottky bariyer engelinden dolayı ZnO nun p-tipi transistör gibi çalıştığı belirtilmiştir. Bizim kullandığımız SOI (silicon-on-insulator) altlıklar ve transistörün üç elektrotu yüksek katkılı p^+ tipi yarıiletkendir. Fakat silikon ile yarıiletken nanotellerin iş fonksiyonları arasındaki farktan dolayı bu malzemelerin davranışlarını değiştirebilir. Dolayısıyla bizim kullandığımız ITZO nanotellerin iş fonksiyonları ile silikonun iş fonksiyonu arasındaki farktan dolayı (bu fark yapılan rezistör ölçümlerinde açıkça görülmektedir) p-tipi transistör gibi davrandığı söylenebilir.

- Transistörlerdeki yüksek akım değerlerinin nedeni olarak nanotellerin büyütülmesi sırasında malzeme buharının SOI altlığın yalıtkan tabakası olan SiO_2 dielektrik tabaksının içerisine belli oranda diffüze olduğu (veya yalıtkan tabakanın katkılandığı) dolayısıyla yalıtkan tabakanın belli bir oranda iletken hale gelmiş olmasına yorumlanmıştır.
- Yine nanotellerin köprü şeklinde büyütülmesi ve bu tellerin büyük çoğunluğunun yalıtkan tabakaya temas etmemesi (havada olması) nedeniyle transistörün gate elektroduna uygulanan sinyalin nanotellerde yeterli derecede yük taşıyıcısı oluşturamamasına neden olmaktadır ki bu da transistörün açma/kapama (on/off) oranını düşürmektedir.
- Organik Alq3 mikrotellerin yapılan XRD [104], PL ve absorbsiyon [209] analizleri literatür ile uyumlu çıkmıştır.
- Alq3 mikrotel aktif katmanlı FET in elektriksel ölçüm sonuçlarına bakıldığı zaman yeterli derecede akım kazancının olmadığı görülmüştür. Bunun nedeni yaptığımız transistörde sadece iki adet mikrotelin transistörün aktif katmanına katkı sağlamasından dolayı yeteri derecede akım kazancı elde edilememesine atfedilebilir. Çünkü Alq3 molekülü ile yapılan mikrotellerin direnç ölçümleri diyot tipi gibi davranmıştır ve oldukça yüksek voltaj değerlerinde oldukça düşük akım yoğunluğu elde edilmiştir (100 V ta yaklaşık 125 nA). Dolayısıyla eğer transistörün kanal aralığına daha fazla mikrotel yerleştirilebilseydi muhtemelen daha iyi bir akım kazancı elde edilebilirdi. Bilindiği gibi organik moleküller hava ortamına karşı oldukça hassas malzemelerdir dolayısıyla hava ortamında yapılan elektriksel ölçümler aygıt performansını oldukça etkilemektedir. Böyle bir problemi ortadan kaldırmak için kullanılan yöntem azot veya argon ortamlar (Glove box) içerisinde elektriksel ölçümleri yapmaktır. Elimizde böyle imkân olmadığı için aygıtın bu ortamlardaki performansını ölçemedik.
- C_{60} mikrotel FET'ler yüksek katkılı n^+-tip Si altlılar üzerine imal edilmiştir. Bulgular kısmında da verildiği gibi yüksek katkılı n^+-tip Si yarıiletkende çoğunluk taşıyıcılar elektronlardır. Bu altlığa negatif gate volatjı uygulandığında C_{60} mikrotel FET aygıtının kanalı pozitif (p-tip) hale gelir (Şekil 3.62). C_{60} mikrotellerin hem hava ortamında sentezi hem de elektriksel karakterizasyonların hava ortamında yapılmasından dolayı oksijenin organik yapıya diffüze olması p-tipi iletimi daha uygun hale getirmektedir. Bu duruma daha önce de değindiğimiz gibi literatürde C_{60} materyalinden imal edilen

FET'lerde n-tipi iletimin ancak yüksek vakum veya hava ile teması kesilmiş bir ortamda (Azot veya Argon ortamlar) gözlemlenebileceği aksi takdirde hava ortamında yapılan ölçümlerde aygıtların hızla bozulduğu ve hem n-tip hem de p-tip iletimin gözlemlenebileceği belirtilmiştir [212].

- Alq3 mikrotel FET ölçümü sonucunda p-tip transistör davranışı kullanılan altın metalinin iş fonksiyonunun (5.1 eV) Alq3 molekülünün HOMO seviyesine (5.8 eV) yakın olmasından kaynaklanmaktadır.
- ITZO FET'lerde en yüsek mobilite değerinin (μ=11 $cm^2/V.s$) Zn/In=1.31, Zn/Sn=2.62 ve In/Sn=2 atomik karışım değerlerine sahip 1.FET aygıtta elde edilmiştir. Atomik karışımların 1 den küçük değerleri veya çok daha yüksek orandaki karışımlarımda mobilitenin düştüğü gözlemlenmiştir. Buna göre en yüksek mobilite için optimum durumun atomik karışım oranlarının 1 ile 3 arasında ve birbirine yakın değerler için elde edildiği sonucuna varılmıştır. Bu durum geçiş iletkenliği için de gözlemlenmiş olup yine en yüksek geçiş iletkenliği değeri 1.FET aygıtta elde edilmiştir.
- Bu çalışma sonunda: Özellikle organik materyallerden yapılan nano veya mikrotellerden aygıt imal etmek ciddi zaman ve emek gerektirmektedir. Çünkü var olan yöntemlerin organik materyaller için işe yaramadığı görülmüştür. Bu sebepten dolayıdır ki bu tez çalışmasında da organik mikrotel aygıtların hem imali hem de elektriksel karakterizasyonları konusunda istenilen verim elde edilememiştir. Bu konu ile alakalı gerek nano/mikro tel veya çubukların sentezine yönelik yeni metotlar ve aygıt imali üzerine yeni tekniklerin geliştirilmesi üzerinde durulması gerekmektedir. Ayrıca ciddi literatür açığı olan bu konu hakkında araştırmacıların katkı yapabilecekleri bir alan olup her katkı hem önemli bir boşluğu dolduracak hem de Ülkemiz adına önemli kazanımlar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

[1] Feyynman P.R. (1960) There's Plenty of Romms at the Bottom. Engineering and Science, (23), 22.

[2] Tolochko N.K. History of Nanotechnology. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS),

[3] Binnig G., Rohrer H. (1983) Scanning tunneling microscopy. Surface Science, 126, 236-244.

[4] Martín N. (2013) The Revival of Fullerenes?. The Electrochemical Society Interface , 22,(3),51-56.

[5] Iijima S. (2002) Carbon nanotubes: past, present, and future. Physica B: Condensed Matter, 323, (1–4),1–5.

[6] Appenzeller J., Knoch J., Björk T. M., Riel H., Schmid H., Riess W. (2008)Toward Nanowire Electronics. IEEE Transactions on Electron Device, 55, (11), 2827 – 2845.

[7] Barrelet J. C., Greytak B. A., Lieber M. C. (2004) Nanowire Photonic Circuit Elements. Nano Lett., 4, (10), 1981–1985.

[8] McAlpine C. M., Friedman S. R., Jin S., Lin H.K., Wang U. W., Lieber M. C. (2003) High-Performance Nanowire Electronics and Photonics on Glass and Plastic Substrates. Nano Lett., 3, (11), 1531–1535.

[9] Li Y., Qian F., Xiang J., Lieber M. C. (2006) Nanowire Electronic and Optoelectronic Device. Materialstoday, 9,(10), 18-27.

[10] Thelander C., Agarwal P., Brongersma S., Eymery J., Feiner F. L., Forchel A., Scheffler M., Riess W., Ohlsson J. B., Gösele U., Samuelson L. (2006) Nanowire Based One Dimensional Electronics. Materialstoday, 9, (10), 28-35.

[11] Liu C.-Pu, Wang R.-Chi, Kuo C.-Lin, Liang Y.-Han, Chen W.-Yu, (2007) Recent Patents on Fabrication of Nanowires. Recent Patents on Nanotechnology, 1, 11-20.

[12] Chen S., Bomer G. J., Wiel G. van der W., Carlen T. E., Berg van den A., (2009) Top-Down Fabrication of Sub-30 nm Monocrystalline Silicon Nanowires Using Conventional Microfabrication. ACS Nano,3 ,(11), 3485–3492.

[13] Nickels P., Dittmer U. W., Beyer S., Kotthaus P. J., Simmel C. F. (2004) Polyaniline nanowire synthesis templated by DNA. Nanotechnology, 15,1524–1529.

[14] Rackauskas S., Nasibulin G. A., Jiang H., Tian Y., Kleshch I. V., Sainio J.,

Dobraztsova E., Bokova N.S., Nobraztsov A., Kauppinen I. E. (2009) A novelmethod formetal oxide nanowire synthesis. Nanotechnology, 20, 165603 (8pp).

[15] Kim K., Kim M., Cho M. S. (2006) Pulsed electrodeposition of palladium nanowire arrays using AAO template. Materials Chemistry and Physics, 96 , 278–282.

[16] Zhang Y., Wang N., Gao S., He R., Miao S., Liu J., Zhu J., Zhang X. (2002) A Simple Method To Synthesize Nanowires. Chem. Mater., 14, 3564-3568.

[17] Greene E. L., Law M., Goldberger J., Kim F., Johnson C. J., Zhang Y., Saykally J. R., Yang P. (2003) Low-Temperature Wafer-Scale Production of ZnO Nanowire Arrays. Angew. Chem. Int. Ed.,42, 3031 – 3034.

[18] Sunkara K. M., Sharma S., Miranda R., Lian G., Dickey C. E. (2001) Bulk synthesis of silicon nanowires using a low-temperature vapor–liquid–solid method. Appl. Phys. Lett., 79, (10), 1546-1548.

[19] Chang Pai-C., Fan Z., Wang D., Tseng W-Y., Chiou W-A., Hong J., Lu G. J., (2004) ZnO Nanowires Synthesized by Vapor Trapping CVD Method. Chem. Mater., 16, 5133-5137.

[20] Hobbs G. R., Petkov N., Holmes D. J. (2012) Semiconductor Nanowire Fabrication by Bottom-Up and Top-Down Paradigms. Chem. Mater., 24, 1975−1991.

[21] Fuhrmann B., Leipner S. H., Höche H-R., Schubert L., Werner P., Gösele U. (2005) Ordered Arrays of Silicon Nanowires Produced by Nanosphere Lithography and Molecular Beam Epitaxy. Nano Lett., 5, (12), 2524-2527.

[22] Choi W. K., Liew T. H., Dawood M. K., Smith I. H., Thompson V.C., Hong H. M. (2008) Synthesis of Silicon Nanowires and Nanofin Arrays Using Interference Lithography and Catalytic Etching. Nano Lett., 8, (11), 3799-3802.

[23] Biswas A., Bayer S. I., Biris S. A., Wang T., Dervishi E., Faupel F. (2012) Advances in top–down and bottom–up surface nanofabrication: Techniques, applications & future prospects. Advances in Colloid and Interface Science,170, 2–27.

[24] Li Y.S., Lin P., Lee Y. C., Tseng Y. T. (2004) Field emission and photofluorescent characteristics of zinc oxide nanowires synthesized by a metal catalyzed vapor-liquid-solid process. Journal of Applied Physics, 95, 371.

[25] Wan Q., Yu K., Wang H. T., Lin L. C. (2003) Low-field electron emission from tetrapod-like ZnO nanostructures synthesized by rapid evaporation. Appl. Phys. Lett., 83, (11), 2253.

[26] Yang Yi-H., Wu Sheng-J., Chiu Hui-S., Lin Ping-I., Chen Yit-T. (2004) Catalytic Growth of Silicon Nanowires Assisted by Laser Ablation. J. Phys. Chem. B., 108, 846-852.

[27] Ko H. S., Lee D., Kang W. H., Nam H. K., Yeo Y. J., Hong J. S., Grigoropoulos P. C., Sung J. H. (2011) Nanoforest of Hydrothermally Grown Hierarchical ZnO Nanowires for a High Efficiency Dye-Sensitized Solar Cell. Nano Lett., 11, 666–671.

[28] Gates B., Mayers B., Grossman A., Xia Y. (2002) A Sonochemical Approach to the Synthesis of Crystalline Selenium Nanowires in Solutions and on Solid Supports. Adv. Mater., 14, (23), 1749-1752.

[29] Fan J. H., Lee W., Scholz R., Dadgar A., Krost A., Nielsch K., Zacharias M. (2005) Arrays of vertically aligned and hexagonally arranged ZnO nanowires: a new template-directed approach. Nanotechnology, 16, 913–917.

[30] Yu H., Bao Z., Oh H. J. (2013) High-Performance Phototransistors Based on Single-Crystalline n-Channel Organic Nanowires and Photogenerated Charge-Carrier Behaviors. Adv. Funct. Mater., 23, 629-639.

[31] Qiu L., Lee H. W., Wang X., Kim S. J., Lim A. J., Kwak D., Lee S., Cho K. (2009) Organic Thin-film Transistors Based on Polythiophene Nanowires Embedded in Insulating Polymer. Adv. Mater., 21, 1349–1353.

[32] Weng Y. W., Chang J. S., Hsu L. C., Hsueh J. T. (2011) A ZnO-Nanowire Phototransistor Prepared on Glass Substrates. ACS Appl. Mater. Interfaces, 3, 162–166.

[33] Ai N., Zhou Y., Zheng Y., Chen H., Wang J., Pei J., Cao Y. (2013) Achieving high sensitivity in single organic submicrometer ribbon based photodetector through surface engineering. Organic Electronics, 14, 1103–1108.

[34] Tang Q., Tong Y., Hu W., Wan Q., Bjørnholm T. (2009) Assembly of Nanoscale Organic Single-Crystal Cross-Wire Circuits. Adv. Mater., 21,4234–4237.

[35] Chuang S., Gao Q., Kapadia R., Ford C. A., Guo J., Javey A. (2013) Ballistic InAs Nanowire Transistors. Nano Lett.,13, 555−558.

[36] Syed Mubeen and Martin Moskovits; (2011) Gate-Tunable Surface Processes on a Single-Nanowire Field-Effect Transistor. Adv. Mater.,23, 2306–2312.

[37] Sagade A. A., Rao V. K., Mogera U., George J. S., Datta A., Kulkarni U. G. (2013) High-Mobility Field Effect Transistors Based on Supramolecular Charge Transfer Nanofibres. Adv. Mater.,25, 559–564.

[38] Do Hoon Kim, Su Jeong Lee, Sang Hoon Lee, Jae-Min Myoung,; (2016) Electrical properties of flexible multi-channel Si nanowire field-effect transistors depending on the number of Si nanowires. Chem. Commun., 52, 6938-6941.

[39] Nasr B., Wang D., Kruk R., Rösner H., Hahn H., Dasgupta S. (2013) High-Speed, Low-Voltage, and Environmentally Stable Operation of Electrochemically Gated Zinc Oxide Nanowire Field-Effect Transistors. Adv. Funct. Mater., 23, 1750–1758.

[40] Zhu M., Luo H., Wang L., Guo Y., Zhang W., Liu Y., Yu G. (2013) The synthesis of 2,6-dialkylphenyldithieno[3,2-*b*:2′,3′-*d*]thiophene derivatives and their applications in organic field-effect transistors. Dyes and Pigments, 98, 17-24.

[41] Niu Q., Zhou Y., Wang L., Peng J., Wang J., Pei J., Cao Y. (2008) Enhancing the Performance of Polymer Light-Emitting Diodes by Integrating Self-Assembled Organic Nanowires. Adv. Mater.,20, 964–969.

[42] Xu S., Xu C., Liu Y., Hu Y., Yang R., Yang Q., Ryou Jae-H., Kim J. H., Lochner Z., Choi S., Dupuis R., Wang L. Z. (2010) Ordered Nanowire Array Blue/Near-UV Light Emitting Diodes. Adv. Mater., 22, 4749–4753.

[43] Lee Chul-H., Kim Yong-J., Hong J.Y., Jeon Seong-R., Bae Sukang, Hong H.B., Yi Gyu-C. (2011) Flexible Inorganic Nanostructure Light-Emitting Diodes Fabricated on Graphene Films. Adv. Mater., 23, 4614–4619.

[44] Chen S., Zhao Z., Tang Z. B., Kwok Hoi-S.; (2012) Growth methods, enhanced photoluminescence, high hydrophobicity and light scattering of 4,4′-bis(1,2,2-triphenylvinyl)biphenyl nanowires. Organic Electronics,13, 1996–2002.

[45] Lupan O., Pauporté T., Bahers L.T., Viana B., Ciofini I. (2011) Wavelength-Emission Tuning of ZnO Nanowire-Based Light-Emitting Diodes by Cu Doping: Experimental and Computational Insights. Adv. Funct. Mater., 21, 3564–3572.

[46] Lee W. J., Kim K., Park H. D., Cho Y. M., Lee B. Y., Jung S. J., Kim Dae-C., Kim J., Joo J. (2009) Light-Emitting Rubrene Nanowire Arrays: A Comparison with Rubrene Single Crystals. Adv. Funct. Mater.,19, 704–710.

[47] Lupan O., Pauporté T., Viana B. (2010) Low-Voltage UV-Electroluminescence from ZnO-Nanowire Array/p-GaN Light-Emitting Diodes. Adv. Mater.,22, 3298–3302.

[48] Yu Z., Zhang Q., Li L., Chen Q., Niu X., Liu J., Pei Q. (2011) Highly Flexible Silver Nanowire Electrodes for Shape-Memory Polymer Light-Emitting Diodes. Adv. Mater.,23, 664–668.

[49] Min W. K., Kim K. Y., Shin G., Jang S., Han M., Huh J., Kim T. G., Ha S. J. (2011) White-Light Emitting Diode Array of p^+-Si/Aligned n-SnO_2 Nanowires Heterojunctions. Adv. Funct. Mater.,21, 119–124.

[50] Tan Sek-S., Kee Yeh-Y., Wong Hin-Y., Tou Teck-Y.; (2013) Pulsed laser deposition of ITO nanorods in argon and OLED applications. Surface & Coatings Technology, 231, 98–101.

[51] Choi Kwang-H., Kim J., Noh Young-J., Na Seok-I., Kim Han-K. (2013) Ag nanowire-embedded ITO films as a near-infrared transparent and flexible anode for flexible organic solar cells. Solar Energy Materials & Solar Cells, 110, 147–153.

[52] Lee Ju-H., Shin Hyun-S., Noh Yong-J., NaSeok-I., Kim Han-K. (2013) Brush painting of transparent PEDOT/Ag nanowire/PEDOT multilayer electrodes for flexible organic solar cells. Solar Energy Materials & Solar Cells,114, 15–23.

[53] Qi L., Li C., Chen Y. (2012) Dye-sensitized solar cells based on nitrogen-doped TiO_2–B nanowire/TiO_2 nanoparticle composite photoelectrode. Chemical Physics Letters, 539–540, 128–132.

[54] Jung J., Myoung J., Lim S. (2012) Effects of ZnO nanowire synthesis parameters on the photovoltaic performance of dye-sensitized solar cells. Thin Solid Films, 520, 5779–5789.

[55] Yoon M. S., Lou J. S., Loser S., Smith J., Chen X. L., Facchetti A., Marks T. (2012) Fluorinated Copper Phthalocyanine Nanowires for Enhancing Interfacial Electron Transport in Organic Solar Cells. Nano Lett.,12, 6315−6321.

[56] Maeyoshi Y., Saeki A., Suwa S., Omichi M., Marui H., Asano A., Tsukuda S., Sugimoto M., Kishimura A., Kataoka K., Seki S. (2012) Fullerene nanowires as a versatile platform for organic electronics. Sci. Rep.,2, 600; DOI:10.1038/srep00600

[57] Chao Jiun-J., Shiu Shu-C., Lin Ching-F. (2012) GaAs nanowire/poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) hybrid solar cells with incorporating electron blocking poly(3-hexylthiophene) layer. Solar Energy Materials & Solar Cells, 105, 40–45.

[58] Jung Jin-Y., Um Han-D., Jee Sang-W., Park Kwang-T., Bang H. J., Lee Jung-H. (2013) Optimal design for antireflective Si nanowire solar cells. Solar Energy Materials & Solar Cells, 112, 84–90.

[59] Reinhard M., Eckstein R., Slobodskyy A., Lemmer U., Colsmann A. (2013)

Solution-processed polymer–silver nanowire top electrodes for inverted semi-transparent solar cells. Organic Electronics, 14, 273–277.

[60] Sachse C., Müller-M. L., Bormann L., Kim H. Y., Lehnert F., Philipp A., Beyer B., Leo K. (2013) Transparent, dip-coated silver nanowire electrodes for small molecule organic solar cells. Organic Electronics,14,143–148.

[61] Tian G., Pan K., Chen Y., Zhou J., Miao X., Zhou W., Wang R., Fu H. (2013) Vertically aligned anatase TiO_2 nanowire bundle arrays: Use as Pt support for counter electrodes in dye-sensitized solar cells. Journal of Power Sources, 238, 350–355.

[62] Zhang Y., Wu Z., Zheng J., Lin X., Zhan H., Li S., Kang J., Bleuse J., Mariette H. (2012) ZnO/ZnSe type II core–shell nanowire array solar cell. Solar Energy Materials & Solar Cells, 102, 15–18.

[63] Kim Dong-uk, Yoo B. (2011) A novel electropolymerization method for Ppy nanowire-based NH_3 gas sensor with low contact resistance. Sensors and Actuators B.,160, 1168–1173.

[64] Kim Byeong-G., Lim Dong-G., Park Jae-H., Choi Young-J., Park Jae-G. (2011) In-situ bridging of SnO_2 nanowires between the electrodes and their NO_2 gas sensing characteristics. Applied Surface Science, 257, 4715–4718.

[65] Li X., Chin E., Sun H., Kurup P., Gu Z. (2010) Fabrication and integration of metal oxide nanowire sensors using dielectrophoretic assembly and improved post-assembly processing. Sensors and Actuators B.,148, 404–412.

[66] Jung Sung-H., Choi Sun-W., Kim Sang S. (2012) Fabrication and properties of trench-structured networked SnO_2 nanowire gas sensors. Sensors and Actuators B., 171–172, 672– 678.

[67] Offermans P., Crego-Calama M., Brongersma S.H. (2012) Functionalized vertical InAs nanowire arrays for gas sensing. Sensors and Actuators B., 161, 1144–1149.

[68] Shaymurat T., Tang Q., Tong Y., Dong L., Liu Y., (2013) Gas Dielectric Transistor of CuPc Single Crystalline Nanowire for SO_2 Detection Down to Sub-ppm Levels at Room Temperature. Adv. Mater., 25, (16), 2269–2273.

[69] Steinhauer S., Bruneta E., Maier T., Mutinati G.C., Köck A., Freudenberg O., Gspan C., Grogger W., Neuhold A., Resel R. (2013) Gas sensing properties of novel CuO nanowire devices. Sensors and Actuators B., 187, 50–57.

[70] Hwang In-S., Kim Sun-J., Choi Joong-K., Jung Jong-J., Yoo D. J., Dong Ki-Y., Ju

Byeong-K., Lee Jong-H. (2012) Large-scale fabrication of highly sensitive SnO_2 nanowire network gas sensors by single step vapor phase growth, Sensors and Actuators B., 165, 97– 103.

[71] Kolmakov A., Klenov O. D., Lilach Y., Stemmer S., Moskovits M. (2005) Enhanced Gas Sensing by Individual SnO_2 Nanowires and Nanobelts Functionalized with Pd Catalyst Particles. Nano Lett., 5, (4), 667-673.

[72] Maki C. W., Mishra N. N., Cameron G. E., Filanoski B., Rastogi K. S., Maki K. G. (2008) Nanowire-transistor based ultra-sensitive DNA methylation detection. Biosensors and Bioelectronics, 23, 780–787.

[73] Hsiao Cheng-Y., Lin Chih-H., Hung Cheng-H., Su Chun-J., Lo Yen-R., Lee Cheng-C., Lin Horng-C., Ko Fu-H., Huang Tiao-Y., Yang Yuh-S. (2009) Novel poly-silicon nanowire field effect transistor for biosensing application. Biosensors and Bioelectronics, 24, 1223–1229.

[74] Skucha K., Fan Z., Jeon K., Javey A., Boser B. (2010) Palladium/silicon nanowire Schottky barrier-based hydrogen sensors. Sensors and Actuators B.,145, 232–238.

[75] Sulka D. G., Hnida K., Brzózka A. (2013) pH sensors based on polypyrrole nanowire arrays. Electrochimica Acta, 104, 536–541.

[76] Lupan O., Ursaki V.V., Chai G., Chow L., Emelchenko A. G., Tiginyanu M. I., Gruzintsev N. A., Redkin N. A. (2010) Selective hydrogen gas nanosensor using individual ZnO nanowire with fast response at room temperature. Sensors and Actuators B.,144, 56–66.

[77] Kurowska E., Brzózka A., Jarosz M., Sulka D. G., Jaskuła M. (2013) Silver nanowire array sensor for sensitive and rapid detection of H_2O_2. Electrochimica Acta, 104, 439–447.

[78] Hsueh Ting-J., Chen Yi-W., Chang Shoou-J., Wang Sea-F., Hsu Cheng-L., Lin Yan-R., Lin Tzer-S., Chen I-C. (2007) ZnO nanowire-based CO sensors prepared on patterned ZnO:Ga/SiO_2/Si templates. Sensors and Actuators B., 125, 498–503.

[79] Li J., Zhang Y., To S., You L., Sun Y. (2011) Effect of Nanowire Number, Diameter, and Doping Density on Nano-FET Biosensor Sensitivity. ACS Nano, 5, (8), 6661–6668.

[80] Heinzig A., Slesazeck S., Kreupl F., Mikolajick T., Weber M. W. (2012) Reconfigurable Silicon Nanowire Transistors. Nano Lett.,12, 119−124.

[81] Zheng G., Gao P. A. X., Lieber M. C. (2010) Frequency Domain Detection of Biomolecules Using Silicon Nanowire Biosensors. Nano Lett., 10, 3179–3183.

[82] Ghazali A.B. N., Ebert M., Ditshego M.J. N., R. de Planque R. M., Chong H.M.H. (2016) Top-down fabrication optimisation of ZnO nanowire-FET by sidewall smoothing. Microelectronic Engineering, 159,121–126.

[83] Wang X., Zhou J., Song J., Liu J., Xu N., Wang L. Z. (2006) Piezoelectric Field Effect Transistor and Nanoforce Sensor Based on a Single ZnO Nanowire. Nano Lett., 6,(12), 2768-2772.

[84] Sohn I. J., Choi S. S., Morris M. S., Bendall S. J., Coles J. H., Hong W.-K., Jo G., Lee T., Welland E. M. (2010) Novel Nonvolatile Memory with Multibit Storage Based on a ZnO Nanowire Transistor. Nano Lett., 10, 4316–4320.

[85] Pescaglini A., Martín A., Cammi D., Juska G., Ronning C., Pelucchi E., Iacopino D. (2014) Hot-Electron Injection in Au Nanorod−ZnO Nanowire Hybrid Device for Near-Infrared Photodetection. Nano Lett., 14, 6202−6209.

[86] Keem K., Jeong D-Y., Kim S. (2006) Fabrication and Device Characterization of Omega-Shaped-Gate ZnO Nanowire Field-Effect Transistors. Nano Lett., 6, (7),1454-1458.

[87] Trung D. D., Hoa D. N., Tong V. P., Duy V. N., Da T.D., Chung V. H., Nagao T., Hieu V. N. (2014) Effective decoration of Pd nanoparticles on the surface of SnO_2 nanowires for enhancement of CO gas-sensing performance. Journal of Hazardous Materials, 265, 124–132.

[88] Huh J., Na J., Ha S. J., Kim S., Kim T. G. (2011) Asymmetric Contacts on a Single SnO_2 Nanowire Device: An Investigation Using an Equivalent Circuit Model. ACS Appl. Mater. Interfaces, 3, 3097–3102.

[89] Shin G., Bae Y. M., Lee J. H., Hong K. S., Yoon H. C., Zi G., Rogers A. J., Ha S. J. (2011) SnO_2 Nanowire Logic Devices on Deformable Nonplanar Substrates. ACS Nano, 5, (12), 10009–10016.

[90] Kuang Q., Lao C., Wang L. Z., Xie Z., Zheng L. (2007) High-Sensitivity Humidity Sensor Based on a Single SnO_2 Nanowire. JACS, 129, 6070-6071.

[91] Xua P., Chenga Z., Pan Q., Xu J., Xiang Q., Yu W., Chu Y. (2008) High aspect ratio In_2O_3 nanowires: Synthesis, mechanism and NO_2 gas-sensing properties. Sensors and Actuators B, 130, 802–808.

[92] Singh N., Gupta K.R., Lee S. P. (2011) Gold-Nanoparticle-Functionalized In_2O_3 Nanowires as CO Gas Sensors with a Significant Enhancement in Response. ACS Appl. Mater. Interfaces, 3, 2246–2252.

[93] Ishikawa N. F., Chang H.-K., Curreli M., Liao H.-I., Olson A. C., Chen P.-C., Zhang R., Roberts W. R., Sun R., Cote J. R., Thompson E. M., Zhou C., (2009) Label-Free, Electrical Detection of the SARS Virus N-Protein with Nanowire Biosensors Utilizing Antibody Mimics as Capture Probes. ACS Nano, 3,(5),1219–1224.

[94] Duan T., Liao C., Chen T., Yu N., Liu Y., Yin H., Xiong Z.-J., Zhu M.-Q. (2015) Single crystalline nitrogen-doped InP nanowires for low-voltage field-effect transistors and photodetectors on rigid silicon and flexible mica substrates. Nano Energy, 15, 293–302.

[95] Wallentin J., Ek M., Wallenberg R. L., Samuelson L., Borgström T. M. (2012) Electron Trapping in InP Nanowire FETs with Stacking Faults. Nano Lett.,12, 151−155.

[96] Reese C., Bao Z., (2007) Organic single-crystal field-effect transistors. materialstoday,10, 20-27.

[97] Wen Y., Liu Y., Guo Y., Yu G., Hu W. (2011) Experimental Techniques for the Fabrication and Characterization of Organic Thin Films for Field-Effect Transistors. Chem. Rev.,111, 3358–3406.

[98] Oh Y. J., Park J.-T., Jang H.-J., Cho W.-J., Islam M. S. (2014) 3D-Transistor Array Based on Horizontally Suspended Silicon Nano-bridges Grown via a Bottom-Up Technique. Adv. Mater., 26, 1929–1934,

[99] Chaudhry A., Ramamurthi V., Fong E., Islam M. S. (2007) Ultra-Low Contact Resistance of Epitaxially Interfaced Bridged Silicon Nanowires. Nano Lett., 7, (6),1536-1541.

[100] Lee J. S., Islam M. S., Kim S. (2006) Direct Formation of Catalyst-Free ZnO Nanobridge Devices on an Etched Si Substrate Using a Thermal Evaporation Method. Nano Lett., 6, (7),1487-1490.

[101] Lee J. S., Islam M. S., Kim S. (2007) Photoresponses of ZnO nanobridge devices fabricated using a single-step thermal evaporation method. Sensors and Actuators B., 126, 73–77.

[102] Li H., Tee C-K. B., Cha J. J., Cui Y., Chung J. W., Lee S. Y., Bao Z. (2012) High-Mobility Field-Effect Transistors from Large-Area Solution Grown Aligned C_{60}

Single Crystals. J. Am. Chem.Soc.,134, 2760−2765.

[103] Wu K.-Y., Wu T.-Y., Chang S.-T., Hsu C.-S., Wang C.-L. (2015) A Facile PDMS-Assisted Crystallization for the Crystal Engineering of C_{60} Single-Crystal Organic Field-Effect Transistors. Adv. Mater., 27, 4371-4376.

[104] Hu J.-S., Ji H.-X., Cao A.-M., Huang Z.-X., Zhang Y., Wan L.-J., Xia A.-D., Yu D.-P., Meng X.-M., Lee S.-T. (2007) Facile solution synthesis of hexagonal Alq3 nanorods and their field emission properties. Chem. Commun., 29, 3083–3085.

[105] Lo S.-S., Hsu W.-H., Sie S.-H., Leu H.-J. (2012) A single Alq3 submicro-wire Schottky diode and its negative differential resistance. J. Mater. Chem., 22, 12618.

[106] Zhao Y. S., Di C., Yang W., Yu G., Liu Y., Yao J. (2006) Photoluminescence and Electroluminescence from Tris (8-hydroxyquinoline) aluminum Nanowires Prepared by Adsorbent-Assisted Physical Vapor Deposition. Adv. Funct. Mater., 16, 1985–1991.

[107] Wang B., Zhu L. F., Yang Y. H., Xu N. S., Yang G. W. (2008) Fabrication of a SnO2 Nanowire Gas Sensor and Sensor Performance for Hydrogen; Fabrication of a SnO_2 Nanowire Gas Sensor and Sensor Performance for Hydrogen. J. Phys. Chem. C,112, 6643-6647.

[108] Bai S., Wu W., Qin Y., Cui N., Bayerl D. J., Wang X. (2011) High-Performance Integrated ZnO Nanowire UV Sensors on Rigid and Flexible Substrates. Adv. Funct. Mater., 21(23), 1–6.

[109] You J., Jang K., Lee S., Bang D., Haam S., Choi Chang-H., Park J., Na S. (2015) Label-free detection of zinc oxide nanowire using a graphene wrapping method. Biosensors and Bioelectronics, 68, 481–486.

[110] Yuhas B. D., Yang P. (2009) Nanowire-Based All-Oxide Solar Cells. JACS,131, 3756–3761.

[111] Konenkamp R., Word R. C., Godinez M. (2005) Ultraviolet Electroluminescence from ZnO/Polymer Heterojunction Light-Emitting Diodes. Nano Lett., 5 (10), 2005–2008.

[112] Chang Pai-C., Fan Z., Chien Chung-J., Stichtenoth D., Ronning C., Lu J. G. (2006) High-performance ZnO nanowire field effect transistors. Applied Physics Letters, 89, 133113.

[113] Meduri P., Pendyala C., Kumar V., Sumanasekera G. U., Sunkara M. K. (2009) Hybrid Tin Oxide Nanowires as Stable and High Capacity Anodes for Li-Ion Batteries.

Nano Lett., 9, (2), 612-616.

[114] Park J., Lee S., Lee J., Yong K. (2013) A Light Incident Angle Switchable ZnO Nanorod Memristor: Reversible Switching Behavior Between Two Non-Volatile Memory Devices. Adv. Mater., *25*, 6423–6429.

[115] Ellmer K., Mientus R. (2008) Carrier transport in polycrystalline transparent conductive oxides: A comparative study of zinc oxide and indium oxide. Thin Solid Films, 516, 4620–4627.

[116] Minami T. (2000) New *n*-Type Transparent Conducting Oxides. MRS Bulletin, 25, 38-44.

[117] Lee J., Choi W., Kim C., Hong J., (2006) Electrical and optical properties of a n-type ZnO thin film deposited on a Si substrate by using a double RF Co-sputtering method. Journal of the Korean Physical Society, 49, 1126-1129.

[118] Nithya N., Radhakrishnan S. R., (2012) Effect of Thickness on the Properties ZnO Thin Films Advances in Applied Science Research, 3, 4041-4047.

[119] Lu J. G., Ye Z. Z., Zeng Y. J., Zhu L. P., Wang L., Yuan J., Zhao B. H. (2006) Structural, optical, and electrical properties of (Zn,Al)O films over a wide range of compositions. Journal of Applied Physics, 100, 073714.

[120] Smijs T.G., Pave S. (2011) Titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles in sunscreens: focus on their safety and effectiveness. Nanotechnology. Science and Applications, 4, 95–112.

[121] Sirelkhatim A., Mahmud S., Seeni A., Kaus H. M.N., Ann L. C., Bakhori K. M. S., Hasan H., Mohamad D., (2015) Review on Zinc Oxide Nanoparticles: Antibacterial Activity and Toxicity Mechanism. Nano-Micro Lett. 7(3), 219–242.

[122] Wang Z. Lin. (2004) Zinc oxide nanostructures: growth, properties and applications J. Phys.: Condens. Matter.,16, R829–R858.

[123] Ozgur U., Alivov Y.I., Liu C., Teke A., Reshchikov M., Dogan S., Avrutin V., Cho S.J., Morkoc H., (2005) A comprehensive review of ZnO materials and devices. J. Appl. Phys., 98(4), 041301.

[124] Janotti A., Van de Walle C. G. (2009) Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor. Rep. Prog. Phys., 72, 126501.

[125] Shen Y., Cao X., Zhang B., Wei D., Ma J., Liua W., Hana C., Shen Y. (2014) Synthesis of SnO_2 nanorods and application to H_2 sensor. Journal of Alloys and

Compounds. 593, 271–274.

[126] Jain G., Kumar R. (2004) Electrical and optical properties of tin oxide and antimony doped tin oxide films. Optical Materials, 26, 27–31.

[127] Batzill M., Diebold U. (2005) The surface and materials science of tin oxide. Progress in Surface Science, 79, 47–154.

[128] Sun Y., Zhao C., Shen M., Pan Z., Liu X. (2016) SnO_2 nanoparticles encapsulated by curved graphite layers as anode materials for Li-ion batteries with high performances. Journal of Alloys and Compounds,683, 191-197.

[129] Mohamed M.A. I., Dao Van-D., Yasin A. S., Choi Ho-S., Barakat A.M.N. (2016) Synthesis of novel SnO_2@TiO_2 nanofibers as an efficient photoanode of dye-sensitized solar cells. International journal of hydrogen energy. 41, 10578-10589.

[130] Binga Y., Zenga Y., Fenga S., Qiao L., Wanga Y., Zheng W. (2016) Multistep assembly of Au-loaded SnO_2 hollow multilayered nanosheets for high-performance CO detection. Sensors and Actuators B, 227, 362–372.

[131] Cheng Y., Yang R., Zheng Jian-P., Wang Z.L., Xiong P. (2012) Characterizing individual SnO_2 nanobelt field-effect transistors and their intrinsic responses to hydrogen and ambient gases. Materials Chemistry and Physics. 137, 372-380.

[132] Tsai Min-Y., Bierwagen O., Speck J. S. (2016) Epitaxial Sb-doped SnO_2 and Sn-doped In_2O_3 transparent conducting oxide contacts on GaN-based light emitting diodes. Thin Solid Films. 605, 186–192.

[133] Das S., Jayaraman V. (2014) SnO_2: A comprehensive review on structures and gas sensors. Progress in Materials Science. 66, 112–255.

[134] Nitta N., Wu F., Lee J. T., Yushin G. (2015) Li-ion battery materials: present and future. Materials Today, 18,(5), 252-264.

[135] Eric N. D., Qing W., Wei G.,Yanbin C., Xiaoqing P., Wei L. (2007) Fully Transparent Thin-Film Transistor Devices Based on SnO_2 Nanowires. Nano Lett.,7, (8), 2463-2469.

[136] A. Vilà, A. Gomez, L.Portilla, J.R.Morante, (2014) Influence of In and Ga additives onto SnO_2 inkjet-printed semiconductor. Thin Solid Films. 553, 118-122.

[137] Guoxiu W., Jinsoo P., David W., Min S. P., Jung-H. A. (2007) Synthesis, Characterization, and Optical Properties of In_2O_3 Semiconductor Nanowires. Inorganic Chemistry, 46, (12), 4778–4780.

[138] Lee C. H., Kim M., Kim T., Kim A., Paek J, Lee J. W., Choi S.-Y., Kim K., Park J.-B., Lee K. (2006) Ambient Pressure Syntheses of Size-Controlled Corundum-type In_2O_3 Nanocubes. J.A.C.S.,128, 9326-9327.

[139] Takada T., Suzuki K., Nakane M. (1993) Highly sensitive ozone sensor. Sens. Actuators B: Chem.,13, 404–407.

[140] Ivanovskaya M., Gurlo A., Bogdanov P. (2001) Mechanism of O_3 and NO_2 detection and selectivity of In_2O_3 sensors. Sens. Actuators B: Chem., 77, 264–267.

[141] Klaus D., Klawinski D., Amrehn S., Tiemann M., Wagner T. (2015) Light-activated resistive ozone sensing at room temperature utilizing nanoporous In_2O_3 particles: Influence of particle size. Sensors and Actuators B: Chem. 217, 181–185.

[142] https://en.wikipedia.org/wiki/Indium(III)_oxide

[143] Wagner, R. S., Ellis, W. C. (1964) Vapor-Liquid-Solid Mechanism of Single Crystal Growth. Appl. Phys. Lett. 4, (5), 89-90.

[144] Sun W. J., Liu H. (2011) Semiconducting Oxide Nanowires: Growth, Doping and Device applications. Nanowires - Implementations and Applications, Dr. Abbass Hashim (Ed.), ISBN: 978-953-307- 318-7, InTech.

[145] Wu Y., Yang P. (2001) Direct Observation of Vapor-Liquid-Solid Nanowire Growth. J. Am. Chem. Soc.,123, 3165-3166.

[146] Jia G. L., Paichun C., Zhiyong F. (2006) Quasi-one-dimensional metal oxide materials—Synthesis, properties and applications. Materials Science and Engineering R. 52, 49–91

[147] Keller F., Hunter M.S., Robinson D.L. (1953) Structural Features of Oxide Coatings on Aluminum. J.Electrochem.Soc., 100, 411-419.

[148] Booker C.J.L., Wood J.L., Walsh A. (1957) Electron micrographs from thick oxide layers on aluminium. Br.J. Appl. Phys., 8,347.

[149] Hoar T.P., Mott N.F. (1959) J.Phys. A mechanism for the formation of porous anodic oxide films on aluminium. Chem.Solid, 9,97-99.

[150] Yao Z., Wang C., Li Y., Kim Nam-Y. (2015) AAO-assisted synthesis of highly

ordered, large-scale TiO_2 nanowire arrays via sputtering and atomic layer deposition. Nanoscale Research Letters, 10, 166.

[151] http://nanodevice.yonsei.ac.kr/?mid=topic_nanopattern&ckattempt=1

[152] Öztürk S., Kılınç N., Taşaltın N., Öztürk Z.Z., (2012) Fabrication of ZnO nanowires and nanorods. Physica E, 44, 1062–1065.

[153] Yoshimi M., Hazama H., Takahashi M., Kambayashi S., Wada T., Kato K., Tango H., (1989) "Two-dimensional simulation and measurement of high-performance MOSFETs made on a very thin SOI film," IEEE Transactions on Electron Devices. 36, (493–503)

[154] Winnie Ni. Y. (2006) Stress Engineering for Polarization Control in Silicon-on-Insulator Waveguides and its Appications in Novel Passive Polarization Splitters/Filters, PhD Thesis. Carleton University, Ottawa, Canada. 5-6.

[155] Kanbur H. (2008) Yalıtkan Tabakalı Al/p-Si Schottky Diyotlarda Elektriksel Karakteristiklerin Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi. Doktora Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye,54-56.

[156] https://www.el-cat.com/silicon-properties.htm

[157] Chiang C. K., Fincher C. R., Park Y. W., Heeger A. J., Shirakawa H., Louis E. J., Gau S. C., MacDiarmid A. G. (1977) Electrical Conductivity in Doped Polyacetylene. Physical Review Letters., 39,1098.

[158] Jacob M. V. (2014) Organic Semiconductors: Past, Present and Future. Electronics, 3, 594-597.

[159] Tang Q., Jiang L., Tong Y., Li H., Liu Y., Wang Z., Hu W., Liu Y., Zhu D. (2008) Micrometer- and Nanometer-Sized Organic Single-Crystalline Transistors. Adv. Mater., 20, 2947–2951.

[160] Mayumi U., Kengo N., Junshi S., Yuri H., Kazumoto M., Takafumi U., Akiko N., Kazuo T., Jun T. (2011) High-Speed Flexible Organic Field-Effect Transistors with a 3D Structure. Adv. Mater., 23,3047–3051.

[161] Krishna P. D., Hyunsoo L., Jeongyong K. (2014) White light-emitting LED using electrospun Alq3/P3BT composite microfibers. Synthetic Metals, 190, 44–47.

[162] Salaha N., Sami S. H., Zishan H. K., Najlaa D. A. (2013) Synthesis and characterization of pure and Tb/Cu doped Alq_3 nanostructures. Journal of Luminescence, 143,640–644.

[163] Jung J. S., Lee J. W., Seo M. R., Lee H. S., Kim J., Lee S. W., Joo J., (2012) Luminescence variation of organic Alq3 nanoparticles on surface of Au nanoparticles and graphene. Synthetic Metals, 162,1852–1857.

[164] Malliaras G. G., Shen Y., Dunlap D. H., Murata H., Kafafi Z.H. (2001) Nondispersive electron transport in Alq3. Appl. Phys. Lett., 79(16), 2582-2584.

[165]http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/697737?lang=en&region=TR

[166] Capelli R., Toffanin S., Generali G., Usta H., Facchetti A., Muccini M. (2010) Organic light-emitting transistors with an efficiency that outperforms the equivalent light-emitting diodes. Nature Materials, 9, 496–503.

[167] Smalley R. E. (1997) Discovering the fullerenes. Reviews of Modern Physics. 69, (3), 723-730.

[168] Xiaoyu L., Xiaoman C., Boqun D., Xiao B., Jianfeng F. (2013) Enhanced performance of C_{60} N-type organic field-effect transistors using a pentacene passivation layer. J. Semicond., 34(8), 084002-1.

[169] Guo F., Xiao Z., Huang J. (2013) Fullerene Photodetectors with a Linear Dynamic Range of 90 dB Enabled by a Cross-Linkable Buffer Layer. Adv.Opt. Mat., 1(4), 289–294.

[170] Tian C-B., Deng L-L., Zhang Z-Q., Dai S-M., Gao C-L., Xie S-Y., Huang R-B., Zheng L-S. (2014) Bis-adducts of benzocyclopentane- and acenaphthene-C60 superior to mono-adducts as electron acceptors in polymer solar cells. Solar Energy Materials & Solar Cells. 125,198–205.

[171] Chan S-H., Lai C-S., Chen H-L., Ting C., Chen C-P. (2011) Highly Efficient P3HT: C60 Solar Cell Free of Annealing Process. Macromolecules, 44, 8886–8891.

[172] Zhang X.H., Domercq B., Kippelen B. (2007) High-performance and electrically stable C60 organic field-effect transistors. Appl. Phys. Lett. 91, 092114

[173] Zhu M., Liu S., Hu S., Yu J. (2016) Highly efficient tandem organic light-emitting diodes based on SubPc:C60 bulk heterojunction as charge generation layer. Journal of Luminescence. 169, 29–34.

[174]http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/379646?lang=en&region=TR

[175] Zhang X., Mizukami S., Kubota T., Ma Q., Oogane M., Naganuma H., Ando Y.,

Miyazaki T. (2012) Observation of a large spin-dependent transport length in organic spin valves at room temperature. Nature Communications. 4,1392.

[176] Contakes S.M., Beatty S. T., Dailey K. K., Rauchfuss T. B., Fenske D. (2000) π-Complexes of Phthalocyanines and Metallophthalocyanines. Organometallics, 19, 4767-4774.

[177] Sakamoto K., Ohno-O. E. (2009) Syntheses and Functional Properties of Phthalocyanines. Optical Materials, 2, 1127-1179.

[178] Sah C-T. (1988) Evolution of the MOS transistor-From Conception to VLSI. IEEE Proc.,76(10),1280-1326.

[179] Shockley W. (1952) A Unipolar Field Effect Transistor. Proc IRE. 40(11), 1365-1376.

[180] Horowitz G. (1998) Organic Field-Effect Transistors. Adv. Mater., 10(5), 365-377.

[181] http://my.ece.ucsb.edu/York/Bobsclass/2B/Extras/MOS%20Basics.pdf

[182] Braga D., Horowitz G. (2009) High-Performance Organic Field-Effect Transistors. Adv. Mater., 21, 1473–1486.

[183] Zaumseil J., Sirringhaus H. (2007) Electron and Ambipolar Transport in Organic Field-Effect Transistors. Chem. Rev., 107, 1296-1323.

[184] Pelatt B.D., Huang C.C., Conley Jr J.F. (2010) ZnO nanobridge devices fabricated using carbonized photoresist. Solid-State Electronics, 54,1143–1149.

[185] Kumar B., Kaushik B. K., Negi Y. S., Mittal P., Mandal A., (2011) Organic Thin Film Transistors Characteristics Parameters, Structures and their Applications. IEEE, 706 – 711. 10.1109/RAICS.2011.6069402

[186] Schwierz F. (2010) Graphene Transistors. nature nanotechnology, 5, 487-496.

[187] Strukov D. B., Borghetti J. L., Williams R. S. (2009) Coupled Ionic and Electronic Transport Model of Thin-Film Semiconductor Memristive Behavior. small, 5(9), 1058–1063.

[188] Chua L. 0. (1971) Memristor-The Missing Circuit Element. IEEE Transactions On Circuit Theory.18(5), 507-519.

[189] Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams R. S. (2008) The missing memristor found. Nature, 453, 80–83.

[190] Gale E. (2014) TiO_2-based memristors and ReRAM: materials, mechanisms and

models. Semicond. Sci. Technol., 29, 104004.

[191] Hayes B. (2011) The Memristor. American Scientist, 99, 106-110.

[192] Syu Y-E., Chang T-C., Lou J-H., Tsai T-M., Chang K-C., Tsai M-J., Wang Y-L., Liu M., Sze S.M. (2013) Atomic-level quantized reaction of HfO_x memristor. Applied Physics Letters, 102, 172903.

[193] Chen Y., Liu G., Wang C., Zhang W., Li R-W., Wang L. (2014) Polymer memristor for information storage and neuromorphic applications. Mater. Horiz., 1, 489–506.

[194] Kutlu F. (2014) Anodik Alüminyum Oksit (AAO) Nano Kalıpların Yapımı. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 23-29.

[195] M. Jothibas, C. Manoharan, S. Ramalingam, S. Dhanapandian, M. Bououdina, (2014) Spectroscopic analysis, structural, microstructural, optical and electrical properties of Zn-doped In_2O_3 thin films, Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. 122, 171–178.

[196] Wenfeng Z., Jiansheng J., Zhubing H., Silu T., Xia F., Yechun Z., Guodong Y., Linbao L., Wenjun Z., Chun-S. L., Shuit-T. L. (2008) Single zinc-doped indium oxide nanowire as driving transistor for organic light-emitting diode. Appl. Phys. Lett. 92, 153312.

[197] Jun N., He Y., Anchuang W., Yu Y., Charlotte L. S., Andrew W. M., Shu J., Lian W., Tobin J. M., John R. I., Carl R. K. (2005) MOCVD-Derived Highly Transparent, Conductive Zinc- andTin-Doped Indium Oxide Thin Films: Precursor Synthesis, Metastable Phase Film Growth and Characterization, and Application as Anodes in Polymer Light-Emitting Diodes, JACS, 127, 5613-5624.

[198] Vomiero A., Ferroni M., Comini E., Faglia G., Sberveglier G. (2007) Preparation of Radial and Longitudinal Nanosized Heterostructures of In_2O_3 and SnO_2. Nano Lett.,7,(12), 3553-3558.

[199] Liu Z., Liang B., Chen G., Yu G., Xie Z., Gao L., Chen D., Shen G. (2013) Contact printing of horizontally aligned Zn_2GeO_4 and $In_2Ge_2O_7$ nanowire arrays for multi-channel field-effect transistors and their photoresponse performances. J. Mater. Chem. C, 1, 131–137.

[200] Qurashi A., El-Maghraby E.M., Yamazaki T., Kikuta T. (2010) Catalyst

supported growth of In_2O_3 nanostructures and their hydrogen gas sensing properties. Sensors and Actuators B. 147, 48–54.

[201] Zhang W., Jie J., He Z., Tao S., Fan X., Zhou Y., Yuan G., Luo L., Zhang W., Lee Chun-S., Lee Shuit-T. (2008) Single zinc-doped indium oxide nanowire as driving transistor for organic light-emitting diode. APL., 92, 153312.

[202] Kim M.-Gil, Kim H. S., Ha Y.-G., He J., Kanatzidis M. G., Facchetti A., Marks T. J. (2010) High-Performance Solution-Processed Amorphous Zinc-Indium-Tin Oxide Thin-Film Transistors. J. A. C.S. 132 (30), 10352–10364.

[203] Jeong Du-W., Kim Ju-J. (2011) p-type Conduction in ZnO Nanowire Schottky Field-effect Transistors with Pt Metal Electrode. Journal of the Korean Physical Society, 59 (5), 3133-3137.

[204] Ng H.T., Han J., Yamada T., Nguyen P., Chen Y.P., Meyyappan M. (2004) Single Crystal Nanowire Vertical Surround-Gate Field-Effect Transistor. Nano Lett., 4 (7), 1247-1252.

[205] Akihito S. (2008) Resistive switching in transition metal oxides. Materials today,11(6), 28-36.

[206] Bersuker G., Gilmer D. C., Veksler D., Kirsch P., Vandelli L., Padovani A., Larcher L., McKenna K., Shluger A., Iglesias V., Porti M., Nafría M. (2011) Metal oxide resistive memory switching mechanism based on conductive filament properties. Journal of Applied Physics, 110 (12), 124518.

[207] Pan F., Chen C., Wang Z-S., Yang Y-C, Yang J., Zeng F. (2010) Nonvolatile resistive switching memories-characteristics, mechanisms and challenges. Progress in Natural Science: Materials International. 20, 1-15.

[208] Hasegawa T., Terabe K., Tsuruoka T., Aono M. (2012) Atomic Switch: Atom/Ion Movement Controlled Devices for Beyond Von-Neumann Computers. Adv. Mater., 24, 252–267.

[209] Chen W., Peng Q., Li Y. (2008) Alq3 Nanorods: Promising Building Blocks for Optical Devices. Adv. Mater., 20, 2747–2750.

[210] Lo S.S., Hsu W.H., Sie S.H., Leu H.J. (2012) A single Alq3 submicro-wire Schottky diode and its negative differential resistance. J. Mater. Chem., , 22, 12618–12621.

[211] Blochwitz J., Pfeiffer M., Fritz T., Leoa K. (1998) Low voltage organic light

emitting diodes featuring doped phthalocyanine as hole transport material. Appl. Phys. Lett.,73(6),729-731.

[212] Tapponnier A., Biaggio I., Günter P. (2005) Ultrapure C_{60} field-effect transistors and the effects of oxygen exposure. APL. 86, 112114.

[213] Chu C.W., Li S.H., Chen C.W., Shrotriya V., Yang Y. (2005) High-performance organic thin-film transistors with metal oxide/metal bilayer electrode. APL. 87, 193508.

[214] Hoel C. A., Mason T. O., Gaillard J. F., Poeppelmeier K. R. (2010) Transparent Conducting Oxides in the ZnO-In_2O_3-SnO_2 System. Chem. Mater., 22, 3569–3579 3569

[215] Ambrosini A., Malo S., Poeppelmeier K. R., Lane M. A., Kannewurf C. R., Mason T. O. (2002) Zinc Doping in Cosubstituted $In_{2-2x}Sn_xZn_xO_{3-\delta}$. Chem. Mater., 14, 58-63.

ÖZGEÇMİŞ

15.03.1985 tarihinde Elazığ'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Elazığ'da tamamladı. 2003 yılında Marmara Üniversitesi, Atatürk Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği Bölümünü kazandı. 2008 yılında lisans eğitimini tamamladıktan sonra yine aynı yıl Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümünde Yüksek Lisans'a kabul edildi. İlk yıl yabancı dil hazırlık olmak üzere 2011 yılında yüksek lisansını tamamladı. 2011 yılında Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümünde Doktora'ya kabul aldı. 2014 Ekim/2015 Ekim tarihleri arasında TÜBİTAK 2214-A bursu ile University of California, Davis, Elektrik&Bilgisayar Bölümünde doktora tez araştırmaları yapmak üzere ABD' de bulundu. 2012 Ocak tarihinden itibaren İstanbul Medeniyet Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.