



**T.C.  
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**Doktora Tezi**

**Ce KATKILI ZnO/Si HETEROEKLEMİNİN ÜRETİMİ ve ARA  
YÜZEYDE OLUŞAN KUSUR SEVİYELERİNİN İNCELENMESİ**

**Halim Onur ÖZTEL**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Katıhal Fiziği Programı**

**DANIŞMAN  
Doç. Dr. Namık AKÇAY**

**Aralık, 2024**

**İSTANBUL**

Bu çalışma, 25.12.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı, Katıhal Fiziği Programında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

### Tez Jürisi

Doç. Dr. Namık AKÇAY (Danışman)  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakültesi

Doç. Dr. Gökhan ALGÜN  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Serap GÜNEŞ  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Bayram DEMİR  
İstanbul Üniversitesi  
Fen Fakültesi

Prof. Dr. Barış KINACI  
Gazi Üniversitesi  
Uygulamalı Bilimler Fakültesi

### **İntihal Programı Beyanı**

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

### **Proje Destekleri**

Bu tez, İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin FDK-2021-38183 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

### **Tezden Üretilmiş Yayınların Künye Bilgileri**

Öztel, H.O., Akçay, N. and Algün, G., 2024, Deep-level transient spectroscopy analysis of interface defects in Ce:ZnO/p-Si heterostructures, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **35**, 1–16.  
doi: 10.1007/s10854-024-13020-6.

## ÖNSÖZ

Doktora öğrenimi sürecinde benden her türlü karşılıksız, maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme, anneme, babama ve kardeşime sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Öte yandan, bu süreçte bilimsel çalışmaları beraber yürüttüğümüz başta danışmanım Doç. Dr. Namık AKÇAY' a ve çalışma grubumuzdan değerli hocam Doç. Dr. Gökhan ALGÜN' e vermiş oldukları desteklerden dolayı teşekkür ederim. Tez izleme komitesindeki Prof. Dr. Serap GÜNEŞ hocama tez çalışmasına katmış olduğu değerli fikirlerinden dolayı ve tezin bilimsel sürecine göstermiş olduğu ilgiden dolayı teşekkür ederim.

Okulumuzun değerli öğretim görevlisi Prof. Dr. Bayram DEMİR' e tez çalışmama göstermiş olduğu ilgiden dolayı ve her zaman tezin gidişatı hakkındaki motive edici konuşmalarından dolayı ayrıca teşekkür ederim.

Gazi Üniversitesi fotonik bölümünde görevli olan Prof. Dr. Barış KINACI hocama tez çalışmasındaki XRD ölçümü için sağlamış olduğu imkanlardan dolayı teşekkür ederim.

Aralık 2024

Halim Onur ÖZTEL

# İÇİNDEKİLER

Sayfa No

|                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ÖNSÖZ .....                                                                                      | iv  |
| İÇİNDEKİLER.....                                                                                 | v   |
| ŞEKİL LİSTESİ .....                                                                              | vi  |
| TABLO LİSTESİ.....                                                                               | x   |
| SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ .....                                                                  | xi  |
| ÖZET .....                                                                                       | xiv |
| SUMMARY .....                                                                                    | xvi |
| 1. GİRİŞ.....                                                                                    | 1   |
| 2. GENEL KISIMLAR.....                                                                           | 4   |
| 2.1. HETEROEKLEM .....                                                                           | 4   |
| 2.2. DERİN SEVİYE GEÇİŞ SPEKTROSKOPİSİ (DLTS) .....                                              | 17  |
| 3. MALZEME VE YÖNTEM.....                                                                        | 26  |
| 3.1. ÇİNKO OKSİT VE SERYUM KATKILI ÇİNKO OKSİT NANOYAPILARIN<br>ÖZELLİKLERİ .....                | 26  |
| 3.2. SOL-JEL YÖNTEMİ İLE NANOYAPILARIN SENTEZLENMESİ .....                                       | 33  |
| 3.3. HETEROEKLEMLERİN HAZIRLANMASI .....                                                         | 39  |
| 3.4. AKIM-VOLTAJ, KAPASİTE-VOLTAJ VE DLTS ÖLÇÜM SİSTEMİ.....                                     | 41  |
| 3.5. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) VE ENERJİ DAĞILIMLI<br>X-IŞINI SPEKTROSKOPİSİ (EDS)..... | 44  |
| 3.6. X-IŞINI KIRINIMI (XRD) .....                                                                | 48  |
| 4. BULGULAR.....                                                                                 | 54  |
| 4.1. SENTEZLENEN NANOYAPILARIN XRD SONUÇLARI .....                                               | 54  |
| 4.2. NANOYAPILARIN SEM VE EDS SONUÇLARI.....                                                     | 55  |
| 4.3. AKIM-VOLTAJ VE KAPASİTE-VOLTAJ ÖLÇÜM SONUÇLARI .....                                        | 62  |
| 4.4. HETEROEKLEMLERİN DLTS ÖLÇÜM SONUÇLARI .....                                                 | 67  |
| 5. TARTIŞMA VE SONUÇ .....                                                                       | 75  |
| KAYNAKLAR.....                                                                                   | 83  |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                                   | 92  |

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1: a) Silisyum atomu ve b) silisyum kristal örgüsünün basit yapısı. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 5  |
| Şekil 2.2: a) Antimon atomunun basit yapısı ve b) antimon katkılı silisyum n-tipi yarıiletkenin basit kristal yapısı. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 6  |
| Şekil 2.3: a) Bor atomunun basit yapısı ve b) bor katkılı silisyum p-tipi yarıiletkenin basit kristal yapısı. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 7  |
| Şekil 2.4: a) Bir diyotun kontak konfigürasyonu ve b) devre sembolü. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 8  |
| Şekil 2.5: a) Her iki yarıiletken tipi (p ve n tipi) için enerji bant profili ve b) denge halinde p-n eklemının bant diyagramı. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 9  |
| Şekil 2.6: Uygulanan voltajın yönüne göre arınmış bölge genişliklerinin ve kontak potansiyellerinin değişiminin şematik gösterimi. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 12 |
| Şekil 2.7: Çeşitli metallerin iş fonksiyonları. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 15 |
| Şekil 2.8: Yarıiletkenin bulk özelliklerinin baskın olduğu, metal-yarıiletken kontağının termodinamik dengedeki şematik bant yapısı. a) Temas yok b) metal ve yarıiletken temas halinde. $W$ , arınma bölgesi genişliğini belirtir. Arınma bölgesinin dışında yarıiletken nötrdür. $F_{Bn}$ , Schottky bariyer yüksekliğini belirtir. $V_{bi}$ ise kontak potansiyelidir (burada $V_{bi}>0$ ) c) p-tipi yarıiletken için (burada $F_{Bp}>0$ ). .... | 16 |
| Şekil 2.9: Omik kontak oluşumu için şematik koşullar, a) düşük bariyer yüksekliği, b) birikim tabakasının oluştuğu durum ve c) yüksek katkılama ile oluşan durum (ince arınma bölgesi). ....                                                                                                                                                                                                                                                        | 17 |
| Şekil 2.10: a) Belirli bir tuzağı karakterize eden emisyon ve yakalama işlemlerinin şematik gösterimi ve b) bu yakalama işlemlerine karşılık gelen geçiş sinyallerinin grafikleri. ....                                                                                                                                                                                                                                                             | 19 |
| Şekil 2.11: Azınlık taşıyıcıların ileri besleme atım gerilimi ile arınmış bölgeye geçişinin şematik gösterimi ve buna karşılık gelen kapasite geçiş sinyalinin zamana bağlı grafiği. ....                                                                                                                                                                                                                                                           | 21 |
| Şekil 2.12: Çoğunluk taşıyıcıların ileri besleme atım gerilimi ile arınmış bölgeye geçişinin şematik gösterimi ve buna karşılık gelen kapasite geçiş sinyalinin zamana bağlı grafiği. ....                                                                                                                                                                                                                                                          | 21 |
| Şekil 2.13: a) Farklı sıcaklıklarda ölçülen kapasite geçiş sinyalinin zamana bağlı değişim grafiği ve b) bu geçiş sinyallerine karşılık gelen sıcaklığa bağlı DLTS sinyal grafiği. ....                                                                                                                                                                                                                                                             | 23 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.1:</b> a) +2 yük durumu, b) +1 yük durumu ve c) nötr yük durumlarındaki oksijen boşluğu etrafındaki yerel atomik gevşemelerin top ve çubuk modeli d) a ve c örgü parametreleri ile ZnO' nun wurtzite kristal yapısı. ....                                                                  | 28 |
| <b>Şekil 3.2:</b> a) -2 yük durumundaki Zn boşluğu ( $V_{Zn}^{2-}$ ) için yerel atomik geometrisi, b) +2 yük durumundaki Zn ara yer kusuru ( $Zn_i^{2+}$ ) ve c) +2 yük durumundaki Zn antisitinin yerel atomik geometrisi ( $ZnO^{2+}$ ). ....                                                       | 29 |
| <b>Şekil 3.3:</b> a) Ayrık-ara yer konfigürasyonu; $O_i^0$ (ayrık)' daki oksijen ara yer kusuru için yerel atomik geometrisi b) oktahedral konfigürasyon $O_i^{2-}$ (okt)' daki oksijen ara yer kusuru ve c) ikame bölgesinden büyük bir yer değiştirme gösteren oksijen antisiti $O_{Zn}^{2-}$ ..... | 30 |
| <b>Şekil 3.4:</b> a) ZnO wurtzite hücresi, Zn sarı, O gri, her iki atom tipi için de tetrahedral koordinasyon gösterilmektedir b) Optimize edilmiş Ce:ZnO kristal yapısı. Kırmızı, mavi ve sarı küreler sırasıyla O atomlarını, Zn atomlarını ve Ce atomlarını temsil eder. ....                      | 33 |
| <b>Şekil 3.5:</b> Sol-jel üretim sürecinin şematik gösterimi. ....                                                                                                                                                                                                                                    | 36 |
| <b>Şekil 3.6:</b> Sentezlenen katkısız ZnO ve Ce katkılı ZnO nanoyapılarının üretim şeması. ....                                                                                                                                                                                                      | 39 |
| <b>Şekil 3.7:</b> a) Heteroeklemlerin yapısının şematik gösterimi b) heteroeklemlerin yan kesit görüntüsünün şematik gösterimi ve c) üretilen heteroeklemin gerçek bir fotoğrafı. ....                                                                                                                | 41 |
| <b>Şekil 3.8:</b> a) ARS DE-202 model kapalı sistem soğutma (sıvı helyum çevrimi ile) b) Keithley 2400 c) Agilent 33250A d) Boonton 7200 LRC e) NI-USB-6251 çok fonksiyonlu I/O (girdi/çıkış) cihazı f) Lakeshore 331 g) bilgisayar h) PFEIFFER-HiPace 80.....                                        | 44 |
| <b>Şekil 3.9:</b> SEM cihazının bileşenlerinin şematik gösterimi. ....                                                                                                                                                                                                                                | 46 |
| <b>Şekil 3.10:</b> Bir kristal tarafından X-ışınlarının kırınımının şematik diyagramı, Bragg koşulu. ....                                                                                                                                                                                             | 50 |
| <b>Şekil 3.11:</b> X-ışını difraktometresinin (XRD) bazı temel parametreleri. ....                                                                                                                                                                                                                    | 52 |
| <b>Şekil 4.1:</b> Katkısız ZnO ve Ce:ZnO nanoyapılarının XRD spektrumları. ....                                                                                                                                                                                                                       | 54 |
| <b>Şekil 4.2:</b> ZnO nanoyapısının SEM görüntüsü. ....                                                                                                                                                                                                                                               | 56 |
| <b>Şekil 4.3:</b> 1% mol Ce katkılı ZnO nanoyapısının SEM görüntüsü. ....                                                                                                                                                                                                                             | 56 |
| <b>Şekil 4.4:</b> 2% mol Ce katkılı ZnO nanoyapısının SEM görüntüsü. ....                                                                                                                                                                                                                             | 57 |
| <b>Şekil 4.5:</b> 5% mol Ce katkılı ZnO nanoyapısının SEM görüntüsü. ....                                                                                                                                                                                                                             | 57 |
| <b>Şekil 4.6:</b> Üretilen heteroeklemin yan kesit SEM görüntüsü. ....                                                                                                                                                                                                                                | 58 |
| <b>Şekil 4.7:</b> Si üzerindeki nanoyapının kaplama kalınlığının yan kesit SEM görüntüsü. ....                                                                                                                                                                                                        | 58 |

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.8:</b> Üretilen heteroeklemin silisyum arka alüminyum kaplamasının yan kesit SEM görüntüsü. ....    | 59 |
| <b>Şekil 4.9:</b> ZnO nanoyapısının EDS analiz grafiği. ....                                                   | 60 |
| <b>Şekil 4.10:</b> 1% mol Ce katkılı ZnO nanoyapısının EDS analiz grafiği. ....                                | 60 |
| <b>Şekil 4.11:</b> 2% mol Ce katkılı ZnO nanoyapısının EDS analiz grafiği. ....                                | 61 |
| <b>Şekil 4.12:</b> 5% mol Ce katkılı ZnO nanoyapısının EDS analiz grafiği. ....                                | 61 |
| <b>Şekil 4.13:</b> uZnO heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki I-V grafiği. ....                               | 62 |
| <b>Şekil 4.14:</b> CeZ1 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki I-V grafiği. ....                               | 63 |
| <b>Şekil 4.15:</b> CeZ2 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki I-V grafiği. ....                               | 63 |
| <b>Şekil 4.16:</b> CeZ5 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki I-V grafiği. ....                               | 64 |
| <b>Şekil 4.17:</b> Üretilen heteroeklemlerin oda sıcaklığındaki (293 K) yarı logaritmik I-V grafiği. ....      | 64 |
| <b>Şekil 4.18:</b> Katkısız ZnO (uZnO) heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki C-V grafiği. ....                | 65 |
| <b>Şekil 4.19:</b> CeZ1 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki C-V grafiği. ....                               | 65 |
| <b>Şekil 4.20:</b> CeZ2 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki C-V grafiği. ....                               | 66 |
| <b>Şekil 4.21:</b> CeZ5 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki C-V grafiği. ....                               | 66 |
| <b>Şekil 4.22:</b> Üretilen heteroeklemlerin oda sıcaklığındaki (293 K) $1/C^2$ -V grafiği. ....               | 67 |
| <b>Şekil 4.23:</b> uZnO heteroekleminin DLTS ölçüm sonucu farklı hız pencerelerindeki DLTS sinyalleri. ....    | 68 |
| <b>Şekil 4.24:</b> uZnO heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki kapasite geçiş sinyallerinin bir kısmı. ....    | 69 |
| <b>Şekil 4.25:</b> CeZ1 heteroekleminin DLTS ölçüm sonucu ve farklı hız pencerelerindeki DLTS sinyalleri. .... | 69 |
| <b>Şekil 4.26:</b> CeZ1 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki kapasite geçiş sinyallerinin bir kısmı. ....    | 70 |
| <b>Şekil 4.27:</b> CeZ2 heteroekleminin DLTS ölçüm sonucu ve farklı hız pencerelerindeki DLTS sinyalleri. .... | 70 |
| <b>Şekil 4.28:</b> CeZ2 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki kapasite geçiş sinyallerinin bir kısmı. ....    | 71 |
| <b>Şekil 4.29:</b> CeZ5 heteroekleminin DLTS ölçüm sonucu ve farklı hız pencerelerindeki DLTS sinyalleri. .... | 72 |

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.30:</b> CeZ5 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki kapasite geçiş sinyallerinin bir kısmı. .... | 72 |
| <b>Şekil 4.31:</b> Üretilen tüm heteroeklemlerin Arrhenius grafiği. ....                                    | 73 |
| <b>Şekil 4.32:</b> DLTS sinyalleri kullanarak elde edilen sıcaklığa bağlı tuzak konsantrasyon grafiği. .... | 74 |



## TABLO LİSTESİ

### Sayfa No

|                                                                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablo 4.1:</b> XRD analizi ile belirlenen katkısız ZnO ve Ce:ZnO nanoyapılarının yapısal parametreleri..... | 55 |
| <b>Tablo 4.2:</b> EDS sonuçlarından elde edilen elementlerin yapı içerisindeki kütlece atom yüzdeleri. ....    | 61 |
| <b>Tablo 4.3:</b> Üretilen heteroeklemlerin hesaplanan elektriksel özellikleri. ....                           | 74 |



## SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

| Simgeler                  | Açıklama                                               |
|---------------------------|--------------------------------------------------------|
| $\text{\AA}$              | : Angstorm.                                            |
| $\beta$                   | : Kırınım Tepe Noktasının Yarı Maksimum Tam Genişliği. |
| $\Delta C$                | : Kapasite Farkı.                                      |
| $\delta$                  | : Dislokasyon Yoğunluğu.                               |
| $\varepsilon$             | : Dielektrik Sabiti.                                   |
| $\chi$                    | : Yarıiletkenin Afinitesi.                             |
| $\lambda$                 | : Dalga Boyu.                                          |
| $\Phi_{sn}$               | : N-Tipi Yarıiletkenin İş Fonksiyonu.                  |
| $\Phi_{sp}$               | : P-Tipi Yarıiletkenin İş Fonksiyonu.                  |
| $\sigma_n$                | : Tuzağın Yakalama Tesir Kesit Alanı.                  |
| $\tau$                    | : Sıcaklığa Bağlı Zaman Sabiti.                        |
| $\theta$                  | : Bragg Kırınım Açısı.                                 |
| $\langle gn \rangle_{th}$ | : Elektronun Malzeme İçerisindeki Termal Hızı.         |
| $A$                       | : Diyot alanı.                                         |
| $C$                       | : Kapasite.                                            |
| $^{\circ}C$               | : Santigrat Derece.                                    |
| $c_1$                     | : Azınlık Taşıyıcıları İçin Yakalama Oranı.            |
| $c_2$                     | : Çoğunluk Taşıyıcıları İçin Yakalama Oranı.           |
| $D$                       | : Kristal Boyutu.                                      |
| $e$                       | : Elektron Yüğü ( $-1.602 \times 10^{-19}$ C).         |
| $e_1$                     | : Azınlık Taşıyıcıları İçin Termal Emisyon Oranı.      |
| $e_2$                     | : Çoğunluk Taşıyıcıları İçin Termal Emisyon Oranı.     |
| $E_a$                     | : Tuzağın Aktivasyon Enerjisi.                         |
| $E_C$                     | : İletkenlik Bandının Enerji Seviyesi.                 |
| $E_T$                     | : Bant Aralığı İçerisindeki Tuzağın Enerji Seviyesi.   |
| $e_n$                     | : Tuzağın Emisyon Hızı.                                |
| $h$                       | : Planck Sabiti ( $6.62607015 \times 10^{-34}$ J.s).   |
| $I$                       | : Akım.                                                |
| $I_0$                     | : Satürasyon Akımı.                                    |
| $K$                       | : Kelvin.                                              |

|                            |                                                             |
|----------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <b><math>K</math></b>      | : Scherrer Sabiti.                                          |
| <b><math>k_B</math></b>    | : Boltzmann Sabiti ( $1.380649 \times 10^{-23}$ J/K).       |
| <b><math>M</math></b>      | : Molarite.                                                 |
| <b><math>m^*</math></b>    | : Etkin Kütle.                                              |
| <b><math>N</math></b>      | : Tuzak Konsantrasyonu.                                     |
| <b><math>N_A</math></b>    | : Akseptör Atom Konsantrasyonu.                             |
| <b><math>N_C</math></b>    | : Elektronların İletkenlik Bandındaki Etkin Konsantrasyonu. |
| <b><math>N_D</math></b>    | : Donör Atom Konsantrasyonu.                                |
| <b><math>n_i</math></b>    | : Asal Yük Taşıyıcıları.                                    |
| <b><math>n_n</math></b>    | : N-Tipi Yarıiletkendeki Elektron Yoğunluğu.                |
| <b><math>n_p</math></b>    | : P-Tipi Yarıiletkendeki Elektron Yoğunluğu.                |
| <b><math>N_t</math></b>    | : Maksimum Tuzak Konsantrasyonu.                            |
| <b><math>O_i</math></b>    | : Oksijen Ara Yer Kusuru.                                   |
| <b><math>O_{Zn}</math></b> | : Oksijen Antisiti.                                         |
| <b><math>Pa</math></b>     | : Pascal.                                                   |
| <b><math>p_n</math></b>    | : N-Tipi Yarıiletkende Boşlukların Yoğunluğu.               |
| <b><math>p_p</math></b>    | : P-Tipi Yarıiletkende Boşlukların Yoğunluğu.               |
| <b><math>R_s</math></b>    | : Seri Direnç.                                              |
| <b><math>t_p</math></b>    | : Voltaj Atım Süresi.                                       |
| <b><math>V_{bi}</math></b> | : Kontak Potansiyeli.                                       |
| <b><math>V_o</math></b>    | : Oksijen Boşluğu.                                          |
| <b><math>V_p</math></b>    | : Atım Voltajı.                                             |
| <b><math>V_R</math></b>    | : Doldurma Atım Voltajı.                                    |
| <b><math>V_{Zn}</math></b> | : Çinko Boşluğu.                                            |
| <b><math>W</math></b>      | : Toplam Arınmış Bölge Genişliği.                           |
| <b><math>W_n</math></b>    | : Arınmış Bölgenin N-Tipi Tarafının Genişliği.              |
| <b><math>W_p</math></b>    | : Arınmış Bölgenin P-Tipi Tarafının Genişliği.              |
| <b><math>Zn_i</math></b>   | : Çinko Ara Yer Kusuru.                                     |
| <b><math>Zn_o</math></b>   | : Çinko Antisiti.                                           |

| <b>Kısaltmalar</b> | <b>Açıklama</b>                                                                        |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>BSE</b>         | : Geri Saçılan Elektronlar (Back Scattered Electrons, BSE).                            |
| <b>CBD</b>         | : Kimyasal Banyo Biriktirme (Chemical Bath Deposition, CBD).                           |
| <b>CBM</b>         | : İletkenlik Bandı Minimumu (Conduction Band Minimum, CBM).                            |
| <b>CVD</b>         | : Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapor Deposition, CVD).                          |
| <b>DC</b>          | : Doğru Akım (Direct Current, DC).                                                     |
| <b>DFT</b>         | : Yoğunluk Fonksiyonel Teori (Density Functional Theory, DFT).                         |
| <b>DLTS</b>        | : Derin Seviye Geçiş Spektroskopisi (Deep Level Transient Spectroscopy, DLTS).         |
| <b>EDS</b>         | : Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS). |
| <b>FWHM</b>        | : Yarı Maksimum Tam Genişliği (Full Width At Half Maximum, FWHM).                      |
| <b>HJ</b>          | : Heteroeklem (Heterojunction, HJ).                                                    |
| <b>k.b.</b>        | : Keyfi Birim.                                                                         |
| <b>LED</b>         | : Işın Yayan Diyot (Light-Emitting Diode, LED).                                        |
| <b>MBE</b>         | : Moleküler Işın Epitaksisi (Molecular-Beam Epitaxy, MBE).                             |
| <b>PLD</b>         | : Darbeli Lazer Biriktirme (Pulsed Laser Deposition, PLD).                             |
| <b>QD</b>          | : Kuantum Noktası (Quantum Dot, QD).                                                   |
| <b>rpm</b>         | : Dakikadaki Devir Sayısı (Revolutions Per Minute, rpm).                               |
| <b>SE</b>          | : İkincil Elektronlar (Secondary Electrons, SE).                                       |
| <b>SEM</b>         | : Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM).                    |
| <b>UV</b>          | : Morötesi (Ultraviole, UV).                                                           |
| <b>VBM</b>         | : Valans Bandı Maksimumu (Valans Band Maximum, VBM).                                   |
| <b>XRD</b>         | : X-Işını Kırınımı (X-ray Diffraction, XRD).                                           |

## ÖZET

### Ce KATKILI ZnO/Si HETEROEKLİMİNİN ÜRETİMİ ve ARA YÜZEYDE OLUŞAN KUSUR SEVİYELERİNİN İNCELENMESİ

#### DOKTORA TEZİ

Halim Onur ÖZTEL

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Namık AKÇAY

Bu doktora tez çalışmasında, Ce katkılı ZnO/p-Si heteroeckleminin arayüzeydeki kusur seviyeleri ve bu kusur seviyelerine Ce katkı konsantrasyonunun etkisi DLTS yöntemi ile incelenmiştir. Katkısız ZnO ve farklı mol oranlarında Ce katkılı ZnO nanoyapılarını sol-jel yöntemi ile sentezlenmiştir. Üretilen n-Ce:ZnO/p-Si heteroecklemleri, p-Si üzerinde döndürme kaplama yoluyla üretilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerinden, yüzeyin düzgün küresel taneler içerdiği gözlemlenmiştir. Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) verilerine göre, sentezlenen nanoparçacıklarda Ce, O ve Zn atomları dışında yabancı atom bulunmamaktadır. EDS verilerine göre, yapıdaki oksijen içeriği Ce katkılanması ile artmıştır. X-ışını kırınımı (XRD) analizi ile tüm nanoyapıların hekzagonal wurtzite yapıya sahip olduğu ve Ce katkısının yapıdaki stresi azalttığı belirlenmiştir. I-V ölçümleri, yapıların iyi bir diyot yapısına sahip olduğunu ve en iyi diyot karakterini gösteren yapının 3,36' lık idealite faktörü ile %2 mol Ce katkısı içeren Ce:ZnO/p-Si hetero yapısı olduğunu belirlenmiştir. Derin seviye geçiş spektroskopisi (DLTS) sonuçları, arayüzde oluşan tuzakların çoğunluk taşıyıcılarından kaynaklı elektron tuzakları olduğunu göstermiştir. Tuzakların aktivasyon enerjileri %0, %1, %2 ve %5 mol Ce için sırasıyla,  $E_0(0.079)$ ,  $E_1(0.311)$ ,  $E_2(0.290)$  ve  $E_5(0.386)$  eV' dir. Bu

tuzakların iletkenlik bandı kenarına yakın ve altında yer aldığı bulunmuştur. Tuzak konsantrasyonu, ZnO kristal örgüsüne Ce eklenmesiyle azaldığı hesaplanmıştır.

Bu doktora tez çalışması, Ce katkılması yoluyla ZnO/p-Si heteroeklemlerin elektriksel özelliklerinin ayarlanabilirliğini ve verimliliklerinin optimize edilebilirliğini ortaya koyması açısından önemlidir. Ayrıca, veriler n-Ce:ZnO/p-Si heteroeklemlerin optik veya elektriksel cihazlarda var olabilecek potansiyel uygulamaları için iyi bir aday olabileceğine ışık tutmaktadır.

Aralık 2024, 109 sayfa.

**Anahtar kelimeler:** Nadir toprak elementi, sol-jel yöntemi, heteroeklem, arayüz kusurları, DLTS.



## **SUMMARY**

### **FABRICATION of Ce DOPED ZnO/Si HETEROJUNCTION and INVESTIGATION of THE DEFECTS at THE INTERFACE**

#### **Ph.D. THESIS**

**Halim Onur ÖZTEL**

**İstanbul University**

**Institute of Graduate Studies in Sciences**

**Department of Physics**

**Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Namık AKÇAY**

In this doctoral dissertation, the defect levels at the interface of Ce-doped ZnO/p-Si heterojunctions and the effect of Ce doping concentration on these defect levels were investigated using the DLTS method. Undoped ZnO and Ce-doped ZnO nanostructures with different molar ratios were synthesized via the sol-gel method. The produced n-Ce:ZnO/p-Si heterojunctions were fabricated on p-Si substrates through spin coating. Scanning electron microscope (SEM) images revealed that the surface contained uniform spherical grains. According to energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) data, any foreign atoms out of Ce, Zn and O were found in the synthesized nanoparticles. A notable observation from the EDS data is that the oxygen content increased with Ce doping. X-ray diffraction (XRD) analysis confirmed that all nanostructures exhibited a hexagonal wurtzite structure, and Ce doping reduced the stress in the structure. I-V measurements demonstrated that the structures possessed good diode characteristics, with the best diode performance observed in the structure containing 2% mol Ce, which had an ideality factor of 3.36. Deep level transient spectroscopy (DLTS) results showed that the traps at the interface were electron traps

originating from the majority carriers. The activation energies of the traps were determined as  $E_0(0.079)$ ,  $E_1(0.311)$ ,  $E_2(0.290)$ , and  $E_5(0.386)$  eV for 0%, 1%, 2%, and 5% mol Ce, respectively, and these traps were found to be located near and below the conduction band edge. The trap concentration was calculated to decrease with the addition of Ce to the ZnO crystal lattice.

This doctoral dissertation is significant as it demonstrates the tunability of the electrical properties and the optimization of the efficiency of ZnO/p-Si heterojunctions through Ce doping. Furthermore, the data shed light on the potential applications of n-Ce:ZnO/p-Si heterojunctions in optical or electronic devices.

December 2024, 109 pages.

**Keywords:** Rare earth element, sol-gel method, heterojunction, interface defects, DLTS.

## 1. GİRİŞ

Geçtiğimiz yüzyıla baktığımızda transistörün keşfi (1947) ve bununla paralel yarıiletkenler fiziğinin hızla ilerlemesiyle, teknoloji çok hızlı bir gelişme kaydetti. İlk transistörlerin yaklaşık 15 cm civarlarında lamba şeklinde olduklarını ve günümüzde bu boyutların 5 nm mertebesinde olduğunu düşündüğümüzde, teknolojideki hızlı gelişmeyi anlamak mümkün [1,2]. Günümüzde 1 cm<sup>2</sup> alana milyarlarca transistör sığdırılabilmekte.

Yarıiletken malzemelerin nano boyutlarda üretilmesi ilk başlarda kimyasal üretim teknikleri ile yapılmaktaydı. Sonraları fizik mühendisliğinin de ilerlemesi ile, üretilen yarıiletken malzemelerin özelliklerini daha hassas bir şekilde kontrol etmek için moleküler ışın epitaksi (Molecular-Beam Epitaxy, MBE), kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapor Deposition, CVD), sıçratma yöntemleri ve litografi teknikleri geliştirildi. Böylece günümüzde kullandığımız bilgisayar işlemcileri, optik haberleşmede kullanılan fiber teknolojisi ve burada kullanılan dedektörler, amplifikatörler vb. cihazlar, dokunmatik ekranlar, ışın yayan diyot (Light Emitting Diode, LED) gibi yarıiletken teknolojisine dayalı aygıtlar üretildi [2,3].

Farklı tip elektriksel iletkenliğe (p-tipi ve n-tipi) sahip iki yarıiletkenden oluşan, p-n heteroeklemine (Heterojunction, HJ) dayalı yarıiletken teknolojisi günümüzde güneş pilleri, optik haberleşme, fotokatalitik teknoloji ve çevre bilimi gibi alanlarda oldukça popülerdir [4–7]. Yarıiletken malzemelerin yapısal, fiziksel ve kimyasal özellikleri, onların elektriksel ve optik özelliklerini belirler. Kimyasal bileşimin saf ve mükemmel kristal halinden, o malzemenin bant aralığı ve taşıyıcıların etkin kütleleri gibi içsel özellikleri belirlenir. Yine yapısal özelliklerden, örgü kusurları, kristalin büyüme şeklinin, termal geçmişi bir sonucu olarak ve katkılamamanın bir sonucu olarak ortaya çıkar. Öte yandan, iki farklı kristal yapısına sahip yarıiletken malzeme bir araya geldiğinde örgü uyumsuzluğu oluşur. Örgü uyumsuzluğu, heteroeklemin yapısını oluşturan malzemeler arasındaki ilişkide kritik bir parametre olarak ön plana çıkar. Uyumsuzluk, arınmış bölge etrafında strese neden olur, arayüzde kusurların oluşmasına, taşıyıcı hareketliliği ve drenaj akımı gibi parametrelerin değişmesine yol açar [8]. Bu kusurlar istenilen özelliğe göre kasıtlı olarak da oluşturulabilir. Ayrıca katkılama ile kimyasal kirlilik atomları, bant aralığı içerisinde yeni elektron seviyeleri oluşturur. Bu seviyeler bant kenarlarının birine yakın olabilir ve kristali katkılama etkisine sahip olabilir, ya

da bant aralığının derinliklerinde oluşabilir. Kirlilik atomları ya da bir diğer adıyla safsızlık atomları genellikle yapıların oluşumu sırasında veya sonrasında kasıtlı olarak eklenir. Ancak bazen istenmeyen planlanmamış kirlilik atomları da yapıya girmiş olabilir ve bu durum istenmeyen bir durumdur [1]. Bu istenmeyen kirlilik atomları başta enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS) olmak üzere, çeşitli analiz yöntemleri ile tespit edilebilir. Heteroeklemin arınmış bölgesinde veya yakınında oluşacak bu sığ veya derin tuzak seviyeleri, cihazın elektriksel veya optik verimliliğini, performansını önemli ölçüde etkiler. Örneğin bu tuzak seviyeleri, serbest yükler için rekombinasyon, yani yeniden birleşim merkezi olarak davranıp ışığın verimliliğini azaltırken, bazıları ise ışık için yararlı olabilecek radyasyon merkezleri olabilir [9]. Ayrıca LED' lerin aktif bölgesindeki kusurlar ışımsız rekombinasyon olasılığının artmasına neden olur ve bu durum cihazın verimliliğinin düşmesine, cihazın direncinin artarak ısınmasına sebep olur [10]. Bu istenmeyen durumlar yarıiletken aygıtlarda verimliliği ve uzun ömürlülüğü azaltacağı için, yarıiletken malzemenin veya aygıtların tuzak seviyelerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Bir diyot, p ve n tipi iki yarıiletken malzemeden oluşmaktadır. Bu iki malzemenin birleşme bölgesinde elektron alışverişi ile serbest yüklerden arınmış bir bölge oluşur. Yük taşıyıcılarının alışverişi sonucunda iyonize katkı atomlarının oluşturduğu elektrik alan, serbest yüklerin bir bölgeden diğerine geçişine izin vermez. Dolayısıyla oluşan heteroekleminde p ve n yapıları, uygulanan potansiyel farka bağlı olarak büyüklüğü değişen paralel plakalı kapasitör gibi davranacaktır. Oluşan heteroeklemin sığası, başta malzemenin dielektrik sabiti olmak üzere, kontak noktasının temas alanı, yani diyot alanı, arınmış bölgenin genişliği ve arınmış bölgedeki yüklerin yoğunluğu ile orantılıdır. Dolayısıyla heteroeklemin, kapasite-voltaj (C-V) ölçümü ile malzemenin donör ve akseptör yoğunluğu belirlenebilir. Bu metot, kapasite-voltaj karakterizasyon metodu olarak isimlendirilir. Uygulanan voltaj değerine bağlı olarak arınmış bölgenin genişliği değişir ve arınmış bölge içerisinde kalan serbest yükler, arınmış bölgeyi hızla terk edeceklerdir. Ancak yarıiletkenin yasak enerji bandının içerisinde tuzak seviyeleri mevcut ise bu serbest yükler önce bu tuzak seviyelerinden, tuzak seviyelerinin konumuna göre iletkenlik veya valans bandına geçerler ve sonrasında arınmış bölgeyi terk ederler. Bu esnada alınan kapasite ölçümü sırasında yüklerin tuzak seviyelerinden iletkenlik veya valans bandına geçişleri zamana bağlı olarak gözlemlenebilir. Bu işlem farklı sıcaklıklarda tekrarlandığında, belirli bir sürede kapasite değişiminin sıcaklığa bağlı grafiği elde edilir. Bu grafik yardımı ile tuzak seviyelerinin konsantrasyonu, enerji seviyesi ve

yakalama tesir kesit alanı bulunabilir. Bu yöntem derin seviye geçiş spektroskopisi (Deep Level Transient Spectroscopy, DLTS) olarak isimlendirilir ve 1974 yılında D. V. Lang tarafından önerilmiştir [11].

Bu tez çalışmasında, akademik çalışmalarda bilim insanları tarafından incelenmesi ve endüstride kullanılması oldukça popüler olan çinko oksit (ZnO) ve seryum (Ce) katkılayarak elde edilen seryum katkılı çinko oksit (Ce:ZnO), üretim maliyeti açısından ucuz ve kolaylığı açısından tercih edilen olan sol-jel metodu ile üretilmiştir. Daha sonra üretilen nanoyapılar, silisyum (Si) üzerine döndürme kaplama metodu ile kaplanarak heteroeklemler oluşturulmuştur. Silisyum, doğada bol miktarda bulunduğundan dolayı oldukça ucuz bir elementtir ve dolayısıyla heteroeklemler başta olmak üzere bütünleşmiş devre teknolojisinde ticari olarak en yaygın kullanılan malzemedir. Kristal yapının iyileştirilmesi ve üretim aşamasındaki istenmeyen fazlalık bileşiklerden kurtulmak için üretilen heteroeklemlere fırınlama işlemi yapılmıştır. Daha sonra heteroeklemler üzerinden uygun kontaklar alınarak, heteroeklemlerin elektriksel ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Tezin amacı, Ce katkı miktarı değiştirilerek elde edilecek heteroeklemlerin elektriksel özelliklerindeki farklılıkları belirlemek, Ce katkısından dolayı arınmış bölgede (ya da ara yüzeyde) oluşması muhtemel tuzak seviyelerinin tespit etmek, bu tuzakların enerji seviyelerini belirlemek ve yakalama tesir kesit alanlarını hesaplamaktır. Ayrıca bu çalışmada üretilen nanoyapıların morfolojik özellikleri taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope, SEM) ile belirlenmiştir. Kristal yapıları ise X-Işını kırınımı (X-ray Diffraction, XRD) ile belirlenmiştir. EDS analizi ile yapıların içerisinde istenmeyen kirlilik atomlarının olmadığı belirlenmiştir. alışmalar İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Nanoteknoloji Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır.

## 2. GENEL KISIMLAR

### 2.1. HETEROEKLEM

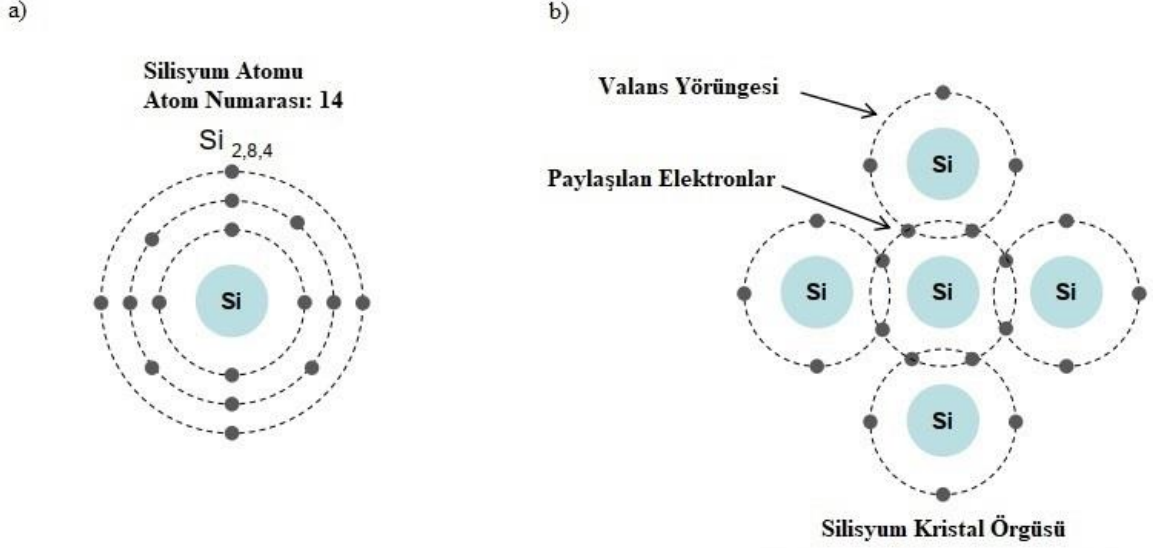
Yarıiletken aygıtların çoğu, p-tipi ve n-tipi yarıiletken bölgelerinin bir araya gelmesiyle oluşan eklemden oluşmaktadır. Yarıiletken aygıtın özellikleri ve çalışması yarıiletken aygıtı oluşturan p-n eklemının özellikleriyle sıkı sıkıya bağlıdır. Bu nedenle, p-n eklemının yapısı, aygıtın çalışma özellikleri açısından çok önemlidir ve incelenmelidir [12].

Metallerde çok sayıda serbest elektron bulunmaktadır. Metal üzerine bir elektrik alan uygulandığında bu serbest elektronlar kolaylıkla hareket ederek elektriksel iletkenliği gerçekleştirirler. Ancak yarıiletken malzemelerde iletkenlik, kristali oluşturan düzgün diziliimli atomların elektronlarının, atomlara nasıl bağlı olduğu ile belirlenir. Yani atomların bu düzgün dizilimi sebebiyle yüklerin alabileceği belirli enerji düzeyleri ve onlara karşılık gelen belirli enerji seviyeleri vardır. Bu enerji seviyeleri yarıiletkenlerde bant yapısını oluşturur. Bant yapıları kendi içlerinde birbirine yakın enerji seviyelerinden oluşur. Ancak bantlar arasında enerji seviyelerinin bulunmadığı yasak bant aralığı mevcuttur. İletkenliğin gerçekleştiği banda iletkenlik bandı, iletkenlik bandından daha düşük seviyede ve iletkenliğin gözlemlenmediği bant ise valans bandı olarak isimlendirilir [3].

Eğer yarıiletken malzeme içerisindeki elektron konsantrasyonunu arttıracak atomlar ile katkılanırsa Fermi seviyesi iletkenlik bandına yaklaşır ve katkılanan atomlar da donör atomları olarak adlandırılır. Bu tip yarıiletken n-tipi olarak isimlendirilir. Öte yandan yarıiletken kristal boşlukların sayısını arttıracak atomlar ile katkılanırsa bu sefer Fermi seviyesi valans bandına yaklaşır ve bu katkı atomları da akseptör atomları olarak isimlendirilir. Bu tip yarıiletken malzeme de p-tipi olarak isimlendirilir [3].

Genel diyot yapısı p-n eklemine dayanmaktadır. Eğer bir diyot, n-tipi katkılı bir yarıiletken ile aynı yarıiletkenin p-tipi katkılı bir örneğinin bir araya gelmesiyle oluşuyorsa bu diyot yapısına homoeklem denir ve bu homoeklem ile yapılmış cihaz bipolar olarak isimlendirilir. Eğer n-tipi ve p-tipi farklı yarıiletken malzemelerden bir diyot oluşturulmuş ise bu diyot yapısına da heteroeklem denir [2].

Periyodik tabloda grup IV elementi olan silisyumun, 14 elektrona sahiptir ve dış kabuğunda 4 değerlik elektronu vardır. Her atomun 4 değerlik elektronu komşu atomlarla kovalent bağ kurarlar. Bu yapı şekil 2.1' de gösterilmiştir.

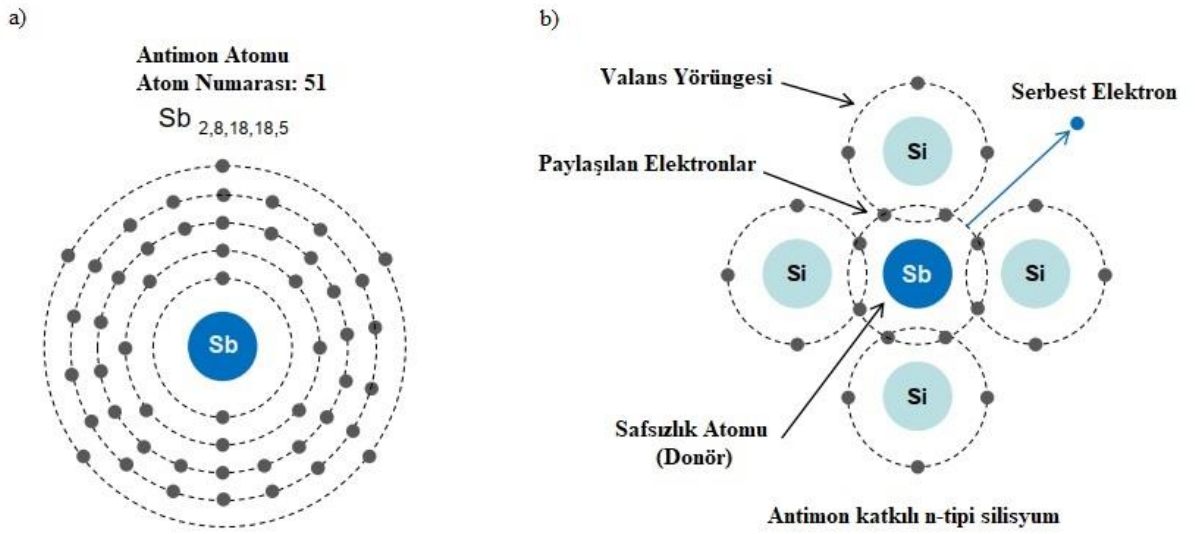


**Şekil 2.1:** a) Silisyum atomu ve b) silisyum kristal örgüsünün basit yapısı.

Grup V atomu olan antimonun (Sb) 51 elektronu vardır ve en dış kabuğunda 5 elektronu bulunur. Şekil 2.2' de katkısız Si yapısında komşu atomlar arası kovalent bağ çiftleri arasındaki Sb atomundan dolayı gelen fazladan 1 serbest elektronun olduğu yapı gösterilmiştir. Bu beşinci elektron, aralarındaki kimyasal bağ kırılarak Sb atomundan ayrılabilir. Bu kimyasal bağı kırmak için gereken enerji, bitişik atomlar arasındaki kovalent bağı kırmak için gereken enerjiden çok daha küçüktür. Bu nedenle kırılan bağ elektronun yerini değiştirir ve böylece serbest yük taşıyıcısı oluşur. Meydana gelen bu serbest taşıyıcı Si kristalinin iletkenliğine katkı sağlar [3]. Her katkı atomu, katkılандığı malzemeye bir elektron verir. Bu örnekte Sb katkılı Si yüksek miktarda elektron yoğunluğuna sahiptir. Dolayısıyla n-tipi olarak isimlendirilir. Bu ifade elektronun negatif yükünden dolayıdır. Elektron yoğunluğu n-tipi bir yarıiletken de katkı atomları tarafından arttırılır.

Benzer şekilde bir diğer V grubu elementi olan fosfor (P) da 5 değerlik elektronuna sahiptir. Bunlardan dördü silikon atomlarıyla kovalent bağ oluşturmaya katkıda bulunacak ve beşincisini fosfor atomuna daha zayıf bir şekilde bağlı olacaktır. Beşinci değerlik elektronuna donör elektron olarak adlandırılır. Donör elektronu olmayan fosfor atomu pozitif yüklüdür. Çok düşük sıcaklıklarda donör elektron fosfor atomuna bağlıdır. Ancak donör elektronunu

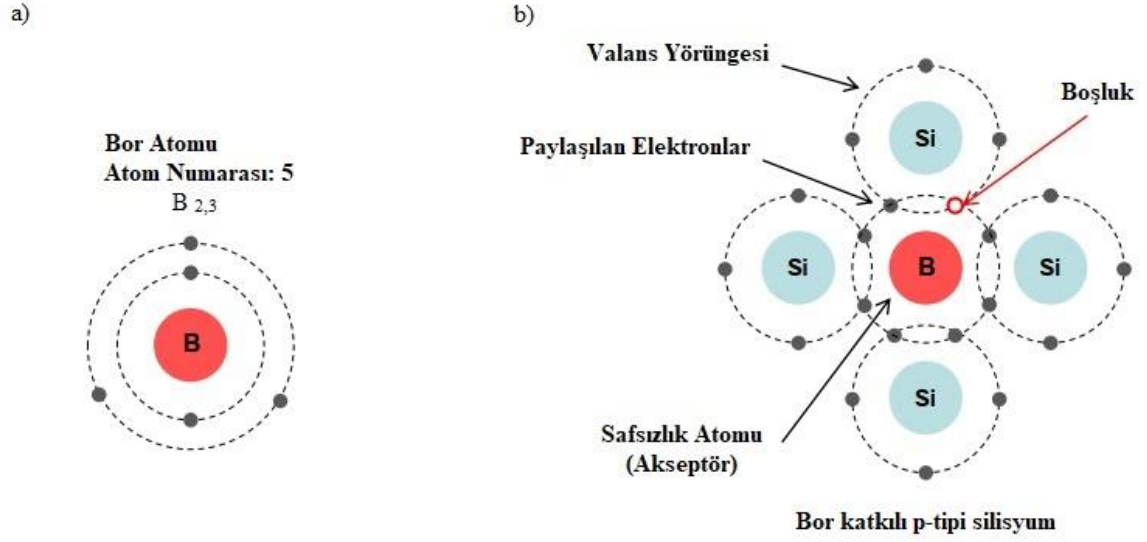
iletkenlik bandına yükseltmek için gereken enerjinin kovalent bağa dahil olan elektronlar için gereken enerjiden önemli ölçüde daha azdır. Donör elektrona termal enerji gibi küçük bir miktarda enerji eklenirse, pozitif yüklü bir fosfor iyonu bırakarak iletkenlik bandına yükseltilebilir. İletkenlik bandındaki elektron artık kristalin içinden geçerek bir akım oluşturabilirken, pozitif yüklü iyon kristalin içinde sabitlenir. Bu tür bir safsızlık atomu, iletkenlik bandına bir elektron bağışlar ve bu nedenle donör safsızlık atomu olarak adlandırılır. Donör safsızlık atomları, valans bandında boşluk oluşturmada iletkenlik bandına elektron sağlar [12].



**Şekil 2.2:** a) Antimon atomunun basit yapısı ve b) antimon katkılı silisyum n-tipi yarıiletkenin basit kristal yapısı.

Yukarıda n-tipi katkılama için anlatılan mekanizma benzer bir şekilde p-tipi katkılama içinde geçerlidir. Eğer Si kristaline grup III elementi olan, toplam elektron sayısı 5 olan ve dış kabuğunda 3 elektron bulunan bor (B) elementi katkılanırsa, Si kristali p-tipi elektriksel iletkenliğe sahip olacaktır. Bu durumun şematik gösterimi şekil 2.3’ deki gibidir. Bu sefer B atomu, komşu Si atomlarından birinden bir elektron kabul ederek sisteme iyonize olmuş serbest taşıyıcı sağlar. Ancak bu serbest taşıyıcı Si bir elektron eksilmesinden dolayı ortaya çıkan boşluktur. Bu net negatif yük ( $-e$ ), komşu Si atomlarıyla kovalent bağ oluşturur. N-tipi katkılama sürecinde olduğu gibi p-tipi katkılama sürecinde de katkılanan atomun iyonlaşma enerjisi bant aralığından çok daha küçüktür. Bunun sebebi iyonizasyon işleminin, Si-Si kovalent bağının yalnızca Si-B kovalent bağı ile değişimini içermesi ve kovalent bağı

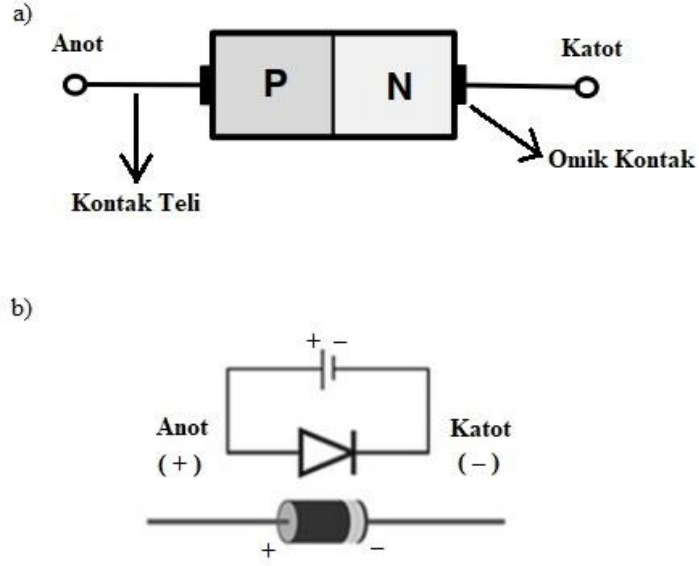
kırmamasıdır. B katkılı Si kristali yüksek oranda boşluk çoğunluğuna sahiptir. Dolayısıyla p-tipi olarak isimlendirilir. Bu ifade elektronun pozitif yükünden gelmektedir [3,12].



**Şekil 2.3:** a) Bor atomunun basit yapısı ve b) bor katkılı silisyum p-tipi yarıiletkenin basit kristal yapısı.

Katkılı yarıiletkenlerin iletkenliği asal yarıiletkenlere göre daha yüksektir. Bunun sebebi katkı materyalinden gelen elektron ya da boşluk yoğunluğunun asal yarıiletkene göre fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Bir n-tipi yarıiletkende elektronlar çoğunluk taşıyıcılar, boşluklar ise azınlık taşıyıcılar olarak isimlendirilir. Aynı şekilde p-tipi yarıiletkende ise boşluklar çoğunluk taşıyıcılar, elektronlar ise azınlık taşıyıcılar olarak isimlendirilir [3].

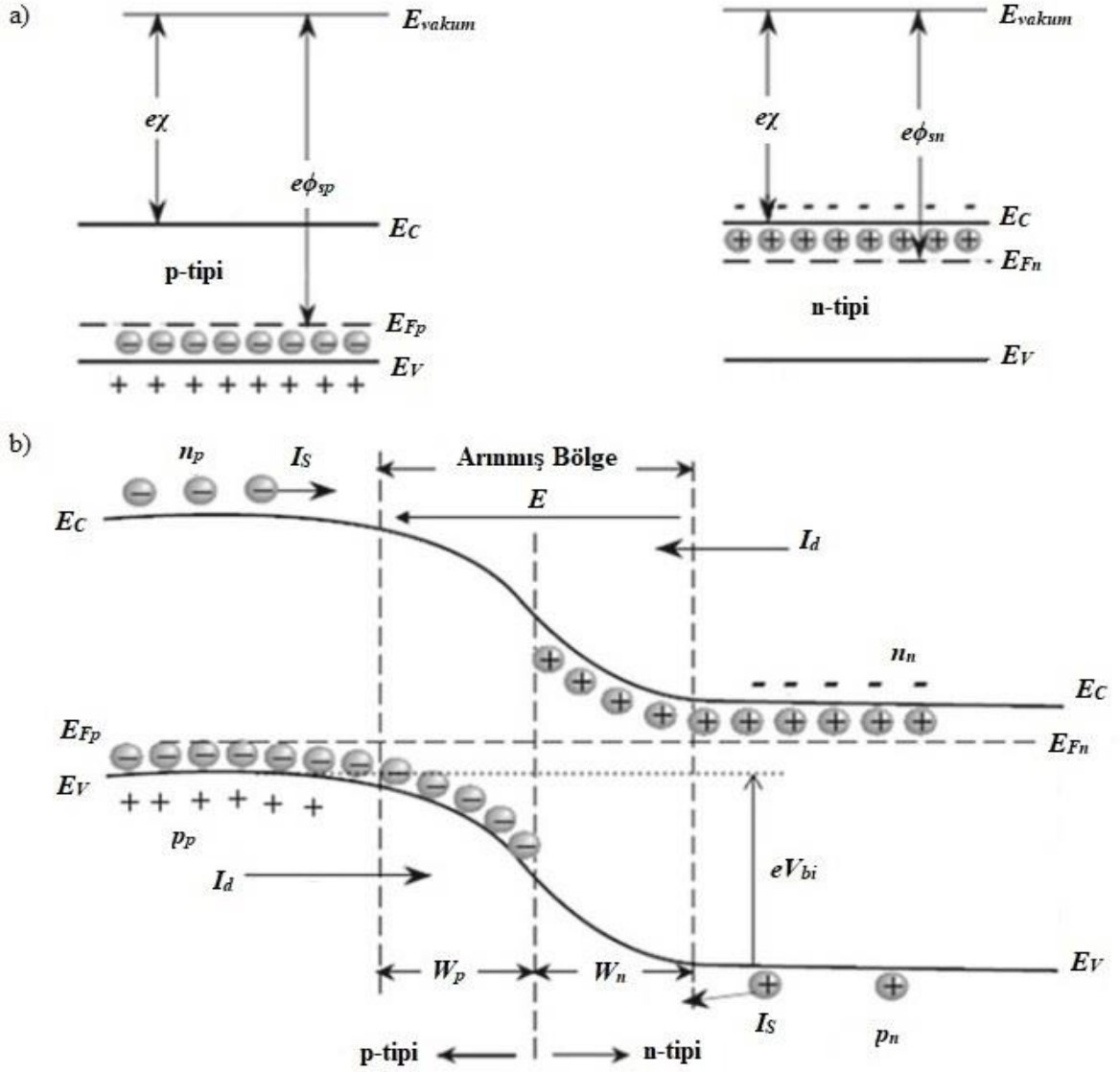
İki farklı elektriksel iletkenliğe (n-tipi ve p-tipi) sahip yarıiletken bir araya getirildiğinde oluşan diyotun, şekil 2.4’ de kontak konfigürasyonu ve devre sembolü gösterilmiştir. Devre gösteriminde, boşlukların, yani pozitif yüklerin çoğunlukta olduğu bölge anot, elektronların, yani negatif yüklerin olduğu bölge ise katot olarak isimlendirilir. Dolayısıyla bir diyot devreye şekil 2.4 (b)’ de gösterildiği gibi bağlanır.



**Şekil 2.4:** a) Bir diyotun kontak konfigürasyonu ve b) devre sembolü.

Yarıiletkenin iki ucunda omik kontaklar bulunur ve bu kontaklar diyot cihazının elektriksel bağlantısını diğer cihazlar ile sağlamak için yapılır, cihazın çalışmasından başka hiçbir eylemde bulunmayan arayüzler olarak görülebilir.

İki farklı tipte elektriksel iletkenliğe sahip yarıiletken bir araya geldiğinde bant yapıları da değişime uğrayacaktır. Şekil 2.5 (a)' da her iki yarıiletken tipi için enerji bant profili görülmektedir. Burada elektron ilgisi ( $e\chi$ ) iletkenlik bandı kenarı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkı olarak tanımlanır. Ayrıca iş fonksiyonu ( $\phi_{sp}$  ve  $\phi_{sn}$ ), bir elektronun vakum seviyesine ulaşması ve yarıiletken kristalden ayrılması için gereken enerjidir. Büyüklüğü Fermi enerjisi ile vakum seviyesi arasındaki farka eşittir [3]. Şekil 2.5 (b)' de denge halinde p-n eklemine bant diyagramı verilmiştir. P-n eklemine voltaj uygulanmadığı durumda ve bağlantı yani yapı termal dengedeyken, Fermi enerji seviyesi tüm sistem boyunca sabittir [12]. P-tipi yarıiletkende çoğunluk taşıyıcılar olan boşlukların ve azınlık taşıyıcıları olan elektronların yoğunlukları sırasıyla  $p_p$  ve  $n_p$  dir. N-tipi yarıiletkende ise çoğunluk taşıyıcıları olan elektronlar ve azınlık taşıyıcıları olan boşlukların yoğunlukları sırasıyla  $n_n$  ve  $p_n$  dir.



**Şekil 2.5:** a) Her iki yarıiletken tipi (p ve n tipi) için enerji bant profili ve b) denge halinde p-n eklemının bant diyagramı.

Bu iki farklı elektriksel iletkenliğe sahip yarıiletken bir araya getirildiğinde, bağlantı noktasındaki elektron ve boşlukların yoğunlukları arasındaki fark (elektronlar için  $n_n - n_p$  ve boşluklar için  $p_p - n_p$ ) bağlantı boyunca difüzyon akımlarının akmasına sebep olur. Elektronlar n tarafından p tarafına doğru hareket ederler ve boşluklar da bu harekete ters yönde akış gerçekleştirirler. Bir elektron bağlantı noktasını geçtiğinde, arkasında pozitif yüklü iyonize donör atomu bırakır, böylece bağlantı noktasının n tarafı elektriksel olarak nötr değildir pozitif  $+e$  net yüküne sahiptir. Bu serbest elektron p tarafına geçtiğinde bir serbest boşlukla birleşir, bu da negatif yüklü iyonize bir akseptör atomla sonuçlanır [3].

İyonize akseptör ve iyonize donör atomları kristal örgüsünün bir parçasıdır. Bu nedenle örgüde lokalizedirler ve birbirlerinden ayrılırlar. Bu ayrılan iki tür yük, bir elektrik alanına ve aralarında bir elektrostatik potansiyel farkına neden olacaktır. Bu farktan dolayı iletkenlik ve valans bant enerjileri, eklem bölgesi civarında bükülür ve iki tip yük için de bir potansiyel bariyer oluşturur, bu bükülmenin sebebi iletkenlik ve valans bantlarının Fermi enerjisine göre göreceli konumu p ve n bölgeleri arasında değiştiğinden denge halinde bu Fermi seviyesinin eşitlenmesinden kaynaklanmaktadır [12]. Bağlantı noktasını geçen bir sonraki elektron, n tarafından p tarafına doğru hareket ederken bu potansiyel bariyeri aşmak zorunda kalacak p tarafındaki hareketli bir boşluk ile yeniden birleştiğinde potansiyel bariyerinin yüksekliği artacaktır ve n ve p tarafında bariyeri oluşturan sabit net yükler artık sırasıyla  $+2e$  ve  $-2e$  dir. Potansiyel bariyer arttıkça p tarafındaki azınlık elektronları ve n tarafındaki azınlık boşlukları bu iç elektrik alanının etkisi altında sürüklenecektir. Bu sürüklenme akımı difüzyon akımının tersi yönde meydana gelir. Dolayısıyla azınlık elektronları p tarafından n tarafına, azınlık boşlukları ise n tarafından p tarafına doğru hareket eder. Denge halinde, sürüklenme ve difüzyon akımları birbirini dengeleyecek ve böylece Fermi enerjileri şekil 2.5 (b)' de gösterildiği gibi heteroeklemin her iki tarafında hizalanacaktır [3].

Arayüzeyde oluşan elektrik alan sebebiyle p ve n tarafında potansiyel fark oluşur. Oluşan bu potansiyel fark, n bölgesinin iletkenlik bandındaki elektronlar, p bölgesinin iletkenlik bandına geçmeye çalışırken bu potansiyel bir bariyer ile karşılaşılır. Bu potansiyel bariyere yerleşik potansiyel bariyeri ya da kontak potansiyeli denir ve  $V_{bi}$  ile gösterilir. Kontak potansiyeli asal yük taşıyıcıları ( $n_i$ ), akseptör atomları ( $N_A$ ) ve donör atomları ( $N_D$ ) konsantrasyonlarına bağlıdır ve denklem 2.1'de kontak potansiyeli eşitliği verilmiştir [3,12].

$$V_{bi} = \frac{k_B T}{e} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (2.1)$$

Bu iç elektrik alan sebebiyle eklem bölgesinde serbest yükler bulanamayacaktır ve böylece eklem bölgesinde serbest yüklerden arınmış bir bölge oluşur. Bu bölgelerin genişliği n-tipi bölge tarafında denklem 2.2 ve p-tipi bölgede ise denklem 2.3 ile verilmiştir [3,12].

$$W_n = \left\{ \frac{2\epsilon V_{bi}}{e} \left[ \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)} \right] \right\}^{1/2} \quad (2.2)$$

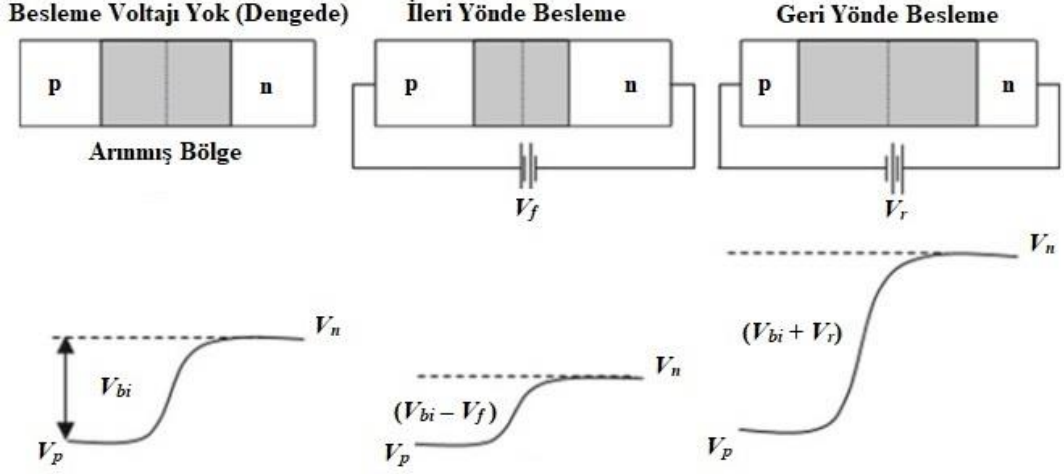
$$W_p = \left\{ \frac{2\epsilon V_{bi}}{e} \left[ \frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)} \right] \right\}^{1/2} \quad (2.3)$$

Kontak potansiyel bariyeri, n bölgesindeki çoğunluk taşıyıcıları olan elektronlar ile p bölgesindeki azınlık taşıyıcıları elektronlar arasında ve ayrıca p bölgesindeki çoğunluk taşıyıcılar olan boşluklar ile n bölgesindeki azınlık taşıyıcılar olan boşluklar arasında dengeyi korur. Bağlantı noktasındaki bu potansiyel farkı voltmetre ile ölçülemez çünkü probalar ile yarıiletken arasında  $V_{bi}$ ' yi iptal edecek yeni potansiyel bariyerleri oluşacaktır.  $V_{bi}$  potansiyeli dengeyi korur, bu nedenle bu voltaj tarafından akım üretilmez [12].

Denklem 2.2 ve denklem 2.3' de arınmış bölgenin genişliğinin n ve p tipi bölgelerdeki katkı konsantrasyonlarına bağlı olduğu görülmektedir. Eğer p tipi bölgede akseptör katkı konsantrasyonu artarsa, bu kısımdaki arınmış bölge genişliği de azalır. Benzer durum bu sefer donör katkı konsantrasyonu arttığında n tipi bölge için de geçerlidir. Şekil 2.5 (b)' de verilen p-n eklemi bant diyagramındaki toplam arınmış bölge genişliği ise denklem 2.4' de verilmiştir [3,12].

$$W = W_n + W_p = \left\{ \frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \left[ \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right] \right\}^{1/2} \quad (2.4)$$

Görüldüğü gibi p-n eklemінде denge durumunda bile bağlantı boyunca difüzyon ve sürüklenme akımları mevcuttur. Ancak bu iki akım birbirini dengeler ve net akım sıfır olur. Harici bir gerilim, yani harici bir elektrik akım uyguladığımızda bu denge hali bozulur ve diyottan sonlu bir akım geçer. Eğer p ve n bölgeleri arasına bir potansiyel uygularsak artık denge durumunda olmayacağız; Fermi enerji seviyesi artık sistem boyunca sabit olmayacak. Öncelikle uygulanan dış elektrik alanının dengedeki serbest taşıyıcı yoğunlukları üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahip olduğunu ve diyotun denge durumundan uzak olmadığını varsayılır. Harici elektrik alan uygulandığında Fermi enerjisi sanki (quasi) Fermi seviyelerine ayrılır ve eklem bölgesinin n ve p tarafında aynı değildir. Bu yapı şekil 2.6' da verilmiştir. Burada serbest taşıyıcıların dağılımı Maxwell-Boltzmann dağılım fonksiyonu ile açıklanmaktadır [3,12]. Dengede arınmış bölgede serbest taşıyıcı bulunmadığından bu bölge doğal olarak diyotun geri kalanından çok daha büyük dirence sahip olacaktır. Bu nedenle uygulanan voltajın çoğu arınmış bölge boyunca düşer. Şekil 2.6' da görüldüğü gibi uygulanan voltajın ileri veya geri yönde olmasına göre arınmış bölge genişliği de değişecektir.



**Şekil 2.6:** Uygulanan voltajın yönüne göre arınmış bölge genişliklerinin ve kontak potansiyellerinin değişiminin şematik gösterimi.

Akım akışını belirleyen şey ise uygulanan voltajın yönüne bağlı olarak değişen bariyer yüksekliğidir yani kontak potansiyelidir. İleri yönde beslemede ( $V=V_f$ ), p ve n tarafları arasındaki potansiyel fark denklem 2.5' deki gibidir.

$$V_{Toplam} = V_{bi} - V = V_{bi} - V_f \quad (2.5)$$

Geri besleme durumunda ise ( $V = -V_r$ ,  $V_r > 0$ ), p ve n tarafları arasındaki potansiyel fark denklem 2.6' da verilmiştir.

$$V_{Toplam} = V_{bi} - V = V_{bi} + V_r \quad (2.6)$$

Denklem 2.5 ve denklem 2.6' da ki  $V_{Toplam}$  potansiyel değerleri uygulanan elektrik alanın yönüne göre denklem 2.2, denklem 2.3 ve denklem 2.4' de  $V_{bi}$  değerinin yerine konularak arınmış bölge genişlikleri uygulanan elektrik alana bağlı olarak hesaplanabilir.

Görüldüğü gibi ileri yönde besleme durumunda, kontak potansiyeli uygulanan voltajın değeri kadar azalacaktır. Arınmış bölgedeki yüksek direnç nedeniyle uygulanan voltajın çoğu bu bölgede azalır. Sonuç olarak dengedeki difüzyon akımını kısıtlayan potansiyel bariyeri artık azalır ve hem n tarafına gerçekleşen boşluk difüzyonundan hem de p tarafına gerçekleşen elektron difüzyonundan kaynaklanan akım artar.

Geri besleme durumunda ise, kontak potansiyeli uygulanan geri besleme voltajı ile aynı miktarda artar. Diyotun p tarafına bağlanan harici voltaj kaynağının elektrodu, boşlukların

arınmış bölgenin çevresinden p-tipi bölgeye doğru daha da uzaklaşmasına neden olur. Dolayısıyla eklem p tarafındaki arınmış bölgesi genişler. Yine benzer şekilde n-tipi tarafa bağlanan pozitif elektrot, arınmış bölgesi yakınındaki elektronları n-tipi bölgeye doğru çekerek eklem n tarafındaki arınmış bölgenin genişlemesine neden olur [3].

Eğer bir diyot ileri yönde beslendiğinde, potansiyel bariyeri azalır ve taşıyıcıların eklem boyunca difüzyonu artar. Ancak sürüklenme akımı kontak potansiyelinin azalmasından etkilenmez. Bunun nedeni arınmış bölgenin iç elektrik alanının, taşıyıcıların saturasyon değerlerinde veya buna yakın hızlarda sürüklenmesine neden olacak kadar yüksek olmasıdır. Sonuç olarak, ileri besleme değeri arttıkça difüzyon akımı sürüklenme akımını aşar. Ancak geri besleme durumunda bariyer yüksekliği uygulanan voltaj kadar artar ve taşıyıcıların geçişi azalır. Bu nedenle de geri besleme değeri arttıkça sürüklenme akımı difüzyon akımını aşar. Sonuç olarak ideal bir diyot için toplam akım, elektron ve boşlukların difüzyon akımlarının toplamıdır. Denklem 2.7' de ideal bir diyotun akım eşitliği verilmiştir bu eşitlik diyot denklemi olarak da bilinir [2,3].

$$I(V) = I_0(e^{eV/nk_B T} - 1) \quad (2.7)$$

Denklem 2.7' de  $I_0$  ifadesi kaçak akım ya da saturasyon akımı olarak adlandırılır ve diyot alanı, taşıyıcıların yoğunlukları ve difüzyon uzunluklarına bağlıdır. Ayrıca denklem 2.7' de diyot akımının ileri besleme durumunda üstel olarak değiştiği açıkça görülmektedir. Ancak geri besleme durumunda ( $V = -V_r$ ,  $V_r > 0$ ),  $|eV_r| \gg k_B T$  olacağından ve  $\exp(eV_r/k_B T) \ll 1$  olacağından  $I=I_0$  olur. Bu kaçak akımdır ve ideal bir diyotta ileri yönde geçen akım ile kıyaslandığında ihmal edilebilecek kadar küçük bir değere sahiptir. Bu nedenle diyot sadece bir yönde (ileri besleme) akım iletir ve geri besleme durumunda ise doğrultucu olarak görev yapar [2,3]. Denklem 2.7' de n değeri idealite faktörüdür. Bu değer diyotun kalitesini gösterir. İdealite faktörü bir diyot için ne kadar küçük ise o kadar iyidir ve bu değer 1'e yakın olması beklenir [2].

Temelde bir diyotu, n ve p bölgelerinin zıt yüklü kapasitör plakaları gibi davrandığı ve arınma bölgesinin de plakalar arası boşluğu dolduran dielektrik madde olduğu paralel plakalı kapasitör gibi düşünülebilir. Dolayısıyla kapasite değeri denklem 2.8 ile hesaplanabilir.

$$C = \left| \frac{dQ}{dV} \right| \quad (2.8)$$

Burada taşıyıcı yoğunluklarından kaynaklı yük değeri ise denklem 2.9' da verilmiştir.

$$|Q| = eAW_nN_D = eAW_pN_A \quad (2.9)$$

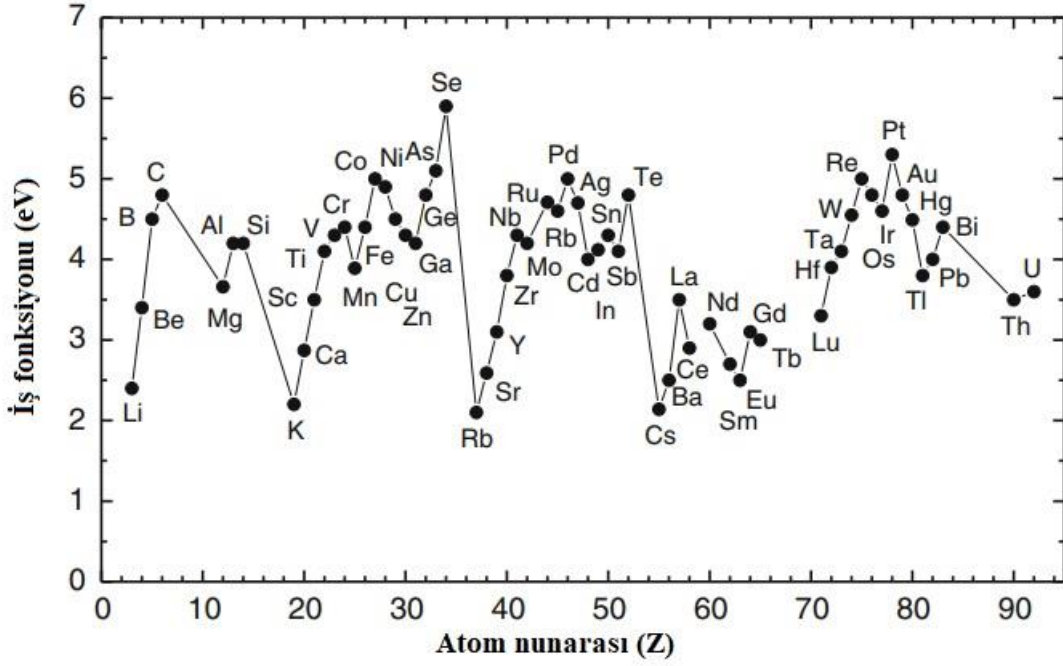
Denklem 2.9' da yük eşitliği ve denklem 2.4' de verilmiş olan ve ileri veya geri besleme durumlarındaki toplam arınmış bölge genişlik değeri düzenlenip denklem 2.8' de yerine konulup hesaplanırsa diyotun kapasite değeri hesaplanır. Denklem 2.10' da bir diyotun kapasite eşitliği verilmiştir [1,3].

$$C = \frac{A}{2} \left[ \frac{2e\varepsilon}{(V_{bi}-V)} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right]^{1/2} = \frac{A\varepsilon}{W} \quad (2.10)$$

Burada A; diyotun kesit alanı,  $\varepsilon$ ; malzemenin dielektrik sabitidir.

Metal-yarıiletken kontak davranışı 1874 yılında F. Braun tarafından araştırılmıştır. Metal sülfürler için, örneğin  $\text{CuFeS}_2$  (bakır demir sülfür), omik olmayan davranış bulmuştur. Bu tip kontaklar doğrultucu özelliklere sahip olup, Schottky kontağı olarak isimlendirilir. Bu tip metal-yarıiletken cihazlara ise Schottky diyotu denir. Öte yandan, metal-yarıiletken kontaklar omik davranış da gösterebilir. Yani çok küçük kontak direncine sahip olup omik özellik sergilerler. Omik bir kontağın diyot karakteristiği olmamasına rağmen, omik bir kontak, her iki akım yönü için de küçük bir kontak direncine sahip olacaktır. Kontak boyunca voltaj düşüşü, aktif katmandaki (kontak dışında, başka bir yerdeki) voltaj düşüşüne kıyasla küçük olacaktır.

Metaller ve yarıiletkenlerin, Fermi seviyeleri ve vakum enerji seviyeleri birbirlerine göre genellikle farklı pozisyonlara sahiptir. Metal, yarıiletkenle temas halinde olduğunda, yükler termodinamik dengede Fermi seviyesinin yapı boyunca sabit olacağı şekilde akacaktır. Fermi seviyesinin metaldeki konumu, şekil 2.7' de çeşitli metaller için gösterilen  $\phi_m$  iş fonksiyonu ile verilir.



Şekil 2.7: Çeşitli metallerin iş fonksiyonları.

Metal ve yarıiletken temas halinde olmadığında şekil 2.8 (a)' da gösterildiği gibi, metal iş fonksiyonu  $\phi_m = E_{vak} - E_F$  eşitliğiyle ve yarıiletken  $\chi_{sc}$  elektron afinitesiyle karakterize edilir. İlk olarak,  $\phi_m > \chi_{sc}$  olduğunu göz önüne alalım. Elektriksel iletkenliği n-tipi olan bir yarıiletken için, Fermi seviyesi ile iletkenlik bandı arasındaki enerji farkı denklem 2.11' deki gibi gösterilir:

$$-eV_n = E_C - E_F \quad (2.11)$$

Dejenere olmayan yarıiletkenler için,  $V_n < 0$  olur. Bu nedenle, yarıiletken Fermi seviyesinin konumu denklem 2.12' deki gibi verilir;

$$E_F = E_{vakum} - \chi_{sc} + eV_n \quad (2.12)$$

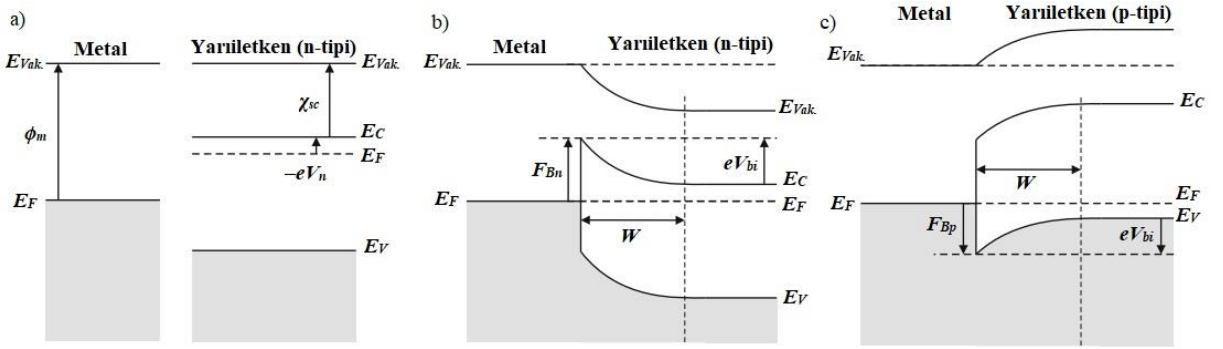
Metal ve yarıiletken temas ettirilirse Fermi seviyeleri dengeye gelir. Şekil 2.8 (b)' deki durum için ( $E_{F,sc} > E_{F,m}$ ) elektronlar yarıiletkenden metale akacaktır. Metalin negatif yüzey yükü, yarıiletkende yüzeyin yakınında pozitif bir yük ile kompanse edilir. Sonunda arayüzde  $F_{Bn}$  yüksekliğinde (Schottky) bir bariyer oluşur ve denklem 2.13' deki gibi ifade edilir.

$$F_{Bn} = \phi_m - \chi_{sc} \quad (2.13)$$

Buradaki ‘n’ alt simgesi, n-tipi bir yarıiletkendeki temas anlamına gelir. Enerji bariyer yüksekliği  $F_{Bn} = -e\phi_B$  olarak verilir. Eşleşmeyen bağlar, yüzey durumları vb. gibi yüzey/arayüz etkileri bu noktada ihmal edilir.

Öte yandan, p-tipi yarıiletken üzerindeki bir temas için, değerlik bandına göre  $F_{Bp}$  bariyer yüksekliği denklem 2.14’ deki gibi olacaktır. Bu durumun bant yapısı şekil 2.8 (c)’ de verildiği gibidir.

$$F_{Bp} = E_g - (\phi_m - \chi_{sc}) \quad (2.14)$$



**Şekil 2.8:** Yarıiletkenin bulk özelliklerinin baskın olduğu, metal-yarıiletken kontağının termodinamik dengedeki şematik bant yapısı. a) Temas yok b) metal ve yarıiletken temas halinde. W, arınma bölgesi genişliğini belirtir. Arınma bölgesinin dışında yarıiletken nötrdür.  $F_{Bn}$ , Schottky bariyer yüksekliğini belirtir.  $V_{bi}$  ise kontak potansiyelidir (burada  $V_{bi}>0$ ) c) p-tipi yarıiletken için (burada  $F_{Bp}>0$ ).

Omik kontaktaki durumda ise, Schottky kontağa göre kıyasla çok küçük de olsa bir kontak direnci olacaktır. Kontak direnci  $R_c$ ,  $V=0$ ’ daki diferansiyel direnç olarak tanımlanır ve denklem 2.15’ deki gibi ifade edilir.

$$R_c = \left( \frac{\partial I}{\partial V} \right)^{-1}_{V=0} \quad (2.15)$$

Düşük katkı konsantrasyonlarında, taşıma (transport) termiyonik emisyon tarafından domine edilir. Bu durumda  $R_c$ , denklem 2.16’ daki gibi yazılır.

$$R_c = \frac{k_B}{eA^*T} \exp\left(\frac{F_{Bn}}{kT}\right) \quad (2.16)$$

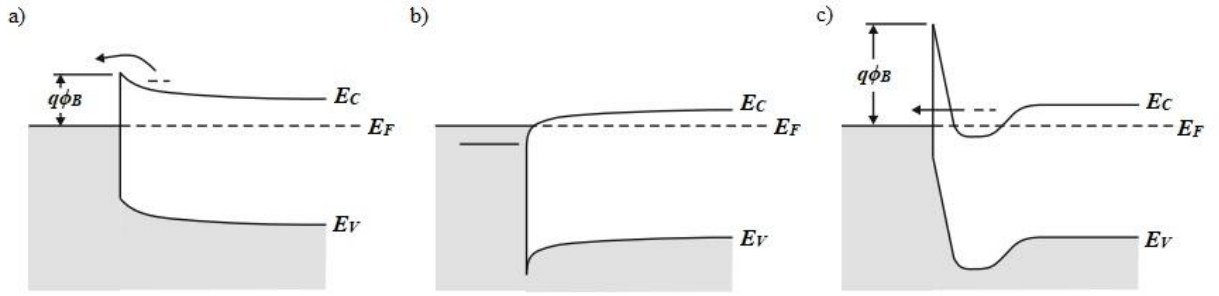
Burada  $A^*$ , Richardson sabitidir ve elektron için bu değer vakumda  $120 \text{ Acm}^{-2}\text{K}^{-2}$  dir.

Küçük bariyer yüksekliği (şekil 2.9 (a)) küçük kontak direncine yol açacaktır. Öte yandan, n-tipi bir yarıiletken için, metal iş fonksiyonu  $\phi_m < E_{vak} - E_F$  olan, negatif bir Schottky bariyer yüksekliği, taşıyıcıların taşınması için bir engel olmayacak şekilde bir birikim tabakasına yol açar (şekil 2.9 (b)). Yüksek katkı konsantrasyonlarında ise  $R_c$ , tünelleme akımı tarafından belirlenir denklem 2.17' de verildiği gibi katkı miktarı ile orantılıdır.

$$R_c \propto \exp\left(\frac{F_{Bn}}{E_{00}}\right) \quad (2.17)$$

Denklem 2.17' den görüldüğü gibi kontak direnci katkı miktarı arttıkça üstel olarak azalır. Burada  $E_{00}$  karakteristik enerji parametresidir ve katkı konsantrasyonu ile orantılıdır.

Omik kontakların oluşumu için üç mekanizma, düşük bariyer yüksekliği, birikim tabakası ve yüksek katkılama durumu, şekil 2.9' da şematik olarak özetlenmiştir.



**Şekil 2.9:** Omik kontak oluşumu için şematik koşullar, a) düşük bariyer yüksekliği, b) birikim tabakasının oluştuğu durum ve c) yüksek katkılama ile oluşan durum (ince arınma bölgesi).

Geniş bant aralıklı yarıiletkenlerde omik kontak oluşturabilmek zordur, çünkü n-tipi (ya da p-tipi) malzemelerle kontak için yeterince küçük (p-tipi için büyük) iş fonksiyonuna sahip metaller çoğunlukla mevcut değildir. Ancak yine de yapılan deneysel ve teorik çalışmalar ile belirlenen malzemelerle uygun omik kontaklar alınabilmektedir. Schottky kontak cihazları yarıiletken teknolojisinde kendine yer bulsa da omik kontaklar hemen hemen tüm cihazlar için vazgeçilmezdir. Omik kontaklar genellikle yarıiletken için katkı maddesi içeren ya da içermeyen saf bir kontak metalinin buharlaştırılmasıyla hazırlanır.

## 2.2. DERİN SEVİYE GEÇİŞ SPEKTROSKOPİSİ (DLTS)

Yarıiletken kristali içerisinde katkılama ile donör veya akseptör atomları bulunur. Bu atomlardan kaynaklı oluşan enerji seviyelerinin dışında ayrıca kristal üretimi esnasında, üretim şartlarından kaynaklanan sebeplerden dolayı kristal örgüsünde bozukluklar,

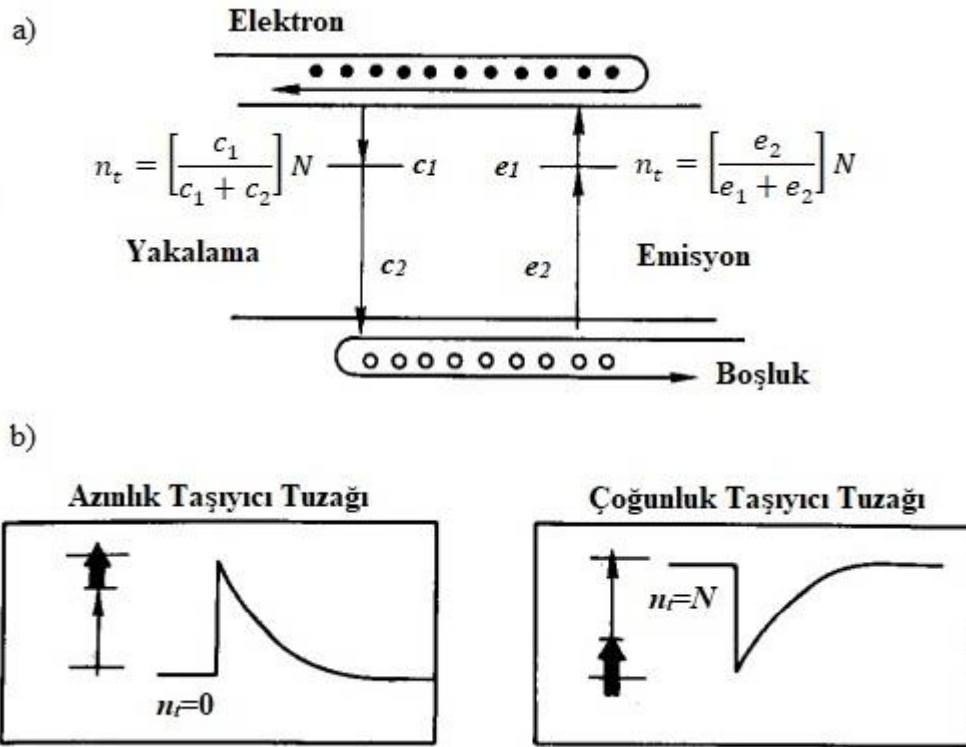
istenmeyen ve kirlilik olarak nitelendirdiğimiz atomlardan kaynaklı kusurlar, yarıiletkenin bant aralığının içerisinde yeniden birleşim (rekombinasyon) merkezi olarak davranan enerji seviyelerinin oluşmasına yol açarlar. Bu istenmeyen seviyeler serbest yükleri tuzakladıkları için malzemenin direncinin artmasına sebep olurlar. Öte yandan malzemede oluşturulan yük çiftlerinin tekrar birleşmesine sebep oldukları için ışımalı (foton) veya ışımalı olmayan (fonon) istenmeyen duruma sebep olurlar. Bu tuzak seviyelerini tanımlarken iletkenlik veya valans bandına göre konumlarına bakılır ve bu fark birkaç  $k_bT$  den büyükse tuzak seviyesi “derin” tuzak olarak isimlendirilir. Eğer tuzak seviyesi bant kenarlarına yakın ise bu seferde “sığ” olarak nitelendirilir [13].

Bir yarıiletkende bulunan tuzakları karakterize etmek amacıyla hassas, hızlı ve analizi kolay bir teknik tercih edilmelidir. Böyle bir teknik, çoğunluk ve azınlık taşıyıcı tuzakları arasında ayırım yapabilmeli ve bu tuzakların konsantrasyonları, enerji seviyeleri ve yakalama oranları hakkında bilgi sağlamalıdır. Ayrıca böyle bir tekniğin, farklı tuzaklardan kaynaklanan sinyallerin birbirinden ayrıştırılabilmesi ve tek bir değişkene karşı çizildiğinde aynı şekilde tekrarlanabilir olması gerekmektedir. Ek olarak, bir araştırma tekniği açısından faydalı olabilmesi için, olası herhangi bir yöntemin hem ışımalı hem de ışımalı olmayan birleşme merkezleri de dahil olmak üzere geniş bir derinlik aralığında ölçebilme yeteneğine sahip olması da önemlidir.

Derin seviye geçiş spektroskopisi olarak adlandırılan bu teknik, yüksek frekanslı (MHz aralığında) bir kapasitans tekniğidir. Dolayısıyla DLTS tekniğini açıklayabilmek için öncelikle kapasitans geçiş sinyallerini analiz etmek gerekir. Yarıiletkenlerde ilk aşamada tuzakların varlığının tespiti için geçici kapasite değişimlerinin gözlemlenmesi iyi bilinen bir yöntemdir. Bu teknik p-n eklemine arınmış bölgedeki kusur seviyesi hakkında bilgi elde etmek için, başlangıçtaki dengesizlik durumunu takiben bu kusur seviyesinin işgalinin termal dengeye dönüşüyle ilişkili geçici kapasitansı gözlemleyerek yapılır. Yani eğer arınmış bölgede tuzak seviyeleri mevcut ise bu seviyelerin doluluk durumları cihazın kapasitesini etkiler. Bu geçici olayın zaman sabiti sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülebilir ve seviye için aktivasyon enerjisi elde edilebilir. Geçici olayın başlangıç büyüklüğü tuzak seviyesinin konsantrasyonu ile ilgilidir. DLTS’ de kullanılan bu teknikte başlangıç koşullarını tanımlamak için numuneye bir atım voltajı uygulanır. Daha sonra voltaj büyüklüğü azaltılarak serbest yüklerin bu bölgeye girişine izin verilir. Bu serbest yükler bölgedeki tuzak seviyelerince

yakalanırlar. Ardından uygulanan besleme voltajı ilk haline getirildiğinde arınmış bölge genişliği de ilk haline gelir ve tuzaklanan serbest yükler arınmış bölgeyi terk ederler. Ancak bu serbest yükler arınmış bölgeyi terk ederken, yüklerin tipine göre öncelikle iletkenlik ya da valans bandına geçerler. Bu süreç şekil 2.10 (a)' da gösterilmiştir.

Bant aralığı içinde bulunan yerleştirilmiş bir enerji seviyesi, elektronları ve boşlukları yakalama olasılığı eşit olan bir rekombinasyon merkezi olarak düşünülebilir. Başka bir deyişle, rekombinasyon merkezi tarafından elektronların ve boşluğun yakalama tesir kesitleri eşittir. Shockley–Read–Hall rekombinasyon teorisinde, bant aralığı içindeki bir enerji seviyesi ( $E_T$ )' sinde bir rekombinasyon merkezi bulunduğu varsayılır. Bu merkez bir akseptör tipi kusurdan kaynaklanıyorsa, bir elektron yakaladığında negatif yüklüdür ve aksi durumunda yani yakalamadığında nötrdür [3].



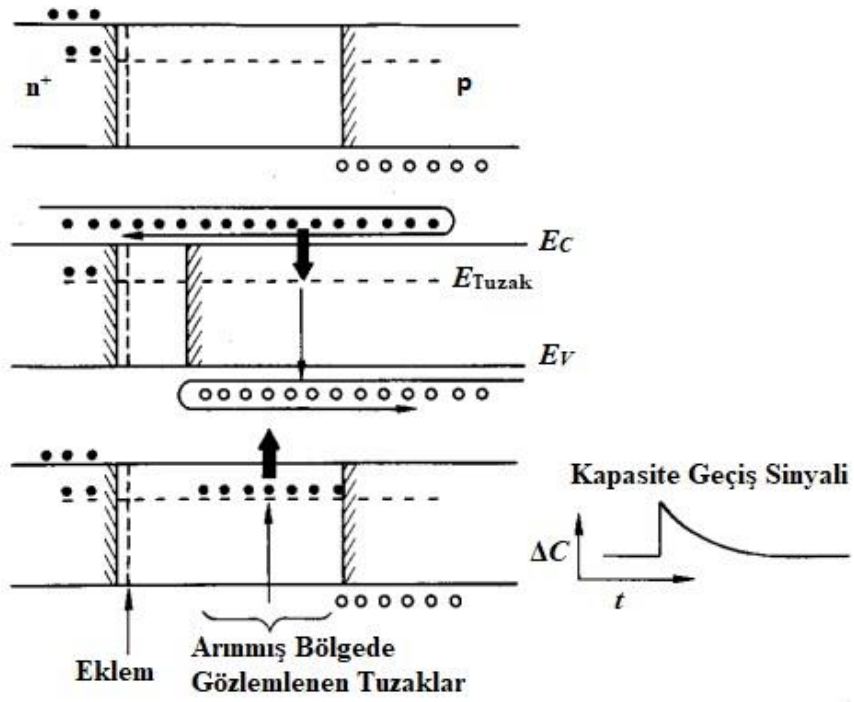
**Şekil 2.10:** a) Belirli bir tuzağı karakterize eden emisyon ve yakalama işlemlerinin şematik gösterimi ve b) bu yakalama işlemlerine karşılık gelen geçiş sinyallerinin grafikleri.

Şekil 2.10, belirli bir tuzağı karakterize eden emisyon ve yakalama işlemlerinin şematik bir özetidir. Azınlık taşıyıcıları (bu gösterimde elektronlar) için yakalama ve termal emisyon oranları sırasıyla  $c_1$  ve  $e_1$ ' dir. Çoğunluk taşıyıcıları (boşluklar) için yakalama ve termal emisyon oranları ise sırasıyla  $c_2$  ve  $e_2$ ' dir. Geri besleme durumunda gözlemlenebilir tuzaklar

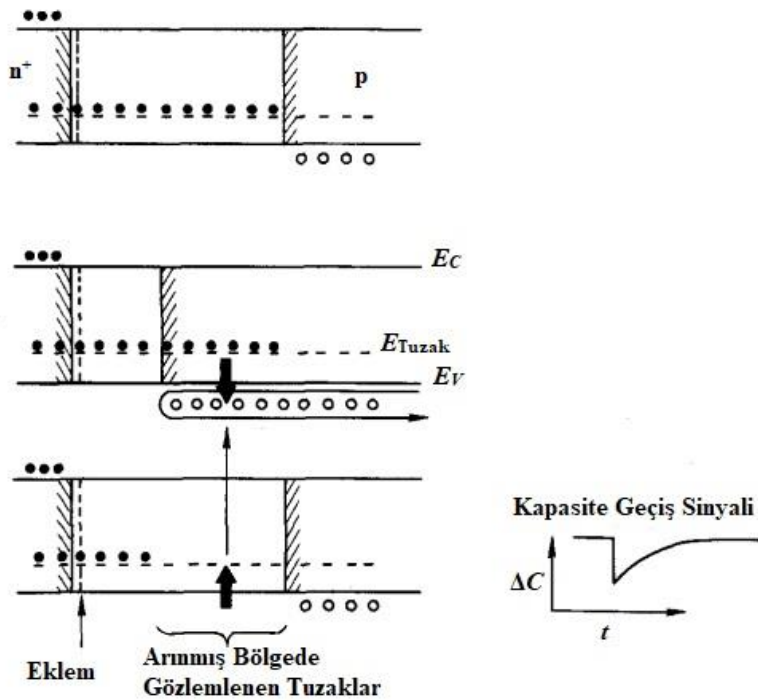
arınmış bölge içerisinde. Dolayısıyla, yakalama oranları sıfırdır ve seviyelerin işgali, termal emisyon oranları  $e_1$  ve  $e_2$  tarafından belirlenir. Şekil 2.10' de gösterildiği gibi kararlı durum da (yani termal dengede) elektronlar tarafından işgal edilen tuzak konsantrasyonu denklem 2.18' de verilmiştir [11,13,14].

$$n_t = \left[ \frac{e_2}{e_1 + e_2} \right] N \quad (2.18)$$

Burada  $N$  tuzak konsantrasyonudur. Bir elektron tuzağını, içinde elektron bulunmayan ( $n_t=0$ ) ve dolayısıyla onları yakalayabilen bir tuzak olarak tanımlanır. Benzer şekilde bir boşluk tuzağı da elektronlarla dolu olan ( $n_t=N$ ) ve dolayısıyla tuzağa düşmüş bir elektronun bir boşlukla yeniden birleşmesine, yani bir boşluğu yakalamasına olanak tanıyan bir tuzaktır. Emisyon oranları Boltzmann faktörleri ile orantılıdır. Dolayısıyla tuzak seviyesi ile iletkenlik bandı (elektron emisyonu) ve tuzak seviyesi ile valans bandı (boşluk emisyonu) arasındaki enerji farkına üstel olarak bağlıdır. Bu nedenle elektron tuzakları bant aralığının yarısının üst kısmında, boşluk tuzakları ise alt tarafında olma eğilimindedir. Denklem 2.18' e göre bir elektron tuzağı için  $e_1 \gg e_2$  ve bir boşluk tuzağı için de  $e_2 \gg e_1$  olması gerekir. Bu durum şekil 2.10 (b)' de ince ve kalın oklarla gösterilmiştir ve bu geçişlere karşılık gelen kapasite geçiş sinyalleri de verilmiştir. Kapasitedeki değişimin nedeni ise tuzaklardaki elektron işgalinin uygulanan atım voltajı ile artırılıp azaltılmasından kaynaklıdır. Tuzaklardaki azınlık taşıyıcı sayısındaki artış, eklemenin kapasite değerindeki artışa neden olur. Şekil 2.10 (b)' de gösterildiği gibi, tuzaklanan azınlık taşıyıcılardan kaynaklanan kapasite geçişi her zaman pozitifdir. Öte yandan çoğunluk taşıyıcılardan kaynaklanan kapasite geçişi ise her zaman negatiftir. Bu geçişlerin mekanizması ve karşılık gelen kapasite geçiş sinyali şekil 2.11 ve şekil 2.12' de gösterilmiştir [11].



**Şekil 2.11:** Azınlık taşıyıcıların ileri besleme atım gerilimi ile arınmış bölgeye geçişinin şematik gösterimi ve buna karşılık gelen kapasite geçiş sinyalinin zamana bağlı grafiği.



**Şekil 2.12:** Çoğunluk taşıyıcıların ileri besleme atım gerilimi ile arınmış bölgeye geçişinin şematik gösterimi ve buna karşılık gelen kapasite geçiş sinyalinin zamana bağlı grafiği.

İki ana atım gerilimi vardır. Birincisi şekil 2.11’ de görülen diyotu anlık olarak ileri besleme ile azınlık taşıyıcıların arınmış bölgeye geçmesini sağlayan atım ve ikincisi ise şekil 2.12’ de

görülen çoğunluk taşıyıcıları atımı. Bu atım ise diyotun ön besleme atımını azaltarak şekil 2.12’ de görülen çoğunluk taşıyıcıların arınmış bölgeye girişine olanak sağlar. Şekil 2.10 (a)’ da gösterildiği gibi ön beslemeli atım sırasında kararlı durumda elektron tuzak konsantrasyonu denklem 2.19’ deki gibidir [11].

$$n_t = \left[ \frac{c_1}{c_1 + c_2} \right] N \quad (2.19)$$

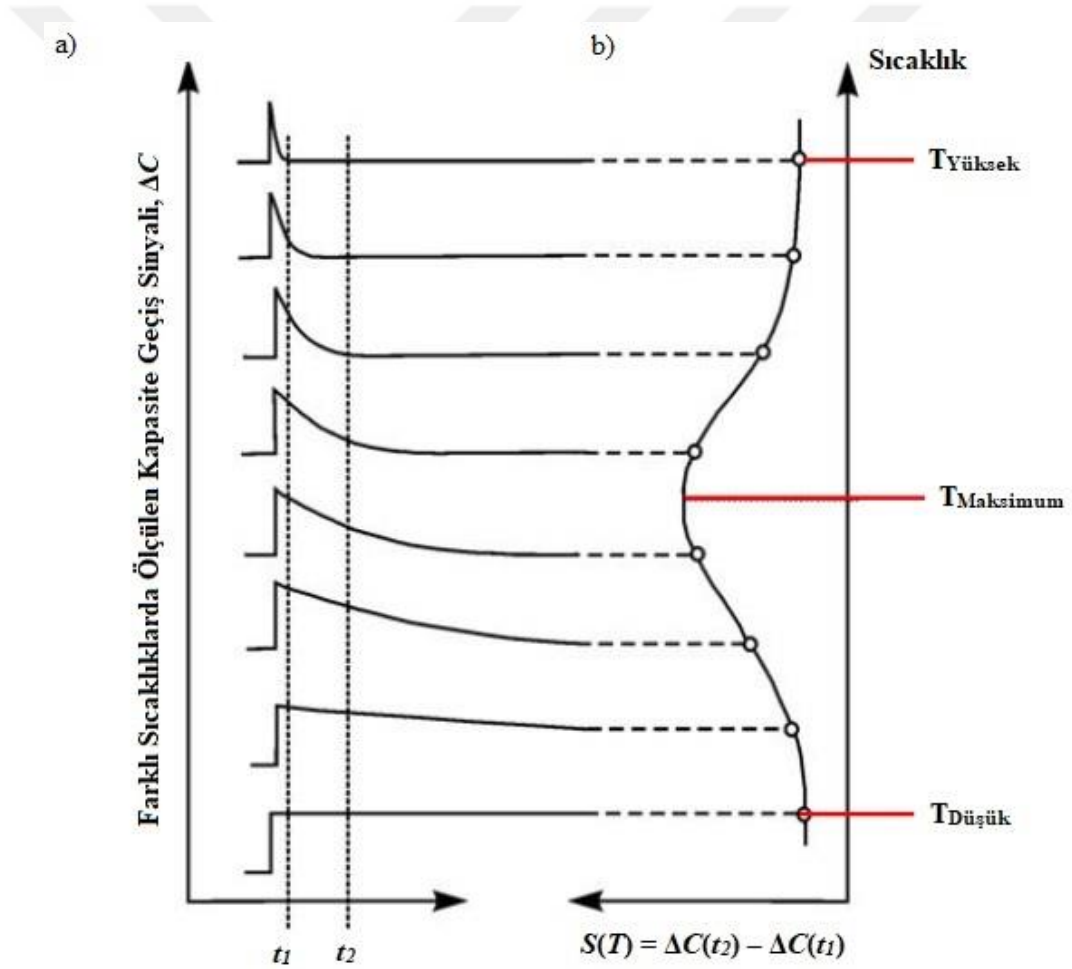
Burada  $c_1$ , arınmış bölgeye giren azınlık taşıyıcılarının (elektron) konsantrasyonuyla orantılı, azınlık taşıyıcı yakalama oranıdır ve  $c_2$  ise çoğunluk taşıyıcıların (boşluk) konsantrasyonuyla orantılı, çoğunluk taşıyıcı emisyon oranıdır. Göz önünde bulundurduğumuz tüm durumlarda yakalama oranları, emisyon oranlarından çok daha büyüktür ve bu ön besleme atımı sırasında ihmal edilebilir. Uygulanan doldurma atımı,  $c_1 \gg c_2$  olacak şekilde ve tuzakların boşalma eğilimlerini bastırarak kadar çok sayıda elektroni arınmış bölgeye sokan bir atım ise bölgedeki tuzakların tamamı elektronlar ile dolacaktır. Öte yandan çoğunluk taşıyıcıları bölgeye sürükleyen atım ise yalnızca bölgede boşlukların oluşmasına neden olur ve dolayısıyla dolu olan tüm elektron tuzaklarını boşaltma eğilimindedir. Şekil 2.11, uygulanan atım voltajında azınlık taşıyıcıları (elektron) için oluşan kapasite geçiş sinyalinin bant diyagramı üzerindeki etkisinin şematik gösterimidir. Şekil 2.12 ise yine aynı şekilde bu sefer çoğunluk taşıyıcıları (boşluklar) oluşan kapasite geçiş sinyalinin bant diyagramı üzerindeki etkisinin şematik gösterimidir. Şekil 2.11 ve şekil 2.12’ de tuzakların mekanizmasının kolay anlaşılabilmesi ve basitleştirmek için bant bükülmesini dikkate almadık ve bant diyagramı düz bir şekilde çizildi. Anlatılan örnekteki tuzak mekanizması  $n^+p$  diyot yapısı içindir. Bu mekanizma tüm p-n diyot eklemlerinde ve Schottky diyot yapısı için de geçerlidir. Şekillerde arınma bölgesinin kenarları gölgeli çizgilerle gösterilmiştir. Ayrıca şekil 2.11 ve şekil 2.12’ de arınma bölgesinde yakalama ve emisyon süreçleri ve uygun ön beslemeli atım voltajı öncesinde, sırasında ve sonrasındaki tuzakların elektron işgalini göstermektedir [11,13].

Tuzak konsantrasyonu, tüm tuzak seviyelerinin dolması için gerekli olan atım voltajı ile gerçekleşen kapasite değişimden elde edilir. Denklem 2.20’ de tuzak konsantrasyonu eşitliği  $n^+p$  için verilmiştir [11].

$$N = 2 \left( \frac{\Delta C}{C} \right) (N_A - N_D) \quad (2.20)$$

Burada  $N$  tuzak konsantrasyonu,  $\Delta C$ , doldurma atım voltajı altında  $t=0$  anındaki kapasitedeki değişim,  $C$ , diyotun başlangıç koşullarındaki kapasite değeri,  $(N_A - N_D)$  ise tuzakların gözlemlendiği eklemenin p tarafındaki net akseptör konsantrasyonudur.

Kapasite geçiş sinyali zamanla değişen kapasite değerinin bir fonksiyonudur. Seçilecek iki farklı zamana karşılık gelen kapasite farklı bize DLTS sinyalini oluşturacaktır. Bu seçilebilecek iki farklı zaman değeri oran penceresi olarak isimlendirilir. Ölçüm işlemi malzemenin sıcaklığı değiştirilerek tekrarlandığında seçilen oran penceresi değerlerine göre bir DLTS spektrumu elde edilir. Bu spektrum şekil 2.13' de verilmiştir. Bu yöntem Boxcar DLTS yöntemi olarak isimlendirilir [11].



**Şekil 2.13:** a) Farklı sıcaklıklarda ölçülen kapasite geçiş sinyalinin zamana bağlı değişim grafiği ve b) bu geçiş sinyallerine karşılık gelen sıcaklığa bağlı DLTS sinyal grafiği.

DLTS sinyali, spektrumu oluşturan  $t_1$  ve  $t_2$  zamanlarındaki kapasite değerlerinin farkı olarak tanımlanır. Denklem 2.21' de genel DLTS spektrum sinyal eşitliği verilmiştir [11,13].

$$S(T) = \Delta C(t_2) - \Delta C(t_1) \quad (2.21)$$

Denklem 2.21' deki zamana bağılı kapasite değerinin değişimi, tüm tuzakların dolu olduğu kapasite değerinin üstel olarak değişimi şeklinde ifade edilebilir. Bu ifadelerin eşitliği denklem 2.22 ve denklem 2.23' de verilmiştir [11,13].

$$\Delta C(t_1) = \Delta C(0) \exp\left(-\frac{t_1}{\tau}\right) \quad (2.22)$$

$$\Delta C(t_2) = \Delta C(0) \exp\left(-\frac{t_2}{\tau}\right) \quad (2.23)$$

Burada  $\tau$ ; sıcaklığa bağılı zaman sabiti olup elektron ve boşlukların emisyon hızlarına bağlıdır. Zaman sabiti eşitliği denklem 2.24' de ki gibidir [11,13].

$$\tau = \frac{1}{e_1 + e_2} \quad (2.24)$$

Denklem 2.22 ve denklem 2.23, DLTS spektrum sinyal eşitliği olan denklem 2.21' de yerine yazılırsa DLTS spektrum sinyal eşitliği denklem 2.25' de verildiği gibi olur.

$$S(T) = \Delta C(0) \left[ \exp\left(-\frac{t_2}{\tau}\right) - \exp\left(-\frac{t_1}{\tau}\right) \right] \quad (2.25)$$

DLTS sinyalinin maksimum değeri, DLTS sinyalinin sıcaklığa bağılı zaman sabiti değerine göre türevinin sıfıra eşit olduğu sıcaklık değerine karşılık gelir. Yani maksimum zaman sabiti değeri  $t_1$  ve  $t_2$  seçilen zamanlarını içeren eşitlik denklem 2.27' de verilmiştir [11,13].

$$\frac{dS(T)}{d\tau} = 0 \quad (2.26)$$

$$\tau_{maks} = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} \quad (2.27)$$

Hız penceresi olarak isimlendirilen ve seçilen  $t_1$  ve  $t_2$  değerlerine göre kapasite geçişinin en büyük olduğu yere karşılık gelen tuzağın emisyon hızı ( $e_n$ , buradaki  $n$  elektron veya boşluğa karşılık gelen genel bir ifadedir ve her iki tuzak için de eşitlikler geçerlidir.) denklem 2.28' de verilmiştir [11,13].

$$e_n = \frac{1}{\tau_{maks}} \quad (2.28)$$

Elektron için tuzaktan emisyon hızı ise denklem 2.21’de verilmiştir [11,13].

$$e_n = \sigma_n < \vartheta_n >_{th} N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_T}{k_B T}\right) \quad (2.21)$$

Burada  $\sigma_n$ ; tuzağın yakalama tesir kesit alanı,  $<\vartheta_n>_{th}$ ; elektronun malzeme içerisindeki termal hızı,  $N_C$ ; elektronların iletkenlik bandındaki etkin konsantrasyonu,  $E_C$ ; iletkenlik bandının enerji seviyesi,  $E_T$ ; tuzağın enerji seviyesi,  $k_B$ ; Boltzmann sabiti ve  $T$  ise Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Elektronların termal hızları, elektronların malzeme içerisindeki etkin kütleleri ile orantılıdır ve denklem 2.22 eşitliği ile verilmiştir [11,13].

$$< \vartheta_n >_{th} = \left(\frac{3k_B T}{m_n^*}\right)^{1/2} \quad (2.22)$$

Denklem 2.22 ile verilen eşitlik aynı şekilde boşluklar için de geçerlidir ve eşitlik bu sefer etkin kütle değeri boşluklar için alınarak yazılabilir. Elektronların iletkenlik bandındaki etkin kütle konsantrasyonunun eşitliği denklem 2.23’ de verilmiştir [11,13].

$$N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* k_B T}{h^2}\right)^{3/2} \quad (2.23)$$

Bir tuzağın aktivasyon enerjisi  $E_A$ , tuzağın türüne göre, tuzağın enerji seviyesi ile tuzaktaki parçacığın (elektron ya da boşluk) geçeceği enerji bandı arasındaki enerji farkıdır. Elektron için düşünürsek yukarıdaki denklemleri göz önüne aldığımızda iletkenlik bandındaki elektronların etkin konsantrasyonları ve sıcaklığa bağlı olmayan termal hızlarındaki terimler bir sabit ifade ( $A$ ) altında toplanırsa denklem 2.21 tekrardan şu şekilde yazılabilir;

$$e_n = A T^2 \sigma_n \exp\left(-\frac{E_A}{k_B T}\right) \quad (2.24)$$

DLTS spektrumunda seçilen farklı  $t_1$  ve  $t_2$  değerleri için, yani farklı hız penceresi için emisyon hızlarından elde edilen DLTS sinyalinin tepe noktalarında kayma meydana gelecektir. Bu kayan tepe noktalarına karşılık gelen emisyon hızlarının her birinin, sıcaklığın tersine göre çizilen grafiği Arrhenius grafiği olarak tanımlanır ve bu grafiğin eğimi bize tuzak seviyesinin aktivasyon enerjisini verecektir. Bu eğimin sıcaklık eksenini kestiği değer ise tuzağın yakalama tesir kesiti değerini verir [11,13].

### 3. MALZEME VE YÖNTEM

#### 3.1. ÇİNKO OKSİT VE SERYUM KATKILI ÇİNKO OKSİT NANOYAPILARIN ÖZELLİKLERİ

Çinko oksit (ZnO), endüstri ve teknolojiye uzun süredir kullanılan en popüler yarıiletken malzemelerden biridir. ZnO' nun popülaritesi, oda sıcaklığında geniş bant aralığından (~3,37 eV), cihazın düşük eşik voltajında çalışmasını sağlayan büyük eksiton bağlanma enerjisinden (60 meV), düşük maliyetinden, çevre dostu olmasından ve doğada bol miktarda bulunmasından kaynaklanmaktadır [15,16]. Ayrıca, ZnO' nun wurtzite kristal yapısı GaN (galyum nitrid) ile aynıdır. Ancak farklı olarak ZnO' nun kristal hacmi daha büyüktür. GaN pahalı bir malzeme olmasından dolayı, hemen hemen aynı örgü uyumuna sahip olmasından dolayı ZnO, GaN' a alternatif bir alttaştır [17]. ZnO n-tipi elektriksel iletkenliğe sahiptir ancak elektriksel ve optik özellikleri hala yüksek verimli cihazlar için elverişli olmadığından dolayı birçok araştırmacı kalıcı p-tipi elektriksel özelliğe sahip ZnO elde etmek için çalışmalar yürütmektedir. Kalıcı p-tipi özelliğe sahip ZnO üretmek için pek çok çalışma olmasına rağmen, teorik ve deneysel çalışmalar henüz tekrarlanabilir ve stabil p-tipi katkı ZnO elde edilemediğini göstermiştir [18,19]. Yine de ZnO malzemesi ile yapılan yarıiletken cihazlar birçok alanda kullanılmaktadır. Özellikle bant aralığından dolayı, ultraviyole (UV) ışık yayan diyotlar (LED), yine UV lazer diyotlar (LD) gibi ultraviyole bölgesi için kullanışlı bir malzemedir [19]. Katkısız ve katkı ZnO' nun birçok uygulama alanı vardır. Özellikle gaz sensörleri [20,21], heteroeklem tabanlı biyosensörler [22] ve optik sensörler [23,24], UV fotodedektörler [25–27], alan etkili transistörler [28], UV lazerler [17], optik iletişim ve çok işlevli nano yapıları cihazlar [29]. ZnO' nun bir diğer avantajı ise nanoyapısının, kuantum noktaları (Quantum Dot, QD) [30], nanoteller, nanotüpler [29,31] ve nanoşeritler [32] gibi farklı formlarda üretilebiliyor olmasıdır.

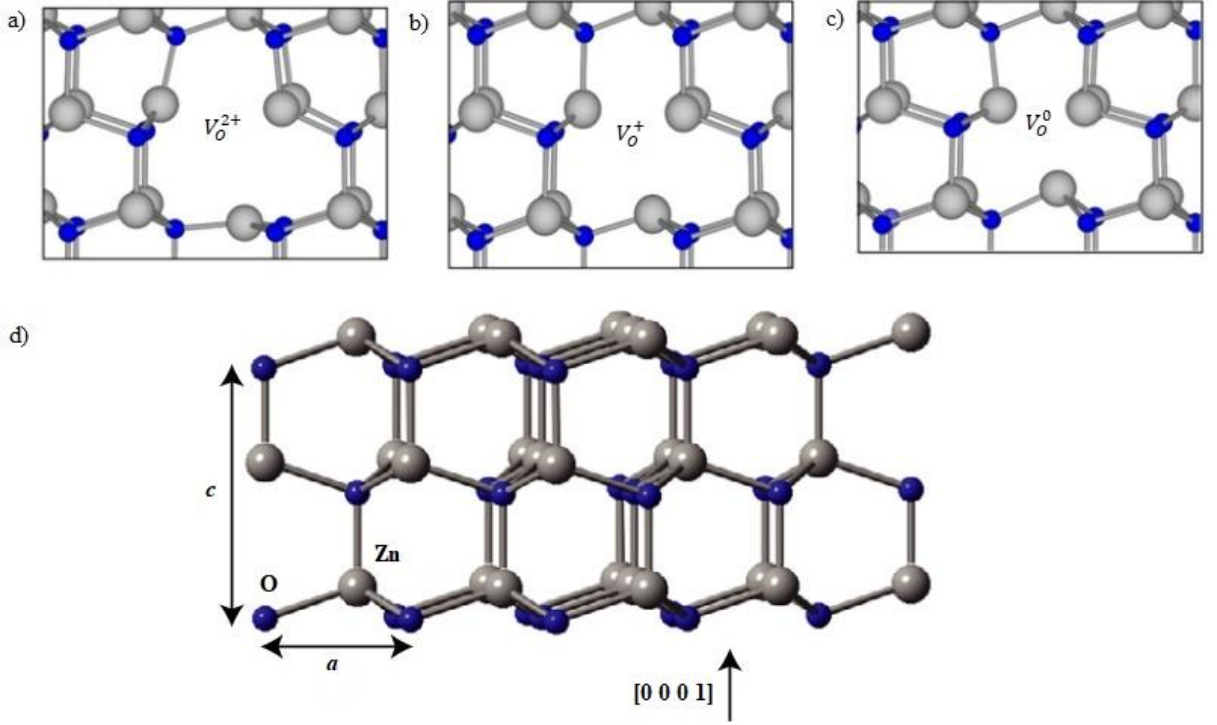
Üretim yöntemlerinde, katkı ve katkı ZnO nanoyapılarının üretimi için mekanokimyasal yanma yöntemi [21], radyo frekansı (rf) sıçratma tekniği [19,25], kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapor Deposition, CVD) yöntemi, darbeleri lazer biriktirme (Pulsed Laser Deposition, PLD) yöntemi [16,24,33], hidrotermal yöntem [31], yoğunlaşma ile geri biriktirme tekniği [34], sprey piroliz tekniği [35], ıslak kimyasal çözelti yolu [36] ve sol-jel tekniği [37]

gibi bir çok üretim tekniği kullanılmaktadır. Etkin kütle ve elektron mobilitesi taşıyıcı konsantrasyonu ile doğrudan ilişkilidir. Yapılan çalışmalarda n tipi ZnO için taşıyıcı konsantrasyonu  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  ile  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  aralığında değiştiğinde, karşılık gelen elektronun etkin kütlesi  $0.23m_0$  ile  $0.26m_0$  aralığında değişmektedir. Ayrıca elektron mobilitesi de  $20.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  ile  $102 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  aralığında değişmektedir [33]. Boşlukların etkin kütlesi ise taşıyıcı konsantrasyonu  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  iken  $0.59m_0$  dır [38]. ZnO' nun dielektrik sabiti yapılan farklı çalışmalarda birbirine yakın olmakla birlikte  $8.5\epsilon_0$  [39] ve  $8.65\epsilon_0$  [16] olarak hesaplanmıştır.

İdeal bir kristal örgüsünde her atom belirlenmiş konumundadır. İdeal yapıdan sapmalara ise kusur denir. Doğal veya bir diğer adıyla içsel kusurlar, yalnızca bileşen elementlerini içeren kristal örgüdeki kusurlardır. Bunlar arasında boşluklar (düzenli örgü konumlarındaki eksik atomlar), aralıklar (örgüdeki aralıkları işgal eden ekstra atomlar) ve antisitler (bir Zn atomunun, bir O örgü konumunu işgal etmesi veya tam tersi) bulunur [18]. Yukarıda belirttiğimiz gibi ZnO genellikle n-tipi elektriksel iletkenliğe sahiptir ve iletkenliği oksijen boşlukları ( $V_o$ ), oksijen ara yer kusuru ( $O_i$ ), oksijen ve çinko atomlarının örgü içerisinde birbirlerinin yerini alması ile oluşan oksijen antisitleri ( $O_{Zn}$ ), çinko antisitleri ( $Zn_o$ ), çinko ara yer kusuru ( $Zn_i$ ), çinko boşlukları ( $V_{Zn}$ ) ve yabancı safsızlık atomlarından kaynaklanan doğal kusurlarla ilişkilidir [18,19,40–42]. Doğal kusurlara ek olarak, tohum tabakası biriktirme, kimyasal banyo biriktirme (Chemical Bath Deposition, CBD) ve sol-jel yöntemi gibi çeşitli yöntemlerle sentezlenen ZnO nanoyapıları, tuzak seviyelerinin oluşumuna yol açan farklı morfolojiler sergiler. Morfolojideki bu farklılıklar çinko boşlukları ( $V_{Zn}$ ), çinko ara yer kusuru ( $Zn_i$ ), oksijen boşlukları ( $V_o$ ) ve oksijen ara yer kusuru ( $O_i$ ) gibi kusurlardan kaynaklanır [42]. 2009 yılında Fan ve arkadaşları, çinko ara yer kusuruna ( $Zn_i$ ) atfedilen 0,25 eV tuzak seviyesinin ZnO varistörlerinin kararlılığıyla yakından ilişkili olduğunu bildirmiştir [43].

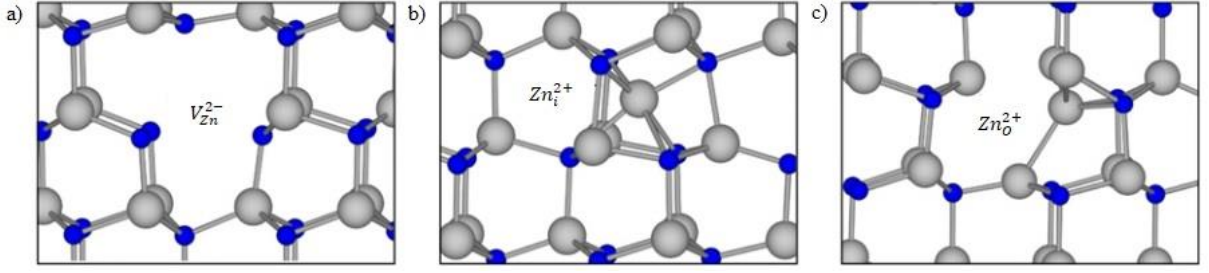
Oksijen boşluğu, ZnO literatüründe en çok bahsedilen kusurdur. Öte yandan, oksijen boşluğu, istem dışı n-tipi iletkenliğin kaynağı olarak en sık öne sürülen kusurdur, ancak son araştırmalar bu atamanın doğru olamayacağını göstermektedir [18]. Oksijen boşluğu, donör gibi davranan kusurlar arasında en düşük oluşum enerjisine sahip olmasına rağmen, yoğunluk fonksiyonel (Density Functional Theory, DFT) hesaplamalar  $V_o$ ' nun sığ bir donör olmaktan çok, derin bir donör olduğunu ve dolayısıyla n-tipi iletkenliğe katkıda bulunamayacağını göstermektedir [18]. Şekil 3.1' de oksijen boşluğunun kristal örgü içerisindeki doğal durumu 0, +1 ve +2 yük durumundaki ZnO kristal yapısının ve ZnO' nun wurtzite kristal yapısı,  $a$  ve

$c$  örgü parametreleri ile gösterimi verilmiştir [18]. Nötr yük durumunda, en yakın dört Zn komşusu denge Zn–O bağ uzunluğunun %12’ si kadar içeriye doğru yer değiştirir. +1 yük durumunda, en yakın dört Zn komşusu %3 kadar dışarıya doğru yer değiştirir ve +2 yük durumunda ise yer değiştirmeler %23 kadar dışarıya doğru olur.



**Şekil 3.1:** a) +2 yük durumu, b) +1 yük durumu ve c) nötr yük durumlarındaki oksijen boşluğu etrafındaki yerel atomik gevşemelerin top ve çubuk modeli d)  $a$  ve  $c$  örgü parametreleri ile ZnO’ nun wurtzite kristal yapısı.

$V_{Zn}$  etrafındaki oksijen atomları, denge Zn–O bağ uzunluğuna göre yaklaşık %10’ luk dışa doğru gevşeme sergiler. Benzer gevşemeler, üç olası yük durumu konfigürasyonu ( $V_{Zn}^0$ ,  $V_{Zn}^-$  ve  $V_{Zn}^{2-}$ ) için de gözlemlenir ve  $V_{Zn}^{2-}$  kusur yapısı şekil 3.2 (a)’ de gösterilmiştir [18]. Bu, çinko boşluğunu çevreleyen oksijen 2p orbitalleri arasındaki örtüşmenin, oksijen atomları arasında önemli kimyasal bağ oluşmasına neden olmak için çok küçük olduğunu gösterir. Gerçekten de hesaplanan O–O mesafeleri yaklaşık 3.5 Å’ dur ve kovalent yarıçapların toplamından (1.46 Å) çok daha büyüktür [18].



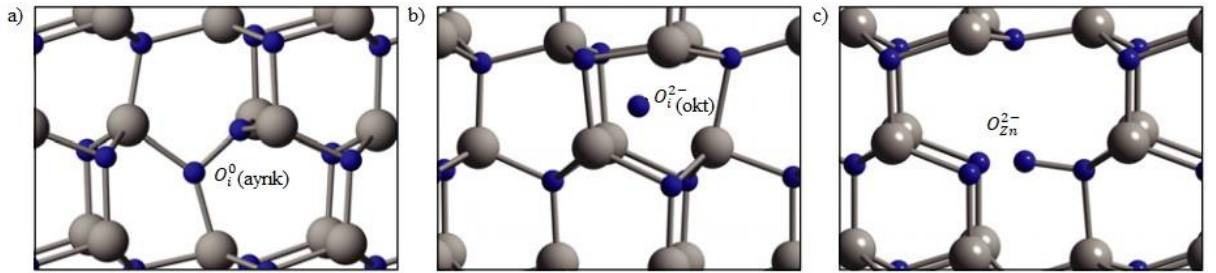
**Şekil 3.2:** a)  $-2$  yük durumundaki Zn boşluğu ( $V_{Zn}^{2-}$ ) için yerel atomik geometrisi, b)  $+2$  yük durumundaki Zn ara yer kusuru ( $Zn_i^{2+}$ ) ve c)  $+2$  yük durumundaki Zn antisitinin yerel atomik geometrisi ( $Zn_O^{2+}$ ).

Bir Zn ara atomu ( $Zn_i$ ) prensipte ZnO wurtzite yapısında tetrahedral bölgeyi veya oktahedral bölgeyi işgal edebilir. Tetrahedral bölgede,  $Zn_i$ 'nin en yakın komşu atomları olarak bir Zn ve bir O atomu vardır ve bunlar  $\sim 0.833d_0$ 'lık bir mesafededir ( $d_0$ , c-ekseni boyunca Zn-O bağ uzunluğudur). Oktahedral bölgede,  $Zn_i$ 'nin en yakın komşuları olarak üç Zn ve üç O atomu vardır ve bunlar  $\sim 1.07d_0$ 'lık bir mesafededir. Boyut değerlendirmelerine dayanarak, Zn ara atomunun geometrik kısıtlamaların daha az şiddetli olduğu oktahedral bölgede daha kararlı olması beklenir. Gerçekten de oktahedral bölgenin  $Zn_i$  için kararlı bölge olduğu, tetrahedral bölgedeki  $Zn_i$ 'nin ise 0.9 eV daha yüksek enerjili olduğu ve kendiliğinden oktahedral bölgeye gevşediği için kararsız olduğu bulunmuştur. Ayrıca, ideal oktahedral alanı işgal etmek yerine, yoğunluk fonksiyonel (Density Functional Theory, DFT) hesaplamalar, c-ekseni boyunca  $Zn_i$ 'nin büyük bir yer değiştirmesini gösterir. Bu da  $1.22d_0$ 'lık artan bir  $Zn_i$ -Zn mesafesi ve  $1.02d_0$ 'lık azalan bir  $Zn_i$ -O mesafesi ile sonuçlanır [18]. GaN' de  $Ga_i$  için c-ekseni boyunca benzer yer değiştirmeler de gözlemlendiği rapor edilmiştir [44]. Şekil 3.2 (b)' de  $Zn_i^{2+}$  kusur yapısı gösterilmiştir.

Diğer doğal kusurlar (çinko antisitleri, oksijen ara yer kusuru ve oksijen antisitleri) daha yüksek oluşum enerjilerine sahiptir ve bu nedenle dengeye yakın koşullar altında ZnO' da bir rol oynamaları beklenmez [18]. Ortaya çıkan  $Zn_O$ -O atomlar arası mesafeler, denge Zn-O bağ uzunluğundan yalnızca %8 daha büyüktür. Bu denge konfigürasyonunda,  $\sim 2,4 \text{ Å}$ 'luk üç  $Zn_O$ -Zn mesafesi ve  $\sim 2,8 \text{ Å}$ 'luk bir  $Zn_O$ -Zn mesafesi bulunur.  $Zn_O$ 'nun bu düşük simetrik konfigürasyonunu bir Zn ara yer kusuru ve bir O boşluğundan oluşan kompleks bir yapı olarak düşünebiliriz [18].  $Zn_O$ 'nun göçü ya da hareketini anlamak için, kusurun oluşmasına neden olan  $Zn_i$  ve  $V_O$  kusur bileşenlerini ayrı ayrı düşünmeyi gerektir ve bu bileşenlerin birbirine bağlı kalıp birlikte mi hareket edeceği yoksa bağımsız mı hareket edeceği sorusu düşünülmelidir.  $Zn_O^{2+}$ 'nin  $Zn_i^{2+}$  ve  $V_O^0$ 'a tahmini ayrışma bariyeri n-tipi ZnO' da 1,3 eV

dir. Bu nedenle  $\text{ZnO}^{2+}$  nun  $\sim 500 \text{ K}$ ' ye kadar sıcaklıklarda kararlı olması beklenir [45]. Bu,  $\text{ZnO}^{2+}$  nun yüksek enerjili elektron ışınlaması gibi denge dışı koşullar altında kasıtlı olarak sokulması durumunda n-tipi iletkenliğe neden olabileceğini düşündürmektedir [46]. Gerçekten de elektron ışınlanmış ZnO üzerinde yapılan son deneyler, ışınlama ile oluşturulan donör kusurlarının  $\text{ZnO}^{2+}$  nin kararlılığıyla tutarlı olarak  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ' de tavlandığını bildirmiştir [47].

Oksijen ara yer kusuru ( $\text{O}_i$ ), prensip olarak, oktahedral veya tetrahedral ara yer bölgelerini işgal edebilir veya ayrık ara yer bölgeleri oluşturabilir. Yoğunluk fonksiyonel hesaplamalar, tetrahedral bölgedeki  $\text{O}_i$ ' nin kararsız olduğunu ve kendiliğinden, fazladan O atomunun en yakın komşu O atomlarından biriyle bir örgü bölgesini paylaştığı ve ayrık ara yer kusurlu bir konfigürasyona evrildiğini veya gevşediğini gösterir [45]. Şekil 3.3 (a)' da  $\text{O}_i(\text{ayrık})$  konfigürasyonunda, O–O mesafesi  $1,46 \text{ \AA}$ ' dur, bu da bant aralığında neredeyse dejeneratif ve tamamen dolu iki durumla birlikte bir O–O kimyasal bağının oluşumunu işaret etmektedir.  $\text{O}_i^0$  (ayrık)' in, O–O bağ uzunluğunun  $1,51 \text{ \AA}$  olduğu en düşük enerji konfigürasyonundan  $\sim 0,2 \text{ eV}$  daha yüksek oluşum enerjisine sahip metastabil bir konfigürasyona sahip olduğu bulunmuştur. Çok farklı O–Zn–O bağ açılarında sahip bu iki neredeyse dejenere konfigürasyonun varlığı, oksijenin ZnO kristaline gömülü bir  $\text{O}_2$  molekülü olarak ayrık ara yer kusuru olduğu fikrini güçlendiriyor. [18,45,48]. Erhart ve Albe ayrıca bu  $\text{O}_i(\text{ayrık})$  ve onun metastabil konfigürasyonu hakkında çalışma yaptılar ve bu kusurların iletkenlik bant minimumu (Conduction Band Minimum, CBM)' na yakın akseptör geçiş seviyeleriyle elektriksel olarak aktif olduğunu öne sürdüler [49].



**Şekil 3.3:** a) Ayrık-ara yer konfigürasyonu;  $\text{O}_i^0(\text{ayrık})$ ' daki oksijen ara yer kusuru için yerel atomik geometrisi b) oktahedral konfigürasyon  $\text{O}_i^{2-}(\text{okt})$ ' daki oksijen ara yer kusuru ve c) ikame bölgesinden büyük bir yer değiştirme gösteren oksijen antisiti  $\text{O}_{\text{Zn}}^{2-}$ .

Oksijen ara yer kusurları, Şekil 3.3 (b)' de gösterildiği gibi oktahedral bölge  $\text{O}_i(\text{okt})$ ' yi işgal eden elektriksel olarak aktif ara yer kusurları olarak da var olabilir ve bant aralığının alt

kısımında iki elektron kabul edebilen durumlar ortaya çıkarır. Bu durumlar oksijenin  $p$  orbitallerinden türetilir ve valans bandı maksimumu (Valans Band Maximum, VBM)' nun 0,72 eV ve 1,59 eV üzerinde derin akseptör geçiş seviyeleriyle sonuçlanır. Şekil 3 (b)' de görüldüğü gibi,  $O_i$ , n-tipi ZnO' da oktahedral aralık bölgesinde  $O_i^{2-}$ (okt) derin akseptör olarak var olabilir [18].

Oksijen antisiti ( $O_{Zn}$ ), en uygun O-zengin koşullar altında bile çok yüksek oluşum enerjisine sahip bir akseptör tipi kusurdur. Bu nedenle,  $O_{Zn}$ ' nin dengede bulunması çok olası değildir. Ancak  $O_{Zn}$ , ışınlama veya iyon aşılama gibi denge dışı koşullar altında potansiyel olarak oluşturulabilir. İdeal Zn bölgesindeki O' nun kararsız olduğu ve kendiliğinden konum dışı bir konfigürasyona evrildiği veya gevşediği bulunmuştur. O atomu  $[0\ 0\ 0\ \bar{1}]$  yönünde 0,7 Å' dan fazla yer değiştirir ve şekil 3.3 (c)' de gösterildiği gibi oksijene en yakın komşularından biriyle kimyasal bir bağ oluşturur [18,45]. O–O bağ uzunluğu, -2 yük durumunda 1,46 Å' dur (kovalent yarıçapın tam iki katı) ve nötr yük durumunda 1,42 Å' dur.  $O_{Zn}$  ile diğer yakın oksijen atomları arasındaki mesafeler yaklaşık 2,0 Å' dur, bu da 0,73 Å' luk oksijen kovalent yarıçapının iki katından çok daha büyüktür, bu da bağın olmadığını gösterir.  $O_{Zn}$ , valans bandı maksimumunun 1,52 eV ve 1,77 eV üzerinde geçiş seviyelerine sahip derin akseptörlerdir [45].

Öte yandan, ticari kullanım için üretilen silisyum (Si) wafer ihmal edilebilir derecede düşük kusur konsantrasyonları nedeniyle neredeyse mükemmel kristaller olarak kabul edilir. Si, ZnO gibi heteroeklemler ve entegre devre teknolojisi için yaygın olarak kullanılan ticari bir yarıiletkenidir. Ancak Si ve ZnO farklı kristal yapılara sahiptir. ZnO wurtzite yapısına sahipken, Si elmas yapısına sahiptir. Bu, ikisinin birleşimiyle oluşan hetero yapıda örgü uyumsuzluğuna yol açarak ZnO/Si arayüzünde kusurlara neden olabilir. Bu kusurlar genellikle optoelektronik malzemelerdeki lüminesansta önemli bir rol oynar. Bazıları ışık verimliliğini azaltacak rekombinasyon merkezleri olarak davranırken, diğerleri ışık için yararlı olan radyasyon merkezleri olabilir [9]. Ayrıca, ışık yayan diyotların (LED) aktif bölgesindeki kusurlar, radyasyonsuz rekombinasyon olasılığının artmasına neden olur [10].

Uygun elementlerle katkılama, ZnO malzemesinin yapısal, optik ve elektriksel özelliklerini geliştirmek ve kontrol etmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Son zamanlarda lantanit katkılı yapılar üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Lantanitler aynı zamanda nadir toprak elementleri olarak da bilinirler. Lantanit iyonları ( $Eu^{3+}$ ,  $Er^{3+}$ ,  $Ce^{3+}$ ,  $La^{3+}$  vb.) katkı

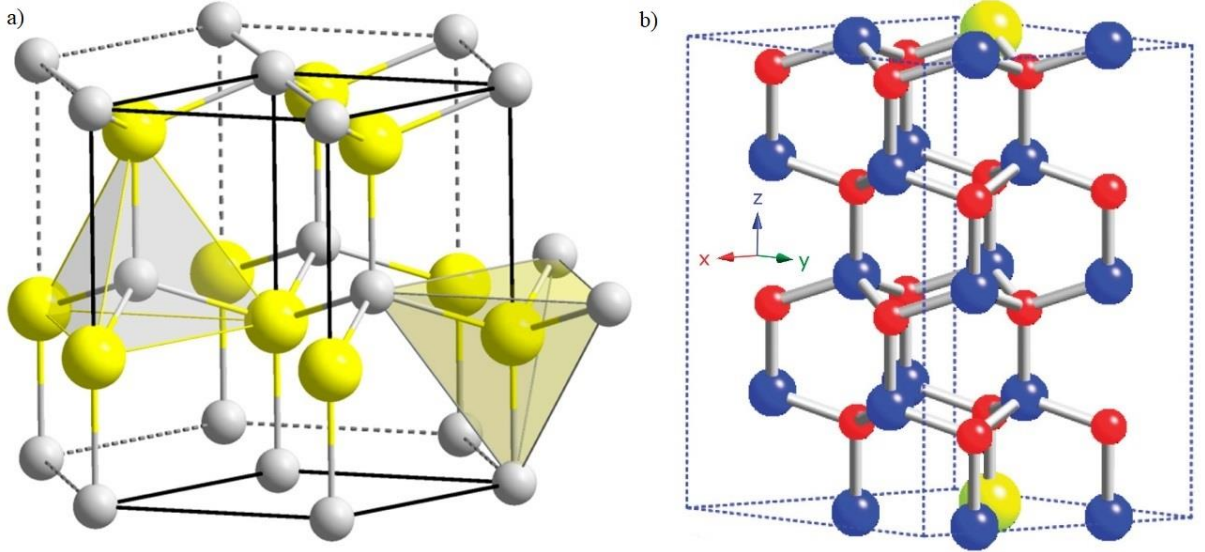
yarıiletkenler teknoloji açısından önemlidir. Lantanit iyonları, enerji transfer süreçleriyle luminesans verimliliğini arttırmak için yarıiletken malzemelerde katkı malzemesi olarak kullanılırlar. Lantanit grubunun ilk elementi olan Ce, ZnO örgüsü için uygun bir katkı elementidir. Ce katkılanması ZnO kristal örgüsünde konak bölgesine yerleşerek, örgüdeki gerilimin artmasına ve bazı yeni tip kusurların, örneğin Zn boşluk kusuru ( $V_{Zn}$ ) gibi kusurların oluşmasına neden olur ve bu nedenden dolayı ZnO' nun emisyon özelliklerini UV bölgeden kırmızı bölgeye kaymasına sebep olur [34]. Ce katkısı yapıda önemli rol oynar, kristal örgü kusurunun ve oksijen boşluğunun artmasına neden olur.  $Zn^{2+}$  ve  $Ce^{4+}$  için ilgili iyonik yarıçapları göz önüne alındığında, kristal örgü içerisinde  $Ce^{4+}$  iyonunun  $Zn^{2+}$  iyonun yerini aldığı olasıdır. Bu durum kusur oluşum reaksiyonuna göre denklem 3.1' deki gibi  $Zn^{2+}$  iyonları yerine  $Ce^{4+}$  iyonları geçebilir [50,51].



Burada  $Ce_{Zn}^{**}$ , ZnO kristal örgüsündeki  $Zn^{2+}$  iyonu yerine  $Ce^{4+}$  iyonunun geçmesinden dolayı kaynaklanan kusurdur ve  $O_0^x$  ise oksijen boşluklarından dolayı oluşan örgü içi kusurlardır [50,51].

Ayrıca iletkenlik bandı altında oluşan  $Ce'$  ye bağlı kusur seviyesi ile birleşerek iletkenlik bandında kaymaya neden olur ve UV emisyonundan kırmızı bölgeye kaymanın sebebi budur ve bant aralığının daralması olarak tanımlanır [50,52]. Öte yandan Ce, Ce-O arasındaki iyonik bağ ve 4f orbitalinin bulunması gibi ana özellikleri nedeniyle ZnO için çeşitli katkı elementleri arasında Ce daha ilgi çekici bir elementtir [53]. Ayrıca kararlı kimyasal yapısı,  $Ce^{3+}/Ce^{4+}$  nın redoks bağlanması ve Ce katkısından dolayı oluşan oksijen boşluklarının nispetten yüksek hareketliliği ve örgünün değişen morfolojik özellikleri üzerindeki kontrol edilebilirliğinden dolayı yine Ce katkı elementi diğer katkı elementleri arasında öne çıkmaktadır [35,37]. Ce katkısı parçacıkların bir araya toplanmasını ve büyümesini kısıtlar. Dolayısıyla spesifik yüzey alanını artırır ve serbest yüklerin yapıdan ZnO yüzeyine hızla geçebilmesi nedeniyle ZnO' nun fotokatalitik performansını etkili bir şekilde geliştirir [54]. Bu geliştirme alüminyum (Al) katkılı ZnO ile benzer sonuçlarla karşılaştırılabilir [55]. Ce atomlarının aseton ve etanol molekülleriyle iyi kimyasal etkileşimi nedeniyle Ce katkı maddesi bu gazların algılanmasına yönelik tepki süresini iyileştirir. Böylece Ce katkılı ZnO sensörü, nefes analizi ile tip-1 diyabet hastalarının tespit edilmesinde kullanılabilir [35].

Dahası, Ce katkısı dielektrik sabitinde bir artışa ve piezoelektrik katsayının iyileştirilmesine yol açar [36]. ZnO'yu Ce ile katkılamak, valans bandı ile iletkenlik bandı arasında yeni bir lokalize seviyenin ortaya çıkmasına neden olur. Bu, Ce katkılı ZnO'nun (Ce:ZnO) dejenere bir yarıiletken olduğunu gösterir. Ara bandın ortaya çıkması yapının optik performansını iyileştirir. Ce:ZnO'nun elektronik yapısı göz önüne alındığında ise; Nadir toprak elementleri sıklıkla diğer elementlerle üç değerlikli bileşikler oluştururken, ZnO'daki Zn atomunun ortalama kimyasal değeri iki değerlidir. Bu nedenle, bir Zn atomunun bir Ce atomuyla yer değiştirmesi Ce:ZnO'da fazladan bir elektrona karşılık gelir; Sistem elektronegatiflik gösterir. Bu fazladan elektron kolayca kaybolur ve bu da elektriksel nötrlüğe yol açar. Fermi seviyesi elektron eksikliğiyle aşağı doğru hareket eder [36,52]. Bu sonuçlar, Ce'nin ZnO yapısı için yalnızca uygun ve araştırmaya değer bir katkı maddesi olmadığını, aynı zamanda Ce:ZnO'nun umut verici bir optik malzeme olduğunu ve optoelektronik uygulamalar ve cihazlar için potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Şekil 3.4' de ZnO ve Ce:ZnO'nun kristal yapıları gösterilmiştir [52,56].



**Şekil 3.4:** a) ZnO wurtzite hücresi, Zn sarı, O gri, her iki atom tipi için de tetrahedral koordinasyon gösterilmektedir b) Optimize edilmiş Ce:ZnO kristal yapısı. Kırmızı, mavi ve sarı küreler sırasıyla O atomlarını, Zn atomlarını ve Ce atomlarını temsil eder.

### 3.2. SOL-JEL YÖNTEMİ İLE NANOYAPILARIN SENTEZLENMESİ

“Sol” ler ve “jel” ler, uzun zamandır doğal olarak var olduğu bilinen iki madde biçimidir. Mürekkep, kil gibi çeşitli materyallerin yanı sıra göz vitreusu, kan, serum ve süt gibi birçok maddeyi içerirler. Soller ve jeller uzun zamandır bilimsel ilgi odağı haline gelmiştir.

Laboratuvarda hazırlanan en eski sollar 1853 yılında Faraday tarafından altın ile sentezlenmiştir ve günümüzde hala stabildirler [57].

Jellere gelince, doğal olarak bulunan bazı silika jeller dışında, jellerin sentezi ancak 19. yy' da gerçekleştirilebilmiştir. Ebelmen 1846' da ilk silika jeli üretmiştir ve Cossa ilk alümina jeli 1870' te sentezlemiştir [57]. Uzun bir süre boyunca sollar ve yalnızca bilimsel açıdan ilgi çekiciydi. Ancak son derece yüksek spesifik alanları, onları kataliz alanında giderek daha çekici hale getirdi. 1960' lı yılların başlarında İngiltere' de kil ve nükleer yakıt oksitleri ile Matijevic' in kontrollü boyut ve şekle sahip koloidal parçacıkların üretimine yönelik çalışmaların ardından, daha teknik kullanıma yönelik malzemeler üretildi. 1970' li yıllardan buyana jeller ve inorganik koloidler alanında giderek artan sayıda bilimsel yayınlar yapılmaktadır. Bu yüksek teknoloji malzemeler, potansiyel olarak giderek ilgi çekici hale geldi ve bunlarla ilgili uygulamalar giderek arttı öyle ki bazıları zaten ticarileştirildi. Yeni sol-jel prosesleri artık yeni ve daha iyi ürünlere yönelik mevcut ihtiyacı en azından bir dereceye kadar karşılayabilmektedir. Yüksek saflıkta nano boyutta tozlar, incefilmler, nükleer yakıtlar, elektronik bileşenler ve yarıiletkenler ve de manyetik malzemeler artık sol-jel teknikleriyle üretilmektedir. Tekrarlanabilir homojen kompleks malzemelerin üretiminin gerekli olduğu durumlarda sol-jel tekniği çok faydalı bir yöntemdir. Aslına bakılırsa sol-jel tekniği genellikle “kimya yolu ile daha iyi malzemelere” giden yol olarak kabul edilir. Ancak fiziğin temel yönleri de çok önemlidir ve ihmal edilmemelidir. Bu yönler, özellikle DLVO teorisini, jelleşmenin süzülme yaklaşımını ve daha genel olarak mekanik veya manyetik herhangi bir özelliğin “ultrayapı” tasarımını (yani çok küçük atom kümeleri ölçeğinde) içerir [57].

Sol-jel tekniği görece ucuz olması, üretim aşamasının yine görece kolay olması, tekrarlanabilirliği ve kontrol edilebilirliğinin kolay olması açısından oldukça kullanışlı ve hızlı sonuç elde edilebilen bir yöntemdir.

Teknik açıdan bakacak olursak; sol, bir sıvı içindeki koloidal parçacıkların (nanopartiküller) kararlı bir süspansiyonudur. Parçacıklar amorf veya kristal olabilir ve yoğun, gözenekli veya polimerik altyapılara sahip olabilir. Dahası alt koloidal kimyasal birimlerin toplanmasından oluşabilir. Öte yandan, jel, sürekli bir sıvı fazı (ıslak jel) çevreleyen ve destekleyen gözenekli, üç boyutlu olarak sürekli bir katı ağdan oluşur. Oksit malzemelerin sentezi için çoğu sol-jel sisteminde jelleşme (yani jellerin oluşumu), sol parçacıkları arasında kovalent bağların oluşmasından kaynaklanır. Van der Waals kuvvetleri veya hidrojen bağları gibi diğer bağlar

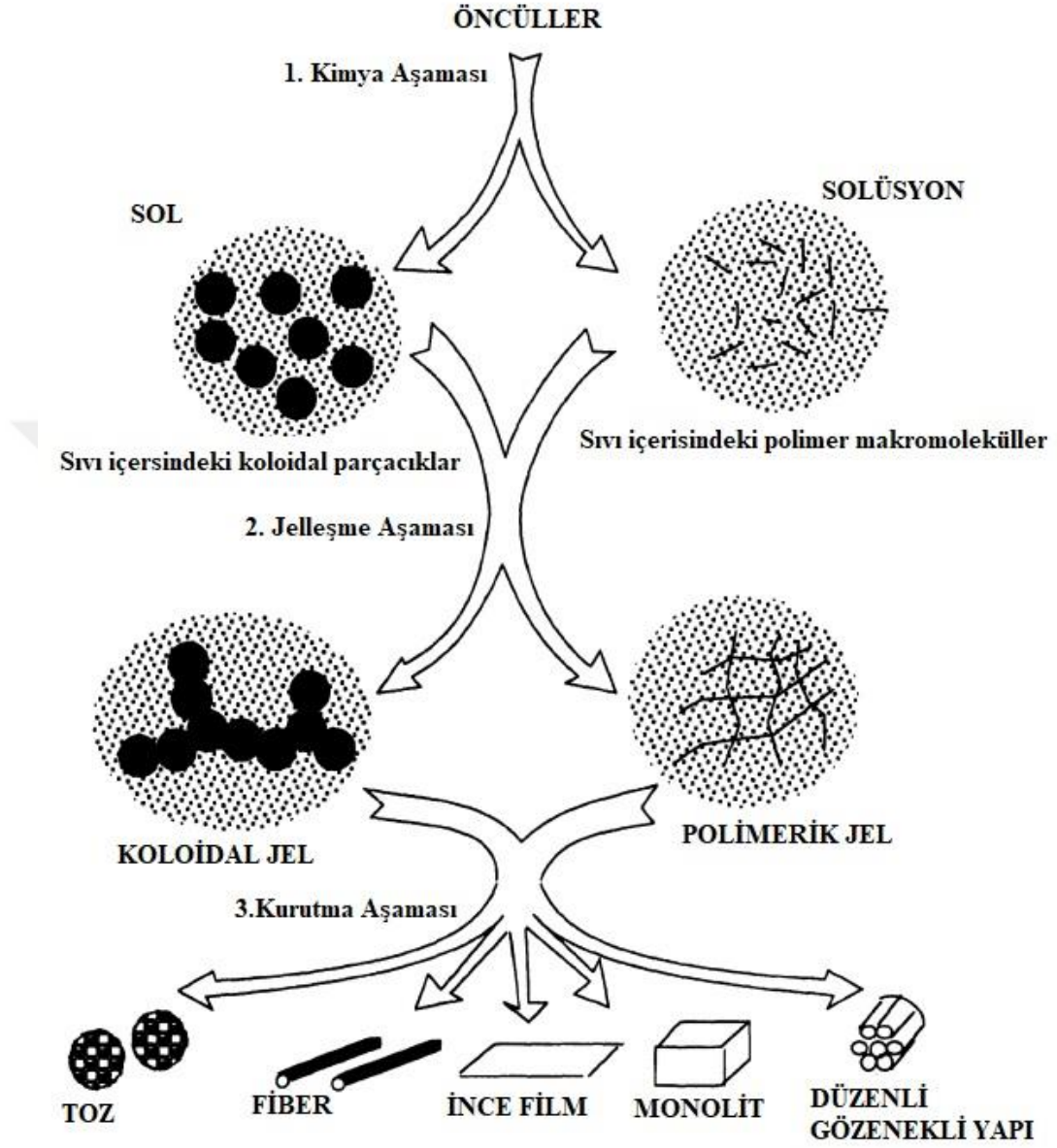
söz konusu olduğunda jel oluşumu tersine çevrilebilir. Bir jel ağının yapısı büyük ölçüde sol parçacıklarının boyutuna ve şekline bağlıdır [58].

Bir sol' ün var olması için, çevredeki sıvıdan daha yoğun olan katı parçacıkların boyutları, dağılımdan sorumlu kuvvetlerin yerçekimi kuvvetinden daha büyük olmasını sağlayacak kadar küçük olması gerekir. Üstelik bu parçacıkların makroskobik açıdan önemli sayıda atom içermesi gerekir. Pratikte koloidal bir sol içindeki parçacıkların 2 nm ile 0.2  $\mu\text{m}$  arasında bir boyuta sahip olması gerekir ve bu da parçacık başına  $10^3$  ile  $10^9$  atoma karşılık gelir. Sol' ün koloidal parçacıklarını stabil bir şekilde dağıtmak için kullanılan çözücü genellikle ya saf sudur ya da sudan oluşan bir çözeltidir. Ancak alkol gibi başka çözücüler de kullanılabilir [57].

Jel, sıvı bir ortam boyunca stabil bir şekilde genişleyen ve yalnızca kabın boyutuyla sınırlı olan, gözenekli ve 3 boyutlu olarak birbirine bağlı bir katı ağıdır. Bu katı ağ koloidal sol parçacıklarından yapılmışsa jel' in koloidal olduğu söylenir. Katı ağ alt-koloidal kimyasal birimlerinden oluşuyorsa jel polimeriktir. Flory tarafından tanımlandığı gibi bir polimer, yapısı “bir veya birkaç temel birimin tekrarı” yoluyla oluşturulabilen bir molekül grubudur. İnorganik sol ve jel' lerin ise büyük bir çeşitliliği vardır. Jel' lerin doğası, katı ağ ile sıvı ortamın bir arada bulunmasına bağlıdır. Sıvı, jel' i oluşturan katı ağ arasında bulunur. Kendiliğinden akamaz ve katı ağ ile termodinamik dengededir. Sıvı çoğunlukla sudan oluşuyorsa ve bu sulu faz büyük oranda mevcutsa buna karşılık gelen jel hidrojel olarak isimlendirilir. Hidrojel, bıçakla kolayca kesilebilen yumuşak bir malzemedir. Öte yandan sıvı faz büyük ölçüde alkolden oluşuyorsa jel, alkojel olarak isimlendirilir. Son olarak, eğer sıvının çoğu uzaklaştırılırsa, elde edilen kırılgan katı kurutma yöntemine bağlı olarak ya kserojel ya da aerojel olarak adlandırılır. Bunlara daha basit olarak kuru jeller de denebilir [57].

Yeterince hızlı soğutma ile termodinamik olarak uygun kristal yapı önlenir, hızlı ve neredeyse geri dönüşümü olmayan reaksiyonlar sol-jel malzemelerdeki amorf ağ yapılarının nedenidir. Bu nedenle sol-jel malzemeleri, daha sonraki malzemelerin yapı taşlarını oluşturan moleküler öncüllerden kinetik olarak kontrol edilen reaksiyonlarla oluşan yarı kararlı katılardır. Buradan ortaya çıkan sonuç, öncül özelliklerde dahil olmak üzere tüm reaksiyon parametrelerinin, sol-jel materyalinin yapısı ve dolayısıyla özellikleri üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olmasıdır [58].

Şekil 3.5’ de sol-jel prosesinin özetinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.5: Sol-jel üretim sürecinin şematik gösterimi.

Basit bir sinterleme sonrasında kırılmayı önleyen tamamen monolitik bir işlem kullanılarak küçük seramik parçalarının sentezlenmesi de mümkündür. Ayrıca gözeneklerin boyutu süperkritik kurutma veya yüzey aktif maddelerinin (sürfaktan) kullanımıyla da kontrol edilebilir. Sol-jel süreci sadece şekil 3.5’ deki gibi sabit bir rota uygulaması zorunluluğu yoktur. Pek çok farklı rota ve keşfedilmemiş pek çok ara yol mevcuttur [57].

Tez çalışmasında katkısız ZnO ve Ce katkılı ZnO nanoyapılarının üretimi için sol-jel tekniği kullanılmıştır. Nanoyapıların üretimi İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Nanoteknoloji Araştırma Laboratuvarında yapılmıştır.

Sol-jel ile nanoyapıları sentezleme aşamasında, çinko kaynağı olarak çinko asetat dihidrat (99.999%, eser metaller bazında), seryum kaynağı olarak ise seryum (III) nitrat hekzahidrat (99%, eser metaller bazında) kullanılmıştır. Alkol bazlı çözücü olarak ise 2-metoksietanol (ACS reaktif, 99.5%) ve stabilizer olarak da etanolamin (ACS reaktif, 99%) kullanılmıştır. Tüm kimyasallar Sigma-Aldrich (Germany) firmasından temin edilen kimyasallardır.

Tez çalışmasında katkısız ZnO nanoyapısının sentezlenmesi;

Molarite oranı 0.3 M olacak şekilde 50 ml 2-metoksietanol içerisine 3.292 gr çinko asetat dihidrat hassas tartıda tartılıp eklendi. Daha sonra manyetik karıştırıcıda çözelti 15 dakika karıştırıldı. Bu sırada çözeltinin sıcaklığı 80 °C olacak şekilde manyetik karıştırıcının sıcaklığı ayarlandı. Sıcaklık 15 dakika sonunda 80 °C ulaştığında üzerine molar oranı 1:1 olacak şekilde yaklaşık olarak 0.9 ml etanolamin eklendi ve sabit sıcaklıkta 90 dakika dakikada 400 devirde karıştırıldı. Stabilizer eklenene kadar beyaz olan çözelti rengi, stabilizer eklendiğinde şeffaf bir hal aldı. İşlem sonunda ısıtıcı kapatılıp hazırlanan solüsyon oda sıcaklığına gelinceye kadar karıştırılmaya devam edildi ve sonunda solüsyon uygun saklama kabına alındı.

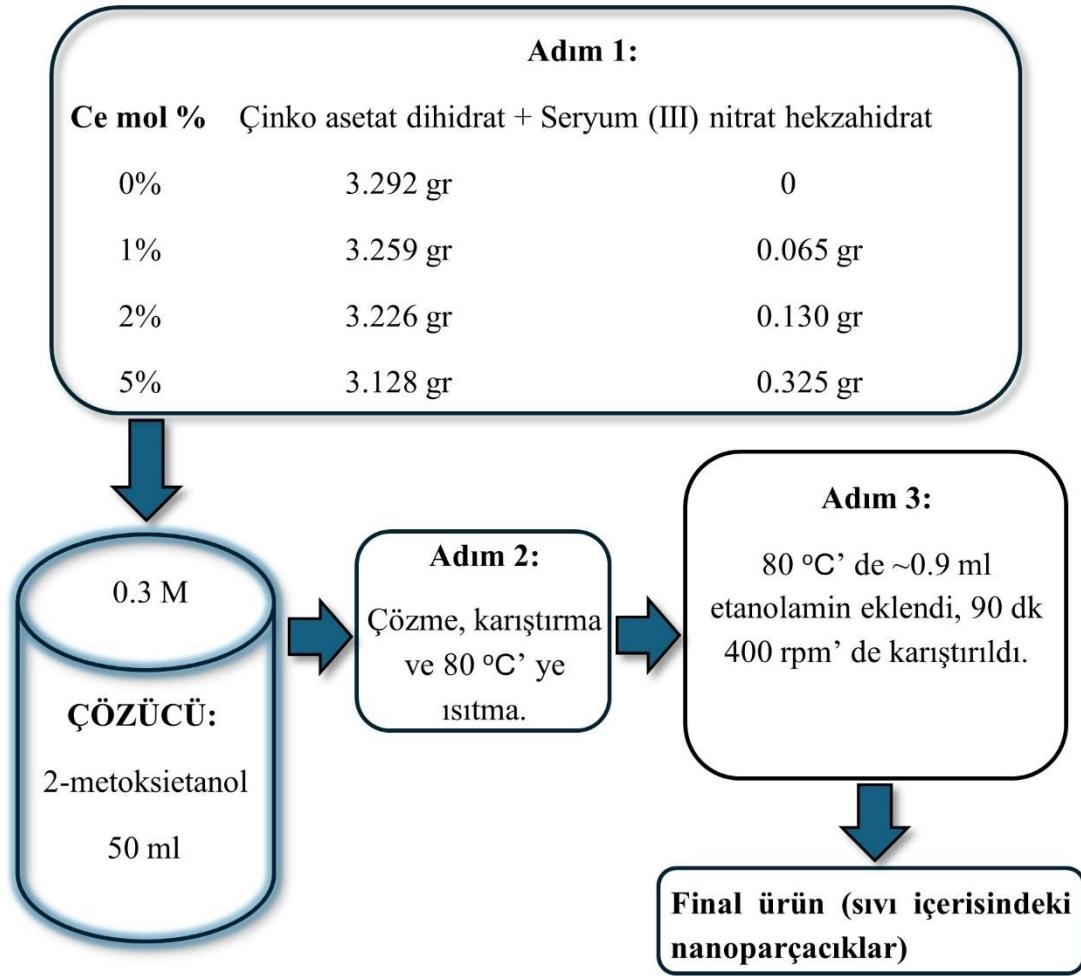
1% Ce katkılı ZnO nanoyapısının sentezlenmesi;

Molarite oranı 0.3 M olacak şekilde 50 ml 2-metoksietanol içerisine 3.259 gr çinko asetat dihidrat ve 0.065 gr seryum (III) nitrat hekzahidrat hassas tartıda tartılıp eklendi. Daha sonra manyetik karıştırıcıda çözelti 15 dakika karıştırıldı. Bu sırada çözeltinin sıcaklığı 80 °C olacak şekilde manyetik karıştırıcının sıcaklığı ayarlandı. Sıcaklık 15 dakika sonunda 80 °C ulaştığında üzerine molar oranı 1:1 olacak şekilde yaklaşık olarak 0.9 ml etanolamin eklendi ve sabit sıcaklıkta 90 dakika dakikada 400 devirde karıştırıldı. Stabilizer eklenene kadar beyaz olan çözelti rengi, stabilizer eklendiğinde şeffaf bir hal aldı. İşlem sonunda ısıtıcı kapatılıp hazırlanan solüsyon oda sıcaklığına gelinceye kadar karıştırılmaya devam edildi ve sonunda solüsyon uygun saklama kabına alındı.

2% ve 5% Ce katkılı ZnO nanoyapıların sentezlenmesi;

Molarite oranı yine 0.3 M, çözücü miktarı 50 ml, karıştırma hızı 400 devir ve süre miktarları da aynı olacak şekilde; 2% Ce katkılı ZnO nanoyapısının sentezinde 3.226 gr çinko asetat dihidrat ve 0.130 gr seryum (III) nitrat hekzahidrat kullanılmıştır. Öte yandan 5% Ce katkılı ZnO yapısının üretiminde ise 3.128 gr çinko asetat dihidrat ve 0.325 gr seryum (III) nitrat hekzahidrat kullanılmıştır. Sentezleme aşamasındaki gözlemler ve sentezleme sonrası yapılan işlemler üretilen bütün nanoyapılar için aynıdır.

Şekil 3.6' da tez çalışmasında sentezlenen katkısız ZnO ve Ce katkılı ZnO nanoyapılarının üretim şeması verilmiştir. Şekil 3.6' daki şemayı daha iyi anlamak ve üretim sürecinin netleşmesi için, şema üzerinden, örneğin adım 1 aşamasında 5% mol Ce katkılı ZnO üretiminde, 3.128 gr çinko asetat dihidrat ile 0.325 gr seryum (III) nitrat hekzahidrat önceden hazırlanmış 50 ml 2-metoksietanol içerisine eklenerek toplamda 0.3 M çözelti elde edildi. Adım 2' de çözme, karıştırma (400 rpm) ve çözelti sıcaklığının 80 °C' ye getirilmesi aşaması yapıldı. Çözelti 80 °C' ye geldiğinde ise ~0.9 ml etanolamin çözeltiye damla damla eklendi ve 90 dk 400 rpm de karıştırıldı. Daha sonra çözelti oda sıcaklığına geldiğinde uygun saklama kabına alındı.



**Şekil 3.6:** Sentezlenen katkısız ZnO ve Ce katkılı ZnO nanoyapılarının üretim şeması.

### 3.3. HETEROEKLEMLERİN HAZIRLANMASI

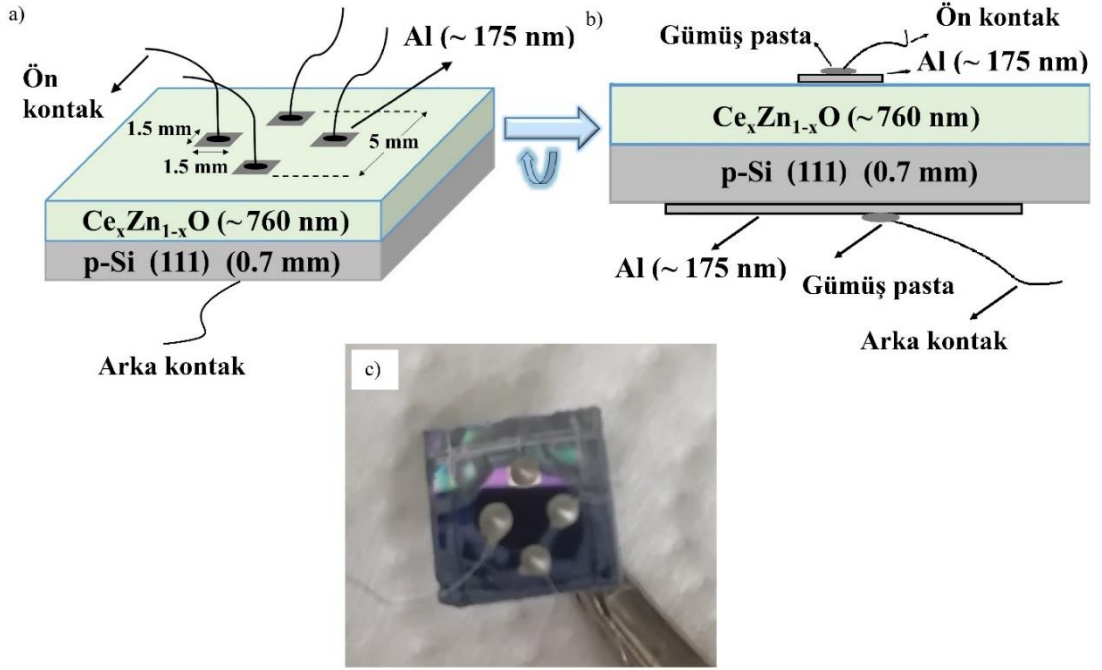
Sol-jel yöntemi ile hazırlanan nanoyapılar boron (B) katkılı Si (111) (p-Si) (MTI Corporation (USA)) üzerine döndürme kaplama yöntemi ile kaplanmıştır. Si kristalinin kalınlığı 0.65–0.7 mm olup direnci ise 5–10  $\Omega\text{cm}$ ' dir. Silisyum wafer, kaplama işlemine hazır hale getirilmek için 1 cm x 1 cm ebatlarında kesildi. Üzerinde kalabilecek toz tanelerinden kurtulmak için yüzeyleri kuru hava pompası ile temizlendi. Kesilen p-Si' ların yüzeyleri önce özel tozsuz ve çizmeyen peçete ile aseton ve alkol kullanılarak kesim sırasında üzerlerinde oluşmuş olacak kir tabakasından temizlendi. Daha sonra hassas yüzey temizliği için ISOLAB marka ultrasonik banyo içerisinde önce alkol sonra aseton ile 2 şer dakika temizlendi. Sonra p-Si yüzeyini üzerindeki oksit tabakayı temizlemek için 1:10 oranında hidroflorik asit (HF, %42) çözeltisinde 5 dk bekletildi. Daha sonra saf su içerisinde alınarak uygun saklama kabına koyuldu.

Omik arka kontakların oluşturulması için, hazırlanan p-Si' lar, uygun maskeler kullanılarak arka yüzeyleri yaklaşık 175 nm kalınlıkta olacak şekilde alüminyum (Al) (99.999%) ile kaplandı [59–61]. Kaplama işlemi Edwards Model 6E (Edwards, UK) termal evaporatör cihazı ile  $\sim 10^{-6}$  mbar vakum altında yapıldı.

Arka kontak noktası hazırlanan p-Si' ların ön yüzeyleri hazırlanan nanoparçacıklar ile döndürme kaplama yöntemi ile kaplandı. Kaplama işlemi ISOLAB marka ayarlanabilir mikropipetler kullanılarak her bir kat için 20  $\mu$ l ve damla damla olacak şekilde damlatılarak kaplama yapıldı. Kaplama esnasında döndürme hızı ise dakikada 2000 devir olarak ayarlandı. Her kaplama arasında ara ısıtma uygulandı. Bu ara ısıtmanın amacı, kaplama sonrasında ikinci kat kaplamayı yapabilmek için önceki kaplamadan kalan artık sıvı çözeltiden kurtulmak ve önceki kaplamanın yüzeye daha iyi tutunmasını sağlamaktır. Bu ara ısıtma işlemi atmosfer altında yaklaşık 250 °C' de 2 dk olarak uygulanmıştır. Kaplama döngüsü üç kez tekrarlandı ve toplam kaplama miktarı 3 kat olarak uygulandı. Sonrasında hazırlanan heteroeklemler için fırınlama işlemi yapıldı. Fırınlama işlemi MAGMATHERM MT 1305-E4 marka ve model kapalı fırın içerisinde dakikada 4 °C artacak şekilde 450 °C' de 1 saat tavlama işlemi yapıldı. Bu tavlama işleminin amacı ise ara ısıtmada tamamen kurtulamadığımız organik bileşiklerden arınmak ve daha iyi kristal yapısı elde etmektir [37]. Son olarak üst yüzey omik kontakları için termal evaporatör işlemi uygun maske kullanılarak Al ile yine kaplama kalınlığı 175 nm olacak şekilde tekrarlandı [62]. Hazırlanan heteroeklemin şematik gösterimi ve bir adet örneğe ait gerçek bir görsel şekil 3.7' de verilmiştir.

Sol-jel yöntemi ile üretilen nanoyapılar ile hazırlanan heteroeklemleri Ce katkı miktarına göre isimlendirirsek;

$Ce_xZn_{1-x}O$ :  $x=0, 1, 2$  ve 5 mol% için hazırlanan heteroeklemlerin isimleri sırasıyla uZnO, CeZ1, CeZ2 ve CeZ5 olarak isimlendirildi. Burada uZnO' yu katkısız ZnO olarak tanımladık.



**Şekil 3.7:** a) Heteroeklemlerin yapısının şematik gösterimi b) heteroeklemlerin yan kesit görüntüsünün şematik gösterimi ve c) üretilen heteroeklemin gerçek bir fotoğrafı.

### 3.4. AKIM-VOLTAJ, KAPASİTE-VOLTAJ VE DLTS ÖLÇÜM SİSTEMİ

Bir yarıiletken cihazın hem kontak yapılarının belirlenmesi hem de diyot karakteristiği gösterip göstermediğinin belirlenmesi için I-V ölçümü büyük önem arz etmektedir. Bir p-n ekleminde, sadece p-n ekleminin analizinin yapılabilmesi için kontaklar omik kontak olmalıdır. Dolayısıyla, eğer kontaklar Schottky kontak özelliği gösteriyorsa, p-n eklemi analizi için uygun kontak değildirler. Diyot yapısında olan bir yarıiletken aygıt geri besleme durumunda akımı geçirmezken, ileri besleme durumunda kırılma voltajından itibaren geçirdiği akımda üstel bir artış olması gerekir. Kaçak akım, uygulanan elektrik alan etkisi ile malzeme içerisindeki elektron boşluk çiftlerinin hareketi olarak tanımlanır. Yarı logaritmik I-V grafiğinden, geri besleme voltajı değerine göre kaçak akım hesaplaması yapılır. Geri besleme durumunda, kaçak akım ne kadar düşük ise diyot, o kadar iyi bir doğrultucu görevi görmektedir. İleri besleme durumunda, kırılma voltajı ne kadar küçük ise ve üstel artış ne kadar büyük ise diyot da o kadar iyi bir diyot yapısındadır. Bu özellikler diyotun kalitesini belirlemede kullanılır. Ayrıca farklı sıcaklıklarda bu ölçümler tekrarlanarak diyotun sıcaklığa karşı değişimi gözlemlenir ve diyotun elektriksel özelliklerinden dolayı sıcaklık düştükçe geri besleme durumunda kaçak akımın azalması ve ileri besleme durumunda da kırılma voltajının artması beklenir. Ayrıca DLTS ölçümleri sıcaklığa bağlı ölçümler olduğu için diyottan geçen

akımın, diyotun aşırı ısınmasına sebep olup ölçümleri etkilemesi istenmeyen bir durumdur. Böyle bir diyot DLTS ölçümü için uygun değildir. Dolayısıyla, DLTS analizi için kullanılacak diyotun direnci düşük olmalıdır.

Kaçak akım, kapasite ölçümü yapılmak istenen diyotta kapasite değerinin düşmesine neden olur ve kapasite ölçümlerini olumsuz yönde etkiler. Dolayısıyla da DLTS ölçümleri de arınmış bölgenin kapasite ölçümlerine doğrudan bağlı olduğu için olumsuz yönde etkilenir. Özetle kaçak akım ne kadar küçük ise heteroeklem için yapılacak elektriksel ölçümlerin tümü daha tutarlıdır.

Öte yandan C-V ölçümünün temeli uygulanan potansiyel ile arınmış bölgedeki yük miktarındaki değişimine dayanmaktadır. Uygulanan potansiyele bağlı arınmış bölgedeki yük miktarı ölçülen kapasite değeri ile denklem 3.2 kullanılarak hesaplanır.

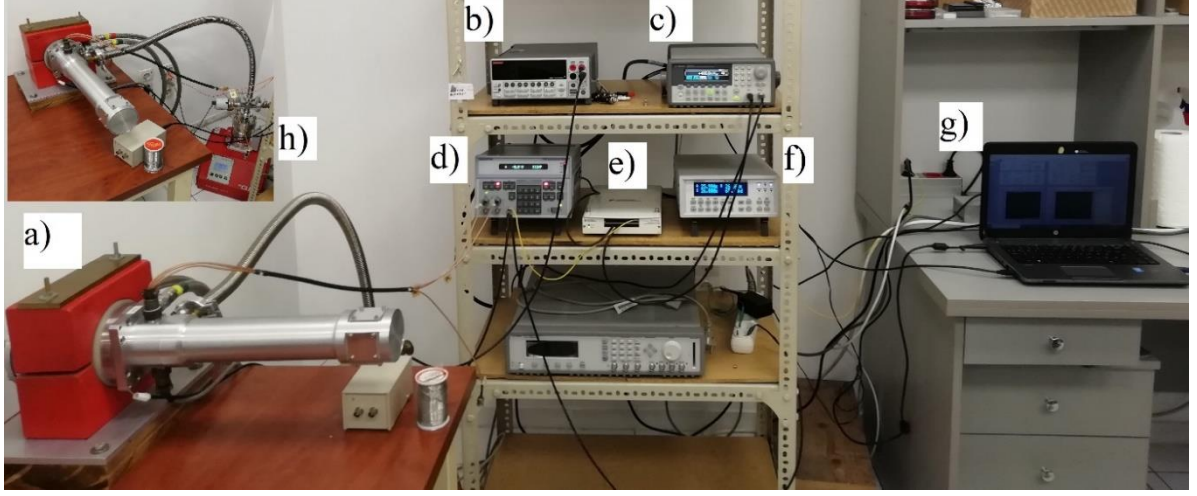
$$C = \frac{A}{2} \sqrt{\frac{2q\epsilon N_d}{(V_{bi}+V)}} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2' de uygulanan geri besleme potansiyeli (V) ile heteroeklemin kapasitesi küçülmektedir. Uygulanan ileri besleme potansiyeli (V) ile de heteroeklemin kapasitesi büyümektedir. Kapasite değerinin karesinin tersinin ( $1/C^2$ ), uygulanan voltaja göre grafiği çizilirse, bu grafiğin voltaj eksenini kestiği noktadan kontak potansiyeli ( $V_{bi}$ ) değeri bulunur.

Kapasite-voltaj (C-V) ölçümleri, 0,1 V' luk artışlarla -4 V ile 1 V arasında artan voltajla sabit 1 MHz frekansında gerçekleştirildi. Farklı sıcaklık aralığında (15 K – 300 K) C-V ölçümleri alınarak heteroeklemlerin diyot karakteristikleri incelenmiştir.

DLTS ölçüm sistemi temelde heteroekleme uygulanan besleme potansiyeli ve atım voltaj değeri ile arınmış bölge genişliği değiştirilerek elde edilen kapasite geçiş sinyal değerindeki sıcaklığa bağlı değişiklikleri analiz yöntemine dayanmaktadır. Sıcaklığa bağlı ölçümlerde arınmış bölge genişliği değiştirilerek, arınmış bölge civarındaki varsa tuzak seviyeleri tespit edilir. Bu tuzak seviyelerinde yakalanmış yükler varsa, bu yüklerin hangi sıcaklıkta bulunduğu tuzak seviyesinden yükün türüne göre (elektron ya da boşluk) bağlı olduğu (yakın) bant seviyesine geçiş enerjisi hesaplanabilir. Bu enerji de o tuzagın aktivasyon enerjisi değerini verir.

Tüm bu ölçümleri gerçekleştirebilmek için yüksek hassasiyetli ölçüm ve kontrol cihazlarına ihtiyaç vardır. Tez kapsamında, akım-voltaj ölçümleri için Keithley 2400, atım voltaj jeneratörü için Agilent 33250A, kapasite ölçümü ve kapasite geçiş sinyallerinin ölçümü için Boonton 7200 LRC marka ve model yüksek hassasiyetli cihazlar kullanıldı. Burada C-V ölçümleri için doğru akım (DC) kaynağı olarak Agilent 33250A fonksiyon üretici kullanıldı. DLTS ölçümleri için ise atım (darbe) sinyali aynı Agilent 33250A sinyal kaynağı kullanılarak üretildi. Sıcaklık kontrolcüsü olarak ise Lakeshore 331 model cihaz kullanıldı. Bu cihazların birbirleri ile iletişiminin sağlanabilmesi için NI-GPIB HS+ model dijital kontrolcü kullanıldı. Uygulanan atım voltajı, ölçülen akım, kapasite ve voltaj değerleri analog sinyallerdir. Dolayısıyla bu değerlerin ölçülüp verilerin toplanması ve bilgisayara aktarılabilmesi için dijitalden analoğa dönüştürücü cihaza ihtiyaç vardır. Dijital-analog kontrolcü olarak NI-USB-6251 çok fonksiyonlu I/O (girdi/çıkı) cihazı kullanıldı. Bilgisayar kontrol ve analiz yazılımı için ise LabVIEW programı kullanıldı. Bütün elektriksel ölçümler ARS DE-202 model kapalı soğutma (sıvı helyum çevrimi ile) sistemi içerisinde yapıldı. Sistem tamamen kapalı olup PFEIFFER-HiPace 80 model vakum cihazı ile ölçümler  $4.6 \times 10^{-7}$  mbar vakum altında gerçekleştirildi. Dolayısıyla ölçümler karanlık ortamda yapılmıştır. I-V, C-V ve DLTS ölçüm sisteminin gerçek bir fotoğrafı şekil 3.8' de verilmiştir.



**Şekil 3.8:** a) ARS DE-202 model kapalı sistem soğutma (sıvı helyum çevrimi ile) b) Keithley 2400 c) Agilent 33250A d) Boonton 7200 LRC e) NI-USB-6251 çok fonksiyonlu I/O (girdi/çıkıtı) cihazı f) Lakeshore 331 g) bilgisayar h) PFEIFFER-HiPace 80.

### 3.5. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) VE ENERJİ DAĞILIMLI X-İŞİNİ SPEKTROSKOPİSİ (EDS)

Taramalı elektron mikroskobu, bir numunenin boyutu, şekli, bileşimi, kristalografisi ve diğer fiziksel ve kimyasal özellikleri hakkında mikroskobik ölçekli bilgi ortaya koyan büyütülmüş görüntüler oluşturan bir araçtır. SEM' in ilkesi ilk olarak Knoll ve Theile tarafından 1935 ve 1939 yılları arasında gösterilmiş ve ilk gerçek SEM, von Ardenne tarafından 1938' de geliştirilmiştir. Modern ticari SEM, 1950' lerde ve 1960' larda Prof. Sir Charles Oatley ve Cambridge Üniversitesi' deki birçok öğrencisi tarafından kapsamlı bir geliştirme sonucunda 1972' de ortaya çıkmıştır [63].

SEM' in temel çalışma prensibi, bir elektron kaynağından emisyon yoluyla elde edilen elektronların ince odaklanmış bir elektron demetinin oluşturulmasını içerir. Bu elektron demetindeki elektronların enerjisi,  $E_0$ , tipik olarak  $E_0 = 0,1$  ila 30 keV aralığında seçilir [63].

Elektron kaynağından emisyon gerçekleştirildikten ve elektronlar yüksek enerjiye ivmelendirilmesinden sonra elde edilen elektron demeti, diyaframlar, manyetik ve/veya elektrostatik mercekle ve elektromanyetik bobinler tarafından değiştirilir. Bu elemanlar, demet çapını ardışık olarak azaltmak ve objektif lens ile odaklanmış demeti, örnek üzerinde birbirine yakın ama ayrı konumlarda sıralı olarak yerleştirmek için bir raster (x-y) deseninde

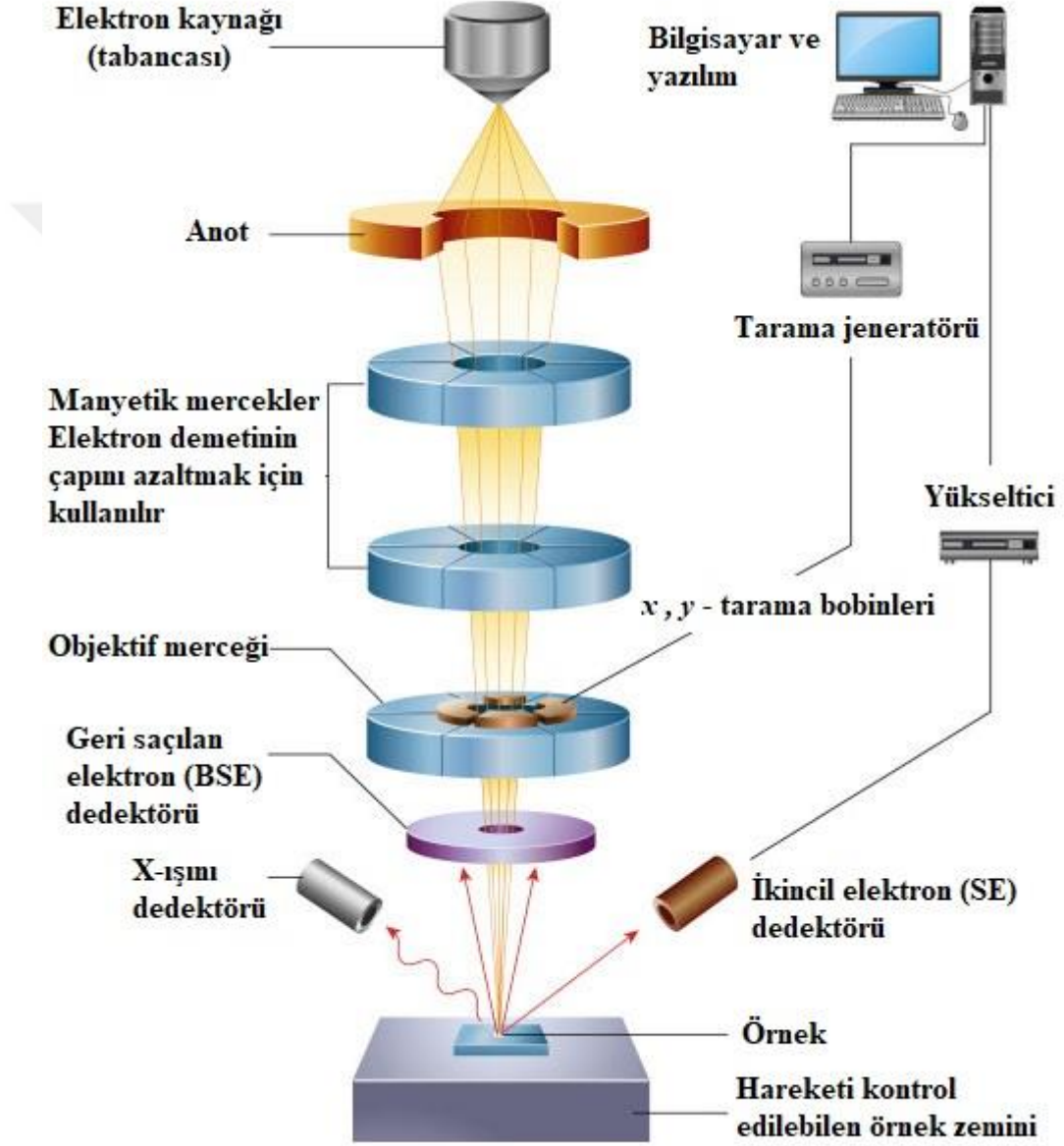
taramak amacıyla kullanılır [63]. Tarama desenindeki bu ayrı konumların her birinde, elektron demetinin numuneyle etkileşimi iki adet örnekten dışı doğru uzaklaşan elektron üretir:

- Geri saçılan elektronlar (Back Scattered Electrons, BSE), numunedeki atomların elektrik alanları tarafından saçılma ve sapma yaşadıktan sonra, çarpışma enerjilerinin büyük bir kısmını koruyarak numuneden çıkan demet elektronlarıdır.
- İkincil elektronlar (Secondary Electrons, SE), demet elektronlarının numunedeki atomlardan çıkardığı elektronların numune yüzeyinden kaçmasıyla oluşan elektronlardır.

Elektron demeti tipik olarak yüksek enerjide olsa da bu ikincil elektronlar düşük kinetik enerji transferi yaşar ve daha sonra 0 – 50 eV aralığında çok düşük kinetik enerjilerle numune yüzeyinden kaçarlar, çoğunluğu 5 eV' nin altındadır. Her demet konumunda, bu giden elektron sinyalleri bir veya daha fazla elektron dedektörü kullanılarak ölçülür, genellikle kullanılan dedektörler, bir Everhart-Thornley "ikincil elektron" dedektörü (aslında hem SE' lere hem de BSE' lere duyarlıdır) ve SE' lere duyarsız bir "özel geri saçılmış elektron dedektörü" dür. Bu dedektörlerin her biri için, numunedeki her bir raster tarama konumunda ölçülen sinyal sayısallaştırılır ve bilgisayar belleğine kaydedilir ve daha sonra bir bilgisayar ekranının karşılık gelen x-y konumundaki gri seviyesini belirlemek için kullanılır ve tek bir resim ögesi (veya piksel) oluşturur. Tarama jeneratörü, özel yazılım içeren harici bir bilgisayarla birlikte, tarama jeneratöründen gelen bilgileri dedektör tarafından edinilen yoğunlukla senkronize edebilir ve böylece gri tonlamalı bir görüntünün gerçek zamanlı olarak piksel-piksel görüntülenmesini ve izlenmesini sağlar. Her x-y konumunda elektron ışınının bekleme süresine bağlı olarak, sinyal-gürültü oranı modüle edilebilir. Büyütme, taranan alanın boyutundan kaynaklanır; burada daha yüksek büyütme giderek daha küçük taranan alanlara karşılık gelir. Piksel sayısı da belirli bir tarama alanı içinde ayarlanabilir ve bu da görünür çözünürlüğü etkileyebilir. Şekil 3.9' da SEM cihazının bileşenleri şematik olarak verilmiştir [63].

Geleneksel vakumlu bir taramalı elektron mikroskopunda, hem elektron-optik kolunu hem de numune odası, yüksek vakum koşullarında ( $<10^{-4}$  Pa) çalışmalıdır, çünkü atmosferdeki gazların atomları ve molekülleriyle karşılaşan elektron demetlerinin yanı sıra geri saçılan elektronlar (BSE) ve ikincil elektronlar (SE) da istenmeyen saçılmaya uğrayabilir. Geleneksel bir yüksek vakumlu SEM' de, yüksek vakum koşullarında artık atom yoğunluğu o kadar

düşüktür ki elektron demetinin, elektron kaynağından numuneye olan uçuş yolu boyunca (yaklaşık 25 cm' lik bir mesafe) artık gazın herhangi bir atomuyla karşılaşması istatistiksel olarak olası değildir. Ayrıca, elektron demetlerinin çarpması sonucu yüzeyinde elektriksel yük oluşabilecek yalıtkan numunelere, elektrik boşalması için uygun bir yol sağlayacak şekilde iletken bir kaplama yapılmalı ve topraklanmalıdır [63].



**Şekil 3.9:** SEM cihazının bileşenlerinin şematik gösterimi.

Değişken basınçlı SEM' de (VPSEM), numune odasındaki basınç, atmosferik gazdan ya da su buharı gibi sağlanan bir gazdan türetilerek 1 Pa ile 2000 Pa arasında değişebilir, bu da kaplanmamış yalıtkan numunelerin, ışın, geri saçılan elektronlar ve ikincil elektron

etkileşimleri tarafından üretilen iyonize gaz atomları ve serbest elektronlar aracılığıyla otomatik olarak deşarj olmasını sağlar. Bu VPSEM basınç aralığının üst sınırında, numune hafifçe soğutulduğunda (2 – 5 °C), su, gaz-sıvı dengede tutulabilir, bu da ıslak numunelerin doğrudan incelenmesine olanak tanır [63].

Oluşturulan elektron demeti, topluca “saçılma olayları” olarak adlandırılan çeşitli fiziksel süreçler aracılığıyla örnek atomları ile etkileşime girer. Bu elektron-örnek etkileşimleri, örnek hakkında bilgi taşıyan geri saçılmış elektronlar (BSE), ikincil elektronlar (SE) ve X-ışınlarını üretir; bu bilgiler kaba ve ince ölçekli topografik özellikler, bileşim, kristal yapı ve yerel elektrik ve manyetik alanlar gibi unsurları içerir. Bu etkileşimden ortaya çıkan X-ışınlarından malzemenin element analizi yapılabilir ve bileşimi hakkında bilgi verir. Buna enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, EDS) adı verilir [63].

SEM görüntülerini yorumlamak ve elektron ile uyarılmış X-ışını mikroanalizi yapmak için, karmaşık saçılma süreçleri genel olarak “elastik olmayan” ve “elastik” saçılma olarak sınıflandırılır. “Elastik olmayan” saçılma, elektron demetinin enerjisini, örnek atomlarının sıkıca bağlı iç kabuk atom elektronları ve zayıf bağlı değerlik elektronları ile etkileşimler yoluyla aşamalı olarak azaltan çeşitli fiziksel süreçlere işaret eder [63]. Bu enerji kaybı süreçleri, ikincil elektronlar oluşturmak için zayıf bağlı dış kabuk atom elektronlarının (bağlanma enerjisi birkaç eV) fırlatılmasını; sıkıca bağlı iç kabuk atom elektronlarının (bağlanma enerjisi yüzlerce ila binlerce eV) fırlatılmasını, bunun sonucunda karakteristik X-ışınlarının salınmasını; atomların elektrik alanında ışın elektronunun yavaşlamasını ve ışının iniş enerjisine ( $E_0$ ) kadar her enerji seviyesinde X-ışını sürekli spektrumu üretmesini (bremsstrahlung veya “frenleme radyasyonu”); iletken metalik katıları dolduran serbest elektron gazında dalgalar oluşmasını (plazmonlar); ve örneğin ısınmasını (fonon üretimi) içerir. Bu elastik olmayan saçılma olaylarında enerji kaybolurken, elektron demetindeki elektronlar mevcut yollarından sadece biraz sapar. Elastik olmayan saçılma nedeniyle enerji kaybı, elektron demetinin örnek içinde ne kadar ilerleyebileceğine ve tüm enerjisini kaybedip örnek tarafından emileceğine nihai bir sınır koyar [63]. Çeşitli elastik olmayan saçılma enerji kaybı süreçleri ayrı ve bağımsız olmasına rağmen, Bethe (1930) bu etkileri “sürekli enerji kaybı yaklaştırması” olarak özetlemeyi başarmıştır. Belirli bir giriş elektron demeti enerjisinde, Bethe mesafesi hedefin atom numarası arttıkça azalır, ancak belirli bir hedef için, giriş elektron demeti enerjisi arttıkça Bethe mesafesi artar. Örneğin, 20 keV giriş elektron

demeti enerjisi ile Au için Bethe mesafesi yaklaşık 1200 nm' dir. Buradan da anlaşılacağı gibi EDS analizinde, incelenecek malzemenin atom numarası ve cihazda üretilen elektron demetinin enerjisi, malzemenin, incelenmek istenen yüzey derinliği boyutunu sınırlamaktadır [63].

### 3.6. X-IŞINI KIRINIMI (XRD)

X-ışını kırınımı kristalografisi, çeşitli maddelerin çeşitli hallerdeki atomik ölçekli yapısı hakkında bilgi edinmek için malzeme karakterizasyonu alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Elbette, 1912' de Max von Laue ve 1913' te W.L. Bragg ve W.H. Bragg tarafından, kristallerden X-ışını kırınımının keşfedilmesinden bu yana bu alanda sayısız ilerleme olmuştur. Kristalografinin kökeni, doğal minerallerin dış görünüşünün incelenmesine kadar uzanır ve geometri ve grup teorisi uygulanarak büyük miktarda veri sistematize edilmiştir. Daha sonra, kristalografi, uzayda özdeş yapısal birimlerin sonsuz tekrarına karşılık gelen küçük birimlerden kristallerin nasıl inşa edilebileceğinin genel olarak değerlendirilmesi için değerli bir yöntem haline gelir [64].

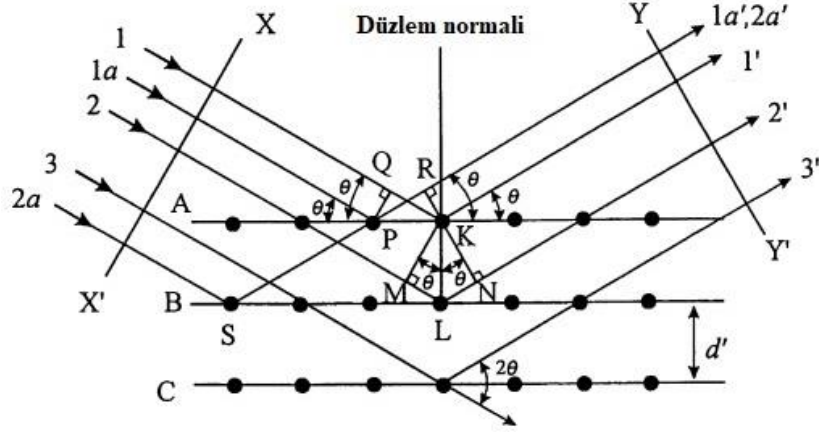
X-ışını kırınımı (X-ray Diffraction, XRD), sentetik ve doğal materyallerin kimyasal bileşimi ve kristal yapısı hakkında detaylı bilgiler sağlayan, çok yönlü ve tahribatsız bir tekniktir. Bu spektroskopi yöntemi, makro boyuttaki materyallerin karakterizasyon aracı olarak kullanılmakla birlikte, nano boyuttaki materyallerin de karakterterizasyon için kullanılmaktadır. Çünkü nano boyuttaki tüm gerekli hacimsel çözünürlükler elde edilebilir ve bu nedenle nano parçacıklar da XRD ile incelenebilir [64].

Bir kristalin bileşeni olan atomlar, titreşen elektronlar tarafından gelen X-ışını demetinin dalga boyuyla aynı olan X-ışınları üretir ve üretilen X-ışınlarının ilgili atomların merkezindeki küresel dalgalar olma olasılığı yüksektir. Bu durum, bir dalganın bir havuzda eşit aralıklarla aynı hat üzerinde sıralanmış yığınlara doğru bir taraftan yuvarlanıp diğer tarafa yayılmasına benzer. Yani, X-ışınlarının kristaller tarafından kırınım olayı, iki veya daha fazla dalga arasındaki belirli faz ilişkilerine, örneğin dalgaların yol uzunluklarındaki farklılıklardan kaynaklanan faz farklılıklarına ve faz farkına bağlı genlikteki değişime atfedilir. Ayrıca, bilinmesi gereken en önemli nokta, yol uzunluklarındaki fark sıfır veya dalga boyunun tam sayısı katıysa iki dalganın tamamen fazda olmasıdır [64].

Herhangi iki dalgaının fazı genellikle yol farkına karşılık gelen  $\Delta$  sapması gösterir.  $\Delta$  değeri  $\lambda$  dalga boyunun tam sayı katı olarak veriliyorsa iki dalgaının fazı tamamen çakışık (fazda) olduğundan, iki dalga tıpkı orijinal dalga gibi tek bir sentezlenmiş dalga oluşturmak üzere birleşecek ve genliği iki katı olacaktır. Yol farkı, X-ışınının kristale göre yönüne bağlıdır.  $\Delta$  değeri  $\lambda/2$  olduğunda, iki dalga birbirini iptal eder ve dalgaların yol boyunca herhangi bir noktada aynı büyüklüğe ama zıt genliğe sahip olması nedeniyle tamamen faz dışıdır. Bu iki uç durum ( $\Delta = \lambda$  ve  $\lambda/2$ ) arasındaki durumlarla da yol farkına bağlı olarak karşılaşılır [64].

Kristaller tarafından X-ışını kırınımının temel hedefi, atomlardan saçılan X-ışınlarının ve gelen X-ışınlarının tamamen aynı fazda olduğu ve tespit edilebilir bir kırınım demeti üretmek için birbirlerini güçlendirdiği belirli koşulu bilmektir. Başka bir deyişle, kristallerden saçılan X-ışınları ile gelen X-ışınları arasındaki yol uzunluğu farklarının dalga boyunun tam sayı katı olduğu ortak ilişki bulunmalıdır. Bu amaçla, en önemli ve bilinen yöntem Bragg açısını içeren Bragg yasası tarafından verilir. Bragg yasasının anlaşılmasını kolaylaştırmak için, şekil 3.10 yararlıdır [64]. Ayrıca aşağıdaki iki geometrik ilişkiyi hatırlamak da gerekir:

- Gelen X-ışını demeti ile yansıma düzlemine dik olan doğrultu arasındaki açı, dik doğrultu ile kırınıma uğramış X-ışını demeti arasındaki açıya eşittir. Gelen X-ışını demeti, düzleme dik doğrultu ve kırınıma uğramış X-ışını demeti her zaman aynı düzlemde bulunur.
- Kırınıma uğramış X-ışını demeti ile iletilen demet arasındaki açı her zaman  $2\theta$ ' dir ve bu açı "kırınım açısı" olarak adlandırılır.



**Şekil 3.10:** Bir kristal tarafından X-ışınlarının kırınımının şematik diyagramı, Bragg koşulu.

Eğer dalga boyu ( $\lambda$ ) olan gelen X-ışınları, atomların düzenli bir periyodik dizilimle  $d'$  düzlemler arası mesafeye sahip bir kristale çarparsa, yeterli yoğunlukta kırınım demeti yalnızca “Bragg koşulu” veya “Bragg yasası” (denklem 3.3) sağlandığında tespit edilir [64].

$$2d' \sin \theta = n\lambda \quad (3.3)$$

Burada  $n$ , yansıma mertebesi olarak adlandırılır ve bitişik kristal düzlemlerden kırınan X ışınları arasındaki yol farkındaki dalga boyu sayısına eşittir (bkz. Şekil 3.10).

Hem  $\lambda$  hem de  $d'$  nin sabit değerleri için kırınım,  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots$  gibi birkaç geliş açısında meydana gelir ve bu da  $n=1,2,3,\dots$  'e karşılık gelir. Birinci dereceden yansımada ( $n = 1$ ), şekil 3.10' da 1' ve 2' ile gösterilen iki saçılmış X-ışını arasındaki yol farkı bir dalga boyudur. 1' ve 3' X-ışınları arasındaki yol farkı iki dalga boyudur. Tüm düzlemlerdeki tüm atomlardan kırınımına uğramış X-ışınları, Bragg yasasını sağlayan belirli bir yönde belirgin yoğunlukta kırınımına uğramış X-ışını demeti üretmek için tamamen aynı fazda kabul edilir [64]. Denklem 3.3 şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$2d \sin \theta = \lambda \quad (3.4)$$

Burada  $d = d'/n$  dir. Bragg yasasının bu biçimi sıklıkla kullanılır.

Genel olarak,  $d'$  lik bir düzlemler arası aralığa sahip belirli bir kristal düzleminde  $(h \ k \ l)$   $n'$  inci dereceden yansıma,  $(nh \ nk \ nl)$  düzleminde birinci dereceden yansıma olarak düşünülebilir.  $(nh \ nk \ nl)$  düzlemi  $(h \ k \ l)$  düzlemine paralel olduğundan,  $(nh \ nk \ nl)$

düzleminden yansıma, ( $d = d'/n$ ) mesafesindeki düzlemlerden birinci dereceden yansımaya eşdeğerdir. Burada,  $2\theta$  birçok durumda kırınım açısı olarak adlandırılır [64].

Herhangi bir düzlem kümesinin kırınım açısı  $2\theta$  ( $h k l$ ), denklem 3.4' ü, bitişik düzlemlerin mesafesi ile Miller indisleri ve her kristal sistemi için örgü parametreleri arasındaki ilişkiyi sağlayan düzlem aralığı denklemleriyle birleştirilerek hesaplanabilir. Örneğin, kristal örgü parametresi  $a$  olan kübik bir kristal ise, düzlemler arası aralık  $d$  ve Miller indisleri ( $h k l$ ) aşağıdaki gibi denklem 3.5 ile verilir [64]:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{(h^2 + k^2 + l^2)}{a^2} \quad (3.5)$$

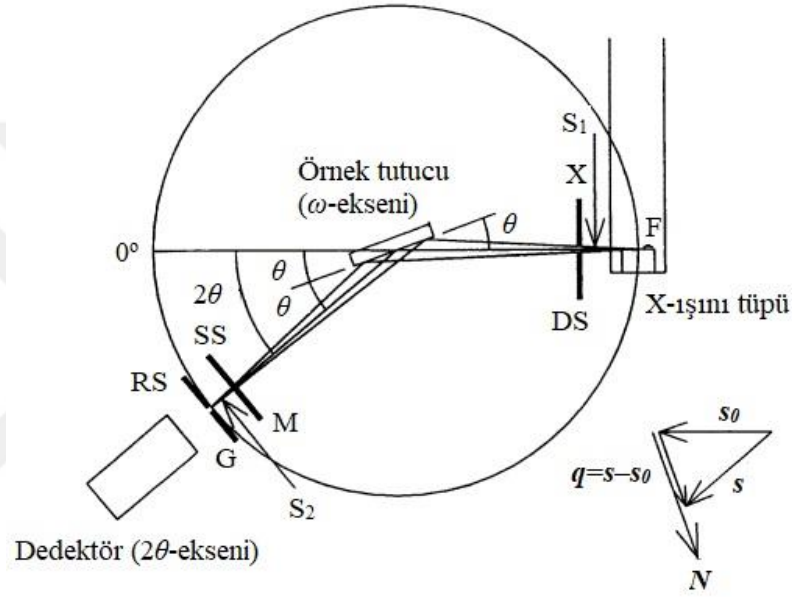
Bragg yasası denklem 3.5 ile birleştirildiğinde,  $\lambda$  dalga boyunu kullanan deneyler için aşağıdaki denklem 3.6 elde edilir.

$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4a^2} (h^2 + k^2 + l^2) \quad (3.6)$$

Denklem 3.6, kırınım yönlerine karşılık gelen kırınım açısının birim hücrenin şekli ve boyutundan belirlenebileceğini ileri sürer. Bu, maddelerin yapısal analizi için önemli bir noktadır. Tersine de çok değerlidir, çünkü kırınım açıları ölçerek bilinmeyen bir kristal yapı belirlenebilir. Başka bir deyişle, kırınım açılarıyla verilen, X-ışını demetlerinin belirli yönleri, doğrudan birim hücredeki atomların konumlarıyla ilişkilidir [64].

Bir difraktometre, bağımsız dönüşe sahip iki eksen ( $\omega$  ve  $2\theta$ ) oluşan hassas bir cihazdır. Bu ekipman, bilinen dalga boyundaki X-ışınları koşulunda Bragg yasasını karşılamak için, kırınan bir X-ışını demetinin yoğunluk verilerini, açının bir fonksiyonu olarak elde etmemizi sağlar. Difraktometrenin temel tasarımı şekil 3.11' de gösterilmiştir [64]. Üç bileşen, X-ışını kaynağı (F), numune tutucu (S) ve dedektör (G), odaklama dairesi olarak bilinen bir dairenin çevresinde yer alır. X-ışını kaynağının konumu sabitlendiğinde ve dedektör  $2\theta$ -eksenine bağlandığında, düz plaka formundaki bir toz numunesi genellikle difraktometrenin merkezine karşılık gelen  $\omega$ -eksenine yerleştirilir. X-ışını tüpünün hedefindeki çizgi odak noktası, difraktometrenin  $\omega$ -eksenine paralel olacak şekilde ayarlanır. Düz plaka numunesi kullanmanın temel nedeni, zayıf kırınan ışınların yoğunluğunu etkili bir şekilde toplamak için odaklama geometrisinden yararlanmaktır. Ölçümler sırasında,  $2\theta$ -ekseni,  $\omega$ -ekseninden iki kat daha fazla döner ve bu nedenle buna sıklıkla teta-ikiteta taraması adı verilir. Burada amaç,

numune düzlemi ile gelen X-ışını demetinin yönü arasındaki açının, gelen X-ışını demetinin yayılma yönüne göre kırınım demetinin yönüne eşit olması deneysel koşulunu korumaktır. Başka bir deyişle, numune düzlemine dik olan yön, gelen X-ışını demetinin vektörü  $s_0$  ile kırınım demetinin vektörleri  $s$  arasındaki farkla tanımlanan saçılma vektörü  $q = s - s_0$  yönüne uydurulmalıdır. Ayrıca, şekil 3.11' deki F (hedef üzerindeki odak noktası), S (difraktometrenin merkezi) ve G (kırınım demetinin odak noktası) noktalarından geçen bir daireye odaklama dairesi veya Rowland dairesi adı verilir [64].



**Şekil 3.11:** X-ışını difraktometresinin (XRD) bazı temel parametreleri.

Açısal dağılımı en aza indirmek ve gelen X-ışını demeti ile kırınan X-ışını demeti için mekânsal çözünürlüğü iyileştirmek amacıyla, X-ışını yoluna bazı yarık sistemleri yerleştirilir. Ayrıca, difraktometre çemberinin düzlemine paralel, birbirine yakın, ince metal plakalardan oluşan bir soller yarığı kullanılır ve bu soller yarığı hem gelen hem de kırınan X-ışını demetlerinin dik dağılımını kısıtlamak içindir. Şekil 3.11' de gösterildiği gibi, ıraksak yarıklar (DS) ve saçılma yarıkları (SS), hem gelen hem de kırınan X-ışını demetlerinin her birinin yatay dağılımını kısıtlamak üzere ayarlanır ve dedektörün önündeki alıcı yarık (RS), mekânsal çözünürlüğü belirlemek üzere ayarlanır. Bir kırınım ölçerin önemli özelliği, yalnızca DS ve SS tarafından dağılımın kısıtlanması değil, aynı zamanda RS tarafından toz numunelerinden kırınan X-ışını demetinin odaklanmasıdır [64].

X-ışını kırınımı analizi için temel yöntemlerden birisi Debye-Scherrer yöntemidir. Bu yöntem, yalnızca geri yansıma bölgesi hassas örgü parametresi ölçümü için uygundur. En

temel haliyle Debye-Scherrer yöntemi, kırınım desenindeki bir tepe noktasının genişliğine dayanan analiz yöntemidir [64]. Debye-Scherrer analiz yönteminde kullanılan ortalama kristal boyutu denklem 3.7 ile verilmiştir [65–67].

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.7)$$

Burada  $D$ , kristal boyutu,  $\lambda$ , X-ışını dalga boyu,  $\beta$ , kırınım tepe noktasının yarı maksimum tam genişliği (FWHM) değeri,  $\theta$ , Bragg kırınım açısı ve  $K$ , Scherrer sabitidir.  $K$ , kristal şekline ve boyut dağılımına, kırınım çizgisinin indislerine ve  $\beta$  için kullanılan gerçek tanıma (FWHM veya integral genişlik) bağlıdır [68].  $K$ , 0.62 ile 2.08 arasında herhangi bir değere sahip olabilir. Bu tez çalışmasında,  $K = 0,94$  kullanılmıştır. Ek olarak, kristal veya nano kristaldeki mikro gerinim, doğru bir analizde dikkate alınması gereken genişlik  $\beta$ ' yi de etkiler. Alaşım bileşimindeki bölgesel dalgalanmalar da genişliği etkileyebilir. Bu çalışmada, hesaplanan  $D$  değerleri tahminleri temsil eder. Denklem 3.7' nin doğruluğu hakkındaki tartışma literatürde, örneğin [69]' te bulunabilir. Kristal analizindeki bir diğer hesaplama ise dislokasyon yoğunluk hesabıdır. Bu ifade kristal boyutunun karesi ile ters orantılıdır. Dislokasyon yoğunluğu formülü denklem 3.8 ile verilmiştir [65–67].

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (3.8)$$

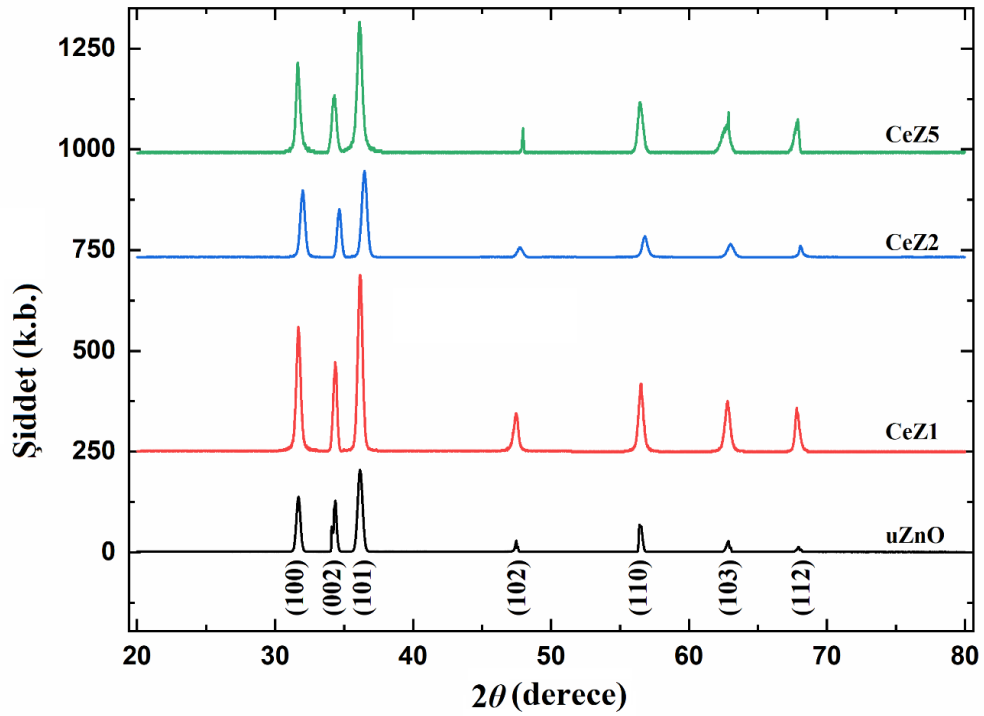
Burada  $\delta$ , dislokasyon yoğunluğudur.

## 4. BULGULAR

### 4.1. SENTEZLENEN NANOYAPILARIN XRD SONUÇLARI

Tez çalışmasında XRD analizleri Bruker D8 Discover model cihaz ile yapılmıştır. Analizler tam tarama için Cu (bakır)  $K\alpha_1$  ışınması ( $1.54 \text{ \AA}$ ) ile  $20^\circ - 80^\circ 2\theta$  aralığında, dakikada  $1^\circ$  tarama hızında gerçekleştirildi. XRD ölçümleri Gazi Üniversitesinde yapıldı.

Şekil 4.1, uZnO, CeZ1, CeZ2 ve CeZ5 nanoyapılarının XRD spektrumlarını göstermektedir. Kristalografik yönelimler PDF Kart No#80-0074' e göre belirlenmiştir.



Şekil 4.1: Katkısız ZnO ve Ce:ZnO nanoyapılarının XRD spektrumları.

Şekil 4.1, Ce:ZnO nanoyapılarının kırınım tepe noktalarının, altıgen wurtzite yapıda olduğunu ve ZnO' nun standart kırınım tepe noktalarına karşılık geldiğini ve tüm yapıların (101) kristal düzlemi boyunca tercihli yönelime sahip olduğunu göstermektedir. Buna göre sentezlenen tüm nanoyapıların altıgen wurtzite kristal yapısına sahiptir.

XRD ölçüm sonuçlarından denklem 3.7 ve denklem 3.8 kullanılarak hesaplanan ZnO ve Ce:ZnO nanoyapılarının ortalama kristal boyutu ( $D$ ) ve dislokasyon yoğunluğu ( $\delta$ ) tablo 4.1’de verilmiştir. Dislokasyon yoğunluğu ZnO’ya Ce katkılanması ile azalmıştır. Kristal boyutu ise bir miktar artmıştır. Öte yandan, ZnO yapısına Ce katkılanması sonucunda stresin azaldığı görülmektedir.

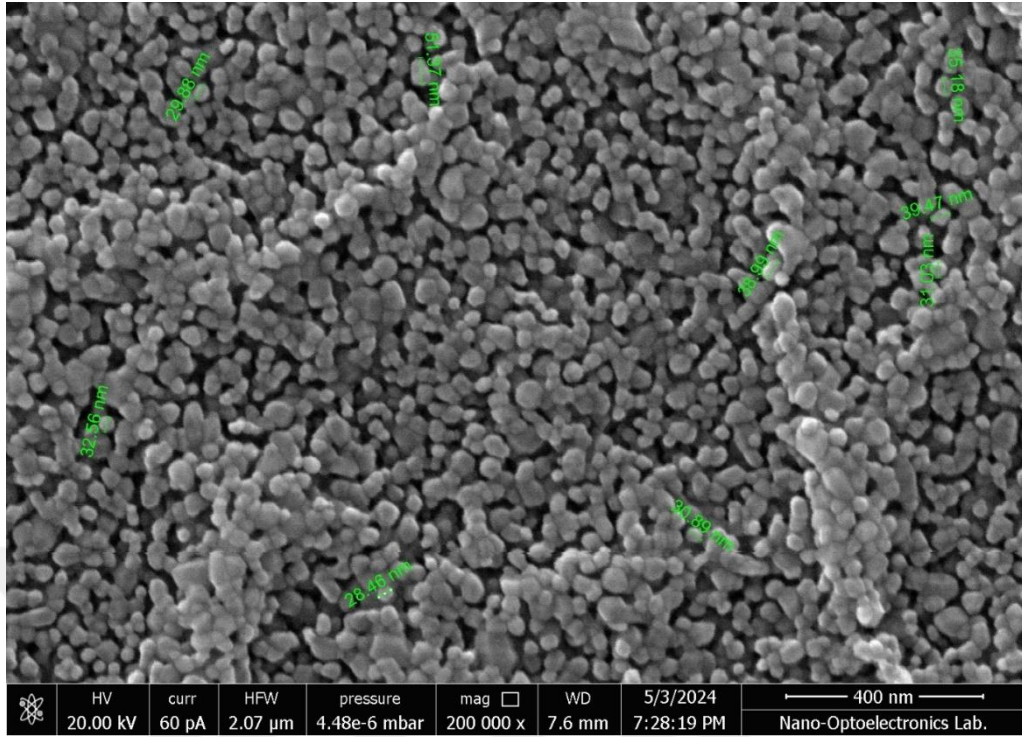
**Tablo 4.1:** XRD analizi ile belirlenen katkısız ZnO ve Ce:ZnO nanoyapılarının yapısal parametreleri.

| Heteroeklem | (101) için FWHM (°) | (101) için $D$ (nm) | $\delta$ (lines/m <sup>2</sup> ) $\times 10^{14}$ | $c$ -ekseni (Å) | Stres (GPa) |
|-------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------------------|-----------------|-------------|
| uZnO        | 0.482               | 18                  | 30.86                                             | 5,2692          | -4.71       |
| CeZ1        | 0.401               | 21                  | 22.68                                             | 5,2507          | -3.10       |
| CeZ2        | 0.435               | 20                  | 25.00                                             | 5,2643          | -4.28       |
| CeZ5        | 0.413               | 21                  | 22.68                                             | 5,2543          | -3.41       |

#### 4.2. NANOYAPILARIN SEM VE EDS SONUÇLARI

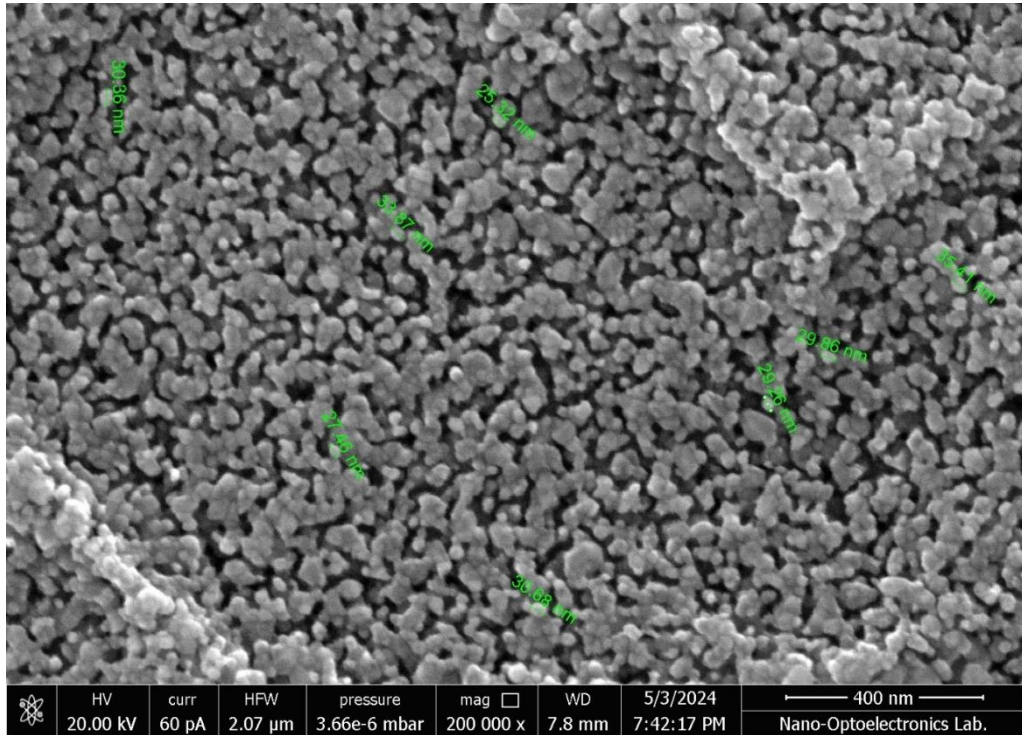
Tez çalışmasında üretilen nanoyapıların morfolojik ve elementel analizleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) kullanılarak incelendi. SEM ve EDS analizleri FEI versa 3D model (FEG) (HR-SEM) (Thermo Fisher Scientific, ABD) model cihaz ile gerçekleştirildi. SEM ve EDS ölçümleri, İstanbul Üniversitesi Nano ve Optoelektronik Araştırma Laboratuvarlarında yapıldı.

Şekil 4.2’de ZnO nanoyapısının SEM görüntüsü verilmiştir.



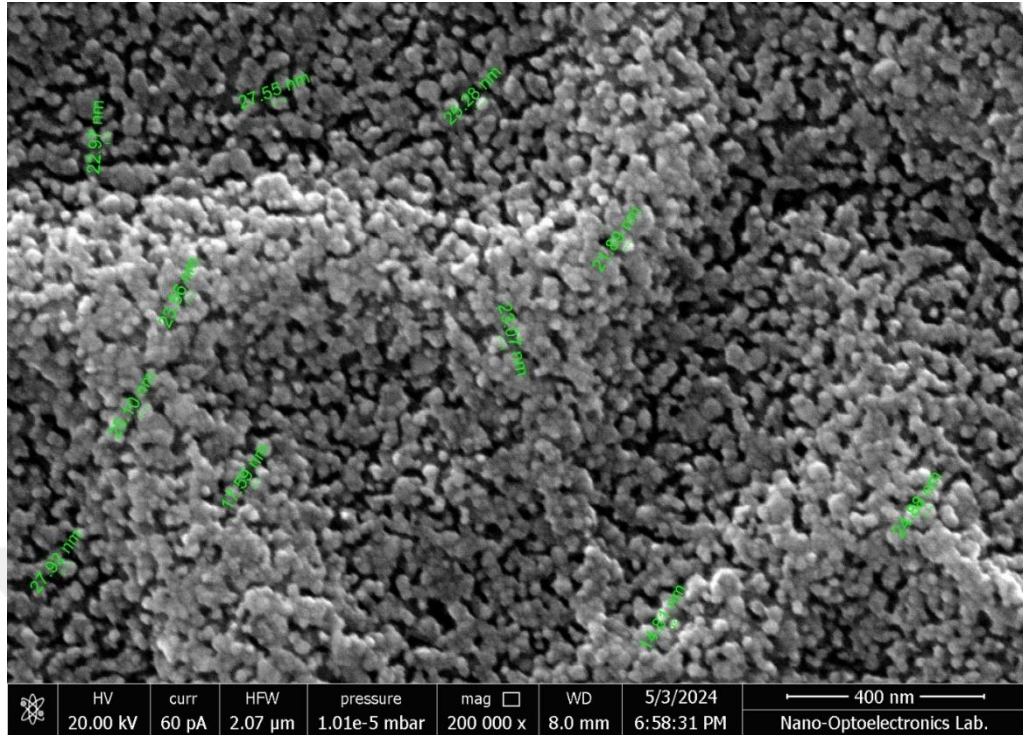
Şekil 4.2: ZnO nanoyapısının SEM görüntüsü.

Şekil 4.3' de 1% mol Ce katkılı ZnO nanoyapısının SEM görüntüsü verilmiştir.



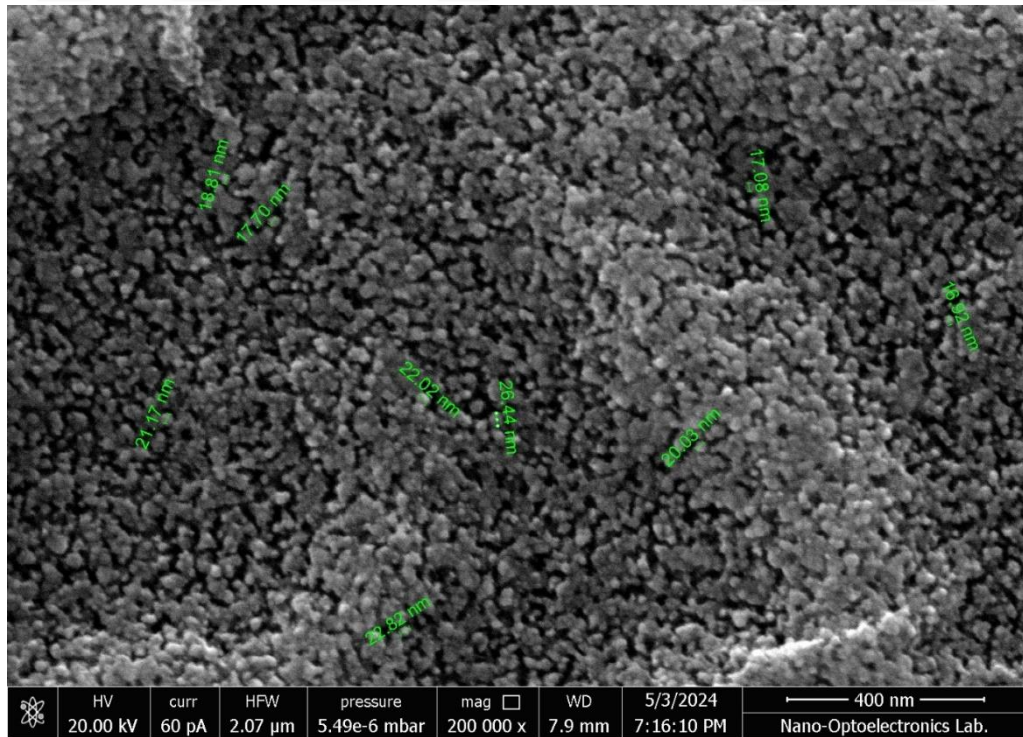
Şekil 4.3: 1% mol Ce katkılı ZnO nanoyapısının SEM görüntüsü.

Şekil 4.4' de 2% mol Ce katkılı ZnO nanoyapısının SEM görüntüsü verilmiştir.



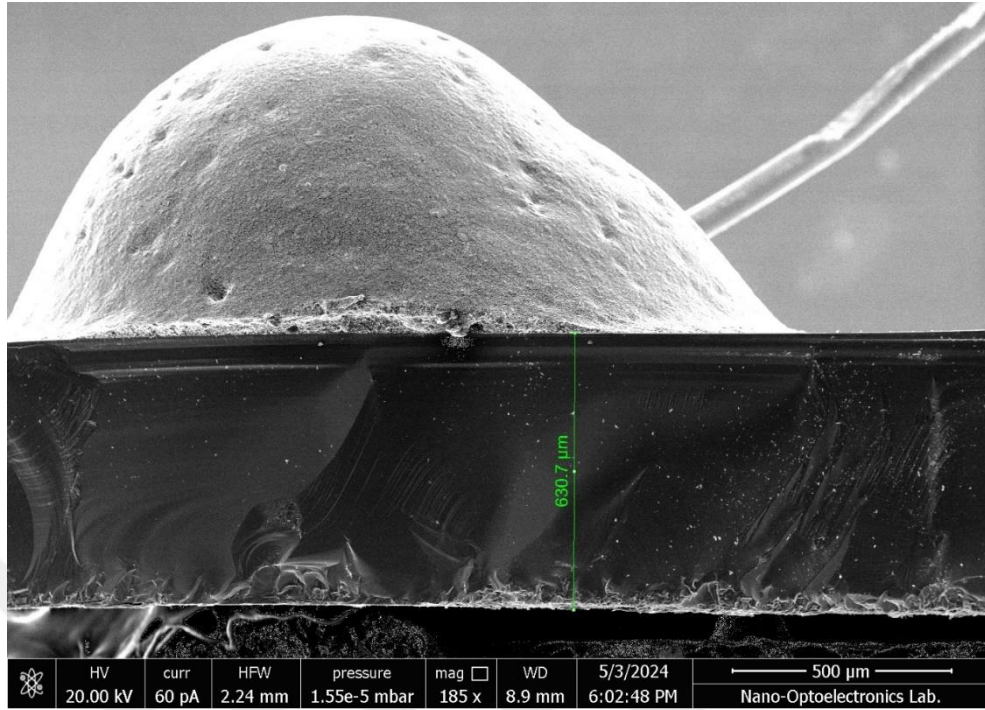
Şekil 4.4: 2% mol Ce katkılı ZnO nanoyapısının SEM görüntüsü.

Şekil 4.5' de 5% mol Ce katkılı ZnO nanoyapısının SEM görüntüsü verilmiştir.



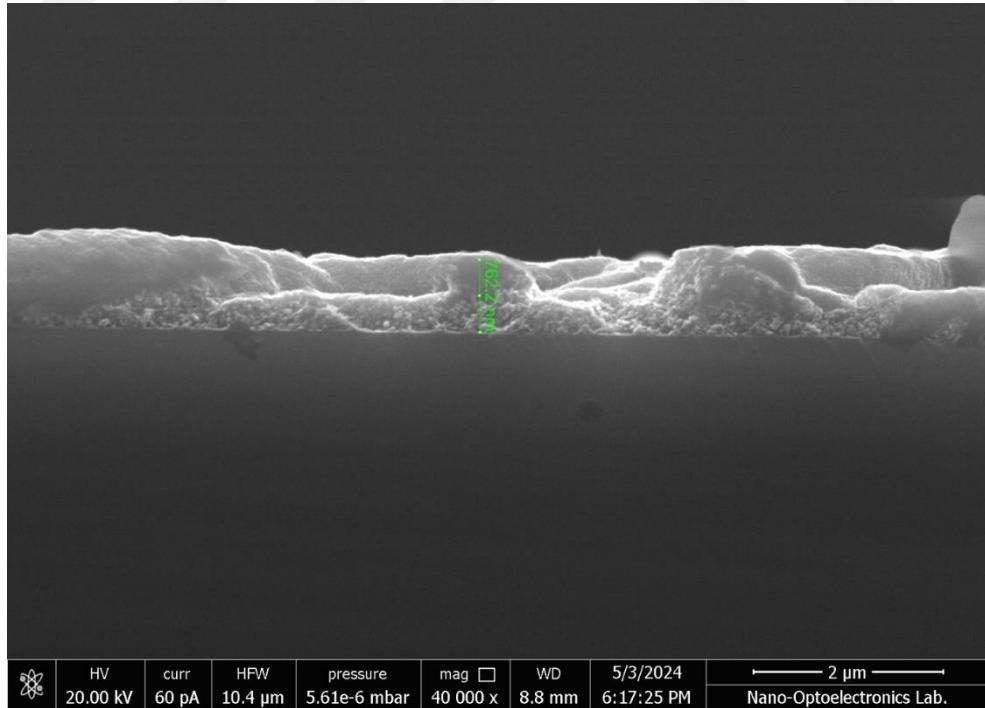
Şekil 4.5: 5% mol Ce katkılı ZnO nanoyapısının SEM görüntüsü.

Şekil 4.6' da üretilen heteroeklemin yan kesit SEM görüntüsü verilmiştir.



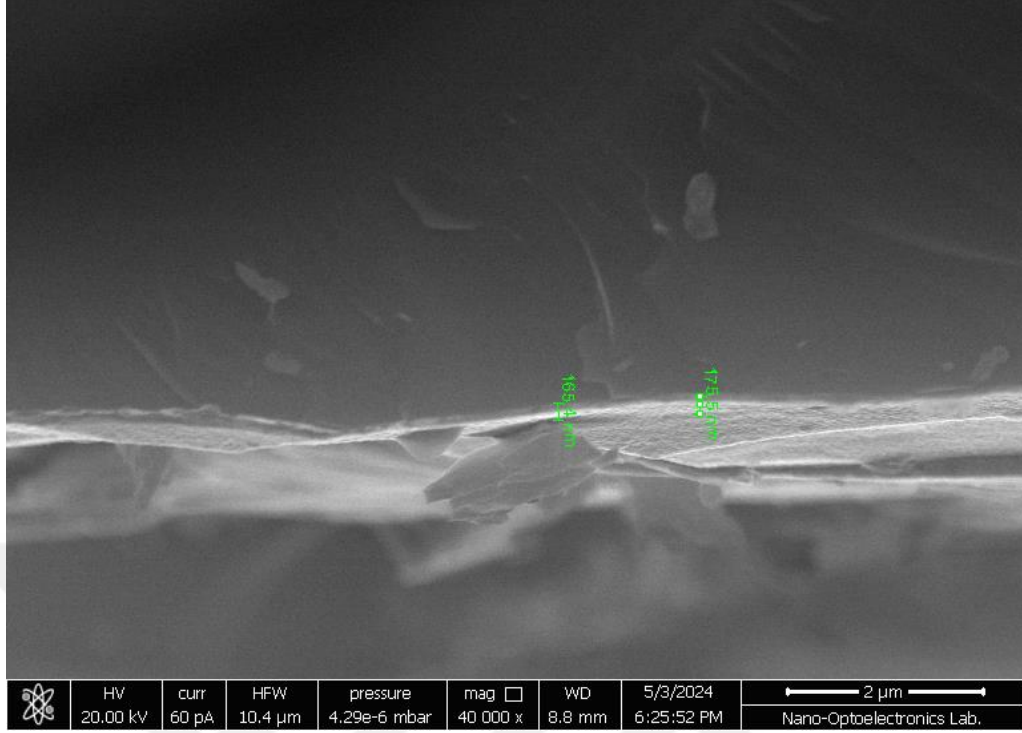
**Şekil 4.6:** Üretilen heteroeklemin yan kesit SEM görüntüsü.

Şekil 4.7' de Si üzerindeki nanoyapının kaplama kalınlığının SEM görüntüsü verilmiştir.



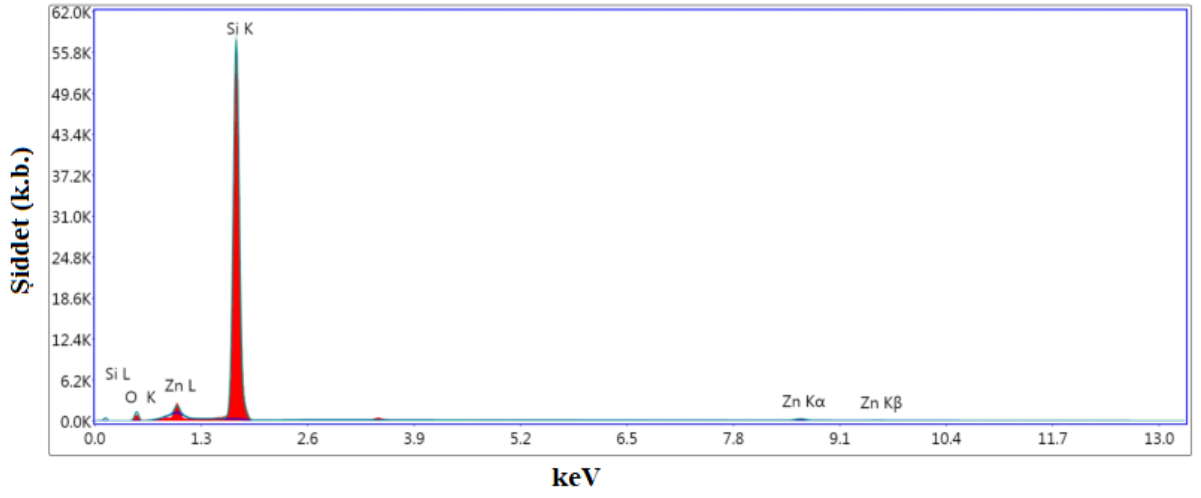
**Şekil 4.7:** Si üzerindeki nanoyapının kaplama kalınlığının yan kesit SEM görüntüsü.

Şekil 4.8' de üretilen heteroeklemin silisyum arka alüminyum kaplamasının yan kesit SEM görüntüsü verilmiştir.



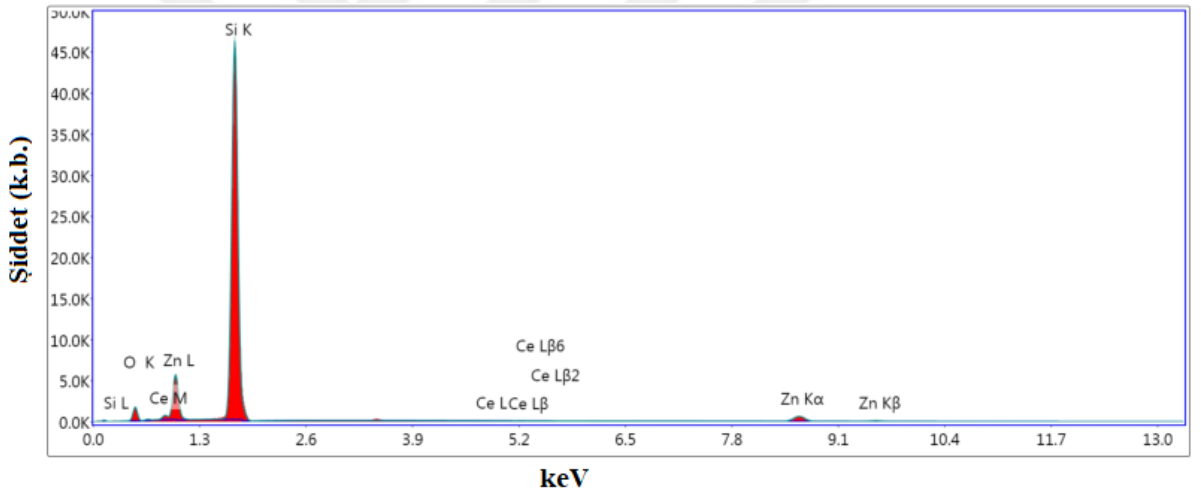
**Şekil 4.8:** Üretilen heteroeklemin silisyum arka alüminyum kaplamasının yan kesit SEM görüntüsü. SEM sonuçları, şekil 4.2’ de görüldüğü gibi, uZnO için ortalama parçacık boyutunun 28 ile 51 nm arasında değiştiğini görülmektedir. Karşılaştırma yapmak gerekirse, şekil 4.3’ deki CeZ1 için ortalama parçacık boyutu 25 ile 35 nm, şekil 4.4’ deki CeZ2 için 17 ile 27 nm ve şekil 4.5’ deki CeZ5 için 16 ile 22 nm’ dir. Yan kesit SEM görüntülerine bakıldığında ise silisyum kalınlığı ~630  $\mu\text{m}$  olarak görülmektedir. Bu da üreticinin bize verdiği veri ile örtüşmektedir. Yine şekil 4.7’ de görülen nanoyapıların kaplama kalınlığı planladığımız gibi olup yaklaşık olarak ~760 nm’ dir. Öte yandan şekil 4.8’ de görülen silisyumun arka kontak kaplamasının kalınlığı ~175 nm’ dir. Bu kalınlık, kaplama işlemi için planladığımız ve hesapladığımız kalınlıkla örtüşmektedir.

EDS grafiklerindeki görülen en şiddetli pik Si elementine aittir ve bu pik, yüzeyi nanoyapı ile kaplanan Si kristalinden gelmektedir. Şekil 4.9’ da ZnO nanoyapısının EDS analiz grafiği verilmiştir.



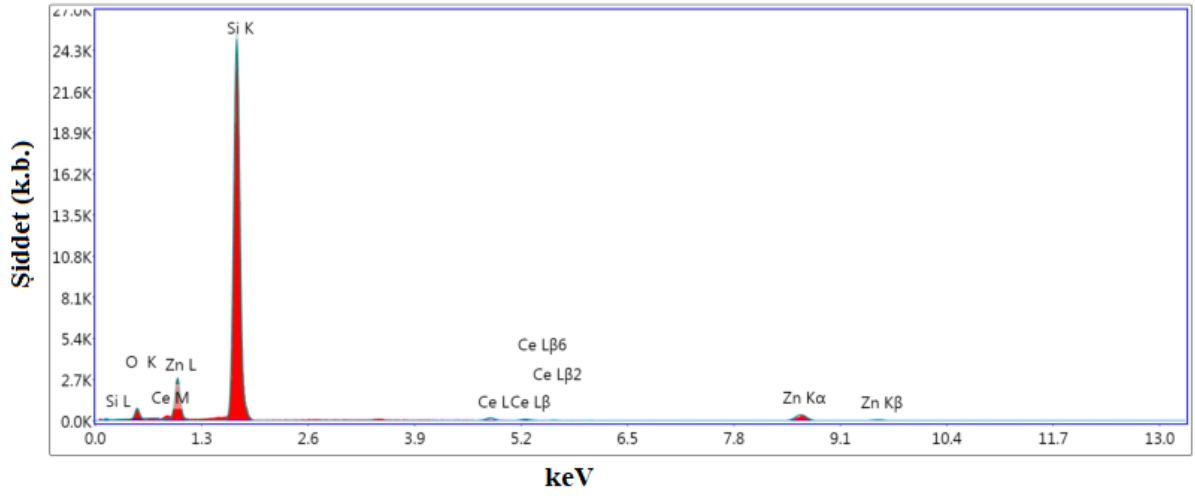
**Şekil 4.9:** ZnO nanoyapısının EDS analiz grafiği.

Şekil 4.10' da 1% mol Ce katkılı ZnO nanoyapısının EDS analiz grafiği verilmiştir.



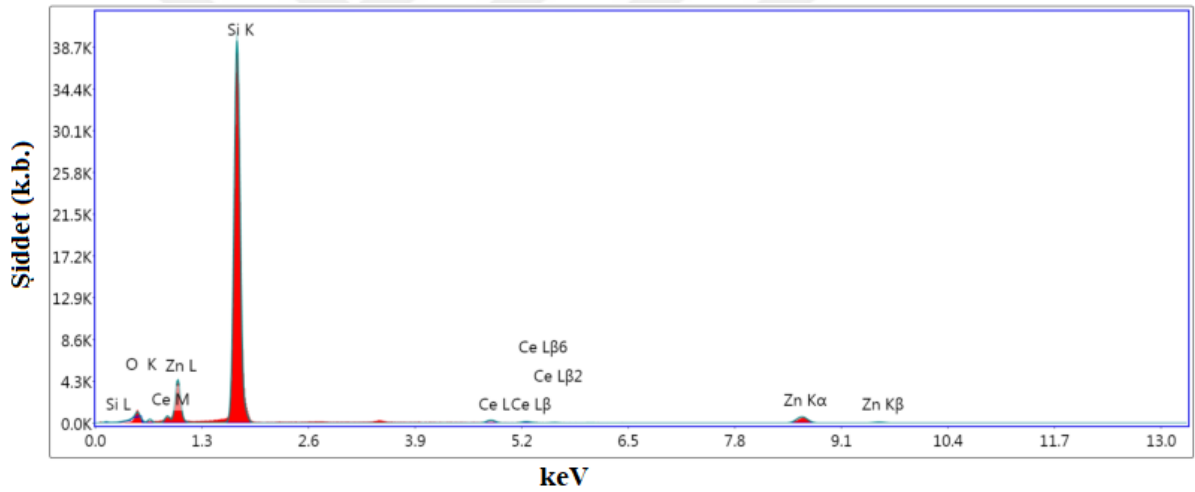
**Şekil 4.10:** 1% mol Ce katkılı ZnO nanoyapısının EDS analiz grafiği.

Şekil 4.11' da 2% mol Ce katkılı ZnO nanoyapısının EDS analiz grafiği verilmiştir.



**Şekil 4.11:** 2% mol Ce katkılı ZnO nanoyapısının EDS analiz grafiği.

Şekil 4.12’ de 5% mol Ce katkılı ZnO nanoyapısının EDS analiz grafiği verilmiştir.



**Şekil 4.12:** 5% mol Ce katkılı ZnO nanoyapısının EDS analiz grafiği.

Tablo 4.2’ de EDS analiz sonuçlarında elementlerin yapı içerisindeki kütlece atom yüzdeleri verilmiştir.

**Tablo 4.2:** EDS sonuçlarından elde edilen elementlerin yapı içerisindeki kütlece atom yüzdeleri.

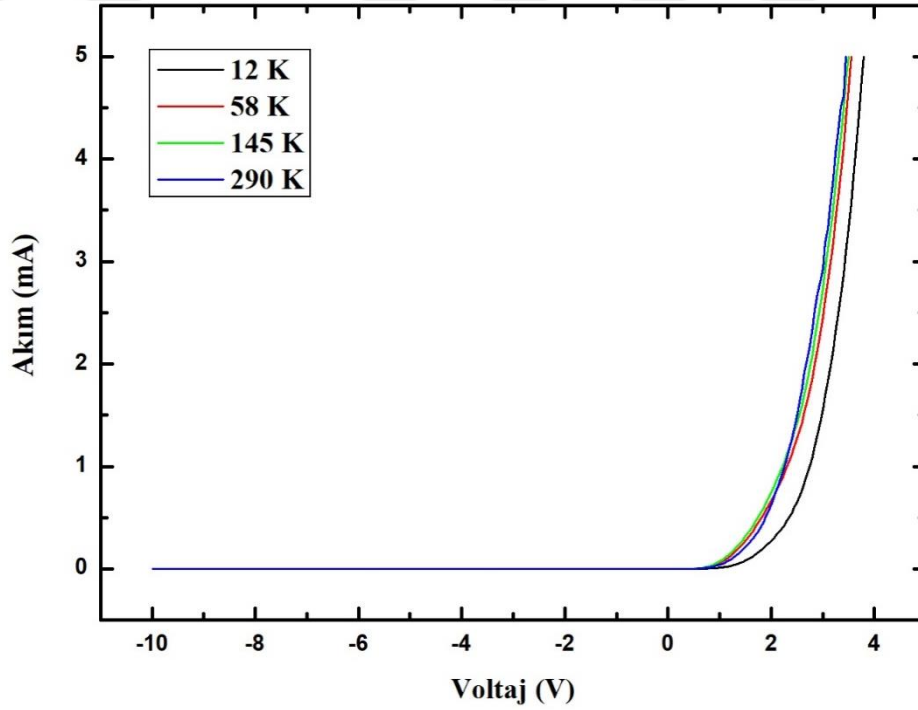
| Heteroeklem | Zn (w%) | Ce (w%) | O (w%) |
|-------------|---------|---------|--------|
| uZnO        | 89.69   | --      | 10.31  |
| CeZ1        | 79.68   | 1.3     | 19.02  |
| CeZ2        | 79.19   | 2.15    | 18.66  |
| CeZ5        | 78.69   | 3.25    | 18.06  |

EDS sonuçlarına göre, spektrumlar yalnızca Zn, O ve Ce atomlarını içermektedir. Bu da EDS verilerine göre nanoyapıların Zn, O ve Ce atomları dışında yapılarda, yabancı ve istenmeyen kirlilik atomlarının bulunmadığını göstermektedir. Tablo 4.2’ de verilen EDS analiz sonuçları, literatürle benzer ve karşılaştırılabilir sonuçları içermektedir [54].

#### 4.3. AKIM-VOLTAJ VE KAPASİTE-VOLTAJ ÖLÇÜM SONUÇLARI

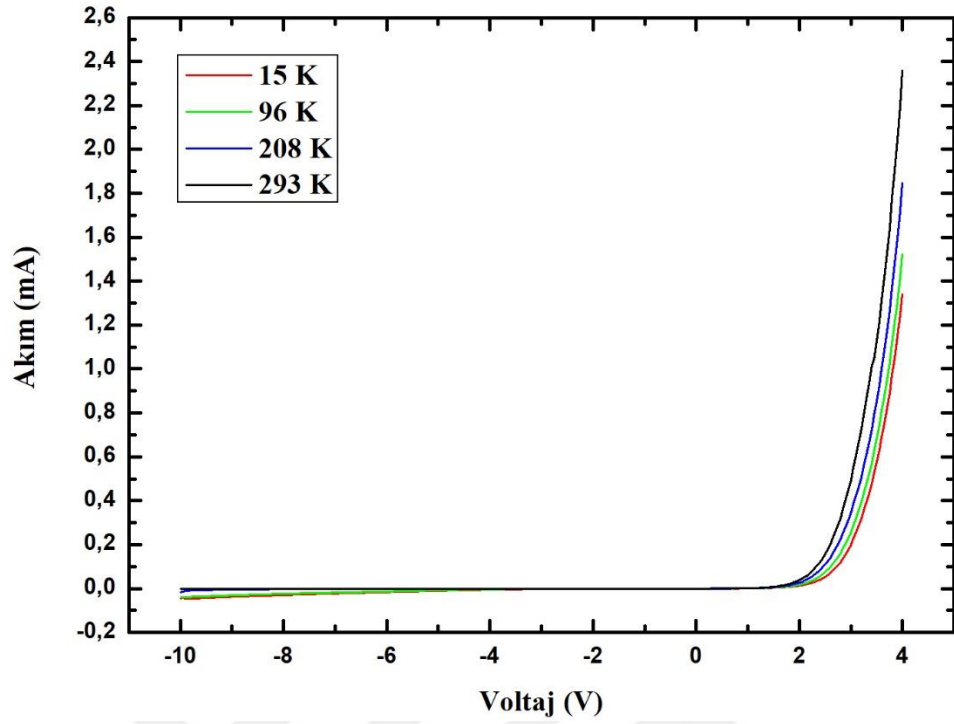
Denklem 2.7 kullanılarak I-V grafikleri üzerinde yapılan analizler ile kaçak akım ve idealite faktörü değerleri hesaplanmıştır.

Şekil 4.13’ de uZnO heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki I-V grafiği verilmiştir.



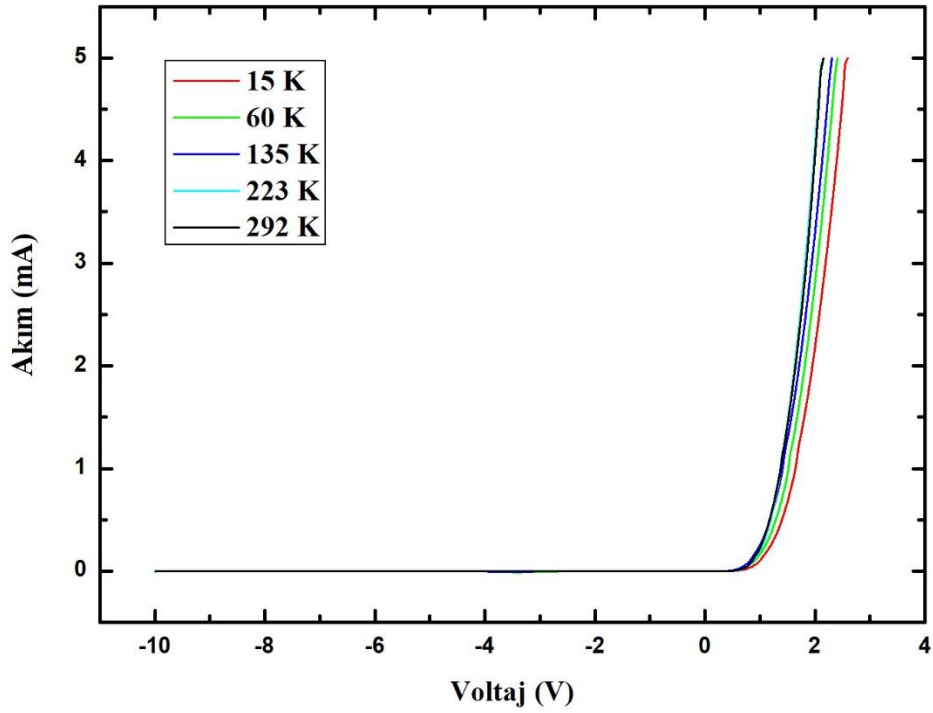
**Şekil 4.13:** uZnO heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki I-V grafiği.

Şekil 4.14’ de CeZ1 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki I-V grafiği verilmiştir.



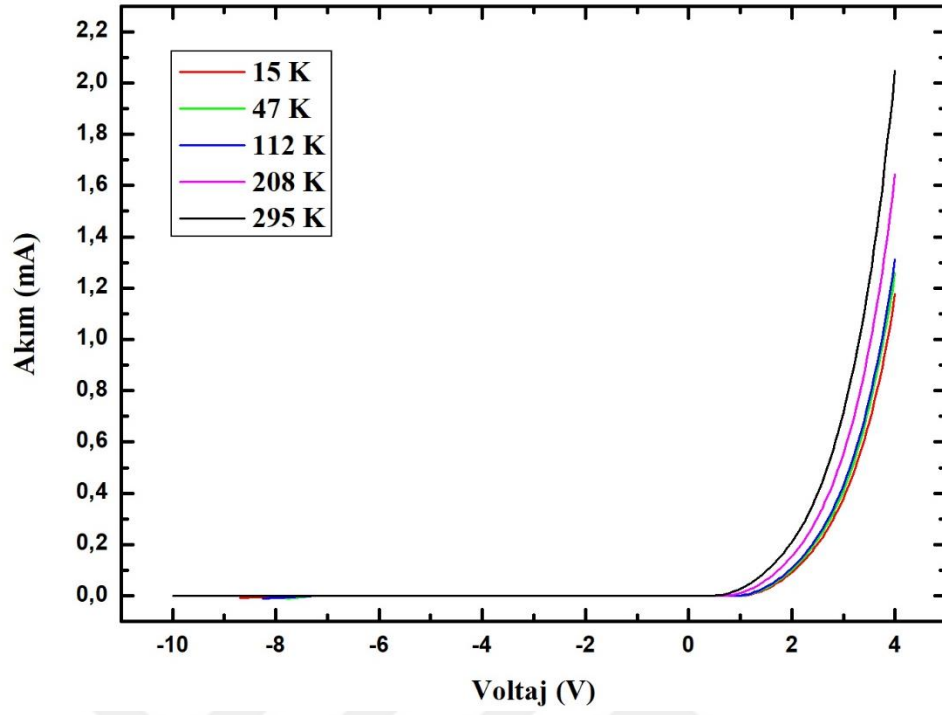
Şekil 4.14: CeZ1 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki I-V grafiği.

Şekil 4.15' de CeZ2 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki I-V grafiği verilmiştir.



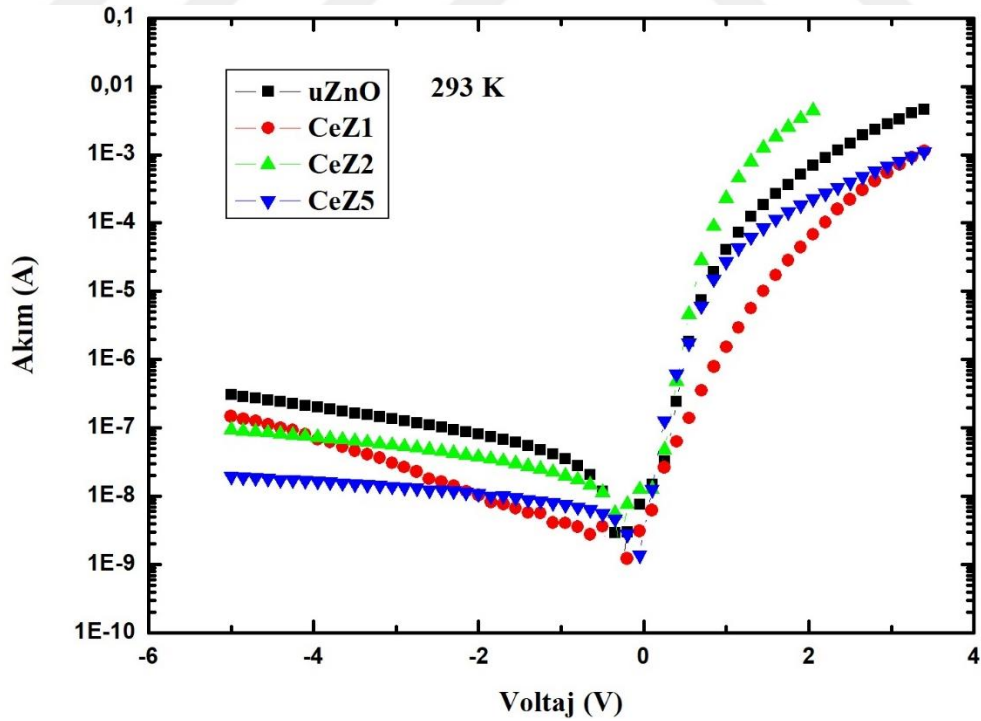
Şekil 4.15: CeZ2 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki I-V grafiği.

Şekil 4.16' da CeZ5 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki I-V grafiği verilmiştir.



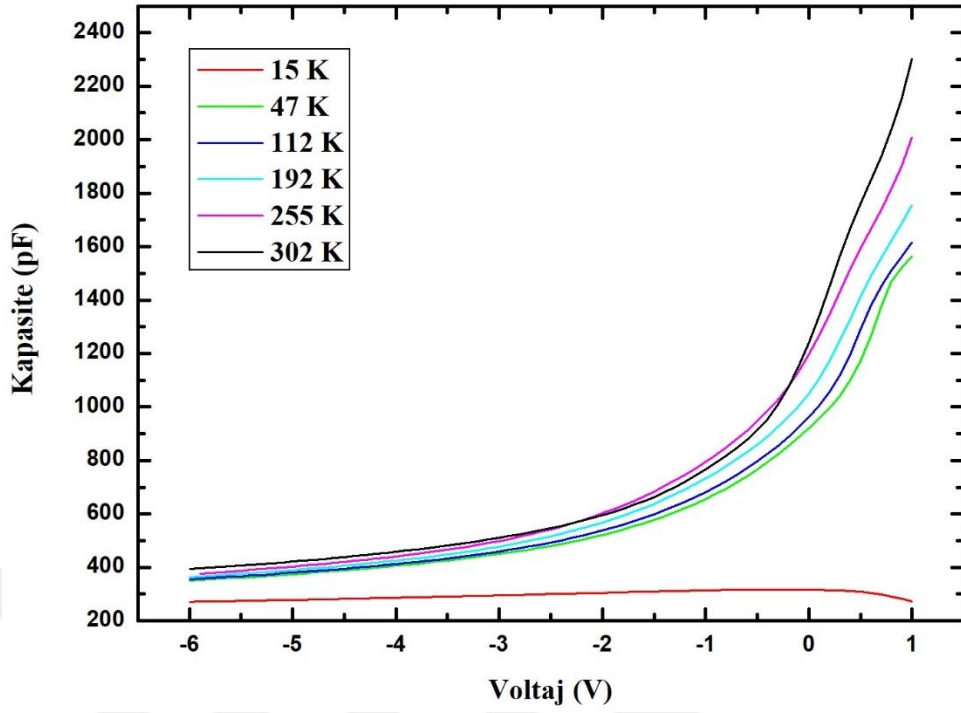
Şekil 4.16: CeZ5 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki I-V grafiği.

Şekil 4.17' de heteroeklemlerin oda sıcaklığındaki yarı logaritmik I-V grafiği verilmiştir.



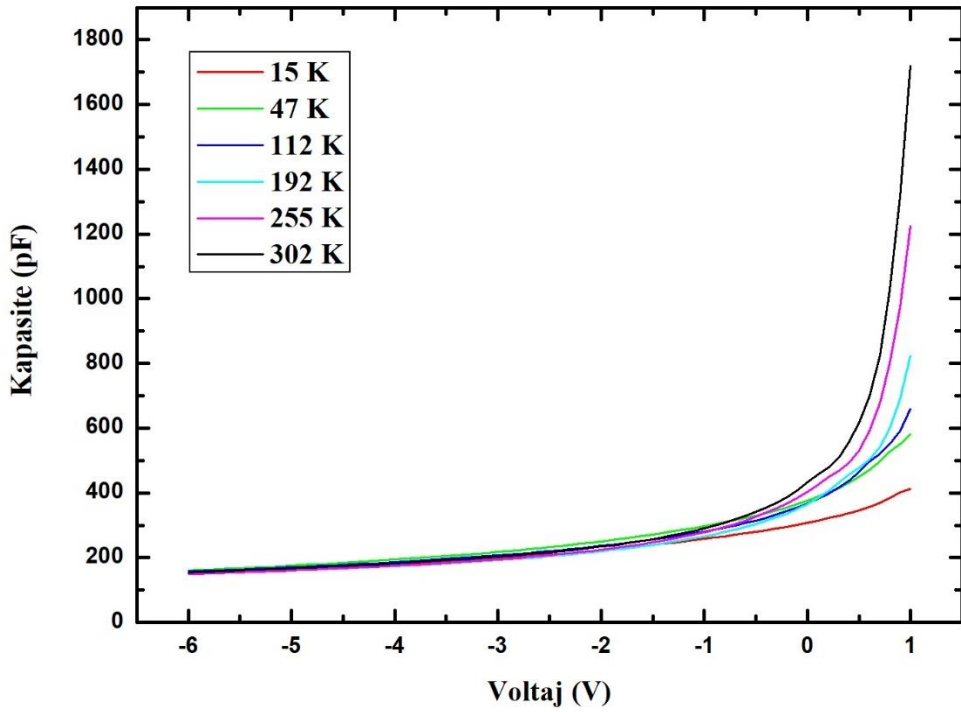
Şekil 4.17: Üretilen heteroeklemlerin oda sıcaklığındaki (293 K) yarı logaritmik I-V grafiği.

Şekil 4.18' de uZnO heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki C-V grafiği verilmiştir.



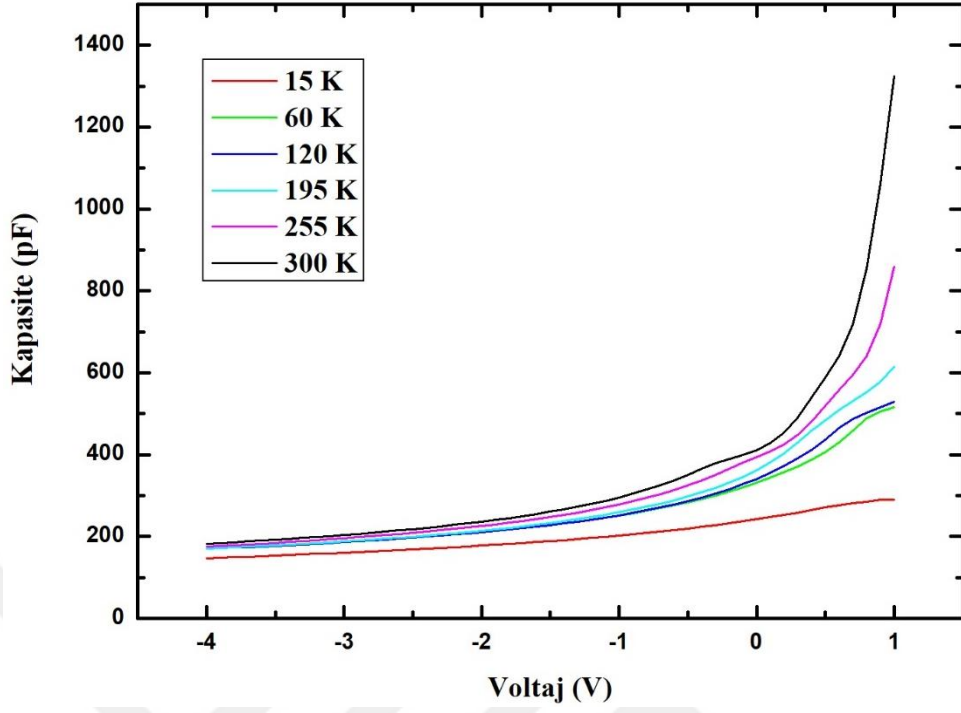
Şekil 4.18: Katkısız ZnO (uZnO) heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki C-V grafiği.

Şekil 4.19' da CeZ1 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki C-V grafiği verilmiştir.



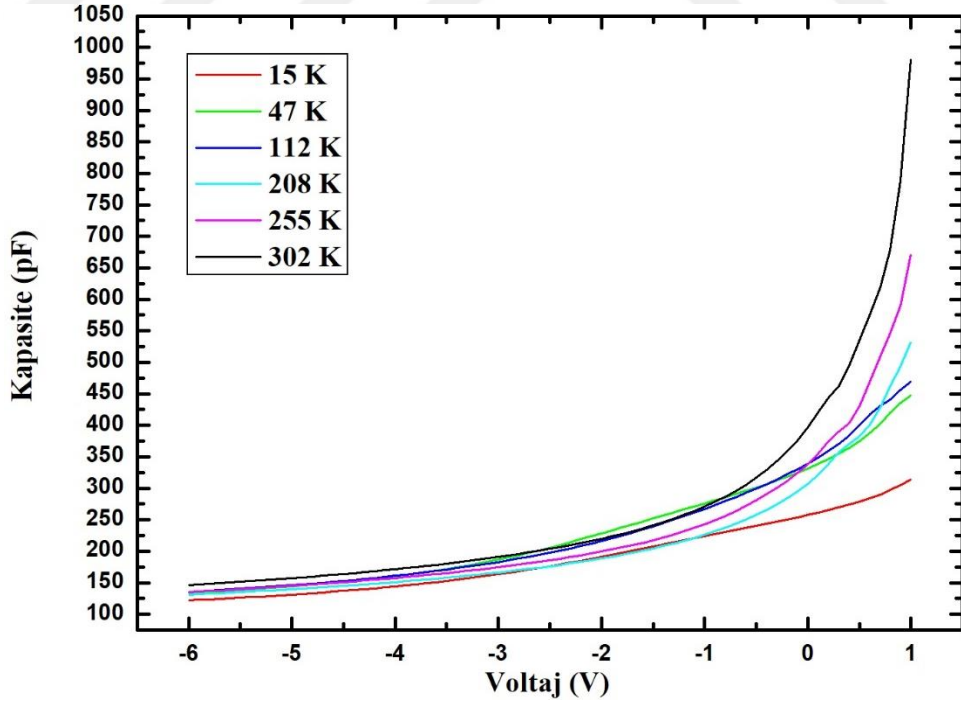
Şekil 4.19: CeZ1 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki C-V grafiği.

Şekil 4.20' de CeZ2 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki C-V grafiği verilmiştir.



Şekil 4.20: CeZ2 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki C-V grafiği.

Şekil 4.21' de CeZ5 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki C-V grafiği verilmiştir.

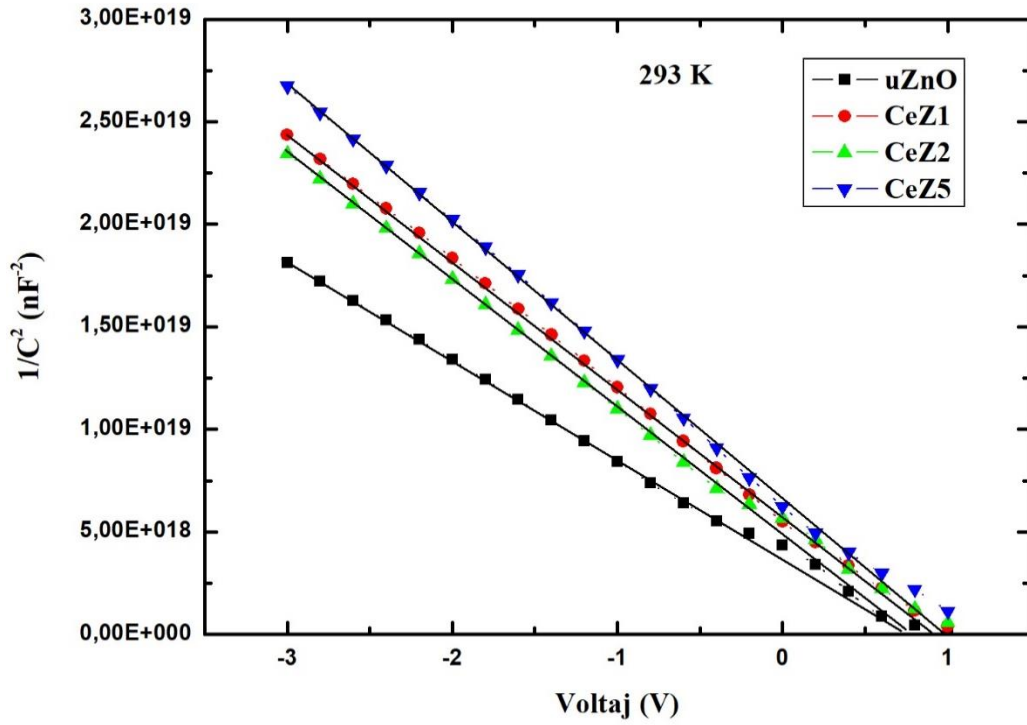


Şekil 4.21: CeZ5 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki C-V grafiği.

Sıcaklık azaldıkça, iyonize yük taşıyıcılarının sayısı da azalacaktır. Sonuç olarak, kapasite yük taşıyıcısı konsantrasyonuna bağlı olduğu için azalacaktır. C-V grafiklerine göre,

taşıyıcıların  $\sim 60$  K' nin altında donmaya başladığı açıktır. Bu, öncelikle termal olarak iyonize yük taşıyıcılarının kısmi hareketsizliğinin sonucudur [70]. Taşıyıcı konsantrasyonları, C-V grafiğinde verilen kapasite değerleri kullanılarak  $A^2/C^2=f(V)$  fonksiyonunun doğrusal kısmının eğiminden belirlendi. Burada A, diyot alanı ve ZnO dielektrik sabitini içermektedir.

Şekil 4.22' de üretilen heteroeklemlerin oda sıcaklığındaki (293 K)  $1/C^2$ -V grafiği verilmiştir. Bu grafikten heteroeklemlerin kontak potansiyelleri hesaplanmıştır.



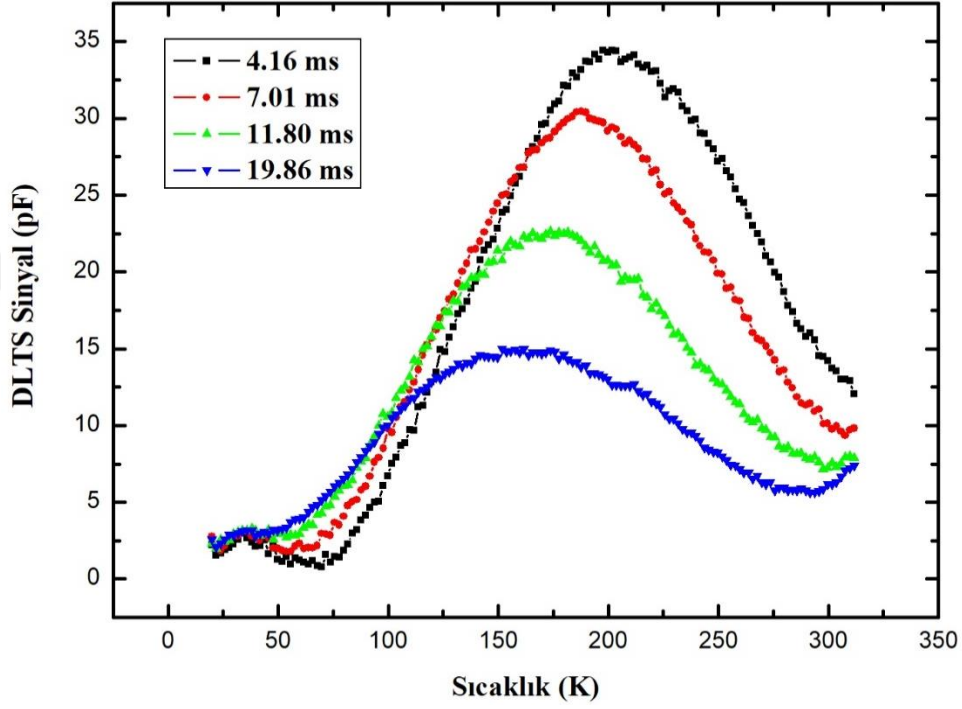
Şekil 4.22: Üretilen heteroeklemlerin oda sıcaklığındaki (293 K)  $1/C^2$ -V grafiği.

#### 4.4. HETEROEKLEMLERİN DLTS ÖLÇÜM SONUÇLARI

DLTS ölçümleri için atım voltaj değeri, heteroeklemlerin C-V ölçüm grafiklerinin ikinci derece türevleri alınarak elde edilen grafiklerden değişimlerin gözlemlendiği voltaj aralığı ile belirlenmiştir. Bu verilere göre başlangıç besleme atım voltajı  $V_R=0$ , uygulanan atım voltajı ise  $V_P=0.8$  V olarak belirlenmiştir. Uygulanan voltajın atım süresi ise  $t_p=1$  sn dir. Böylece uygulanan atım voltajının periyodu da 2 sn olmuş olur. Bu parametreler bütün heteroeklemlerin ölçümünde aynıdır. Bunun sebebi C-V grafiklerinin ikinci derece türevlerinden elde edilen grafiğin değişim aralığı benzerdir. Dolayısıyla bu parametreler bütün heteroeklemler için sabit tutulmuştur ve böylece aranılan tuzak seviyelerinin tespiti için

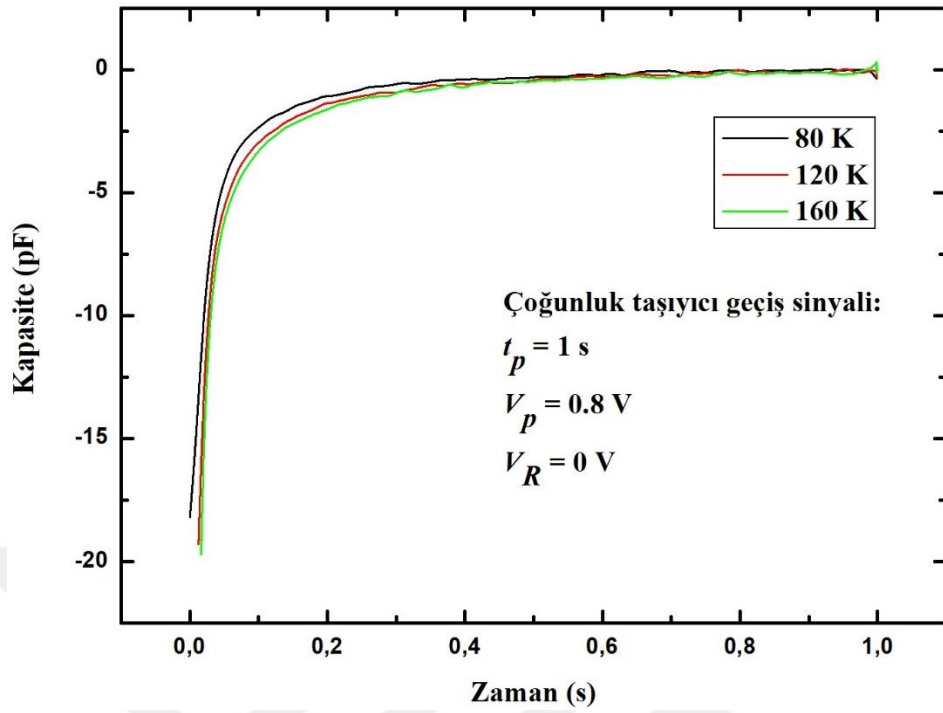
değişken sayısı azaltılmış ve heteroeklemlerin tuzak seviyeleri açısından kıyaslanabilmesi kolaylaştırılmıştır.

Şekil 4.23' de uZnO heteroekleminin DLTS ölçüm sonucu farklı hız pencerelerindeki DLTS sinyalleri ile verilmiştir.

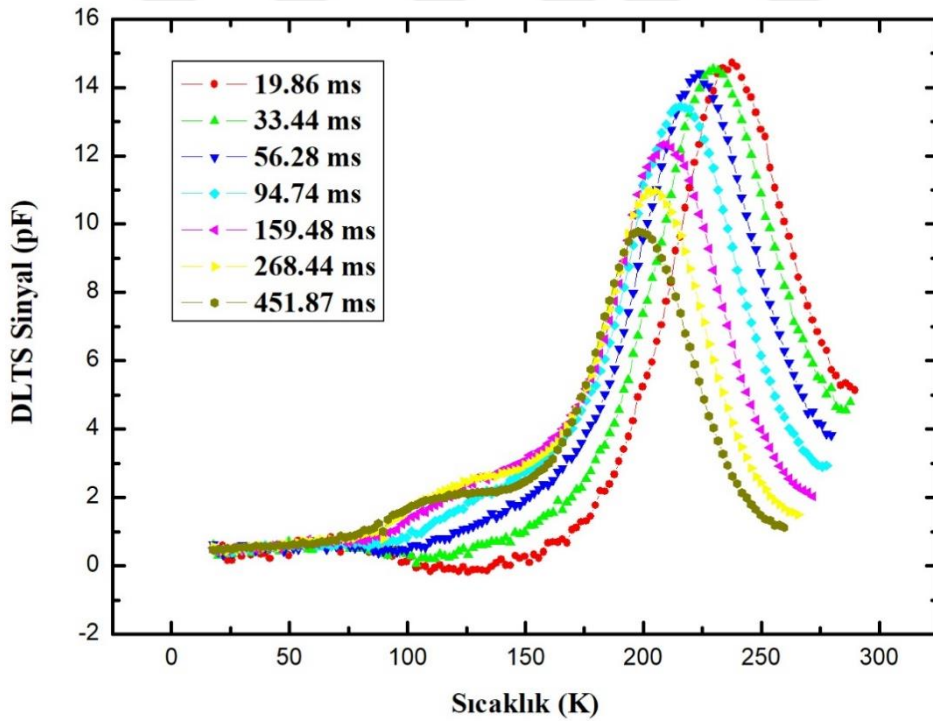


**Şekil 4.23:** uZnO heteroekleminin DLTS ölçüm sonucu farklı hız pencerelerindeki DLTS sinyalleri.

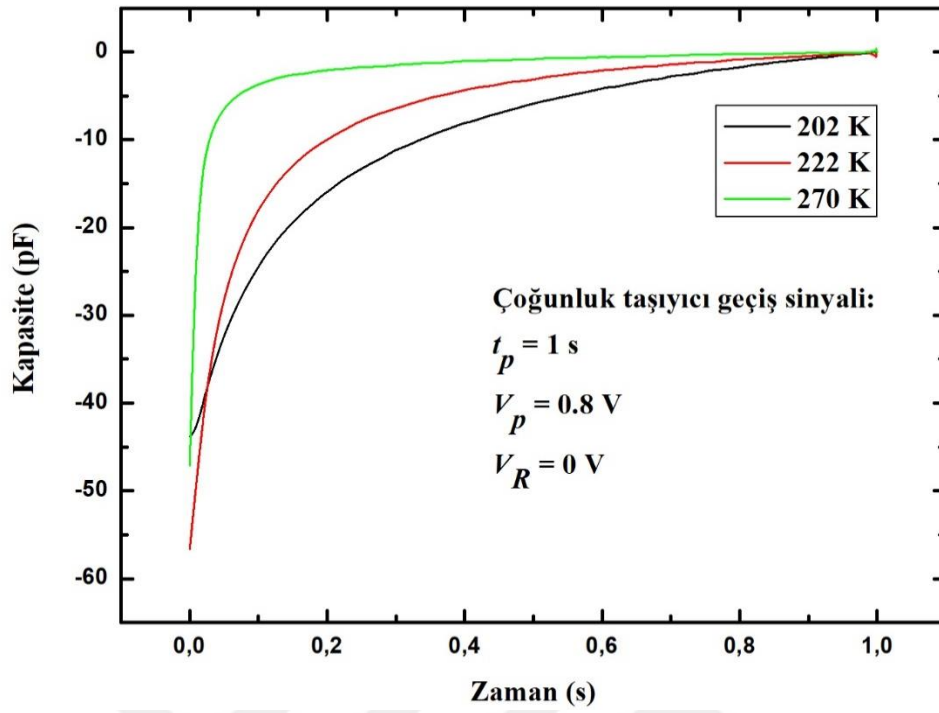
Şekil 4.24' de uZnO heteroekleminin farklı sıcaklıklarda kapasite geçiş sinyal değerlerinin bir kısmı verilmiştir. Bu kapasite geçiş sinyallerine göre seçilen hız pencereleri DLTS sinyallerini oluşturmaktadır. Şekil 4.25' de CeZ1 heteroekleminin DLTS ölçüm sonucu farklı hız pencerelerindeki DLTS sinyalleri ile verilmiştir. Şekil 4.26' da CeZ1 heteroekleminin farklı sıcaklıklarda kapasite geçiş sinyal değerlerinin bir kısmı verilmiştir. Şekil 4.27' de CeZ2 heteroekleminin DLTS ölçüm sonucu farklı hız pencerelerindeki DLTS sinyalleri ile verilmiştir.



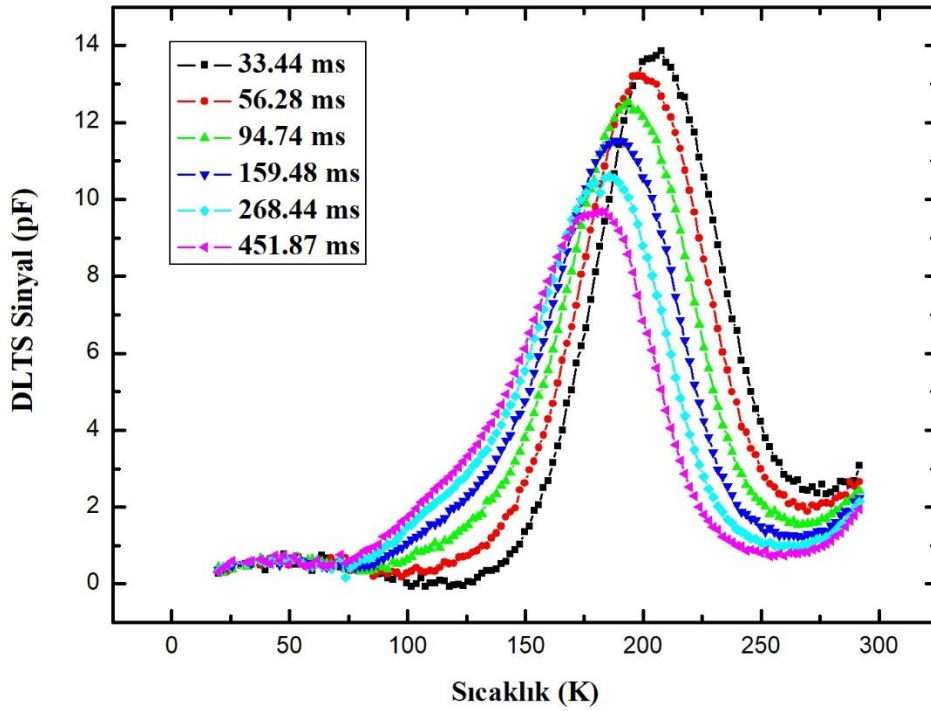
Şekil 4.24: uZnO heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki kapasite geçiş sinyallerinin bir kısmı.



Şekil 4.25: CeZ1 heteroekleminin DLTS ölçüm sonucu ve farklı hız pencerelerindeki DLTS sinyalleri.

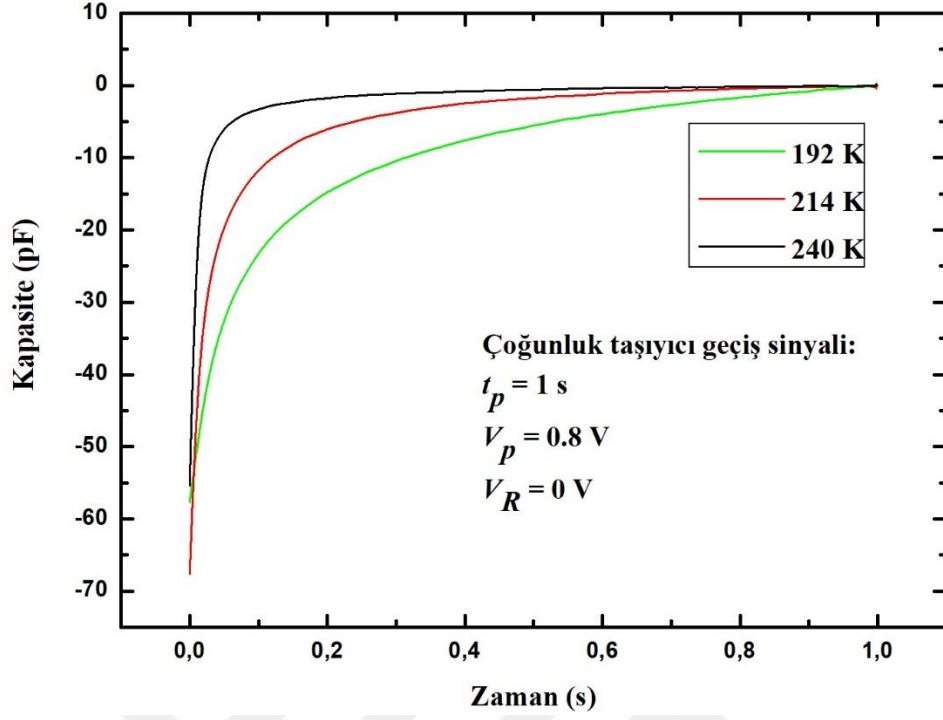


Şekil 4.26: CeZ1 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki kapasite geçiş sinyallerinin bir kısmı.



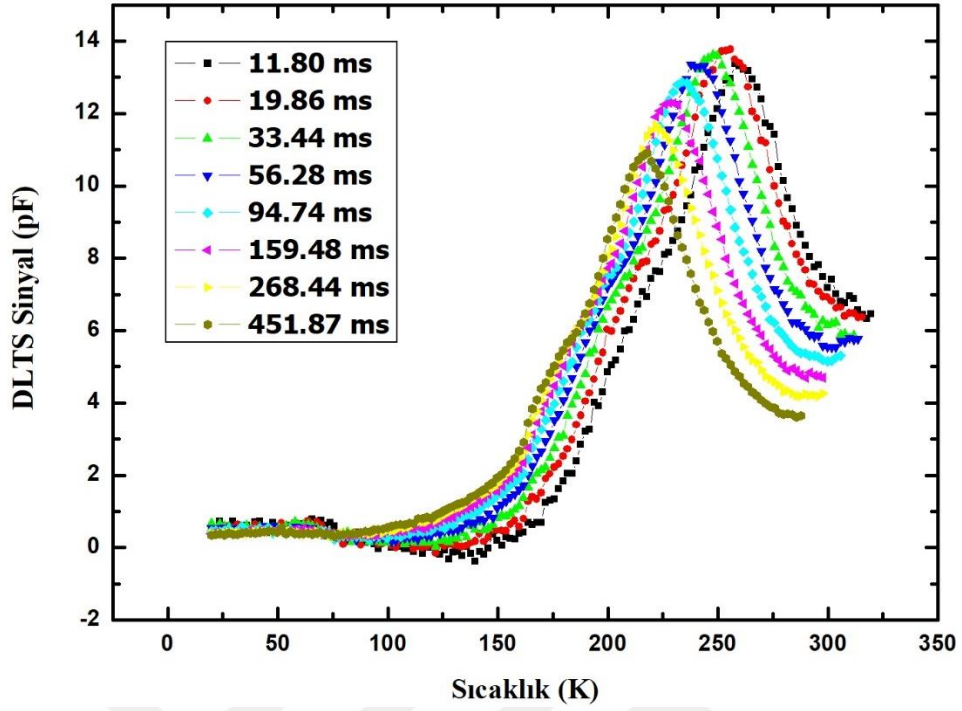
Şekil 4.27: CeZ2 heteroekleminin DLTS ölçüm sonucu ve farklı hız pencerelerindeki DLTS sinyalleri.

Şekil 4.28' de CeZ2 heteroekleminin farklı sıcaklıklarda kapasite geçiş sinyal değerlerinin bir kısmı verilmiştir.

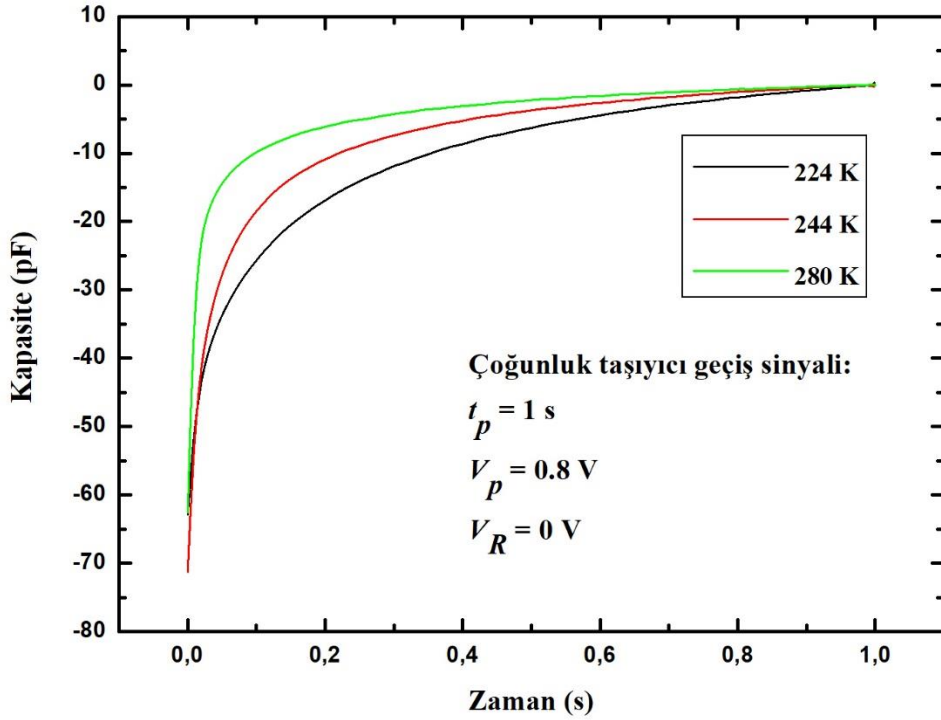


**Şekil 4.28:** CeZ2 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki kapasite geçiş sinyallerinin bir kısmı.

Şekil 4.29’ de CeZ5 heteroekleminin DLTS ölçüm sonucu farklı hız pencerelerindeki DLTS sinyalleri ile verilmiştir. Şekil 4.30’ da CeZ5 heteroekleminin farklı sıcaklıklarda kapasite geçiş sinyal değerlerinin bir kısmı verilmiştir.



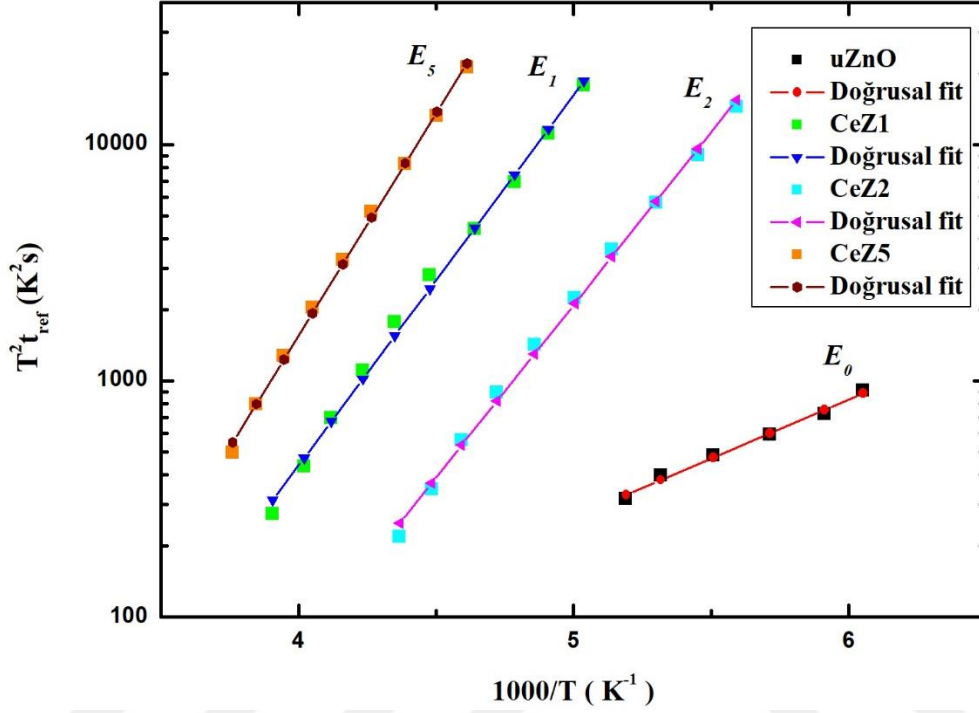
Şekil 4.29: CeZ5 heteroekleminin DLTS ölçüm sonucu ve farklı hız pencerelerindeki DLTS sinyalleri.



Şekil 4.30: CeZ5 heteroekleminin farklı sıcaklıklardaki kapasite geçiş sinyallerinin bir kısmı.

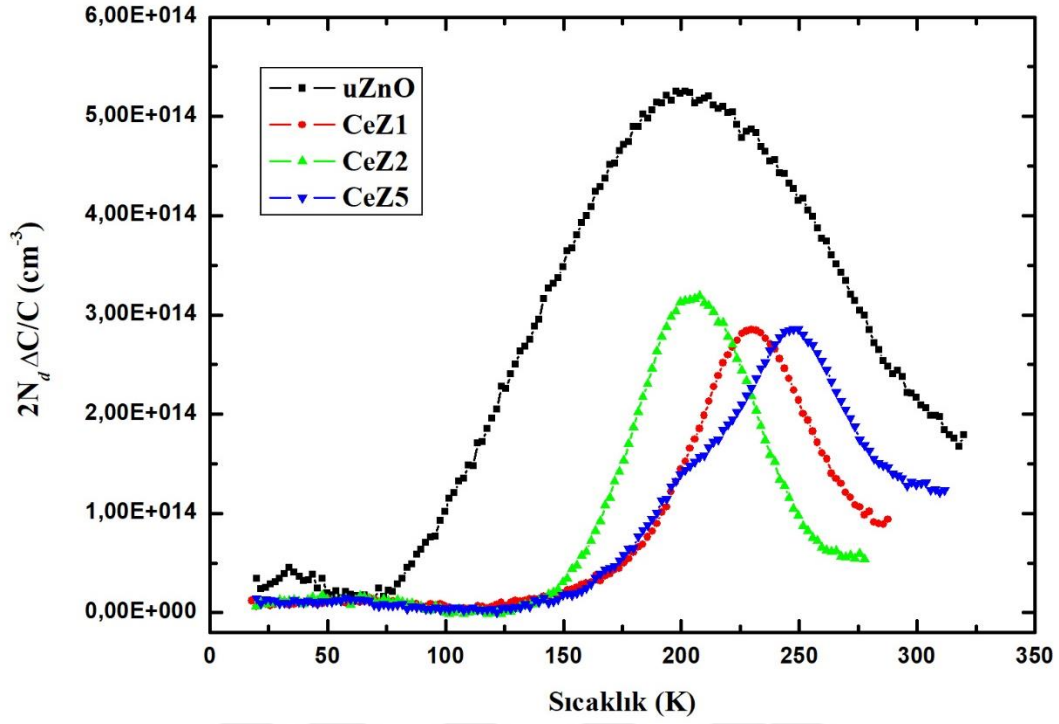
Son olarak DLTS sonuçlarından elde edilen, farklı hız pencerelerindeki DLTS sinyallerinin pik noktalarının karşılık geldiği sıcaklık değerleri ile belirlenen emisyon hızlarının sıcaklığın tersine göre grafiği olan ve Arrhenius grafiği olarak adlandırılan grafik şekil 4.31' de

verilmiştir. Bu grafikten, heteroeklemlerde tespit edilen tuzak seviyelerinin aktivasyon enerjileri grafiğin eğiminden ve bu eğimin sıcaklık eksenini kestiği değer ile de tuzakların yakalama tesir kesit alanları hesaplanmıştır.



**Şekil 4.31:** Üretilen tüm heteroeklemlerin Arrhenius grafiği.

Ayrıca yine DLTS sinyalleri kullanarak elde edilen sıcaklığa bağlı tuzak konsantrasyon grafiği 4.32' de verilmiştir. Bu grafikteki pik noktalarından maksimum tuzak konsantrasyon değerleri ( $N_t$ ) hesaplanmıştır.



**Şekil 4.32:** DLTS sinyalleri kullanarak elde edilen sıcaklığa bağlı tuzak konsantrasyon grafiği.

Yapılan elektriksel ölçümler sonucu elde edilen, kontak potansiyeli ( $V_{bi}$ ), katkı konsantrasyonu ( $N_d$ ), maksimum tuzak konsantrasyonu ( $N_t$ ), tuzakların aktivasyon enerjisi ( $E_a$ ), tuzakların yakalama tesir kesit alanı ( $\sigma$ ), heteroeklemlerin idealite faktörü ( $n$ ) değerleri Tablo 4.3’ de verilmiştir. Bu tablo elektriksel ölçümlerin özeti niteliğindedir. Hesaplamalarda kullanılan diyot alanı, alınan kontak noktalarının boyutu olan  $1.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm} = 2.25 \times 10^{-6} \text{ m}^2$  dir. Ayrıca ZnO için dielektrik sabiti 8.5 [39], Si için ise dielektrik sabiti 11.7 [71] alınmıştır. Si akseptör konsantrasyonu ise  $1.75 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  tür.

**Tablo 4.3:** Üretilen heteroeklemlerin hesaplanan elektriksel özellikleri.

| Heteroeklem | $V_{bi}$ (V) | $N_d$ ( $\text{cm}^{-3}$ ) | $N_t$ ( $\text{cm}^{-3}$ ) | $E_a$ (meV)    | $\sigma$ ( $\text{cm}^2$ ) | $n$  |
|-------------|--------------|----------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|------|
| uZnO        | 0.73         | $8.51 \times 10^{15}$      | $5.24 \times 10^{14}$      | $E_0 = 79.43$  | $1.43 \times 10^{-21}$     | 5.13 |
| CeZ1        | 0.89         | $6.08 \times 10^{15}$      | $2.85 \times 10^{14}$      | $E_1 = 311.39$ | $1.11 \times 10^{-17}$     | 3.87 |
| CeZ2        | 0.74         | $6.27 \times 10^{15}$      | $3.16 \times 10^{14}$      | $E_2 = 290.11$ | $2.49 \times 10^{-17}$     | 3.36 |
| CeZ5        | 0.93         | $5.57 \times 10^{15}$      | $2.86 \times 10^{14}$      | $E_5 = 386.70$ | $1.08 \times 10^{-16}$     | 5.40 |

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Tuzak seviyelerini araştırmaya başlamadan önce, üretilen heteroeklemlerin birbirleri ile kıyaslayabilmemiz için bu heteroeklemlerin eşit şartlarda olması istenmektedir. Yani üretim aşamasında, üretim şartlarından kaynaklanabilecek tuzak seviyelerinin oluşmaması istenmektedir. Çünkü bu tuzakların ayrımı zor olacaktır. Dolayısıyla kristal örgüdeki gerilimi azaltmak ve ortadan kaldırmak için tavlama işlemi uygulanmıştır.

Tavlama işleminin gerekçesi şu şekilde açıklanabilir. ZnO' nun termal genleşme katsayısı Si' den daha büyüktür ve bu da ZnO ile Si arasında çekme gerilimine neden olur. Sonuç olarak, silisyumların nanoparçacıklar ile kaplanması ve kaplama işlemi aşamasındaki 250 °C' de ara ısı işlem süreci sırasında, örgü uyumsuzluğu ve ZnO/Si arayüzünde oluşacak yüksek kusur konsantrasyonu nedeniyle ZnO' da önemli bir düzlemsel basınç gerilimi gelişir. Bu gerilimi azaltmak için yaygın olarak kullanılan bir yöntem, numuneleri bir fırında yüksek sıcaklıklarda tavlama işlemidir. Tavlama sırasında, ZnO' daki atomlar yeniden düzenlenir ve bu da içsel gerilimi azaltır. Çalışmalarda atmosfer ortamında 400 °C ile 600 °C arasındaki sıcaklıklarda yapılan tavlama işleminde, yapılar arası stresin etkili bir şekilde azaldığı ve daha iyi kristal yapılarının elde edildiği rapor edilmiştir [72,73]. Dahası, bu tavlama işlemi, silikonun arka tarafındaki alüminyum kaplama için omik temas özelliğini iyileştirmeye yardımcı olabilir. Si, alüminyum ve bor ile katkılı olduğunda benzer akseptör seviyeleri oluşturur. Sonuç olarak, bor katkılı Si üzerinde alüminyumla yapılan kontak omik özellik sergileyecektir. Dahası, tavlama işlemi sırasında alüminyumun silikona difüzyonu iletkenliği artırır ve kontakın omik davranışını iyileştirir [62,74–76]. Tavlama sıcaklığına ek olarak tavlama işleminin özellikleri de oluşacak kusurları ve üretilen diyotun kaçak akımını etkileyecektir [77].

Bu çalışmalar ve laboratuvarında yaptığımız önceki çalışmaları da göz önüne aldığımızda tavlama sürecinin özellikleri, tavlama sıcaklığı 450 °C ve bu sıcaklığa çıkarken sıcaklık arttırım hızı dakikada 4 °C olacak şekilde, tavlama süresi ise 450 °C' de 1 saat olacak şekilde belirlenmiştir.

XRD ölçümlerinde üretilen nanoyapıların, kristal kalitelerinin iyi olduğu görülmektedir. Öte yandan şekil 4.1' de Ce katkısı nedeniyle herhangi bir ikincil fazın veya safsızlık (kirlilik) fazının oluşmadığı görülmektedir. Bununla birlikte Ce katkısının etkisi, kırınım tepe

noktalarının şiddetinde ve konumunda kendini gösterir. Şekil 4.1' de kırınım piklerinin şiddeti, katkı miktarına bağlı olarak 1% mol katkı miktarında arttığı, 2% mol katkı miktarında zayıfladığı ve 5% mol katkı miktarında ise tekrar arttığı görülmektedir. Pik şiddetinin artması kristal kalitesinin arttığını gösterirken, pik şiddetinin azalması da kristal kalitesinin bozulduğunu gösterir [78,79]. Buradan hareketle bu çalışmada Ce katkısının ZnO' nun kristal kalitesinde bir iyileşme sağladığı ve en iyi kristal kalitesine sahip yapının ise en şiddetli (101) kırınım pikine sahip olan CeZ1 olduğu söylenebilir. Kristal kalitesindeki iyileşme şöyle açıklanabilir; Genel olarak ZnO nanoyapıları kimyasal olarak aktiftir ve oksijen yüzeyde ve bağlanma sınırında adsorbe edilebilir [80]. Oksijenin kimyasal adsorpsiyonu durumunda, serbest elektronlar için tuzak bölgeleri görevi görürler ve bağlantı sınırının potansiyel bariyerinin artmasına neden olurlar. Bağlantı sınırları, kristal kalitesini büyük ölçüde etkileyen boşluklar, sarkan (uzantı) bağlar vb. gibi çeşitli kusurlar içerebilir [81]. Ana örgüye uygun miktarda katkı maddesinin eklenmesi, sınır kusurlarının azaltılmasına yardımcı olabilir [82]. Bu bilgilere dayanarak, Ce atomunun ZnO kristaline katkılanması, oksijen boşlukları ( $V_o$ ) ve başlangıçta Zn tarafından işgal edilen ara yüzey kusurları ( $Zn_i$ ) gibi kusurların azalmasına ve buna bağlı olarak bu çalışmada ürettiğimiz nanoyapıların kristal kalitelerinin artmasına neden olduğu düşünülmektedir [83,84]. Katkı miktarının artmasıyla kristal kalitesindeki bozulma, Zn (0.074 nm) ve Ce (0.114 nm) iyonları arasındaki boyut farkının neden olduğu strese (gerilime) ve Ce atomlarının bağlantı sınırından ayrılmasıyla da ilişkilendirilebilir [85–87].

Şekil 4.1' in işaret ettiği diğer bir durum, ZnO örgüsüne Ce katıldığında kırınım pik noktalarının konumundaki değişikliklerdir. uZnO nanoyapısının XRD spektrumundaki ana piki (101)  $35.912^\circ$  ye karşılık gelirken, CeZ1, CeZ2 ve CeZ5 nanoyapılarındaki bu pik sırasıyla  $35.913^\circ$ ,  $36.168^\circ$  ve  $35.967^\circ$  ye karşılık gelmektedir. Diğer tüm pikler için de benzer kaymalar vardır. Yani ZnO örgüsüne az miktarda Ce (1% ve 2% mol) katkıldığında kırınım pikleri büyük açılara doğru kayarken Ce katkısı miktarı arttığında (5% mol) ise kırınım pikleri küçük açılara doğru kaydığı XRD grafiğinde görülmektedir.

Genel olarak, bir kristal örgüye, örgüyü oluşturan atomların iyon çaplarından daha büyük bir iyon çapına sahip elementin katkı atomları geldiğinde, kristalin örgü parametrelerini haliyle de örgünün hacmini etkiler [88]. Buna göre, şekil 4.1' de görülen kırınım piklerinin konumlarındaki kaymalar ve Ce katkısı ile kristal örgüsünde oluşan düzensizliğe ve Ce

atomunun iyonik yarıçapının (0.114 nm) Zn atomunun iyonik yarıçapından (0.074 nm) daha büyük olmasının yarattığı gerilime atfedilebilir [89–91]. Bu olgu kristal örgü içinde strese neden olur. Ek olarak, hetero yapılarda, örgü sabitlerindeki farklılık örgü uyumsuzluğuna yol açar ve bu da gerilime (stres) neden olur. Bu stres, kristal örgü sabitiyle (*c*-ekseni) içsel olarak bağlantılıdır; örgü sabitleri arasındaki uyumsuzluk arttıkça, örgü uyumsuzluğundan kaynaklanan stres de buna bağlı olarak artar [92–95]. Tablo 4.1’ de, malzemelerin örgü sabitlerini ve XRD analiziyle belirlenen, kristal örgü içindeki, ilişkili stres miktarları verilmiştir. Hesaplamalar, Vinay Gupta ve Abhai Mansingh tarafından yayınlanan çalışmalarında [92] oluşturulan metodolojilere dayanılarak yapılmıştır.

Tablo 4.1, FWHM ve  $\delta'$  nın Ce katkısıyla azaldığını ve  $D'$  nin Ce katkısıyla az miktarda arttığını gösterirken Ce:ZnO nanoyapılarında bu parametreler Ce konsantrasyonuna göre değiştirmektedir. Ce katkısı ile FWHM’ un azalması daha keskin piklerin elde edildiğini ve dolayısıyla da yapıların kristal kalitesinin arttığını göstermektedir.

Diğer yandan,  $D'$  nin Ce katkısı ile artması Zener çivileme etkisinden kaynaklanabilirken, Ce:ZnO nanoyapılarında Ce konsantrasyonuna bağlı olarak  $D'$  nin artması yada azalması, iyonik yapı farkından kaynaklanan stresten dolayı ve de ZnO kristalinin içerisindeki ara bölgeleri işgal eden Ce atomlarının oluşturduğu dislokasyonlardan dolayı oluşmaktadır [89,96]. Kristal yapısındaki kusurları ifade eden  $\delta'$  nın ZnO kristal örgüsüne Ce katkılanması ile azalması, kusurların örgüye uygun miktarda katkılama ile etkili bir şekilde azaltılabilmesinin bir sonucu olabilir [82,97]. Bununla birlikte, katkı konsantrasyonuna bağlı olarak Ce:ZnO nanoyapılarındaki  $\delta$  değerinin değişimi Zn atomlarının ve Ce atomlarının iyonik yarıçaplarındaki farklılıklardan kaynaklanabilecek nokta kusurlarına dayandırılabilir [67,98].

SEM bulguları, uZnO için parçacık boyutunun Ce:ZnO nanoyapılarından daha büyük olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, parçacık boyutunun artan Ce içeriğiyle azaldığı görülmektedir. Bu eğilim, Ce katkı maddesi konsantrasyonunun örgü düzeni ve tane sınırları üzerindeki etkisinden kaynaklanıyor olabilir [35,99]. SEM sonuçlarından, morfolojik olarak yapıların aynı formda ve baskın olarak düzgün küresel yapıda oldukları görülmektedir. Aynı formda olmaları üretilen nanoyapıların homojen dağılım gösterdiğini işaret eder [34,51]. Ce katkı maddesi konsantrasyonu arttıkça yüzey gözenekliliğinin azaldığı ve bunun sonucunda kompakt bir yapı oluştuğu görülmektedir. Bunun bir sebebi, Ce katkısı ile nanoparçacıkların

büyükliğünün azalması olsa da, bu olgu, Ce katkısının neden olduğu oksidasyon durumundaki artışa ve tavlama işleminin atmosferik bir ortamda gerçekleştirilmesine de bağlanmaktadır [100]. Bu sonuçlara benzer bir sonuç literatürde başka bir nadir toprak elementi olan lantan (La) için de rapor edilmiştir [101].

EDS sonuçlarından ise, üretilen nanoyapılarda Zn, O ve Ce elementleri dışında istenmeyen kirlilik atomlarının olmadığı görülmektedir. Yani başka bir elemente rastlanmamıştır. Bu sonuç, heteroeklemlerin kusur karakterizasyonu yapılırken, kusur seviyelerinin, aktivasyon enerjilerinin, yakalama tesir kesit alanlarının ve kusur konsantrasyonlarının sadece Ce katkısı ile nasıl değiştiğini incelememiz açısından önemlidir ve bize Ce katkısı ile bu özelliklerin nasıl değiştiğini açıklamamızda kıyas bakımından kolaylık sağlar. EDS verilerindeki kritik sonuç, yapıdaki oksijen içeriğinin Ce katkısı ile artmasıdır.

Yapılan C-V ölçümü analizlerinden üretilen heteroeklemlerin kontak potansiyelleri Tablo 4.3' de verildiği gibi uZnO için 0.73 V iken 1% Ce katkılıandığında bir miktar artarak 0.89 V olarak hesaplandı ve 2% Ce katkılama miktarında ise tekrar azalarak 0.74 V olarak hesaplandı. 5% katkı miktarında ise tekrar arttığı görüldü. Kontak potansiyeli heteroeklemi oluşturan malzemelerin elektron ilgileri ve heteroeklemin bariyer yüksekliği ile ilgilidir. Bariyer yüksekliği Ce:ZnO ve Si iş fonksiyonları arasındaki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Teoride elektron ilgileri ( $\chi$ ), ZnO ve p-Si için sırasıyla 4.25 eV ve 4.95 eV' dir. Dolayısıyla kontak potansiyeli de teoride 0.79 eV olarak hesaplanabilir. Ancak deneysel sonuçlarda daha yüksek kontak potansiyeli değerleri de rapor edilmiştir [102–104]. Ayrıca potansiyel bariyer yüksekliği termiyonik emisyon teorisinden diyot alanına (A) da bağlıdır. Dolayısıyla deneysel çalışmalarda farklı diyot alanları için farklı değerler elde edilebilir [61].

Yine tablo 4.3' de verilen ve C-V ölçümlerinden hesaplanan üretilen heteroeklemlerin taşıyıcı konsantrasyonları  $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  mertebesinde dir. Bu sonuçlar literatürde yapılan çalışmalar ile tutarlıdır. Paradowska ve arkadaşlarının yapmış olduğu (111) kristal yapısına sahip p-tipi Si üzerine magnezyum (Mg) katkılı ZnO ile üretilen heteroeklem üzerinde yaptıkları çalışmada benzer sonuçlara varmışlardır [73]. Başka bir benzer sonuç AZO/p-Si üzerine yapılan çalışma için de geçerlidir [105]. Ancak yapılan başka çalışmalarda,  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  mertebesinin üzerinde katkı konsantrasyon değerleri de hesaplanmıştır. Bu durum yapıdaki oksijen konsantrasyonu ile ilgilidir. ZnO kristal yapısına daha fazla oksijen katılması durumunda, daha düşük elektron konsantrasyonu gözlemlenebilir [106].

Öte yandan yapılan I-V ölçümlerinden, üretilen heteroeklemlerin iyi birer diyot yapısında oldukları görülmektedir. Farklı sıcaklıklarda alınan I-V ölçümlerinden ileri besleme durumunda sıcaklık düştükçe kırılma voltajının arttığı görülmektedir. Bu durum heteroeklemlerin ideal diyot yapısına uyduğunu gösterir. Yarı-logaritmik I-V grafiğinden kaçak akımların  $1.96 \times 10^{-8}$  A ile  $3.09 \times 10^{-7}$  A aralığında değiştiği görülmektedir. Bu ölçümler 293 K ve  $-5$  V geri besleme voltajında gözlemlenmiştir. Ce katkılanması kaçak akımı sistematik olarak azalttı. Üretilen heteroeklemler literatür ile karşılaştırıldığında çok düşük kaçak akıma sahiptir [73,104]. Heteroeklemlerin idealite faktörü ( $n$ ), heteroeklemlerin I-V ölçümlerinden hesaplanır. Yarı logaritmik I-V grafiğinin ileri besleme voltajı ile ölçülen akım değişiminin lineer kısmın eğiminden  $n$  değeri hesaplanmıştır. Tablo 4.3' deki verilere göre aynı zamanda heteroeklemlerin kalitesini de gösteren idealite faktörü 3.36 – 5.40 aralığında değişmektedir. Bu değerler teoride ideal diyot yapısının  $n=1$  olduğu durum ile kıyaslandığında yüksektir. Bu durum yapıdaki kusur seviyeleri ile ilgili olabilir. Ce katkılı olduğunda idealite faktörünün azaldığı görülmektedir. Literatürde ise 1% Ce katkılı ZnO/p-Si için idealite faktörü 3.7 olarak rapor edilmiştir [99]. İdealite faktörünün düşük olması heteroeklemin iyi bir diyot yapısında olduğunu gösterir. Bu nedenle en iyi diyot yapısına sahip heteroeklem, idealite faktörü 3.36 olan CeZ2' de görülmektedir. Ancak Ce katkısı 5% olduğunda diyot yapısının bozulduğu görülmektedir. Literatürde 1% katkı konsantrasyonunda Mg:ZnO/p-Si heteroeklemi için idealite faktörü 5.62 olarak rapor edilmiştir [73]. Buradan ZnO bazlı diyot yapısında Ce katkısının Mg katkısına göre daha etkin bir rol oynadığı düşünülebilir.

Tez çalışması kapsamında yapılan DLTS ölçümlerinin amacı, üretilen heteroeklemlerin arayüzeyinde oluşabilecek kusur seviyelerini tespit etmektir. İleri yönde besleme voltajı uygulandığında, diyotun kontak potansiyelinin uygulanan voltaj miktarı kadar azalacağı ve arınmış bölge genişliğinin de azalacağı bilinmektedir. Arayüzde meydana gelen kusur seviyelerini araştırmak için arınmış bölge genişliğinin azaltılması gerektiği açıktır [107–110].

DLTS ölçümlerinde, taranan sıcaklık aralığında (20 K – 300 K) üretilen her heteroeklem için DLTS spektrumlarında bir adet pik gözlemlendiğinden dolayı bu pik, bir tuzak seviyesine aittir. DLTS çalışmasında çoğunluk ve azınlık taşıyıcı tuzakları tespit edilebilir. Başlangıç besleme voltajı (doldurma atım voltajı)  $V_R \leq 0$  olduğunda ve atım voltajı ( $V_P$ ) uygulandığında, kapasite geçiş spektrumunda çoğunluk taşıyıcıları gözlemlenebilir. Bununla birlikte  $V_R > 0$

olduğu durumda azınlık tuzakları dolu olacaktır ve bu tuzaklar elektriksel olarak aktiftirler [73]. Bu durumlar göz önünde bulundurulduğunda, tespit ettiğimiz tuzakların, hem ileri yönde atım voltajı ( $V_P$ ) hem de yukarıda belirtilen çoğunluk taşıyıcı geçiş sinyallerinin özelliklerinden dolayı tez çalışmasında yapılan DLTS ölçümlerinde tespit edilen tuzakların çoğunluk taşıyıcı tuzakları (burada elektron) oldukları düşünülmektedir.

Heteroeklemler için hesaplanan tuzak seviyelerinin aktivasyon enerjisi, iletkenlik bandı kenarının ( $E_C$ ) altında yer alır ve sırasıyla uZnO, CeZ1, CeZ2 ve CeZ5 için  $E_0$ ,  $E_1$ ,  $E_2$  ve  $E_5$  olarak isimlendirilmiştir. Dolayısıyla, elektron tuzaklarının konumu sırasıyla iletkenlik bandı kenarı altında ve yakınında  $E_C - E_0$ ,  $E_C - E_1$ ,  $E_C - E_2$  ve  $E_C - E_5$  enerji seviyesi konumunda yer alacaktır.

Tablo 4.3' de verilen tuzakların aktivasyon enerjileri ( $E_a$ ) ve yakalama tesir kesit alanları ( $\sigma$ ) Arrhenius grafiğinden hesaplanmıştır. Katkısız ZnO ile üretilen heteroeklem için aktivasyon enerjisi 79 meV olarak hesaplanmıştır ve iletkenlik bandına çok yakındır ( $E_C - 0.079$  eV). Böyle tuzak seviyeleri sık tuzak seviyeleri olarak adlandırılırlar ve ZnO için benzer bir sonuç literatürde rapor edilmiştir [111]. ZnO/Si heteroekleminde meydana gelen kusurlar, Si kristal yapısı, ZnO sentezleme yöntemi, tavlama sıcaklığı ve ZnO kristal tipine bağlı olmasına rağmen, kusurların ana nedeni ZnO kristal örgüsündeki oksijen boşluklarının ( $V_O$ ) varlığıdır [103,104,112]. Tuzak seviyesinin Ce katkısı ile iletkenlik bandının altına, daha derinlere doğru ilerlediği görülmektedir. Aktivasyon enerjisi ( $E_a$ ), CeZ1 ( $E_C - 0.311$  eV) ve CeZ2 ( $E_C - 0.290$  eV) için birbirine çok yakındır ancak CeZ5 ( $E_C - 0.386$  eV) için biraz daha yüksektir. Yakalama tesir kesit alanı ise Ce katkı miktarı arttıkça sistematik olarak artmıştır.

Ce katkısı yapıda önemli rol oynar, kristal örgü kusurunun ve oksijen boşluğunun artmasına neden olur.  $Zn^{2+}$  ve  $Ce^{4+}$  için ilgili iyonik yarıçapları göz önüne alındığında, kristal örgü içerisinde  $Ce^{4+}$  iyonunun  $Zn^{2+}$  iyonun yerini aldığı olasıdır. Bu durum kusur oluşum reaksiyonuna göre denklem 3.1' deki gibi  $Zn^{2+}$  iyonları yerine  $Ce^{4+}$  iyonları geçebilir.

Ayrıca ZnO içerisindeki Ce katkı maddesinin  $Ce^{2+}$ ,  $Ce^{3+}$  ve  $Ce^{4+}$  gibi farklı iyonları fazladan oksijen kusuru oluşturmuş olabilir [50,51]. Literatürde yapılan Raman çalışmasına göre, Ce:ZnO yapısında oksijen boşlukları ( $V_O$ ) veya örgü diziliminde Zn atomlarının olmamasından kaynaklı nokta kusurların ( $Zn_i$ ) varlığı rapor edilmiştir [50].

Yapıdaki kusurların hangi tür kusurlar olduğunun anlaşılması için yapının oksidasyon durumunun bilinmesi gerekmektedir. Örneğin denklem 3.1' de verilen kusur oluşum eşitliğinde yapının oksidasyon durumu yani yapıda var olan Ce iyonu  $Ce^{4+}$  için verilmiştir. Literatürdeki bir çalışmada, ZnO' daki Ce konsantrasyonu 0.5% mol' ü aştığında seryumun oksidasyon durumunun  $Ce^{3+}$  dan  $Ce^{4+}$  a değiştiği bildirilmiştir [113]. Çalışmamızda, yapıların sol-jel yöntemi ile sentezlenmesi ve sentez sırasında kullanılan bileşiklere, Ce katkı konsantrasyon oranlarına, atmosferik ortamda tavlama işlemine, tavlama sıcaklıklarına ve sentezlenen nanoparçacıkların morfolojik ve kristal yapılarına dayanarak, Ce:ZnO yapısının oksidasyon durumunun  $Ce^{4+}$  olabileceği çıkarımı yapılmıştır. Bu sonuç, literatürde bildirilen bulgular ile uyumludur [50,51,113,114]. Belirlenen bu oksidasyon seviyesi göz önüne alınarak, DLTS sonuçları literatürle karşılaştırıldığında, Ce katkısı nedeniyle ZnO kristal örgüsünde  $Zn^{2+}$  yerine  $Ce^{4+}$  ikamesinin, ikame edici kusuru sonucu, içsel çinko boşluğu ( $V_{Zn}$ ) kusurlarının meydana geldiği varsayılmaktadır. Bu gözlemlerden, saf ZnO' da çinko ara yer ( $Zn_i$ ) kusurlarının oluşumunun baskılandığı ve bunun yerine çinko boşluk ( $V_{Zn}$ ) kusurlarının oluşumuna yol açtığı sonucuna varılabilir. Ayrıca, Ce katkılmasının neden olduğu oksidasyon durumundaki artış, katkısız ZnO' da ( $uZnO$ ) bulunan oksijen boşluk ( $V_o$ ) kusurlarının, Ce katkılı ZnO' da (Ce:ZnO) bulunan oksijen ara yer ( $O_i$ ) kusurlarıyla yer değiştirmesine yol açar [34,42,73,115]. Bu açıklamaları EDS sonuçlarıyla karşılaştırarak, oksijen ara yer kusurlarının ( $O_i$ ) konsantrasyonunun CeZ1' de, CeZ2 ve CeZ5' ten daha yüksek olduğu sonucuna varılabilir. Çünkü CeZ1 yapısında daha fazla oksijen mevcuttur (Tablo 4.2). Öte yandan, çinko boşluk ( $V_{Zn}$ ) kusurlarının yaygınlığının CeZ1' e kıyasla CeZ2 ve CeZ5' te daha yüksek olduğu sonucuna varılabilir.

Benzer şekilde başka bir nadir toprak elementi olan evropiyum (Eu) ile oluşturulan Eu:ZnO/p-Si heteroekleminde  $Eu^{3+}$  iyonundan dolayı benzer sonuçlara rastlanmıştır. Bu yapıda ise  $Eu^{3+}$  iyonunun, kusurların oluşumundaki ana etkiye sahip olduğu rapor edilmiştir [116].

DLTS sinyallerinin pik değerlerinden kusur konsantrasyonları hesaplanmıştır. Tuzak konsantrasyonları, aynı üstel değeri korurken ( $10^{14}$  mertebesi), Ce katkı maddesinin eklenmesiyle hafif bir düşüş gösterdi. XRD sonuçlarına göre, Ce ile katkılama nanoyapıların kristal kalitesini artırdı, kusurların ve dislokasyon yoğunluğunun varlığını azalttı, bu da muhtemelen tuzak konsantrasyon değerlerinin azalmasına neden oldu. Tuzak konsantrasyon değerleri tablo 4.3' de verilmiştir. Katkısız ZnO için üretilen  $uZnO$  heteroeklemi için sonuç,

literatürde hesaplanan ve raporlanan tuzak konsantrasyonu  $\sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  değeri ile benzerdir [112,117].

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında, Ce katkılı ZnO/p-Si heteroekleminin arayüzeydeki kusur seviyeleri ve bu kusur seviyelerine Ce katkı konsantrasyonunun etkisi DLTS yöntemi ile incelemiştir. Katkısız ZnO ve farklı mol oranlarında Ce katkılı ZnO nanoyapılarını sol-jel yöntemi ile sentezlenmiştir. Üretilen n-Ce:ZnO/p-Si heteroeklemleri, p-Si üzerinde döndürme kaplama yoluyla üretilmiştir. SEM görüntülerinden, yüzeyin düzgün küresel taneler içerdiğini, Ce katkılama konsantrasyonu arttıkça tane boyutunun küçüldüğünü, dolayısıyla ZnO' nun morfolojik yapısının Ce katkılmasıyla daha sıkı hale geldiğini göstermiştir. EDS verileri yapıda Ce, Zn ve O elementlerinin varlığını ve yapıda yabancı atomların bulunmadığını doğrularken, Ce' nin ZnO kristal örgüsüne katkısının O miktarını artırdığını ortaya koymaktadır. XRD analizi ile tüm nanoyapıların hekzagonal wurtzite yapıya sahip olduğu ve Ce katkılamanın yapıdaki stresi azalttığı belirlenmiştir. I-V ölçümleri heteroeklem yapılarının iyi bir doğrultucu davranışa sahip olduğunu göstermiştir. %2 mol Ce içeren Ce:ZnO/p-Si hetero yapısı 3.36' lık bir idealite faktörü ile en iyi diyot karakterini sergilemiştir. DLTS sonuçları, arayüzde oluşan tuzakların öncelikle elektron tuzakları olduğunu vurgulamıştır. Tuzakların aktivasyon enerjileri sırasıyla %0, %1, %2 ve %5 mol Ce için  $E_0(0.079)$ ,  $E_1(0.311)$ ,  $E_2(0.290)$  ve  $E_5(0.386)$  eV' dir ve bunların iletkenlik bandı kenarına yakın ve altında yer aldığı bulunmuştur. Tuzak konsantrasyonu, ZnO kristal örgüsüne Ce eklenmesiyle azalmıştır.

Bu tez çalışması, düşük Ce katkılı Ce:ZnO/p-Si heteroekleminin optimum sonuçlar verdiğini göstermektedir. Dolayısıyla düşük Ce katkı miktarı üzerinde çalışmaların geliştirilmesi ve ilerletilmesi önerilir. DLTS sonuçları, Ce:ZnO/p-Si yapısı ile yapılacak potansiyel cihazların, 300 K altındaki sıcaklıklarda çalışma voltajına da bağlı olarak kullanışlı olup olamayacağı hakkında geleceğe yönelik fikir vermektedir. Ayrıca, diğer elektriksel ölçüm verileri de Ce:ZnO/p-Si heteroeklemlerin optik veya elektriksel cihazlarda var olabilecek potansiyel uygulamaları için iyi bir aday olabileceğine ışık tutmaktadır. Bu çalışma, Ce katkılması yoluyla ZnO/p-Si heteroeklemlerin elektriksel özelliklerinin ayarlana bilirliğini ve verimliliklerinin optimize edilebilirliğini ortaya koyması açısından önemlidir.

## KAYNAKLAR

- [1]. Blood, P. and Orton, J.W., 1992, *The Electrical Characterization of Semiconductors: Majority Carriers and Electron States*, vol **14**, ed N.H. March, (London: Academic Press), ISBN: 9780125286275.
- [2]. Grundmann, M., 2016, *Graduate Texts in Physics The Physics of Semiconductors*, (Switzerland: Springer Cham), ISBN: 978-3-319-23880-7.
- [3]. Balkan, N. and Erol, A., 2021, *Semiconductors for Optoelectronics*, (Springer Cham), ISBN: 9783319449340.
- [4]. Chiou, A.H., Liao, H.Y. and Wei, J.L., 2024, Effects of TiO<sub>2</sub> thin films on silicon nanowire arrays in heterojunction solar cells, *Surf. Coatings Technol.*, **476**, 130248.
- [5]. Alharbi, S.R.N., Qasrawi, A.F. and Algarni, S.E., 2023, High-performance n-Si/p-SeO<sub>2</sub>/p-SiO<sub>2</sub> heterojunction photodetectors for potential application in visible light communication technology, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, **129**, 464-473.
- [6]. Wu, X., Chen G, Li, L., Wang, J., and Wang, G., 2023, ZnIn<sub>2</sub>S<sub>4</sub>-based S-scheme heterojunction photocatalyst, *J. Mater. Sci. Technol.*, **167**, 184–204.
- [7]. Che, L., Pan, J., Cai, K., Cong, Y. and Lv, S.W., 2023, The construction of p-n heterojunction for enhancing photocatalytic performance in environmental application: A review, *Sep. Purif. Technol.*, **315**, 123708.
- [8]. Izyumskaya, N.F., Avrutin, V.S. and Vyatkin, A.F., 2004, Control over strain relaxation in Si-based heterostructures, *Solid. State. Electron.* **48**, 1265–78.
- [9]. Liu, C.H, Liu, B.C and Fu Z.X., 2008, Electrical and deep levels characteristics of ZnO/Si heterostructure by MOCVD deposition, *Chinese Phys. B.*, **17**, 2292–6.
- [10]. Rumyantsev, O.I., Brunkov, P.N., Pirogov, E.V., and Egorov, A.Y., 2010, Study of defects in heterostructures with GaPAsN and GaPN quantum wells in the GaP matrix *Semiconductors*, **44**, 893–7.
- [11]. Lang, D., V., 1974, Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors, *J. Appl. Phys.*, **45**, 3023–32.
- [12]. Neamen, D., 2011, *Semiconductors Physics and Devices*, (New York, NY: McGraw-Hill), ISBN: 978-0-07-352958-5.
- [13]. Geller, M.P., 2007, Investigation of Carrier Dynamics in Self-Organized Quantum Dots for Memory Devices, Thesis (PhD) (Technische Universität Berlin).
- [14]. Kapteyn, C., 2001, *Carrier Emission and Electronic Properties of Self-Organized Semiconductor Quantum Dots*, Thesis (PhD), (Berlin: Mensch and Buch Verlag).

- [15]. Tang, Z.K., Wong, G.K.L., Yu, P., Kawasaki, M., Ohtomo, A., Koinuma, H. and Segawa, Y., 1998, Room-temperature ultraviolet laser emission from self-assembled ZnO microcrystallite thin films, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 3270–2.
- [16]. Lu, J.G., Fujita, S., Kawaharamura, T., Nishinaka, H., Kamada, Y., Ohshima, T., Ye, Z., Zeng, Y.J., Zhang, Y.Z., Zhu, L.P., He, H.P. and Zhao, B.H., 2007, Carrier concentration dependence of band gap shift in n-type ZnO:Al films, *J. Appl. Phys.* **101**, 083705.
- [17]. Reynolds, D.C., Look, D.C., and Jogai, B., 1996, Optically pumped ultraviolet lasing from ZnO *Solid State Commun.*, **99**, 873–5.
- [18]. Janotti, A. and Van de Walle C.G., 2009, Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor *Reports Prog. Phys.*, **72**, 126501.
- [19]. Kim, K.K., Niki, S., Oh, J.Y., Song, J.O., Seong, T.Y., Park, S.J., Fujita, S. and Kim, S.W., 2005, High electron concentration and mobility in Al-doped n-ZnO epilayer achieved via dopant activation using rapid-thermal annealing, *J. Appl. Phys.* **97**, 066103.
- [20]. Kang, Y., Yu, F., Zhang, L., Wang, W., Chen, L. and Li, Y., 2021, Review of ZnO-based nanomaterials in gas sensors *Solid State Ionics*, **360**, 115544.
- [21]. Çolak, H. and Karaköse, E., 2019, Synthesis and characterization of different dopant (Ge, Nd, W)-doped ZnO nanorods and their CO<sub>2</sub> gas sensing applications, *Sensors Actuators, B Chem.* **296**, 126629.
- [22]. Tereshchenko, A., Bechelany, M., Viter, R., Khranovskyy, V., Smyntyna, V., Starodub, N. and Yakimova, R., 2016, Optical biosensors based on ZnO nanostructures: Advantages and perspectives. A review, *Sensors Actuators, B Chem.* **229**, 664–77.
- [23]. Ensafi, A.A., Zakery, M. and Rezaei, B., 2019, An optical sensor with specific binding sites for the detection of thioridazine hydrochloride based on ZnO-QDs coated with molecularly imprinted polymer, *Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* **206**, 460–5.
- [24]. Dikovska, A.O., Atanasova, G.B., Nedyalkov, N.N., Stefanov, P.K., Atanasov, P.A., Karakoleva, E.I and Andreev, A.T, 2010, Optical sensing of ammonia using ZnO nanostructure grown on a side-polished optical-fiber, *Sensors Actuators, B Chem.*, **146**, 331–6.
- [25]. Hwang, J.D., Wu, D.H. and Hwang, S.B., 2015, Inserting an i-ZnO layer to increase the performance of p-Si/n-ZnO heterojunction photodetectors, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **39**, 132–5.
- [26]. Chen, C., Zhou, P., Wang, N., Ma, Y. and San, H., 2018, UV-assisted photochemical synthesis of reduced graphene oxide/ZnO nanowires composite for photoresponse enhancement in UV, photodetectors *Nanomaterials*, **8**, 26.

- [27]. Choi, M.S., Park, T., Kim, W.J. and Hur, J., 2020, High-performance ultraviolet photodetector based on a zinc oxide nanoparticle@single-walled carbon nanotube heterojunction hybrid film, *Nanomaterials*, **10**, 395.
- [28]. Fan, Z., Wang, D., Chang, P.C., Tseng, W.Y. and Lu, J.G., 2004, ZnO nanowire field-effect transistor and oxygen sensing property, *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 5923–5.
- [29]. Zhu, Y., Elim, H.I., Foo, Y.L., Yu, T., Liu, Y., Ji, W., Lee, J.Y., Shen, Z., Wee A.T.S., Thong, J.T.L., and Sow, C.H., 2006, Multiwalled carbon nanotubes beaded with ZnO nanoparticles for ultrafast nonlinear optical switching, *Adv. Mater.*, **18**, 587–92.
- [30]. Singh, K. and Mehta, S.K., 2016, Luminescent ZnO quantum dots as an efficient sensor for free chlorine detection in water, *Analyst*, **141**, 2487–92.
- [31]. Gu, Y.Z., Lu, H.L., Zhang, Y., Wang, P.F., Ding, S.J. and Zhang, D.W., 2015, Effects of ZnO seed layer annealing temperature on the properties of n-ZnO NWs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/p-Si heterojunction, *Opt. Express*, **23**, 24456.
- [32]. Nie, B., Hu, J.G., Luo, L.B., Xie, C., Zeng, L.H., Lv, P., Li, F.Z., Jie, J.S., Feng, M., Wu, C.Y., Yu, Y.Q. and Yu, S.H., 2013, Monolayer graphene film on ZnO nanorod array for high-performance schottky junction ultraviolet photodetectors, *Small*, **9**, 2872–9.
- [33]. Tang, J., Deng, L.Y., Tay, C.B., Zhang, X.H., Chai, J.W., Qin, H., Liu, H.W., Venkatesan, T. and Chua, S.J., 2014, Determination of carrier concentration dependent electron effective mass and scattering time of n-ZnO thin film by terahertz time domain spectroscopy, *J. Appl. Phys.*, **115**, 033111.
- [34]. George, A., Sharma, S.K., Chawla, S., Malik, M.M. and Qureshi, M.S., 2011, Detailed of X-ray diffraction and photoluminescence studies of Ce doped ZnO nanocrystals, *J. Alloys Compd.*, **509**, 5942–6.
- [35]. Kulandaisamy, A.J., Elavalagan, V., Shankar, P., Mani, G.K., Babu, K.J. and Rayappan, J.B.B., 2016, Nanostructured Cerium-doped ZnO thin film—A breath sensor, *Ceram. Int.*, **42**, 18289–95.
- [36]. Sinha, N., Ray, G., Bhandari, S., Godara, S. and Kumar, B., 2014, Synthesis and enhanced properties of cerium doped ZnO nanorods, *Ceram. Int.*, **40**, 12337–42.
- [37]. Yousefi, M., Azimirad, R., Amiri, M. and Moshfegh, A.Z., 2011, Effect of annealing temperature on growth of Ce-ZnO nanocomposite thin films: X-ray photoelectron spectroscopy study, *Thin Solid Films*, **520**, 721–5.
- [38]. Meyer, B.K., Alves, H., Hofmann, D.M., Kriegseis, W., Forster, D., Bertram, F., Christen, J., Hoffmann, A., Straßburg, M., Dworzak, M., Haboeck, U. and Rodina, A.V., 2004, Bound exciton and donor-acceptor pair recombinations in ZnO, *Phys. Status Solidi Basic Res.*, **241**, 231–60.
- [39]. Crisler, D.F., Cupal, J.J. and Moore, A.R., 1968, Dielectric, Piezoelectric, and Electromechanical Coupling Constants of Zinc Oxide, *Crystals Proc. IEEE*, **56**, 225–6.

- [40]. Tsirapas, C., Girginoudi, D., Dimitriadis, E.I. and Georgoulas, N., 2017, Investigation on deep level defects in polycrystalline ZnO thin films, *J. Vac. Sci. Technol. B, Nanotechnol. Microelectron. Mater. Process. Meas. Phenom.*, **35**, 031203.
- [41]. Koneru, B., Banerjee, P. and Franco, A., 2023, Controlled defects and trap-assisted mitigation in Li-intercalated zinc oxide ceramics, *Emergent Mater.*, **6**, 315–20.
- [42]. Rathnasekara, R., Mayberry, G.M. and Hari, P., 2024, Deep-Level Transient Spectroscopy Studies on Four Different Zinc Oxide Morphologies, *Crystals*, **14**, 1–12.
- [43]. Fan, J., Zhang, Z., Tian, H., Zhao, H. and Freer, R., 2009, Investigation of the effect of different dopants on the trap states of ZnO-based and SnO<sub>2</sub>-based varistors, *J. Phys. Conf. Ser.*, **152**, 012060.
- [44]. Limpijumnong, S. and Van de Walle, C.G., 2004, Diffusivity of native defects in GaN, *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, **69**, 1–11.
- [45]. Janotti, A. and Van De Walle, C.G., 2007, Native point defects in ZnO, *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, **76**, 1–22.
- [46]. Look, D.C., Hemsky, J.W. and Sizelove, J.R., 1999, Residual native shallow donor in ZnO, *Phys. Rev. Lett.*, **82**, 2552–5.
- [47]. Look, D.C., Farlow, G.C., Reunchan, P., Limpijumnong, S., Zhang, S.B. and Nordlund K. 2005, Evidence for native-defect donors in n-type ZnO, *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 1–4.
- [48]. Limpijumnong, S., Li, X., Wei, S.H. and Zhang, S.B., 2005, Substitutional diatomic molecules NO, NC, CO, N<sub>2</sub>, and O<sub>2</sub>: Their vibrational frequencies and effects on p doping of ZnO, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 1–3.
- [49]. Erhart, P. and Albe, K., 2006, First-principles study of migration mechanisms and diffusion of oxygen in zinc oxide, *Phys. Rev. B-Condens. Matter Mater. Phys.*, **73**, 1–9.
- [50]. Lang, J., Han, Q., Yang, J., Li, C., Li, X., Yang, Lç, Zhang, Yç, Gao, Mç, Wang, D. and Cao, J., 2010, Fabrication and optical properties of Ce-doped ZnO nanorods, *J. Appl. Phys.*, **107**, 074302.
- [51]. Ge, C., Xie, C. and Cai, S., 2007, Preparation and gas-sensing properties of Ce-doped ZnO thin-film sensors by dip-coating, *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, **137**, 53–8.
- [52]. Zhang, Y.G., Zhang, G.B. and Wang, Y.X., 2011, First-principles study of the electronic structure and optical properties of Ce-doped ZnO, *J. Appl. Phys.*, **109**, 063510.
- [53]. Skorodumova, N.V., Ahuja, R., Simak, S.I., Abrikosov, I.A., Johansson, B. and Lundqvist, B.I., 2001, Electronic, bonding, and optical properties of CeO<sub>2</sub> and Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> from first principles, *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, **64**, 1151081–9.
- [54]. Wang, L., Ji, Z., Lin, J. and Li, P., 2017, Preparation and optical and photocatalytic

- properties of Ce-doped ZnO microstructures by simple solution method, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **71**, 401–8.
- [55]. Manoharan, R., Manjceevan, A., Velauthamurty, K., Sashikesh, G. and Vignarooban K., 2023, Conversion of both photon and mechanical energy into chemical energy using higher concentration of Al doped ZnO, *J. Alloys Compd.*, **948**, 169712.
- [56]. Borysiewicz, M.A., 2019, ZnO as a functional material, a review, *Crystals*, **9**, 505.
- [57]. Alain, C. Pierre, 1998, *Introduction to Sol-Gel Processing*, (Springer New York, NY), ISBN: 9780792381211.
- [58]. Theodoridis, T. and Kraemer, J., 2015, *The Sol-Gel Handbook*, (Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA), ISBN: 9783527334865.
- [59]. Ocaya, R.O., Al-Sehemi, A.G., Tataroğlu, A., Dere, A., Erol, I., Aksu, M., Al-Ghamdi A.A. and Yakuphanoglu, F., 2023, Effect of CuO doping on the performance of LaB6 interlayer films in Al/CuO:LaB6/p-Si/Al diodes, *Phys. B Condens. Matter* **666** 415111.
- [60]. Benamara, M., Nassar, K.I., Soltani, S., Kallekh, A., Dhahri, R., Dahman, H. and El Mir, L., 2023, Light-enhanced electrical behavior of a Au/Al-doped ZnO/p-Si/Al heterostructure: insights from impedance and current-voltage analysis, *RSC Adv.*, **13**, 28632–41.
- [61]. Fang, Z.Q., Claflin, B., Look, D.C., Kerr, L.L. and Li, X., 2007, Electron and hole traps in N-doped ZnO grown on p-type Si by metalorganic chemical vapor deposition, *J. Appl. Phys.*, **102**, 023714.
- [62]. Yıldız, D.E., Kocyigit, A. and Yıldırım, M., 2023, Comparison of Al/TiO<sub>2</sub>/p-Si and Al/ZnO/p-Si photodetectors, *Opt. Mater. (Amst.)*, **145**, 114371.
- [63]. Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Michael, J.R., Ritchie, N.W.M., Scott, J.H.J. and Joy, D.C., 2018, *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, vol **3** (New York, NY: Springer New York), ISBN: 978-1-4939-6674-5.
- [64]. Waseda, Y., Matsubara, E. and Shinoda, K., 2011, *X-Ray Diffraction Crystallography*, (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg), ISBN: 978-3-642-16634-1.
- [65]. Scherrer, P., 1918, Bestimmung der Grösse und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen, *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen*, **26**, 98.
- [66]. Meryem, L.Z., Toudjen N.E.H., Aida, M.S., Aouabdia, N. and Rouabah, S., 2023, Growth of undoped ZnO thin films by spray pyrolysis: effect of precursor concentration, *J. Opt.*, **52**, 1782–1788.
- [67]. Özmen, A., Aydogan, S. and Yilmaz, M., 2019, Fabrication of spray derived nanostructured n-ZnO/p-Si heterojunction diode and investigation of its response to dark and light, *Ceram. Int.*, **45**, 14794–805.
- [68]. Langford, J.I. and Wilson, A.J.C., 1978, Scherrer after Sixty Years: A Survey and

Some New Results in the Determination of Crystallite Size, *J. Appl. Cryst.*, **11**, 102–13.

- [69]. Uvarov, V. and Popov, I., 2013, Metrological characterization of X-ray diffraction methods at different acquisition geometries for determination of crystallite size in nano-scale materials, *Mater. Charact.*, **85**, 111–23.
- [70]. Meaney, S., Pan, A.V., Jones, A. and Fedoseev, S.A., 2019, Partial carrier freeze-out at the LaAlO<sub>3</sub>/SrTiO<sub>3</sub> oxide interface, *APL Mater.*, **7**, 101105.
- [71]. Dunlap, W.C., JR, A. and Watters, R.L., 1953, Direct Measurement of the Dielectric Constants of Silicon and Geissanium, *Phys. Rev.*, **92**, 1396–7.
- [72]. Water, W. and Chu, S.Y., 2002, Physical and structural properties of ZnO sputtered films, *Mater. Lett.*, **55**, 67–72.
- [73]. Paradowska, K.M., Płaczek-Popko, E., Pietrzyk, M.A., Gwóźdź, K. and Kozanecki, A. 2017, Current transport and deep levels in p-Si/n-Zn<sub>0.9</sub>Mg<sub>0.1</sub>O/n-ZnO heterojunction, *J. Alloys Compd.*, **691**, 946–51.
- [74]. Okutan, M., Bablich, A. and Haring Bolivar, P., 2023, Effect of thermal annealing on the electronic parameters of Al/p-Si/Cu double Schottky barrier heights, *Phys. B Condens. Matter*, **657**, 414566.
- [75]. Sedani, S.H., Yasar, O.F., Karaman, M. and Turan, R., 2020, Effects of boron doping on solid phase crystallization of in situ doped amorphous Silicon thin films prepared by electron beam evaporation, *Thin Solid Films*, **694**, 137639.
- [76]. Campbell, Q.T., Misra, S. and Baczewski, A.D., 2023, Electronic structure of boron and aluminum  $\delta$ -doped layers in silicon, *J. Appl. Phys.*, **134**, 044401.
- [77]. Byun, D.W., Kim M Y, Moon S Y, Shin M C, Schweitz M A and Koo, S.M., Effect of Post Annealing on the Electrical Characteristics and Deep Level Defects of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC Heterojunction Diodes, *Eur. Solid-State Device Res. Conf.*, **2022-September**, 249–52.
- [78]. Wei, X.Q., Man, B.Y., Liu, M., Xue, C.S., Zhuang, H.Z. and Yang, C., 2007, Blue luminescent centers and microstructural evaluation by XPS and Raman in ZnO thin films annealed in vacuum, N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>, *Phys. B Condens. Matter*, **388**, 145–52.
- [79]. Usha, K.S., Sivakumar, R., Sanjeeviraja, C. and Vivekanandan, J., 2023, Effect of substrate temperatures on structural, optical and dispersion energy parameters of RF sputtered nickel oxide thin films, *Mater. Chem. Phys.*, **294**, 127007.
- [80]. Choi, B.G., Kim, I.H., Kim, D.H., Lee, K.S., Lee, T.S., Cheong, B., Baik, Y.J. and Kim, W.M., 2005, Electrical, optical and structural properties of transparent and conducting ZnO thin films doped with Al and F by rf magnetron sputter, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **25**, 2161–5.
- [81]. Kim, M.S., Kim, T.H., Kim, D.Y., Kim, G.S., Choi, H.Y., Cho, M.Y., Jeon, S.M., Kim, J.S., Kim, J.S., Lee, D.Y., Son, J.S., Lee, J.I., Kim, J.H., Kim, E., Hwang, D.W. and Leem, J.Y., 2009, Improvement in crystallinity and optical properties of ZnO

- epitaxial layers by thermal annealed ZnO buffer layers with oxygen plasma, *J. Cryst. Growth*, **311**, 3568–72.
- [82]. Yang, Y., Liang, J., Zhang, Z., Tian, C., Wu, X., Zheng, Y., Huang, Y., Wang, J., Zhou, Z., He, M., Chen, Z. and Chen, C.C., 2022, Suppressing Residual Lead Iodide and Defects in Sequential-Deposited Perovskite Solar Cell via Bidentate Potassium Dichloroacetate Ligand, *ChemSusChem*, **15**, 11.
- [83]. Ouhaibi, A., Ghamnia, M., Dahamni, M.A., Heresanu, V., Fauquet, C. and Tonneau, D., 2018, The effect of strontium doping on structural and morphological properties of ZnO nanofilms synthesized by ultrasonic spray pyrolysis method, *J. Sci. Adv. Mater. Devices*, **3**, 29–36.
- [84]. Hashim, N.H., Subramani, S., Devarajan, M. and Ibrahim, A.R., 2017, Properties of undoped ZnO and Mg doped ZnO thin films by sol-gel method for optoelectronic applications, *J. Aust. Ceram. Soc.*, **53**, 421–31.
- [85]. Kang, K.M., Wang, Y., Kim, M., Lee, C. and Park, H.H., 2021, Al/F codoping effect on the structural, electrical, and optical properties of ZnO films grown via atomic layer deposition, *Appl. Surf. Sci.*, **535**, 147734.
- [86]. Yousefi, R., Jamali-Sheini, F., Cheraghizade, M., Khosravi-Gandomani, S., Saaedi, A., Huang, N.M., Basirun, W.J. and Azarang, M., 2015, Enhanced visible-light photocatalytic activity of strontium-doped zinc oxide nanoparticles, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **32**, 152–9.
- [87]. Kuo, S.Y., Chen, W.C., Lai, F.I., Cheng, C.P., Kuo, H.C., Wang, S.C. and Hsieh, W.F., 2006, Effects of doping concentration and annealing temperature on properties of highly-oriented Al-doped ZnO films, *J. Cryst. Growth*, **287**, 78–84.
- [88]. Yarahmadi, M., Maleki-Ghaleh, H., Mehr, M.E., Dargahi, Z., Rasouli, F. and Siadati, M.H., 2021, Synthesis and characterization of Sr-doped ZnO nanoparticles for photocatalytic applications, *J. Alloys Compd.*, **853**, 157000.
- [89]. Suwanboon S, Somraksa W, Amornpitoksuk P and Randorn C 2020 Effect of trisodium citrate on the formation and structural, optical and photocatalytic properties of Sr-doped ZnO *J. Alloys Compd.* **832** 154963.
- [90]. Phillips, R., Jolley, K., Zhou, Y. and Smith, R., 2021, Influence of temperature and point defects on the X-ray diffraction pattern of graphite, *Carbon Trends*, **5**, 100124.
- [91]. Pradeev Raj, K., Sadaiyandi, K., Kennedy, A. and Thamizselvi, R., 2016, Structural, optical, photoluminescence and photocatalytic assessment of Sr-doped ZnO nanoparticles, *Mater. Chem. Phys.*, **183**, 24–36.
- [92]. Gupta, V. and Mansingh, A., 1996, Influence of postdeposition annealing on the structural and optical properties of sputtered zinc oxide film *J. Appl. Phys.* **80** 1063–73.
- [93]. Zhang, Y., Si, W., Jia, Y., Yu, P., Yu, R. and Zhu, J., 2021, Controlling Strain Relaxation by Interface Design in Highly Lattice-Mismatched Heterostructure, *Nano*

*Lett.*, **21**, 6867–74

- [94]. Li, Y., Yao, B., Deng, R., Li, B., Zhang, Z., Shan, C., Zhao, D. and Shen, D., 2013, A comparative study on electroluminescence from ZnO-based double heterojunction light emitting diodes grown on different lattice mismatch substrates, *J. Alloys Compd.*, **575**, 233–8.
- [95]. Romanitan, C., Mihalache, I., Tutunaru, O. and Pachiu, C., 2021, Effect of the lattice mismatch on threading dislocations in heteroepitaxial GaN layers revealed by X-ray diffraction, *J. Alloys Compd.*, **858**, 157723.
- [96]. Manoharan, C., Pavithra, G., Bououdina, M., Dhanapandian, S. and Dhamodharan, P., 2016, Characterization and study of antibacterial activity of spray pyrolysed ZnO:Al thin films, *Appl. Nanosci.*, **6**, 815–25.
- [97]. Sathya, M., Shobika, P.A., Ponnar, M., Pushpanathan, K. and Elsi, S., 2022, Influence of Sr concentration on crystal structure, magnetic properties and supercapacitance performance of ZnO nanoparticles, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **33**, 6745–65.
- [98]. Manoharan, C., Pavithra, G., Dhanapandian, S. and Dhamodharan, P., 2015, Effect of in doping on the properties and antibacterial activity of ZnO films prepared by spray pyrolysis, *Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, **149**, 793–9.
- [99]. Saravanan, P., Maheswari, M. and Abdullah A.S., 2023, Fabrication of n-CeZnO/p-Si heterojunction diodes for enhanced solar energy conversion, *Sol. Energy*, **257**, 88–95.
- [100]. Hwang, J.D. and Chen, Y.H., 2012, Effects of pre-annealing conditions on the characteristics of ZnO nanorods and ZnO/p-Si heterojunction diodes grown through hydrothermal method, *Thin Solid Films*, **520**, 5294–9.
- [101]. Abdel, L.M.K., Mobarak, M., Revaprasadu N, Ashraf, A.H, Othman, W, Khalefa, M.M., Aboud, A.A. and Ismail, M., 2023, Effect of doping on the structural, optical and electrical properties of La-doped ZnO thin films, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, **34**, 1–14.
- [102]. Kaphle, A. and Hari, P., 2016, Characterization of Aluminum Doped Nanostructured ZnO/p-Si Heterojunctions, *Int. J. Eng. Sci.*, **5**, 41–51.
- [103]. Kim, H., Jung, M.J., Choi, S. and Choi, B.J., 2020, ALD growth of ZnO on p-Si and electrical characterization of ZnO/p-Si heterojunctions, *Mater. Today Commun.*, **25**, 101265.
- [104]. Zebbar, N., Kheireddine, Y., Mokeddem, K., Hafdallah. A., Kechouane, M. and Aida, M.S., 2011, Structural, optical and electrical properties of n-ZnO/p-Si heterojunction prepared by ultrasonic spray, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **14**, 229–34.
- [105]. Gwozdz, K., Placzek, P.E., Zielony, E., Paradowska, K.M., Pietruszka, R., Witkowski B.S., Kopalko, K., Godlewski, M. and Chang, L., 2017, Deep traps in the ZnO nanorods/Si solar cells, *J. Alloys Compd.*, **708**, 247–54.

- [106]. Ajimsha, R.S., Jayaraj, M.K. and Kukreja, L.M., 2008, Electrical characteristics of n-ZnO/p-Si heterojunction diodes grown by pulsed laser deposition at different oxygen pressures, *J. Electron. Mater.*, **37**, 770–5.
- [107]. Huang, Y., Chen, X.D., Fung, S., Beling, C.D., Ling, C.C., Dai, X.Q. and Xie, M.H., 2005, Current transport property of n-GaN/n-6H-SiC heterojunction: Influence of interface states, *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 1–3.
- [108]. Lindberg, P.F., Lipp Bregolin, F., Wiesenhütter, K., Wiesenhütter, U., Riise, H.N., Vines, L., Prucnal, S., Skorupa, W., Svensson, B.G. and Monakhov, E.V., 2016, The effect of millisecond flash lamp annealing on electrical and structural properties of ZnO:Al/Si structures, *J. Appl. Phys.*, **119**, 185305.
- [109]. Quemener, V., Vines, L., Monakhov, E.V. and Svensson, B.G., 2011, Electronic properties of n-ZnO(Al)/p-Si heterojunction prepared by dc magnetron sputtering, *Thin Solid Films*, **519**, 5763–6.
- [110]. Yang, L., Fan, Y., Lv, X., Pang, H., Yuan, S., Yu, X., Li, D. and Yang, D., 2023, Effect of Erbium Incorporation on SiN<sub>x</sub>O<sub>y</sub>/c-Si Interface in Silicon-Based Optoelectronic Devices, *IEEE Trans. Electron Devices*, **70**, 5757–61.
- [111]. Look, D.C., Reynolds, D.C., Sizelove, J.R., Jones, R.L., Litton, C.W., Cantwell, G. and Harsch, W.C., 1998, Electrical properties of bulk ZnO, *Solid State Commun.*, **105**, 399–401.
- [112]. Auret, F.D., Nel, J.M., Hayes, M., Wu, L., Wesch, W. and Wendler, E., 2006, Electrical characterization of growth-induced defects in bulk-grown ZnO, *Superlattices Microstruct.*, **39**, 17–23.
- [113]. Zhang, Y., Liu Y, Zhou L, Liu D, Liu F, Liang, X., Yan, X., Gao, Y. and Lu, G., 2018, The role of Ce doping in enhancing sensing performance of ZnO-based gas sensor by adjusting the proportion of oxygen species, *Sensors Actuators, B Chem.*, **273**, 991–8.
- [114]. Zong, X., Jin, Y., Zhang, X., Zhang, J., Li, X. and Xiong, Y., 2023, Stabilization of oxidation state in ZnO decorated-CeO<sub>2</sub> for enhanced formation of CO in CO<sub>2</sub> electroreduction, *Appl. Surf. Sci.*, **609**, 155235.
- [115]. Zhao, X., Li, J., Li, H. and Li, S., 2012, Intrinsic and extrinsic defect relaxation behavior of ZnO ceramics, *J. Appl. Phys.*, **111**, 124106.
- [116]. Althumairi, N.A, Baig, I., Kayed, T.S., Mekki, A., Lusson, A., Sallet, V., Majid, A. and Fouzri, A., 2022, Characterization of Eu doped ZnO micropods prepared by chemical bath deposition on p-Si substrate, *Vacuum*, **198**, 110874.
- [117]. Wang, R.S., Gu, Q.L., Ling, C.C. and Ong, H.C. 2008, Studies of oxide/ZnO near-interfacial defects by photoluminescence and deep level transient spectroscopy, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 042105.

## ÖZGEÇMİŞ

| Kişisel Bilgiler |                                                                          |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Adı Soyadı       | Halim Onur ÖZTEL                                                         |
| Doğum Yeri       |                                                                          |
| Doğum Tarihi     |                                                                          |
| Uyruğu           | <input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer: |
| E-Posta Adresi   |                                                                          |
| Web Adresi       |                                                                          |

| Eğitim Bilgileri |                                |
|------------------|--------------------------------|
| Lisans           |                                |
| Üniversite       | Çanakkale 18 Mart Üniversitesi |
| Fakülte          | Fen Edebiyat Fakültesi         |
| Bölümü           | Fizik (İ.Ö.)                   |
| Mezuniyet Yılı   | 27.06.2011                     |

| Yüksek Lisans |                         |
|---------------|-------------------------|
| Üniversite    | İstanbul Üniversitesi   |
| Enstitü Adı   | Fen Bilimleri Enstitüsü |
| Anabilim Dalı | Fizik Anabilim Dalı     |
| Programı      | Katıhal Fiziği Programı |

| Doktora       |                         |
|---------------|-------------------------|
| Üniversite    | İstanbul Üniversitesi   |
| Enstitü Adı   | Fen Bilimleri Enstitüsü |
| Anabilim Dalı | Fizik Anabilim Dalı     |
| Programı      | Katıhal Fiziği Programı |

| Makale ve Bildiriler |                                                                                                                                                                                                                                                      |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [1]                  | <b>Öztel, H.O.</b> , Akçay, N. and Algün, G., 2024, Deep-level transient spectroscopy analysis of interface defects in Ce:ZnO/p-Si heterostructures, <i>J. Mater. Sci. Mater. Electron.</i> , <b>35</b> , 1–16.                                      |
| [2]                  | Algün, G., Akçay, N., <b>Öztel, H.O.</b> and Can, M.M., 2023, Synthesis and ultrafast humidity sensing performance of Sr doped ZnO nanostructured thin films: the effect of Sr concentration, <i>J. Sol-Gel Sci. Technol.</i> , <b>107</b> , 640–58. |
| [3]                  | Akçay, N., Algün, G. and <b>Öztel, H.O.</b> , 2023, Fabrication of ultra-sensitive humidity sensors based on Ce-doped ZnO nanostructure with superfast response and recovery time, <i>J. Mater. Sci. Mater. Electron.</i> , <b>34</b> , 1565.        |