

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**ULTRASONİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Y:SnO₂
NANOYAPILI FİLMLEİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Esra KAYA
DANIŞMAN: Doç. Dr. Arife GENÇER İMER

VAN-2019

T.C.
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**ULTRASONİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Y:SnO₂
NANOYAPILI FİLMLEİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Esra KAYA

Bu çalışma Van YYÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı tarafından **FYL-2018-7302** No'lu proje olarak desteklenmiştir.

VAN-2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda Doç. Dr. Arife GENÇER İMER danışmanlığında, Esra KAYA tarafından sunulan “**Ultrasonik Püskürtme Yöntemi İle Üretilen Y:SnO₂ Nanoyapılı Filmlerin Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi**” isimli bu çalışma Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili hükümleri gereğince 10/01/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile başarılı bulunmuş ve Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Doç. Dr. Mehmet GÜLCAN

İmza: 

Üye: Doç. Dr. Arife GENÇER İMER

İmza: 

Üye: Dr. Öğr. Üye. Cüneyt YÜCELBAŞ

İmza: 

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 11.01.2019 tarih ve 2019/3-İ sayılı kararı ile onaylanmıştır.

İmza
Enstitü Müdürü 

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



İmza

Esra KAYA

ÖZET

ULTRASONİK PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN Y:SnO₂ NANOYAPILI FİLMLEİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

KAYA, Esra

Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Arife GENCER İMER

Ocak 2019, 120 sayfa

Bu çalışmada, (100) yönelimine sahip ve öz direnci 1-10 Ω -cm olan *p*-Si alttaş kullanıldı. Kalay oksit (SnCl₂.2H₂O, Tin (II) chloride dihydrate) numunesinin 5x10⁻² molarlık (1.64 gram) çözeltisi 150 mL isopropanol (C₃H₈O, 2-Propanol) kullanılarak hazırlandı. Katkı maddesi olan itriyum (YCl₃.6H₂O, Yttrium (III) chloride hexahydrate) numunesinin 1x10⁻² molarlık (0.15 gram) çözeltisi için 50 mL deiyonize su kullanıldı. Cam ve *p*-Si alttaşlar üzerine kaplanacak ince filmler sırasıyla % 0, % 1, %0 2, % 3, % 5 katkılı olacak şekilde hazırlandı. Hazırlanan numunelerin yasak enerji band aralığı, optik metod yardımı ile 3.8 eV mertebesinde belirlendi. Diyot yapımı için yüksek vakum ortamında gümüş metali termal buharlaştırılarak Ag/YSnO₂/*p*-Si yapısı elde edildi.

Üretilen Ag/YSnO₂/*p*-Si diyotlarının oda sıcaklığında karanlık ortamda 100 mW/cm² ışık şiddeti altında *I-V* ölçümleri alındı. Işığa duyarlılığın yok denecek kadar az olduğu gözlemlendi. Akım-gerilim (*I-V*) ve kapasitans-gerilim (*C-V*) ölçümleri yapıldı. Elde edilen *I-V* grafiğinde diyot doğrultucu özellik gösterirken; ortalama idealite faktörü ve ortalama engel yüksekliği değerleri sırasıyla 4.03 ve 0.505 eV olarak belirlendi. Norde fonksiyonları yardımıyla ortalama seri direnç değerleri 25.02 Ω olarak hesaplandı. *C-V* ölçümleri 0.1-2 MHz aralığında alındı ve *C*⁻²-*V* grafikleri yardımıyla engel yüksekliği hesaplandı ve diğer bulgularla karşılaştırıldı. Üretilen yapının sahip olduğu özellikler sayesinde elektronik uygulamalarda kullanılabileceği gösterilmiş oldu.

Anahtar kelimeler: Cheung ve Norde fonksiyonları, Kalay oksit, Sprey kaplama.



ABSTRACT

DETERMINATION THE PHYSICAL PROPERTIES OF Y:SnO₂ NANOSTRUCTURED FILMS DEPOSITED BY ULTRASONIC SPRAY PYROLYSIS

KAYA, Esra

M. Sc. Thesis, Department of Physics

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Arife GENCER İMER

January 2019, 120 pages

In this study, *p*-Si substrate with (100) orientation and 1-10 Ω-cm of resistivity was used. 5×10^{-2} molar (1.64 grams) solution of tin oxide (SnCl₂.2H₂O, Tin (II) chloride dihydrate) sample was prepared by using 150 mL isopropanol (C₃H₈O, 2-propanol). 50 mL of deionized water was used for the 1×10^{-2} molar (0.15 gram) solution of the yttrium (YCl₃.6H₂O, Yttrium (II) chloride hexahydrate) for dopping. Thin films which are coated on glass and *p*-Si substrates were prepared to be 0 %, 1 %, 2 %, 3 %, 5 %, respectively. The forbidden energy band gap of the prepared samples was determined with the help of the $\alpha(h\nu)^2-h\nu$ graph at order 3.8 eV. For the diode construction, the silver metal was thermally evaporated in a high vacuum environment to obtain the Ag / YSnO₂ / *p*-Si structure.

I-V measurements of the produced Ag / YSnO₂ / *p*-Si diodes were taken under the light intensity of 100 mW / cm² in the dark environment at room temperature. It was observed that the sensitivity of the light was negligible. Current-voltage (*I*-*V*) and capacitance-voltage (*C*-*V*) measurements were performed. When the obtained *I*-*V* graph shows diode rectifier characteristic; the average ideal factor and the average barrier height values were determined as 4.03 and 0.505 eV, respectively. By using Norde functions, the average series resistance values were calculated as 25.02 Ω. *C*-*V* measurements were taken at 0.1-2 MHz and the barrier height was calculated by using *C*⁻²-*V* graphs and compared with other indications. It has been shown that the produced structure can be used in applications such as electronics.

Keywords: Cheung and Norde functions, Spray coating, Tin oxide.



ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasında, bilimsel tecrübesinden yararlandığım, emeğini, ilgisini, hoşgörüsünü ve yardımlarını esirgemeyen, değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Arife GENÇER İMER'e teşekkür ederim. Ayrıca çalışmamda her konuda yardımlarını gördüğüm Dicle Üniversitesi Öğretim Üyesi Doç. Dr. Yusuf Selim OCAK'a ve aynı zamanda laboratuvar çalışmalarımın her aşamasında desteğini ve yardımlarını esirgemeyen Batman Üniversitesi Öğretim Üyesi Dr. Ahmet TOMBAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmayı FYL-2018-7302 No'lu proje ile destekleyen Van YYÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığına teşekkür ederim. Hayatımın her adımında yanımda oldukları için aileme ve hayatım boyunca desteğini hiç esirgemeyen sevgili annem Meral KAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

2019

Esra KAYA



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖN SÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ	3
3. TEORİK BİLGİ	17
3.1. Yarıiletkenler	17
3.1.1. Yarıiletken türleri	19
3.2. Metal-Yarıiletken Kontaklar	26
3.2.1. Metal - yarıiletken kontaklarda engel oluşumu	27
3.2.2. Metal-yarıiletken kontaklarda akım iletim mekanizmaları	33
3.2.3. Cheung fonksiyonları yardımı ile diyot parametrelerinin belirlenmesi	37
3.2.4. Norde fonksiyonları yardımı ile diyot parametrelerinin belirlenmesi.....	40
3.2.5. Metal-yarıiletken diyotlarda Schottky kapasitesi.....	44
3.3. Deneyde Kullanılan Kimyasal Malzemeler Ve Özellikleri	48
3.3.1. Kalay elementi (Sn).....	48
3.3.2. Kalay oksit (SnO ₂)	50
3.3.3. İtiryum (Y)	52
3.4. Kalay Oksit Filmlerin Bazı Teknolojik Uygulamaları.....	55
3.4.1. Gaz sensörleri.....	56

	Sayfa
3.4.2. Lityum iyon piller.....	58
3.4.3. Güneş pilleri.....	59
3.4.4. Mimari camlar (kızıl ötesi yansıtıcı olarak).....	61
3.4.5. Uçak camları (ısıtıcı eleman olarak).....	62
3.5. İnce Film Büyütme Teknikleri.....	62
3.5.1. Fiziksel buhar depolama (physical vapour deposition-PVD).....	64
3.5.2. Sputter (saçtırma) kaplama yöntemi.....	65
3.5.3. Kimyasal buhar depolama (CVD).....	67
3.5.4. Sol-jel kaplama tekniği (SCM).....	68
3.5.5. Spray pyrolysis (püskürtme) yöntemi.....	69
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	75
4.1. Püskürtme (Spray Pyrolysis) Yöntemi.....	75
4.2. Deneyde Kullanılan Altlıkların Hazırlanması.....	77
4.3. Çözeltilerin Hazırlanması ve Deneyin Yapılışı.....	78
4.4. Numunelerin Karakterizasyon İşlemleri.....	79
4.5. Akım-Gerilim Ölçümlerinin Alınması.....	80
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	83
5.1. SEM Görüntülerinin İncelenmesi.....	83
5.2. XRD sonuçlarının incelenmesi.....	86
5.3. UV-Vis Spektroskopisi Ölçümleri.....	88
5.4. Y/SnO ₂ /p-Si Diyodunun Akım-Gerilim Karakteristiği.....	90
5.5. Cheung Fonksiyonları İle Karakteristiklerin Belirlenmesi.....	95
5.6. Norde Fonksiyonu İle Karakteristiklerin Belirlenmesi.....	98
5.7. Y/SnO ₂ /p-Si Diyotlarının Kapasitans-Gerilim Karakteristiği.....	102
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	109

	Sayfa
KAYNAKLAR	113
ÖZ GEÇMİŞ	119



ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. İş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve omik kontaklar	27
Çizelge 3.2. Kalay oksitin temel özellikleri.....	50
Çizelge 3.3. İnce Film Elde Etme Metotları	63
Çizelge 5.1. Püskürtme yöntemiyle elde edilen Y katkılı SnO yapılı filmlerin yapısal parametrelerinin katkılama oranına bağlı olarak değişimi	88
Çizelge 5.2. $(\alpha(h\nu))^2-h\nu$ grafiklerinin enerji eksenini kestikleri noktalardan alınan bant aralığı değerleri	89
Çizelge 5.3. Oluşturulan Ag/ Y:SnO ₂ /p-Si diyotlarının ln(I)-V grafiklerinden elde edilen elektriksel parametreleri.....	92
Çizelge 5.4. Oluşturulan tüm Ag/Y:SnO ₂ /p-Si diyotlarının Cheung fonksiyonları kullanılarak hesaplanan elektriksel parametreleri	98
Çizelge 5.5. Oluşturulan Ag/Y:SnO ₂ /p-Si diyotlarının Norde fonksiyonları ile hesaplanan elektriksel parametreleri.....	101
Çizelge 5.6. Ag/YSnO ₂ /p-Si diyotlarının C ⁻² -V grafiği yardımıyla hesaplanan elektriksel parametreleri	107

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Bir yarıiletkenin a) $T = 0$ K'de b) $T > 0$ K'de şematik enerji-bant diyagramı.....	18
Şekil 3.2. Si saf yarıiletkeninin a) $T=0$ K b) $T=298$ K'de iki boyutlu kristal yapısı.....	20
Şekil 3.3. Si saf yarıiletkeninde dış potansiyelle boşluk-elektron çifti oluşumu.....	21
Şekil 3.4. n-tipi yarıiletken, As katkılanmış Si kristali	22
Şekil 3.5. Oda sıcaklığında n – tipi yarıiletkenin bant yapısı.....	23
Şekil 3.6. p-tipi yarıiletken, Ga katkılanmış Si kristali	23
Şekil 3.7. Oda sıcaklığında p - tipi yarıiletkenin bant yapısı.....	24
Şekil 3.8. Has bir yarıiletken için enerji bant diyagramı ve Fermi enerji seviyesinin pozisyonu.....	25
Şekil 3.9. a) n-tipi yarıiletkenlerde b) p-tipi yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyeleri....	25
Şekil 3.10. Metal/n-tipi yarıiletken kontak için ($\Phi_m > \Phi_s$) enerji bant diyagramı (a) Kontak oluşmadan önceki nötral materyaller (b) kontak oluşturulduktan sonra termal denge durumu (E_{Fm} , E_{Fn} sırasıyla metal ve n-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleridir).....	28
Şekil 3.11. Farklı voltajlarda n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler üzerine metal doğrultucu kontakların enerji band diyagramları (a) Termal denge (b) Doğru beslem (c) Ters beslem.....	31
Şekil 3.12. $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda metal/n-tipi yarıiletken kontakın enerji band diyagramı (a) ayrı ayrı materyaller (b) Termal denge (c) Ters beslem (d) Doğru beslem.....	32
Şekil 3.13. Düz beslem altındaki metal/yarıiletken kontakta imaj kuvvet azalma etkisi.....	34
Şekil.3.14. Metal p-tipi yapılarda doğrultucu kontakın a) potansiyel dağılımı ve b) yük dağılımı.....	45
Şekil 3.15. Kalay kristalinin katı hali	49
Şekil 3.16. Kalay oksitin kristal yapısı	51

Şekil	Sayfa
Şekil 3.17. İtiryum elementi yapısı	53
Şekil 3.18. Kalay oksidin gaz algılama mekanizması	57
Şekil 3.19. Tipik bir lityum iyon pil hücresinin şematik olarak gösterimi.....	59
Şekil 3.20. Tek kristalden yapılmış bir güneş pili	60
Şekil 3.21. p-n eklem diyotu.....	60
Şekil 3.22. CdTe güneş pili.....	61
Şekil 3.23. Fiziksel buhar depolama deney düzeneği	65
Şekil 3.24. Saçtırma kaplama teknikleri için temel mekanizma	66
Şekil 3.25. DC saçtırma yönteminin şematik diyagramı	66
Şekil 3.26. Kimyasal buhar biriktirme sisteminin şematik gösterimi.....	67
Şekil 3.27. Sol-jel teknolojileri ve ürünleri	68
Şekil 3.28. Kimyasal püskürtme yönteminin şematik gösterimi	70
Şekil 3.29. Püskürtme başlığı.....	71
Şekil 3.30. Spreyden çıkan çeşitli boyuttaki damlacıkların altlığa ulaşması.....	72
Şekil 4.1. Püskürtme (Spray Pyrolysis) sisteminin deney düzeneği.....	75
Şekil 4.2. Sono-Tech Exacta Coat püskürtme cihazı.....	76
Şekil 4.3. Sprey kaplama cihazı.....	76
Şekil 4.4. XRD ölçüm cihazı.....	79
Şekil 4.5. SEM cihazı	79
Şekil 4.6. UV-Vis optik soğurma ölçüm cihazı.....	80
Şekil 4.7. Termal buharlaştırma cihazı	81
Şekil 4.8. I-V ölçümünde kullanılan Keitley 2400 cihazı.....	81

Şekil	Sayfa
Şekil 4.9. C-V ölçümünde kullanılan analizör cihazı.	82
Şekil 5.1. Katkılı kalay oksit diyotundan alınan SEM görüntüsü.....	83
Şekil 5.2. YTO filminin SEM görüntüsü.....	84
Şekil 5.3. YTO 1 filminin SEM görüntüsü.....	84
Şekil 5.4. YTO 2 filminin SEM görüntüsü.....	85
Şekil 5.5. YTO 3 filminin SEM görüntüsü.....	85
Şekil 5.6. YTO 5 filminin SEM görüntüsü.....	86
Şekil 5.7. Tüm filmler için XRD kırınım desenleri.....	87
Şekil 5.8. Katkısız ve Y katkılı kalay oksit molekülünün soğurma grafiği.....	89
Şekil 5.9. İtriyum katkılı ve katkısız kalay oksit molekülünün $(a(h\nu))^2-h\nu$ grafiği.....	90
Şekil 5.10. Oluşturulan Ag/ Y:SnO ₂ /p-Si diyotlarının karanlıkta ln(I)-V grafiği.....	91
Şekil 5.11. Oluşturulan Ag/ Y:SnO ₂ /p-Si diyotlarının ışık altında ln(I)-V grafiği.....	92
Şekil 5.12. Oluşturulan katkısız Ag/Y:SnO ₂ /p-Si diyotunun karanlık altında ln(I)-V grafiği.....	93
Şekil 5.13. Oluşturulan % 1 itriyum katkılı Ag/Y:SnO ₂ /p-Si diyotunun karanlık altında ln(I)-V grafiği.....	93
Şekil 5.14. Oluşturulan % 2 itriyum katkılı Ag/Y:SnO ₂ /p-Si diyotunun karanlık altında ln(I)-V grafiği.....	94
Şekil 5.15. Oluşturulan % 3 itriyum katkılı Ag/Y:SnO ₂ /p-Si diyotunun karanlık altında ln(I)-V grafiği.....	94
Şekil 5.16. Oluşturulan % 5 itriyum katkılı Ag/Y:SnO ₂ /p-Si diyotunun karanlık altında ln(I)-V grafiği.....	95
Şekil 5.17. % 1 katkılı Ag/ Y:SnO ₂ / p-Si diyotuna ait $H(I)-I$ ve $dV/d(\ln I)-I$ eğrileri ...	96
Şekil 5.18. % 2 katkılı Ag/ Y:SnO ₂ / p-Si diyotuna ait $H(I)-I$ ve $dV/d(\ln I)-I$ eğrileri ...	96
Şekil 5.19. % 3 katkılı Ag/ Y:SnO ₂ / p-Si diyotuna ait $H(I)-I$ ve $dV/d(\ln I)-I$ eğrileri ...	97
Şekil 5.20. % 5 katkılı Ag/ Y:SnO ₂ / p-Si diyotuna ait $H(I)-I$ ve $dV/d(\ln I)-I$ eğrileri ...	97

Şekil	Sayfa
Şekil 5.21. YTO diyotunun $F(V)$ - V grafiği.....	99
Şekil 5.22. YTO1 diyotunun $F(V)$ - V grafiği.....	99
Şekil 5.23. YTO2 diyotunun $F(V)$ - V grafiği.....	100
Şekil 5.24. YTO3 diyotunun $F(V)$ - V grafiği.....	100
Şekil 5.25. YTO5 diyotunun $F(V)$ - V grafiği.....	101
Şekil 5.26. Ag/Y:SnO ₂ /p-Si diyotlarının 1000 kHz frekans altında C - V grafiği.....	103
Şekil 5.27. YTO diyotunun tüm frekanslardaki C - V grafiği.	103
Şekil 5.28. YTO1 diyotunun tüm frekanslardaki C - V grafiği.	104
Şekil 5.29. YTO2 diyotunun tüm frekanslardaki C - V grafiği.	104
Şekil 5.30. YTO3 diyotunun tüm frekanslardaki C - V grafiği.	105
Şekil 5.31. YTO5 diyotunun tüm frekanslardaki C - V grafiği.	105
Şekil 5.32. Ag/Y:SnO ₂ /p-Si diyotlarının 1000 kHz frekans altında C^{-2} - V grafiği.	106

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
Φ_B	Engel yüksekliği
n	İdealite faktörü
N_{ss}	Arayüzey durum yoğunluğu
R_s	Seri direnci
Φ_e	Etkin engel yüksekliği
Φ_{Bo}	Sıfır beslem engel yüksekliği
I_o	Ters beslem doyma akımı
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ^e	Elektron yakınlığı
E_C	İletkenlik band kenarı
E_F	Fermi seviyesi
V_i	Kontak potansiyel farkı
V_F	Kontakta uygulanan doğru beslem gerilimi
V_R	Kontakta uygulanan ters beslem gerilimi
$\Delta\Phi$	Engel düşmesi
J_o	Akım yoğunluğu
A^*	Richardson sabiti
W_D	Tüketim bölgesi kalınlığı
V	Uygulanan gerilim
V_D	Diyot üzerine düşen gerilim
χ_s	Yarıiletkenin elektron yakınlığı
N_D	Verici (donor) yoğunluğu
N_A	Alıcı (akseptör) yoğunluğu
N_c	İletkenlik bandının etkin taşıyıcı yoğunluğu

Simgeler**Açıklama**

N_v	Değerlik bandının etkin taşıyıcı yoğunluğu
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_i	Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
δ	Yalıtkan tabaka kalınlığı
E_g	Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
Q_{ox}	Oksit yükü
A^{**}	Etkin Richardson sabiti

Kısaltmalar**Açıklama**

SCM	Sol-jel kaplama tekniği
C-V	Kapasitans- gerilim
I-V	Akım- gerilim
MIS	Metal- yarıiletken- yalıtkan
MS	Metal- yarıiletken
SD	Schottky diyot
TE	Termiyonik emisyon
TED	Termiyonik emisyon difüzyon

1. GİRİŞ

Son yıllarda, katkılı metal oksitler optiksel, yapısal ve elektriksel özelliklerinin çeşitliliğinin verdiği avantajlardan dolayı önemli hale gelmişlerdir. TCO (Transparent Conducting Oxides = Geçirgen İletken Oksit) filmler doğalarında bulunan mükemmel elektriksel iletkenlik ve optik geçirgenlik karakteristikleri ile dikkat çekerler. Hem katkılı hem de katkısız metal oksitler Schottky ve foto diyotlar, gaz sensörleri, güneş pilleri gibi pek çok aygıtın üretiminde kullanılmaktadır. Gaz sensörlerinin üretiminde metal oksitlerin kimyasal kararlılık ve yarıiletken özellikleri göz önünde bulundurulurken, fotovoltaik aygıtların üretiminde görünür bölgede yüksek geçirgenlik ve yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olması beklenir. Yapılan çalışmalar gösteriyor ki katkılı metal oksitlerin optiksel, yapısal ve elektriksel özelliklerinde ciddi değişimler meydana gelmektedir.

Bu çalışmada uzun zamandır yaygın olarak kullanılan SnO₂ filmin elektriksel, yapısal ve optik özelliklerine Y katkılamanın ve katkı oranlarının etkisi ve bu değişimlerle üretilen aygıtların elektriksel ve fotoelektriksel özelliklerinin değişimi incelendi. Bu sebeple, farklı oranlarda Y katkılı SnO₂ nano yapılı film p tipi Si ve cam alt taşlar üzerine ultrasonik püskürtme yöntemi kullanılarak büyütüldü. Bu işlemlerden önce Si ve cam alt taşlar uluslararası temizleme yöntemleriyle hazır hale getirildikten sonra farklı yüzde oranlarına sahip (% 0, 1, 2, 3, 5) Y-SnO₂ kaplamalar yapıldı. İnce film elde etmek için püskürtme cihazı 2 mm/dk hızda ve 350 °C sıcaklıkta ayarlandı. Son tavlama işlemi her alttaş için 400 °C ve 30 dk olarak ayarlandı.

Üretilen filmlerin yapısal, elektriksel ve optiksel özellikleri XRD, SEM ve UV-Vis karakterizasyon yöntemleri ile incelendi. Daha sonra p tipi Si alt taşlar üzerine oluşturulan nano yapılı film üzerine termal buharlaştırma yöntemi ile gümüş doğrultucu kontaklar oluşturmak için gümüş parçaları asetondan geçirilip kurutulmuş cihaza yerleştirildi ve metal doğrultucu kontaklar oluşturularak Ag/Y:SnO₂/p-Si aygıtlar üretilmiş oldu. Üretilen aygıtların elektriksel ve fotoelektriksel karakterizasyonları akım-gerilim (I-V), kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri ile belirlendi. Yapıların fotoelektriksel özellikleri incelenirken AM 1.5 filtreye sahip güneş simülatörü kullanılarak 100 mW/cm² ışık şiddetinde ölçümler alındı.

Bu yüksek lisans tezinin temel amacı kullanım alanı giderek artan Y metalini kullanarak oluşturulan katkılı SnO₂ nano yapıların elektriksel, optiksel ve yapısal özelliklerinin incelenmesidir. Bu çalışmada ayrıca oluşturulan Ag/Y:SnO₂/p-Si heteroeklemlere yapılan yüzde Y metal katkısının etkileri araştırıldı.

Bu amaçla

- İlk olarak elde edilen alt taşlar üzerine katkılı ve katkısız SnO₂ ince filmler oluşturuldu
- Daha sonra bu ince filmlerin optiksel, yapısal ve elektriksel özellikleri belirlendi
- Oluşturulan SnO₂/Si üzerine heteroeklemler oluşturuldu
- Son olarak da bu yapıların elektriksel ve fotoelektriksel özellikleri yarıiletken aygıtların akım-gerilim ve kapasite-gerilim ölçümleri alınarak belirlendi.

2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ

Sol jel metodunda kolloidlerin hazırlanması için kullanılan başlangıç malzemeleri çevreleri çeşitli ligandlarla sarılan metal veya metaloid elementlerdir (Jeffrey Brinker ve ark., 1990).

SnO₂ filmlerinin hazırlanmasında kullanılan farklı teknikler de değişik optik ve elektriksel özelliklere sahip tabakalara yol açar ki bunlar, kalay oksit filmlerde donör vazifesi gören oksijen boşluklarının kritik etkisine sebep olur. Özellikle fiziksel teknikler kullanılarak elde edilen SnO₂ filmlerinde özdirenc genellikle $6.6 \times 10^{-3} - 2.5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ arasında değişmektedir (Stjerna ve ark., 1994).

SnO₂ filmlerinin yapısal, fiziksel ve kimyasal özellikleri; kullanılan tekniğe, deneysel parametrelere ve hava, oksijen, argon, vakum, hidrojen gibi çeşitli ortamlarda tavlama ya bağlı olarak değişir (Park ve Mackenzie, 1995).

SnO₂ filmleri IV-VI grup bileşiği olup, oda sıcaklığında geniş bir yasak enerji aralığına (Eg~3.4-4 eV) sahip doğrudan optik bant geçişli bir yarıiletken malzemedir (Lin ve Wu, 1996; Madelung, 1996; Amanullah ve ark., 1998; Briand ve ark., 1998).

Farklı elementlerin katkılanması ile SnO₂ filmlerinin özdirençlerinin düştüğü ve optiksel geçirgenliklerinin arttığı bilinmektedir (Lin ve Wu, 1996; Zhou ve ark., 2001).

SnO₂, yüksek optik geçirgenliği ve elektrik iletkenliğinden dolayı bilim ve teknolojide geniş bir uygulama alanı bulmuştur. SnO₂ gaz sensörleri, sıcaklık reflektörleri, düz panel görüntü araçları, fotovoltajik hücreler, boya bazlı güneş hücreleri ve ince film transistörleri gibi çeşitli teknolojik uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır (Ferrere ve ark., 1997; Mwamburi ve ark., 2000; Yin ve ark., 2000; Lavery ve ark., 2001; Sharma ve ark., 2001).

SnO₂ filmleri, $10^{-2} - 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ mertebesinde düşük elektriksel özdirence, görünür bölgede % 70-85 civarında optiksel geçirgenliğe, yüksek kimyasal, termal ve mekanik kararlılığa sahiptirler (Laurent ve ark., 1997; Racheva ve Critclow, 1997; Terrier ve ark., 1997; Rajpure ve ark., 2000; Zhou ve ark., 2001).

Katkısız SnO₂ filmlerinin özdirenci $2.8 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ve geçirgenliği % 70-75 iken, F (flor) katkılı SnO₂ filmlerinin özdirenci $3 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ve geçirgenliği % 85, Sb

katkılanarak $10^{-3} - 10^{-4}$ mertebesinde düşük özdirence sahip ve geçirgenliği % 80-85 civarında olan filmler elde edilmiştir (Zhou ve ark., 2001).

İstenilen özellikte daha kaliteli filmler elde etmek için SnO_2 'e flor (F), antimony, (Sb) ve indiyum (In) gibi farklı elementler katkılanabilmektedir (Lin ve Wu, 1996; Terrier ve ark., 1997; Thanganaju, 2002).

SnO_2 , n-tipi iletkenlik özelliğine sahip bir yarıiletkenidir. Bu n-tipi özelliğinin kaynağı yapısında mevcut olan oksijen boşluklarının donör tipi davranış sergilemesidir. SnO_2 , geniş bant aralığına sahip olan n-tipi bir yarıiletken olmasının yanısıra birçok faydalı özelliği de bir arada bulundurur. Yüksek optik geçirgenlik, düşük elektriksel direnci, kızılötesi ışınlar için yüksek yansıtıcılık, yüksek mekaniksel sertlik ve iyi çevresel kararlılık en belirgin özelliklerindedir (Mol, 2003).

SnO_2 , normal şartlarda yalıtkan gibi davranırken, ince film olarak yarıiletken özelliği göstermektedir. SnO_2 filmleri genellikle düşük konsantrasyonlu toksik gazların belirlenmesinde gaz sensörü olarak kullanılır. Uçak pencerelerinde kullanılmasının nedeni ise, pencerenin üzerine uygulanan ince SnO_2 filminin, buharı veya buzu uzaklaştırmasıdır (Mol, 2003).

Bunun yanında kimyasal püskürtme gibi kimyasal teknikler, güçlü stokiometrik olmayan SnO_2 filmlerinin oluşmasına neden olur. Bu durumdan yararlanarak, nispeten daha düşük dirençli filmler elde edilebilir (Patil ve ark., 2003).

Literatür taraması sonucunda kalay oksit ince filmler ile ilgili yayımlar incelenerek benzer ve farklı teknikler dikkate alınmıştır. Püskürtme ve spin kaplama metodu kullanılarak elde edilen filmlere yönelik yayınlardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Bilinen ilk püskürtme tekniği, 1940'lı yıllarda geçirgen oksit filmlerin hazırlanması için Chamberlin ve arkadaşları tarafından uygulanmıştır. 1966 yılında, Chamberlin ve Skarman CdS (kadmiyum sülfür) filmlerinin üretiminde püskürtme tekniği kullanarak bazı fiziksel özelliklerini incelemiştir (Chamberlin ve ark., 1966).

Kimyasal püskürtme tekniği ile 250-400 °C altta sıcaklığında $\text{SnCl}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ + etanol çözeltisi kullanılarak SnO_2 ince filmleri oluşturulmuştur. Bu filmlerin bazı elektriksel ve optiksel özellikleri incelenmiştir (Chambouleyron ve Saucedo, 1979).

Püskürtme metodu kullanılarak direnci $9 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 'ye sahip olan Sb katkılı SnO_2 filmleri hazırlanmıştır. Yapısal, elektrik ve optik özellikleri Sb konsantrasyonuna,

film kalınlığına ve depolama sıcaklığına bağılı olarak incelenmiştir (Mulla ve ark., 1986).

Başka bir çalışmada, püskürtme metodu kullanılarak hazırlanmış Sb katkılı SnO₂ filmlerinin, film karakteristiklerindeki parametrik değişimlerin etkileri ve bunun büyüme oranı üzerindeki etkileri çalışılmıştır. Elde edilen filmlerin yüzey morfolojisi, Hall etkisi, elektriksel iletkenliği, görünür bölgedeki optik geçirgenliği ve yasak enerji aralıkları incelenmiştir. En iyi karakteristik özelliklere sahip filmleri elde etmek için gereken deney koşulları başarılı bir şekilde belirlenmiştir. Yüksek optik geçirgenliğe (> % 85, 450-800 nm arasında), düşük özdirenç (10^{-3} Ω.cm) ve yasak enerji aralığına (E_g=3.82 eV) sahip filmler 430 °C alttaş sıcaklığında elde edilmiştir (Unaogu ve Okeke, 1990).

Küresel SnO₂ tanecikleri SnCl₄'ün sulu çözeltisi kullanılarak ultrasonik püskürtme metodu ile hazırlanmıştır. Kaynak çözeltideki yoğunluk değişimine rağmen parçacık büyüklüğünün, ortalama çap değeriyle normalizasyonu sonucu bulunan değerler hemen hemen aynıdır. SnO₂ parçacıklarının ortalama çapları kaynak çözeltinin yoğunluğuyla orantılı olarak 0.2-0.8 µm aralığında değişmiştir. Her bir küresel parçacık birçok parçacıktan oluşmuş ve katı mikro gözenekli bir yapı göstermiştir (Lee ve ark., 1992).

Yoon ve Song'un yaptığı bir çalışmada, püskürtme metodu kullanılarak hazırlanmış F katkılı SnO₂ filmlerinin özellikleri incelenmiştir. Alttaş sıcaklığının ve çözeltilerin kimyasal bileşiminin, depolama oranını ve SnO₂: F filminin özelliğini büyük oranda etkilediği bulunmuştur. En iyi depolama koşulları altında kalınlığı yaklaşık 0.6 µm olan film için özdirenç yaklaşık 4.3×10^{-14} Ω.cm ve optik geçirgenlik yaklaşık % 79 olarak gözlenmiştir. X-ışını kırınımı ölçümleri sonucunda elde edilen filmlerin tetragonal yapıda kristallendiği ve (200) yönünde yönelime sahip olduğu görülmüştür. Alttaş sıcaklığı 450 °C'nin üzerinde iken yüzey yapısının küresel şekilden piramit şekline dönüştüğü elektron mikroskopuyla gözlenmiştir. Benzer bir yüzey yapısı değişikliği çözeltideki CH₃OH/H₂O mol oranının 0.1 den küçük olduğu durumda da gözlenmiştir (Yoon ve Song, 1993).

Shanthi ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, flor katkısının püskürtme metodu ile elde edilen SnO₂ filmlerinin yapısal, elektriksel ve optik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada, alkali-free corning (alkali içermeyen kurutulmuş)

borosilikat cam üzerine püskürtme metodu ile 375-450 °C sıcaklık aralığında, F katkılı SnO₂ filmleri elde edilmiştir. Elde edilen filmlerin yapısal, elektrik ve optik özellikleri sıcaklığın ve püskürtme çözeltilisindeki katkı bileşiminin bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Hemen hemen tüm durumlarda filmler (100) yönünde kristallenmiştir. Filmlerin görünür bölgedeki geçirgenliği ve elektriksel direnci F konsantrasyonunun artışı ile ters orantılı olarak azalmıştır (Shanthi ve ark., 1998).

Zaouk ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmalarda, SnO₂ ince filmleri, yeniden düzenlenmiş bir püskürtme tekniği olan elektrostatik püskürtme piroliz (ESP) metoduyla hazırlanmıştır. Filmlerin elektriksel ve optik özellikleri üzerine flor katkı konsantrasyonu, altlık sıcaklığı, püskürtme mesafesi gibi parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Püskürtme mesafesi ve altlık sıcaklığı gibi parametrelerin, flor katkılı SnO₂ ince filmlerinin kaliteli sonucu için son derece önemli olduğu vurgulanmıştır. 550 °C altlık sıcaklığında, 6 cm püskürtme mesafesinde ve başlangıç çözeltilisinde % 80 HF kullanılarak, 9×10^{-4} Ω.cm özdirence ve görünür bölgede % 85 optik geçirgenliğe sahip filmler elde edilmiştir. Bu sonuçlardan, elektrostatik spray pyrolysis metodunun daha kolay, daha ucuz ve daha verimli bir metot olduğu sonucuna varılmıştır. Artan püskürtme mesafesinin, damlacıkların düşme şekillerini etkilemede son derece önemli olduğu vurgulanmıştır (Zaouk ve ark., 2000).

Thangaraju'nun bir çalışmasında, SnCl₂ ön maddesi kullanılarak hazırlanan ve yüksek derecede iletkenlik özelliği taşıyan SnO₂'ye, 400 °C'de flor (F), 350 °C'de antimon (Sb) ve 375 °C'de F+Sb katkılanarak, püskürtme metoduyla filmler elde edilmiş ve elde edilen filmlerin yapısal, optik ve elektrik özellikleri incelenmiştir. Hazırlanan filmlerin yapısal analizlerinden, tetragonal yapıya sahip oldukları, örgü parametrelerinin eklenen katkı malzemesinin miktarına bağlı olmadığı, tercihli yönelim olarak (200) doğrultusunda yönelimleri ve tanecik boyutlarının ise 200 Å ve 650 Å arasında değiştiği tespit edilmiştir. Elektrik ölçümlerinden flor katkılanmış ince filmlerin, Sb ve (F+Sb) katkılanmış örneklerinden daha düşük tabaka direncine sahip olduğu görülmüştür. Bu olaydaki baskın mekanizmanın iyon kirlilik saçılması olduğu makalede vurgulanmış olup, optik ölçümlerinden, en iyi saydamlık değerinin yine flor katkılanmasıyla (FTO filmlerde) başarıldığı sonucuna varılmıştır (Thanganaju ve ark., 2002).

Patil ve arkadaşları püskürtme metodu ile katkısız SnO₂ ince filmlerini amorf cam alttaşlar üzerine oluşturulmuşlardır. Filmler 300–500 °C aralığında değişik altaş sıcaklıklarında 50 °C aralıklarla oluşturulmuştur. Altaş sıcaklığının yapısal, elektrik ve optik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. X-ışını kırınım desenlerinden tüm filmlerin (100) düzlemi boyunca tercihli yönelim gösterdiği ve filmlerin polikristal yapıda olduğu gözlenmiştir. Elde edilen filmlerin yasak enerji aralıklarının 3.36 eV ile 3.87 eV arasında değiştiği gözlenmiştir. 630 nm'deki optik geçirgenlik altaş sıcaklığının artışıyla % 85 ile % 73 arasında değişmiştir (Patil ve ark., 2003).

Elangovan ve arkadaşlarının 2004 yılında yayınlanan bir makalelerinde, püskürtme yöntemiyle farklı altlıklara büyütülen SnO₂ ince filmlerinin fiziksel özellikleri incelenmiştir. Çalışmada, optik cam, corning 7059, pyrex ve fused quartz gibi değişik altlıklar kullanılmıştır. Diğer altlıklarda büyütülen filmlere kıyasla, optik camda büyütülen filmlerin daha iyi elektriksel özellikler gösterdikleri ortaya çıkmıştır. Daha sonra katkısız, flor katkılı ve antimon katkılı kalay oksit ince filmleri optik cam altlıklara büyütülmüştür. Flor katkılama, filmlerin hem optik ve hem de elektrik özelliklerini daha iyi hale getirirken, antimon katkılama filmlerin sadece elektrik özelliklerini iyileştirmiş, optik geçirgenliği azaltmıştır. Katkısız filmlerde (211) boyunca olan tercihli yönelim, katkılı filmlerde yerini (200) tercihli yönelimine bırakmıştır. Yönelimin değişimi SEM fotoğraflarında da kendini göstermiştir. Minimum tabaka direncinin, FTO filmler için 1.8 Ω ve ATO filmler için 2.2 Ω olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlerin literatürdeki en düşük değerler olduğu vurgulanmıştır. Flor katkılama, optik geçirgenliği % 42'den % 85'e kadar arttırdığı, antimon katkılama, optik geçirgenliği % 20'ye kadar düşürdüğü gözlemlenmiştir (Elangovan ve ark., 2004a).

Aynı yıl Elangovan ve arkadaşlarının başka bir çalışmasında, altlık sıcaklığının fonksiyonu olarak 350 °C ve 400 °C sıcaklıklarda, el yapımı püskürtme yöntemiyle, SnCl₂ ön maddesinden hazırlanan SnO₂ ince filmleri elde edilmiştir. Ağırlık oranı olarak % 1'den % 4'e kadar antimon katkılanarak ve antimon katkılanmadan elde edilen SnO₂ ince filmlerin fiziksel özellikleri ele alınmıştır. Filmlerin XRD analizlerinden, antimon katkılanmış SnO₂ ince filmlerin (200) tercihli yönelimi boyunca büyümesine karşın, katkılanmamış SnO₂ ince filmlerinin tercihli yönelimlerinin (211) şeklinde olduğu görülmüştür. SEM görüntüleri, % 1 seviyesinden daha fazla antimon katkılı

kalay oksit filmlerinin yüzeylerinin daha küçük taneciklerden ibaret olduğunu, daha az antimon katkılarıyla elde edilen filmlerin yüzeylerinde ise daha büyük taneciklerin var olduğunu göstermiştir. Elektrik-hall ölçümlerinden taşıyıcı konsantrasyonunun her iki taban sıcaklığında (350 °C ve 400 °C) da artan Sb katkı oranıyla arttığı görülmüştür. Ayrıca antimon katkılı filmler için tabaka direncinin, önceden elde edilen filmler içinde en düşük tabaka direnç değerine sahip olduğuna ve değerinin 2.17 Ω olduğuna değinilmiştir (Elangovan ve ark., 2004b).

G. Korotcenhov ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada, Si alıtış üzerine püskürtme metodu ile elde edilen SnO₂ filmlerinin özellikleri incelenmiştir. Bu filmlerin 350-535 °C püskürtme sıcaklığında kristalografik yönelimlerin değişimi incelenmiştir. Örnekler XRD, SEM ve MRTEM ile karakterize edilmiştir. Değişik püskürtme sıcaklıklarında elde edilen SnO₂ nanokristallerinin bazı kristalografik modelleri, MRTEM mikrogramların dijital görüntü işleme yoluyla yapılması amaçlanmıştır. Bu modeller bilgisayar görüntü simülasyonu ile karşılaştırılmış ve deneysel görüntülerle test edilmiştir (Korotcenhov ve ark., 2005).

Serin ve arkadaşları, püskürtme metodu kullanılarak hazırlanan SnO₂ ince filmlerin elektrik, optik ve yapısal özelliklerini incelemiştir. Çözelti ağırlıkça % 32.21 etil alkol, % 40.35 deiyonize su ve % 27.44 kalay kloritten oluşmuştur. Kalay klorit (SnCl₄.5H₂O) (99.9999 saflıkta) dikey, el yapımı pyrex kabın içine doldurularak kullanılmıştır. Filmler, 50 °C aralıklarla 300-500 °C aralığındaki sıcaklığa sahip altlıklara, taban sıcaklığına bağlı olarak büyütülmüşlerdir. X-ışınları kırınım çalışmaları, kristal tane boyutunun ve tercihli yönelimin altlık sıcaklığına son derece bağlı olduğunu göstermiştir. Ayrıca bu çalışmalar filmlerin 300 °C'de amorf yapıda, diğer sıcaklıklarda polikristal yapıda olduğunu belirtmiştir. Kızılötesi ve görünür bölge spektroskopi çalışmalarıyla 630 cm⁻¹ dalga sayısı civarında SnO₂'nin esneme modu özelliğine ve güçlü bir titreşim bandına sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Görünür bölgede, optik geçirgenliğin, artan sıcaklığa bağlı olarak % 75–95 değerleri arasında değiştiği tespit edilmiştir. Filmin en iyi optik ve elektrik kalite sergilediği sıcaklığın, 400 °C taban sıcaklığı olduğu sonucuna varılmıştır (Serin ve ark., 2006).

Rozati püskürtme metodu ile cam alıtış üzerine katkısız SnO₂ filmlerini elde etmiş ve bu filmlerin yapısal özelliklerine alıtış sıcaklığının etkisini incelemiştir. Bu

filmlerin 250-575 °C püskürtme sıcaklığında kristalografik yönelimlerinin değiştiği gözlenmiştir (Rozati, 2006).

Giraldi ve arkadaşları Si alttaş üzerine SnO₂ filmlerini elde etmiş, optik ve yapısal özellikleri üzerine Sb katkısının etkisini incelemişlerdir (Giraldi ve ark., 2006).

Biswas ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmalarında, F katkılı SnO₂ filmlerinin sulu çözeltisi, SnCl₄ ve NH₄F'den dönel kaplama metoduyla elde edilmiştir. Dengeleyici olan polivinil alkol, malzemenin cama daha iyi yapışmasını sağlamak amacıyla çözeltiliye ilave edilmiştir. Daha sonra bu çözelti, hem daldırma metoduyla, hem döndürme metoduyla farklı kalınlıktaki (200 nm'den 600 nm'ye) kaplama tabakalarını elde etmek amacıyla kullanılmıştır. Filmler elde edildikten sonra havada kurutulup, 450 °C'de tavlansmıştır. Elde edilen filmlerin, SnO₂'nin tetragonal örgülü kristal yapısına sahip olduğu görülmüştür. Optik geçirgenliğin, döndürme metoduyla elde edilen filmlerde nispeten daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. SEM fotoğraflarından polivinil alkol katkılamanın, flor iyonlarının filmleri dağlamasını minimuma indirdiği gözlemlenmiş, daldırma metoduyla elde edilen filmlerin yüzeyi, döndürme metoduyla elde edilen filmlerden daha az gözenekli olduğu görülmüştür. Daldırma metoduyla elde edilen filmlerin kırılma indeksi 1.650-1.803 aralığında değişirken, döndürme metodunda 1.670-1.823 aralığında değiştiği bulunmuştur. Tabaka direnci döndürme metoduyla yapılan numunelerde 3.3-1300 kΩ aralığında iken, daldırma metoduyla yapılan numunelerde 1.4-2500 kΩ aralığında olduğu görülmüştür (Biswas ve ark., 2006).

Çağlar ve arkadaşları püskürtme metodu ile farklı püskürtme zamanlarında (dolayısıyla farklı kalınlıklarda) SnO₂ filmlerini elde etmişlerdir. Bu çalışmada, filmlerin X-ışınları kırınım desenlerini kullanarak, elde edilen filmlerin hemen hemen amorf yapıda olduklarını bulmuşlardır. Filmlerin kalınlığı arttıkça geçirgenliklerinin azaldığı, yasak enerji aralıklarının ise düştüğünü rapor etmişlerdir (Çağlar ve ark., 2007).

El-Maghraby ve arkadaşları spin kaplama metodu ile elde edilen TiO₂/SnO₂ nanoyapıdaki filmlerin yapısal özelliklerine tavlama sıcaklığı ve katkı oranının etkisini incelemiştir (El-Maghraby ve ark., 2008).

Kasar ve arkadaşları püskürtme metoduyla, farklı taban sıcaklıklarında SnO₂ ince filmleri elde etmişlerdir. Çözeltinin konsantrasyonu 2 M ve miktarı 20 ml olacak

şekilde sabit tutulmak kaydıyla, büyütme sıcaklığının, diğer altlık sıcaklıkları arasında, 450 °C’de optimum olduğu sonucuna varılmıştır. X-ışınları kırınım ölçümleri, filmlerin polikristal ve primitif tetragonal yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca altlık sıcaklığına bağlı olarak elde edilen filmlerin örgü parametreleri, tanecik büyüklüğü, mikro zorlanma ve dislokasyon (çizgisel kusur) yoğunluğu da XRD’den hesaplanmıştır. En düşük tabaka direnci ve en yüksek optik geçirgenlik (% 86) 450 °C altlık sıcaklığında elde edilmiş, elektrik ölçümlerinden taşıyıcı yoğunluğunun, $8.81 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ve özdirencin, $1.15 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ olduğu görülmüştür. Bu çalışmada elde edilen filmlerin karakterizasyonlarından, teknolojiye gaz sensörü olarak kullanılabilmesi açısından iyi birer film oldukları vurgulanmıştır (Kasar ve ark., 2008).

Dua ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada; antimon katkılı kalay oksit filmleri, Sn:Sb atomik oranı sırasıyla 90:10, 70:30, 50:50, 30:70 şeklinde değiştirilerek sol-gel dönel kaplama metoduyla silika camlar üzerine büyütülmüştür. Nanoyapılı yüzeylerin % 10 ve % 30 Sb katkılı filmlerden elde edildiği ve nanoküme büyüklüğünün antimon miktarına bağlı olduğu SEM fotoğraflarından gözlemlenmiştir. Ayrıca SnO₂’nin kasiterit fazının düşük Sb katkısında ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Filmlerin UV ölçümlerinden, mor ötesi bölgede soğurma özelliğine sahip oldukları saptanmıştır. Soğurma değerleri yardımıyla filmlerin direkt bant aralığı enerji değerlerinin 3.73 -5.20 eV arasında değiştiği, indirek bant aralığı enerji değerlerinin 2.54-3.46 eV arasında değiştiği, bant aralığı enerjilerinin % Sb katkı oranının artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Elektriksel özdirenç değerlerinin $1.19 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ’den $155.59 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ’ye değiştiği görülmüştür. Minimum özdirencin, % 30 Sb katkısında elde edildiği gözlemlenmiştir. Görünür bölgede optik geçirgenlik değerlerinin ise % 80–97 aralığında değiştiği saptanmıştır (Dua ve ark., 2008).

Moholkar ve arkadaşlarının yayınlanan makalelerinde, cam altlıklar üzerine katkısız ve NH₄F maddesinin değişik ağırlık oranları ile farklı konsantrasyonlarda flor katkılı kalay oksit filmleri, püskürtme yöntemi kullanılarak elde edilmiş ve karakterizasyonları sağlanmıştır. Burada diğer parametreler (altlık sıcaklığı, püskürtme hızı, gaz basıncı, toplam sprey miktarı) sabit tutulmuştur. Film kalınlığının flor katkı oranıyla, 800 nm’den 1572 nm’ye arttığı görülmüştür. XRD ölçümlerinden FTO filmlerin tetragonal yapılı ve (200) düzlemi boyunca yöneldiği, tanecik boyutunun katkısız SnO₂ filmlerde 45 nm iken, flor katkılı filmlerde 66 nm olduğu tespit edilmiştir.

SEM ve AFM çalışmaları, FTO yüzeylerinin nanoparçacıklardan oluştuğunu göstermiştir. Elektrik ölçümlerinden filmlerin n-tipi elektrik iletkenliği gösterdiği anlaşılmıştır. Katkısız filmlerde optik geçirgenlik % 65 iken, ağırlıkça % 20 F konsantrasyonunda elde edilen filmler için optik geçirgenliğin % 85.6'ya yükseldiği ve minimum özdirenç değerinin ise $3.8 \times 10^{-4} \Omega$ değerine düştüğü görülmüştür (Moholkar ve ark., 2009).

Ravichandran ve arkadaşları tarafından yayınlanan bir çalışmada; basit ve düşük maliyetli püskürtme (sprey) tekniği kullanılarak büyütülen çifte katkılı (Sb ve F) nanokristal yapıya sahip kalay oksit filmlerinin güneş pili uygulamaları için uygunluğu incelenmiştir. Ön madde olarak SnCl_2 'nin sulu çözeltisinden faydalanılarak antimon ve flor katkılı kalay oksit ($\text{SnO}_2:\text{Sb:F}$) ince filmlerin üretilmesi sağlanmıştır. Yapısal çalışmalar, katkılanmamış filmlerin tanecik büyüklüğünün 32 nm, çifte katkılı film durumunda ise 71 nm olduğunu ve tercihli yönelimin (200) olduğunu göstermiştir. AFM resimleriyle, filmlerin homojen ve tekdüze bir yapıya sahip oldukları görülmüştür. Görünür bölgede optik geçirgenlik değeri % 76 iken, optik bant aralığı enerjisi 3.55 eV değerinde olduğu saptanmıştır. Tabaka direnci (ağırlıkça antimon % 2 flor ise % 40 seviyesinde katkılı olduğunda) çifte katkılı ince filmler için minimum değer 4.74 Ω olduğu tespit edilmiştir. Bu değer, püskürtme tekniğinin değişik versiyonları kullanılarak elde edilen katkılı kalay oksit ince filmleri için pek çok araştırmacı tarafından rapor edilenlerden daha küçük olduğu vurgulanmıştır. Basit bir teknikle üretilen bu filmlerin, uygun spreylere karşılaştırıldığında, arzu edildiği gibi daha düşük olan $1.36 \times 10^{-2} (\Omega)^{-1}$ 'lik özdirenç değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu yüzden bu basit ve pahalı olmayan püskürtme tekniği, optoelektronik aygıtlar için saydam elektrotlara ve saydam iletken (TCO) güneş pili tabakalarının imalatı için uygun püskürtme metotlarına ekonomik bir alternatif olarak düşünülebileceği vurgulanmıştır. Geniş optik bant aralığı, iyi görünür bölge saydamlığı ve kızılötesi bölgede iyi oranda yansıtma kapasitesine sahip olma, çifte katkılanmış olan bu filmlerin, düşük maliyetli saydam iletken güneş pili tabakaları için arzu edilen bir aday olduğunu ortaya koymuştur (Ravichandran ve ark., 2009a).

Çağlar ve arkadaşları SnO_2 filmini sol jel spin kaplama metodu ile p-Si alttaş üzerine elde etmişlerdir. Elde edilen SnO_2 filminin yasak enerji aralığını 3.58 eV olarak

bulmuşlardır. Ayrıca oluşturulan SnO₂ / p-Si diyotunun akım-voltaj ve kapasitans-voltaj karakteristiklerini de rapor etmişlerdir (Çağlar ve ark., 2009).

Babar ve arkadaşlarının yayınlarında, püskürtme metodu kullanılarak, SnO₂ ince filmleri ile farklı Sb katkı oranına sahip SnO₂:Sb ince filmleri elde edilmiştir. Filmlerin (211) ve (112) düzlemleri boyunca tercihli yönelime sahip, tetragonal örgülü polikristal yapıda oldukları tespit edilmiştir. X-ışınları fotoelektron spektroskopisi ölçümleri (XPS), filmlerin oksijence eksik olduğunu ve SnO₂ filmlerindeki Sb konsantrasyonunun başlangıç çözeltilisinden daha az olduğunu ortaya çıkarmıştır. Elektron mikroskop ölçümlerinden, filmlerin tek düze olduğu ve yüzey morfolojilerinin, Sb'nin katkılanmasıyla iğne uçlu şekillerden, çok yüzlü şekillere değiştiği görülmüştür. Fotoluminesans (PL) ölçümlerinden şiddetli mor ve nispeten zayıf kırmızı yayınlamalar görülmüştür. PL spektrumundaki piklerin nedeni, oksijen boşluklarının birleşik etkisi, kalay çatlakları veya sarkan bağlar, tek yüklü oksijen boşlukları, oksijen çatlakları ve kristal kusurlarına atfedilmiştir. Optik ölçümlerinden, direk optik bant aralığı, dejenerasyonlu yarıiletken özelliği gösteren Sb konsantrasyonuyla 3.55 eV'dan, 3.60 eV'a arttığı gözlemlenmiştir. Elektriksel ölçümlerinden, en uygun elektriksel özelliklerin, % 2 oranında Sb katkılanmış film için elde edildiği ve özdirenç değerinin $1.22 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$, taşıyıcı yoğunluğunun $5.19 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ve mobilitenin $9.83 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ olduğu görülmüştür. Bu filmlerin fiziko-kimyasal özelliklerinin, çeşitli antimon seviyelerinde, çok amaçlı ince film aygıtları için olası aday olduklarını göstermiştir (Babar ve ark., 2010).

Arivazhagan ve Rajesh'in yapmış oldukları çalışmada, SnO₂ ince filmleri, dönel kaplama tekniği ile farklı dönme hızlarında döndürülerek ve sonrasında farklı sıcaklıklarda tavlansarak elde edilmiştir. Dönme hızı olarak 1000 rpm ve 2500 rpm denenmiş, 2500 rpm'de elde edilen filmlerin elektron mikroskop görüntülerinden daha pürüzsüz oldukları görülmüştür. 300 °C, 350 °C ve 400 °C tavlama sıcaklıklarında elde edilen filmlerin yapısal ölçümlerinden, tercihli yönelimlerin (101) olduğu ve tavlama sıcaklığıyla değişmediği gözlemlenmiştir. Tanecik boyutunun 350 °C'deki filmler için daha büyük olduğu görülmüştür. Optik ölçümlerden filmlerin bant aralığı enerjilerinin farklı taban sıcaklıkları için 2.1 eV ile 2.4 eV arasında değiştiği görülmüştür (Arivazhagan ve Rajesh, 2010).

Tatar ve Düzgün'ün yayımlanan bir çalışmalarında SnO₂ filmlere flor katkılanmış ve değişik katkılama oranlarının filmin yapısal, elektrik ve optik özellikleri üzerindeki etkisi, püskürtme metoduyla, altlık sıcaklığı 440 °C'de ve püskürtme mesafesi 40 cm'de sabit tutularak incelenmiştir. Filmlerin polikristal bir yapıya sahip olduğu ve tercihli yönelimlerinin flor katkı oranıyla sürekli değiştiği gözlemlenmiştir. Film kalınlığının artan flor katkı oranıyla 280 nm'den 1545 nm'ye, tanecik büyüklüğünün 17.45 nm'den 33.22 nm'ye değiştiği görülmüştür. AFM çalışmaları, filmlerin nanokristal parçacıklardan oluştuğunu ortaya koymuştur. Elektrik ölçümleri, filmlerin dejenere ve n-tipi olduğunu göstermiştir. Optik ölçümler, % 25 flor katkılama oranında optik geçirgenliğin, % 91.8'e kadar çıktığını ortaya çıkarmıştır (Tatar ve Duzgun, 2012).

Turgut ve arkadaşlarının yayımlanan bir çalışmalarında, farklı püskürtme mesafelerinde, püskürtme metoduyla elde edilen SnO₂ ince filmlerin fiziksel, elektrik ve optik özellikleri incelenmiştir. Hazırlanan çözelti, 400 °C sıcaklığa sahip altlıklara, farklı püskürtme mesafelerinde püskürtülmüştür. XRD ölçümlerinden filmlerin (301) tercihli yönelime ve tetragonal yapıya sahip oldukları tespit edilmiştir. Tanecik boyutunun püskürtme mesafesine bağlı olarak 23.78 nm ile 29.74 nm arasında değiştiği görülmüştür. Elektrik ölçümlerinden, 40 cm püskürtme mesafesinde elde edilen filmlerin tabaka direncinin minimum ve değerinin 3.23 Ω olduğu saptanmıştır. Optik ölçümlerine göre, elde edilen filmler arasında en iyi optik geçirgenliğin 40 cm püskürtme mesafesinde elde edildiği ve değerinin % 59.55 olduğu bulunmuştur (Turgut ve ark., 2012).

Jeng'in yayımlanan bir makalesinde SnO₂ filmler, hem Sb katkılı, hem katkısız olarak dönel kaplama metoduyla elde edilmiştir. Farklı Sb katkılı SnO₂ filmlerin, O₂ ve N₂ gaz atmosferinde tavlandıktan önce ve sonra malzeme özellikleri incelenmiştir. SnO₂ filmlerin O₂ veya N₂ gazları altında tavllanmasıyla, özdirencin artan tavlama sıcaklığına bağlı olarak azaldığı görülmüş, bu durum artan sıcaklıkla kristallığın artması ve kusur sayılarının azalmasına bağlanmıştır. SnO₂ filmlerin XRD piklerinin şiddetleri, artan tavlama sıcaklığıyla hem O₂ hem de N₂ ortamında arttığı saptanmış ve SEM fotoğraflarından yüzeyde, filmler tavlandıktan sonra küçük tomurcuklar ve bazı boşluklar olduğu görülmüştür. SnO₂:Sb filmlerinde ise, O₂ ortamında tavlanan filmlerin N₂ ortamında tavlananlara göre daha büyük özdirence sahip olduğu, filmlerin yüzey

yapılarının tavlandıktan sonra pek değişmediği tespit edilmiştir. N₂ atmosferinde tavlanan SnO₂:Sb filmlerin yüzeylerinde kusurlar gözlenmemiştir. SnO₂:Sb filmlerinin XRD ölçümlerindeki pik şiddetlerinin, O₂ ile tavlanan filmlerin N₂ ile tavlanan filmlere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklıkta tavlanan katkılı ve katkısız filmlerin kimyasal bağ durumları ve Hall mobilitelerinin tavlama atmosferine bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir (Jeng, 2012).

Tatar ve arkadaşlarının yayınlanan bir çalışmada; SnO₂:F filmleri 360–520 °C aralığında 40 °C'lik artışlarla sıcaklığı değişen cam altlıklara SnCl₂·2H₂O ve NH₄F'den oluşan sulu metanol çözeltisinden faydalanılarak püskürtme piroliz yöntemiyle büyütülmüştür. XRD çalışmaları, filmlerin doğada nanokristal yapılardan oluştuğunu ve yapıların tercihli yönelimlerinin artan sıcaklıkla (110), (200) ve (211) düzlemlerine değiştiklerini göstermiştir. Film kalınlığı, artan sıcaklıkla 305 nm'den 204 nm'ye, tanecik boyutu da 20.94 nm'den 33.09 nm'ye değişmiştir. AFM çalışmaları, FTO filmlerin yüzeylerinde nanokristallerin var olduğunu ortaya koymuştur. Elektrik ölçümleri, filmlerin dejenere ve n-tipi iletkenlik sergilediklerini ortaya çıkarmış ve minimum tabaka direncinin 9.03 Ω olduğunu ve 800 nm'de maksimum 558.1 x 10⁻³ Ω⁻¹ kalite faktörüne sahip oldukları görülmüştür. Filmlerin görünür bölgedeki ortalama optik geçirgenliklerinin (800 nm'de) oldukça yüksek ve % 80.664 olduğu, ancak 520 °C sıcaklıkta hazırlanan filmlerin optik geçirgenliğinin % 92.78 olduğu gözlemlenmiştir. Bu değer daha önce literatürde 520 °C sıcaklık için verilenler arasındaki en yüksek değer olduğu ve öz direncin de rapor edilenlerden daha düşük olduğu vurgulanmıştır. Alınan sonuçlar, filmlerin yapı ve özelliklerinin altlık sıcaklığından etkilendiğini göstermiştir (Tatar ve ark., 2013a).

Tatar ve arkadaşlarının diğer bir yayınında, katkısız, ağırlıkça % 20 F katkılı ve % 2 Sb katkılı kalay oksit filmleri 410 °C altlık sıcaklığındaki cam altlıklara spray pyrolysis metoduyla büyütülmüş ve bu filmlerin yapısal, elektrik ve optik özellikleri araştırılmıştır. XRD ölçümlerinden katkısız ve Sb katkılı kalay oksit filmlerin tercihli yönelimlerinin (110) yönünde olduğu, F katkılı filmin tercihli yöneliminin (200) düzlemi boyunca olduğu görülmüştür. Filmlerin, kalay oksidin kasiterit tetragonal rutil yapısında olduğu, Sb ve F katkılarla kristalliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. AFM analizlerinden elde edilen RMS değerlerinin katkısız kalay oksit filmde 22.52 nm iken, F ve Sb katkılı katkılı filmler için sırasıyla 15.52 nm ve 15.56 nm'ye düştüğü ve tüm

filmlerin yüzeylerinde nanokristal parçacıkların oluştuğu tespit edilmiştir. Filmlerin elektrik özellikleri van der Pauw tekniğiyle ölçülmüş olup n-tipi elektrik iletkenliğine sahip oldukları görülmüş, Sb ve F katkılamasının elektrik iletkenliği arttırdığı saptanmıştır. Optik ölçümlerinden katkısız kalay oksit filmin % 52.46 olan optik geçirgenliği F katkılı film için % 77.39'a Sb katkılı film için ise % 69.56'ya yükselmiştir.

Turgut ve arkadaşlarının yayınlanan bir çalışmalarında; SnO₂:Sb ince filmler 520 °C sıcaklığa sahip cam altlıklara püskürtme piroliz yöntemiyle büyütülmüştür. Antimon katkılamasının (% 1-4) filmlerin elektrik, yapısal ve optik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. XRD çalışmaları, filmlerin doğada polikristal olduklarını ve tanecik boyutunun değişen katkı oranıyla 28.19 nm'den 33.59 nm'ye değiştiğini ortaya çıkarmıştır. AFM çalışmaları filmlerin yüzeylerinde nanokristal yapıların olduğunu göstermiş ve elektrik ölçümlerinden filmlerin dejeneratör olup n-tipi bir iletkenlik sergilediği bulunmuştur. SnO₂:Sb filmlerinin değişen katkı oranıyla 0.17 Ω minimum tabaka direncine ve $135 \times 10^{-4} \Omega^{-1}$ maksimum kalite faktörüne (550 nm dalga boyunda) sahip oldukları gözlemlenmiştir. Bu tabaka direnci % 2 antimon katkılı kalay oksit filmleri için SnCl₂·2H₂O ön maddesinden elde edilenler içinde en düşük değer olduğu vurgulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, filmlerin yapısı ve özelliklerinin antimon katkı oranından etkilendiğini ortaya çıkarmıştır (Tatar ve ark., 2013b).

Kocyigit ve arkadaşları tarafından yayınlanan bir çalışmada; SnO₂:Sb:F ince filmleri SnCl₂·2H₂O ön maddesinin propanollü çözeltisinden yararlanılarak cam altlıklar üzerine ev yapımı püskürtme piroliz yöntemiyle büyütülmüştür. Cam altlıkların sıcaklığı deney boyunca 350 °C sıcaklıkta sabit tutulup değişen püskürtme mesafesinin (25, 30, 35, 40 ve 45 cm) filmlerin yapısal, elektrik ve optik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. XRD analizlerinden filmlerin doğada kristal yapıda oldukları ve tetragonal (200) tercihli yöneliminde büyüdükleri görülmüş ve filmlerde ortorombik yapılara da rastlanmıştır. SEM fotoğraflarından filmlerin homojen ve düzgün dağılımlı olduğu görülmüştür. Optik ölçümlerinden filmlerin, oldukça yüksek ve % 85 civarında optik geçirgenlik değerlerine ulaştığı ve yaklaşık 4.3 eV civarında bant aralığı enerjilerine sahip oldukları gözlemlenmiştir. Filmlerin elektrik ölçümlerinden dejeneratör ve n-tipi iletkenlik sergiledikleri vurgulanmıştır (Kocyigit ve ark., 2013).

Battal ve arkadaşları tarafından yayınlanan bir çalışmalarında; $\text{SnO}_2:\text{Sb}:\text{F}$ ince filmler farklı döndürme hızları ve tabaka sayılarında cam altlıklar üzerine dönele kaplama yöntemiyle büyütülmüştür. XRD çalışmaları, filmlerin ortorombik örgülü tek kristal yapı sergilediklerini ve sadece (021) düzleminde büyüdüklerini göstermiştir. Bu filmlerin ortorombik yapılu tek kristallerine literatürde nadiren rastlandığına değinilmiştir. Tercihli yönelimin şiddeti, değışen kaplama sayısı ve kaplama hızıyla değışmiş, ancak yönelimi değışmemiştir. Dahası 6 kat tabakalı filmlerin pik şiddetleri 5 katlı filmlerden daha fazla olduğu görülmüştür. Optik geçirgenlik değeri, daha önce rapor edilen değere oranla daha yüksek olup % 90-95 civarında olduğu vurgulanmıştır. Bu çalışmalarla birlikte kalay oksit gibi zayıf yayımını olan bir inorganik materyalin fotoluminesans kuantum verimi de alınmış ama çok küçük bir değere sahip olduğu bulunmuştur. Alınan sonuçlar, filmlerin yapı ve özelliklerinin farklı dönme hızı ve tabaka sayısından oldukça etkilendiğini ortaya çıkarmıştır (Battal ve ark., 2014).

Literatür tarama sonuçlarından anlaşılacağı üzere kalay oksit ince filmlerin fiziksel özellikleri birçok kişi tarafından incelenmesine rağmen Y katkılu kalay oksit ince film üretimi üzerine bir araştırma bulunamamıştır. Bu sebeple, bu çalışmada farklı oranlarda katkılu Y- SnO_2 ince filmler püskürterek kaplama yöntemiyle p tipi silikon ve amorf cam üzerine büyütülecektir. Elde edilen ince filmlerin optik, yapısal ve elektriksel karakterizasyonları XRD, SEM, UV-Vis kullanılarak analiz edilecektir.

3. TEORİK BİLGİ

3.1. Yarıiletkenler

Katıhal fiziği, katı maddelerin yapısını teknolojiye katkı sağlamak ve geliştirmek adına inceleyen bir bilim dalıdır. Bu bilim dalı özellikle yarıiletkenler olmak üzere süperiletkenler ve polimer yapılarda çarpıcı sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamıştır. Bu başlık altında; katılar, iletkenlik, yalıtkanlık, yarıiletkenlik, ince filmler ve ince film elde etme yöntemleri ile ince film analiz cihazları hakkında bilgilere yer verilmiştir.

Yarıiletkenlerin tarihi Edmond Becquerel ve Faraday'a kadar uzanır. 1839'da Edmond Becquerel, aynı elektrolit içine batırılmış iki elektrottan biri üzerine ışık düşürüldüğü zaman elektrotlar arasında bir potansiyel farkın meydana geldiğini gözlemiştir. 1883 yılında, Faraday gümüş sülfatın direncinin sıcaklık ile değişim katsayısının negatif olduğunu keşfetmiştir. 1923'de Schottky, kuru redresörlerin teorisini yayınlamış ve bu teori yarıiletkenlerin teorik incelenmesinde ilk adım olmuştur (Oral, 1979).

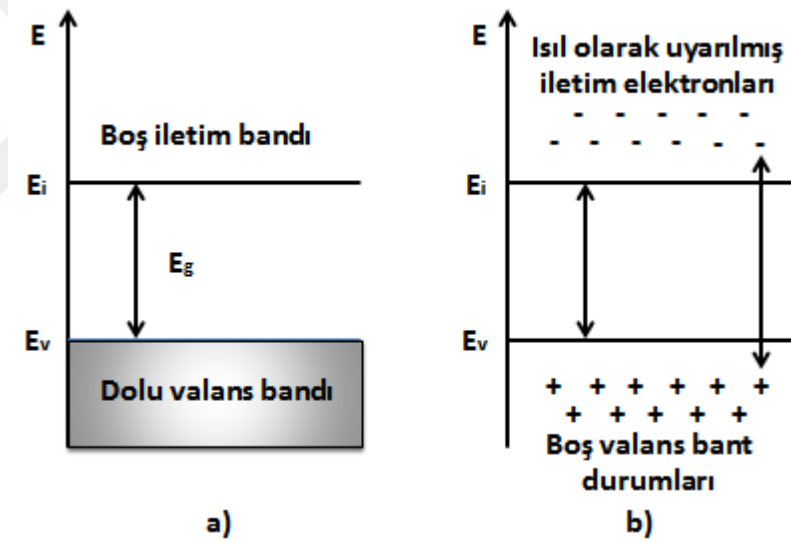
1920'li yıllardan beri yarıiletkenler incelenmesine rağmen ancak 1940'lı yıllarda transistörün icat edilmesi ile popülerlik kazanabilmiştir. Fiziksel özellikleri bakımından yalıtkanlardan iletkenlere kadar uzanan geniş bir bölgeyi kapsayan ve uygulama alanı çok çeşitli olan yarıiletkenler katıhal fiziğinin en popüler uygulama konusu olmuştur.

Yarıiletkenler $T=0$ K'de yalıtkanlıdır. Fakat yasak enerji aralıkları öyle bir değere sahiptir ki, ısı uyarılmayla erime noktalarının altındaki sıcaklıklarda elektriksel iletkenlik gösterirler. Bu tür materyaller yarıiletkenler olarak bilinir. Yarıiletken ve yalıtkan arasında kesin bir ayrım yoktur. Ancak yarıiletkenlerin en önemli özelliği yasak enerji aralıklarının 4 eV'tan daha az olmasıdır (Ashcroft ve Mermin, 1976).

Katı cisimler elektriksel özelliklerine (özdirencine) göre üç gruba ayrılırlar: İletkenler (en iyi iletkenlerden gümüşün özdirenci $\rho=1,6 \times 10^{-6}$ ohm.cm), yarıiletkenler (özdirenci $\rho=10^{-2}-10^9$ ohm.cm) ve yalıtkanlar (en iyi yalıtkanlardan kehribarın özdirenci $\rho=10^{19}-10^{22}$ ohm.cm) şeklindedir (Caferov, 1998; Kittel, 1996).

Ancak yalnızca öz direncin değeri yarıiletkenleri tanımlamak için yeterli değildir. Saf halde yarıiletkenler mutlak sıcaklıkta ($T=0$ K) yalıtkan gibi davranır. Aksine saf olmayan birçok yarıiletken, bazı metalik iletkenler kadar iletkenlik özelliğine sahip olabilir. Sıcaklık yükseldiği zaman öz direncin küçülmesi yarıiletkenleri metallere ayıran önemli özelliktir (Oral, 1979).

0 K'deki bir yarıiletkende iletim bandı boştur, ancak yüksek sıcaklıklarda bir kısım elektronlar yeterince ısısal enerjiyle atomlar arası bağı kopartıp iletim bandına geçiş yaparlar ve iletim bandında serbest bir şekilde hareket ederler (Colinge ve Colinge, 2002). Anlaşılacağı üzere, sıcaklık arttıkça değerlik bandındaki elektronların, iletim bandına ısısal olarak uyarılmaları sonucunda, iletim bandındaki elektronlar ile valans bandındaki elektronlar tarafından geride bırakılan yüklü boşluklar iletkenliğe katkıda bulunurlar (Şekil 3.1) (Van Zeghbroeck, 2004).



Şekil 3.1. Bir yarıiletkenin a) $T = 0$ K'de b) $T > 0$ K'de şematik enerji-bant diyagramı.

Bu durumu açıklamak gerekirse: Valans bandından ısısal olarak uyarılmış olarak iletim bandına geçen elektronlar, geriye valans bandında hol adı verilen boşluklar bırakırlar. Bu holler valans bandında boş kuantum durumları meydana getirirler. Bu boş kuantum durumları valans bandındaki ilk elektronun ardındaki başka elektronlar tarafından doldurulurlar ve bu elektronlar bıraktıkları yerde yeni holler oluştururlar. Holler ile elektronlar ardı ardına yer değiştirmiş olurlar. Böylece valans bandında holler (aslında hareket eden yalnızca elektronlar iken) hareket etmiş gibi düşünülebilirler.

Bunun sonucunda valans bandındaki holler ile iletim bandındaki elektronlar serbest taşıyıcı gibi hareket ederek ilettime katkı sağlarlar.

3.1.1. Yarıiletken türleri

Yarıiletkenlerde elektriksel iletim, iletim bandındaki elektronlar ve valans bandında elektronların bıraktığı holler ile sağlanır. İletim bandındaki elektron yoğunluğu (n_0 konsantrasyonlu), valans bandındaki boşluk yoğunluğuna (p_0 konsantrasyonlu) eşit ise; böyle yarıiletkenlere öz (asal, intrinsic) yarıiletkenler denir (Yacobi 2002). Bu durum, asal iletkenlik sıcaklık bölgesi (T_c) üzerinde meydana gelir. Esasen periyodik cetvelde verilen elementlerin bazı özellikleri itibariyle asal olduğu kabul edilir. Ancak bu elementler, asal iletkenlik sıcaklık bölgesi altında katkılı davranış gösterirler. Bir de katkılı yarıiletkenler vardır ki, dışarıdan katkı söz konusudur. Bunlar; n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerdir (Düzgün, 2008).

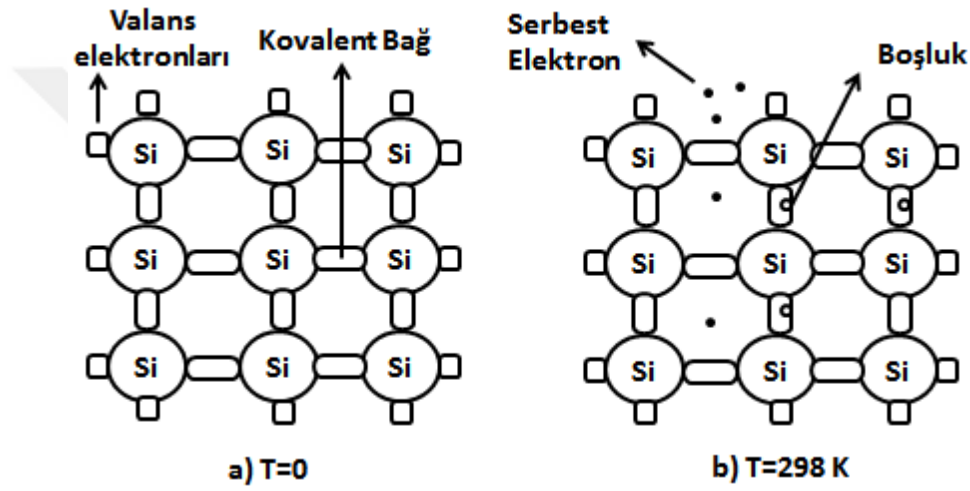
Genel bir tanımla; iletim bandındaki elektron yoğunluğu, valans bandındaki hol yoğunluğuna eşit ise; böyle yarıiletkenlere “has (intrinsic) yarıiletkenler” denir. İletim bandındaki elektron yoğunluğu, valans bandındaki hol yoğunluğuna eşit değil ise; böyle yarıiletkenlere de “has olmayan (extrinsic) yarıiletkenler” adı verilir (Yacobi, 2002).

3.1.1.1. Öz (has, asal, intrinsic) yarıiletkenler

Bir saf yarıiletkende valans elektronları, bir metalin valans elektronları gibi rastgele hareket edemezler. Yarıiletkenin valans elektronları, komşu iyonlarla sıkı bir şekilde bağlıdır. Örnek olarak, silisyumun 14 elektronu çekirdek etrafına dağılmış vaziyettedir. Ancak en dış kabuktaki durum düşünüldüğünde, her atomun 4 valans elektronu vardır, yani her atom 4 değerlidir. Her valans elektronu en yakın dört komşu silisyum atomu ile ortaklaşa kullanılması sonucu, komşu atomlar arasında bağlayıcı bir kuvvet oluşur. Her atomu komşusuna bağlayan bu elektron çifti kovalent bağdır. Valans elektronları, bir atomu yanındaki bir başka atoma bağladıklarından çekirdeklerine oldukça sıkı bir şekilde bağlıdır (Yacobi, 2002).

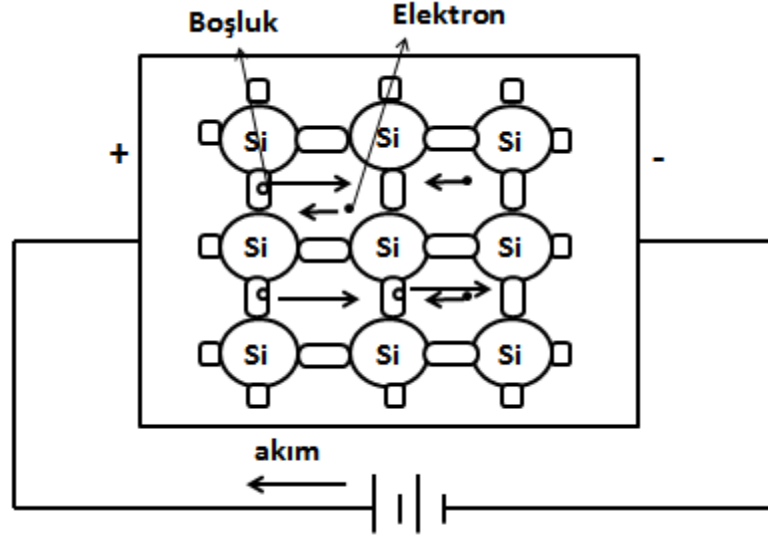
Safsızlık veya kusur içermeyen bir saf yarıiletkende (örneğin Si) 0 K'in üzerindeki sıcaklıklarda ısısal olarak uyarılmış elektronlar, valans bandından iletim bandına geçerler. Geride valans bandında elektronların bıraktığı elektriksel olarak

pozitif yüklü boşluklar (hol) kalır. İletimi, iletim bandındaki elektronlar ve değerlik bandındaki boşluklar birlikte gerçekleştirirler. Oda sıcaklığında kovalent bağı koparmak için gerekli enerji yasak bant aralığı enerjisi kadardır. Aşağıda bu durum silisyum için çizilmiştir. 0 K'de Si yarıiletkeninin kristal yapısı içinde, serbest taşıyıcı bulunmadığından bir yalıtkan özelliği mevcuttur (Şekil 3.2a), ancak oda sıcaklığında kristalin kazandığı ısı enerjisi sebebi ile bazı kovalent bağlar kopar ve iletim mümkün olur. Elektron, yerinden ayrılarak kristal içinde rastgele dolaşan bir serbest elektron haline gelir (Şekil 3.2) (Çolak, 2010).



Şekil 3.2. Si saf yarıiletkeninin a) T=0 K b) T=298 K'de iki boyutlu kristal yapısı.

Ayrıca boşluklar (hol), elektrik akımının taşınması bakımından serbest elektronlarınkine yakın bir etkinliğe sahip olduklarından önemlidir. Komşu atomdaki bir valans elektronu kolaylıkla kovalent bağdan ayrılarak bir boşluğu doldurabilir. Bir kovalent bağdan ayrılarak bir boşluğu dolduran elektron kendi yerinde bir boşluk bırakır. Böylece boşluk, elektrona ters yönde hareket eder. Herhangi bir yönde bir boşluğun ilerlemesi ters yönde negatif bir yükün ilerlemesine eşdeğerdedir. Böylece boşluk bir elektron yüküne eşit bir pozitif yük olarak düşünülebilir (Yacobi, 2002). Şekil 3.3'de bir yarıiletkende iletimin nasıl gerçekleştiği gösterilmiştir. Burada kovalent bağlar kırıldıktan sonra elektron ve boşluk çiftinin hareketi tasvir edilmiştir.



Şekil 3.3. Si saf yarıiletkeninde dış potansiyelle boşluk-elektron çifti oluşumu.

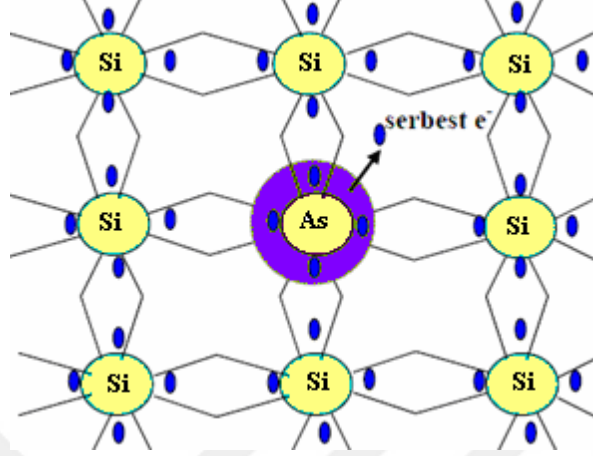
Sonuç olarak, saf yarıiletkende hem elektronlar hem de boşluklar akıma katkıda bulunurlar. Kristal örgüsünden ayrıлып iletkenlik bandına çıkan elektronlar malzeme içinde hareket ederler. Ayrıca, diğer elektronlar da örgü pozisyonları arasında hopping (sıçrama) şeklinde elektronlar tarafından boşalan yerleri doldurarak hareket ederler. Elektronlara ters yönde gerçekleşen bu harekete “boşluk iletimi” denir (Karabay, 2006).

3.1.1.2. Katkılı (asal olmayan, extrinsic) yarıiletkenler

Yarıiletkenlerin en önemli özelliklerinden biri içerisine katılan uygun katkı atomlarına bağlı olarak elektriksel özelliklerinin büyük ölçüde değişim göstermesidir. Bir yarıiletkene uygun katkı atomları katıldığında, çoğunluk taşıyıcıları ya elektronlar, ya da boşluklar olur. Burada yarıiletkene katılan atomlara “safsızlık (impurity) atomları” denir. Katılama oranı, arzu edilen özelliğe ve kullanım alanına bağlı olarak değişir. Yarıiletken kristale katılan safsızlık atomları ya elektron verici (donör) ya da elektron alıcı (akseptör) olarak görev yaparlar. Yarıiletkenler, katılama işlemi sonucunda ya ‘n-tipi’ ya da ‘p-tipi’ özellik gösterirler (Sze, 1981).

Bir yarıiletken kristal, donör (verici) atomlarıyla katılınırsa, çoğunluk taşıyıcıları elektronlar olur. Böyle yarıiletkenlere ‘n-tipi yarıiletkenler’ denir. Örneğin, periyodik tablonun IV. Grup elementlerinden olan Si veya Ge kristaline belirli yöntemlerle V. Grup elementlerinden (As, P, Sb, N) herhangi birisinin 10^{-6}

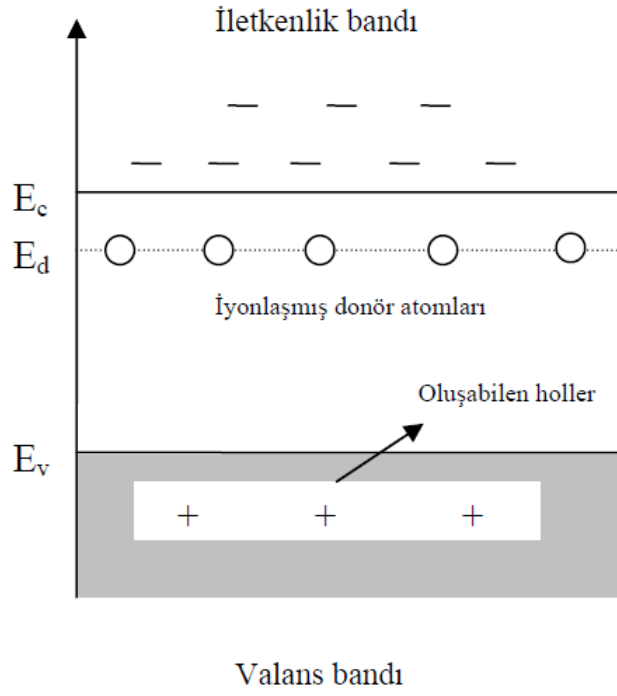
konsantrasyonda katkılanması ile n-tipi yarıiletkenler elde edilir (Van Zeghbroeck, 2004).



Şekil 3.4. n-tipi yarıiletken, As katkılanmış Si kristali (Çolak, 2010).

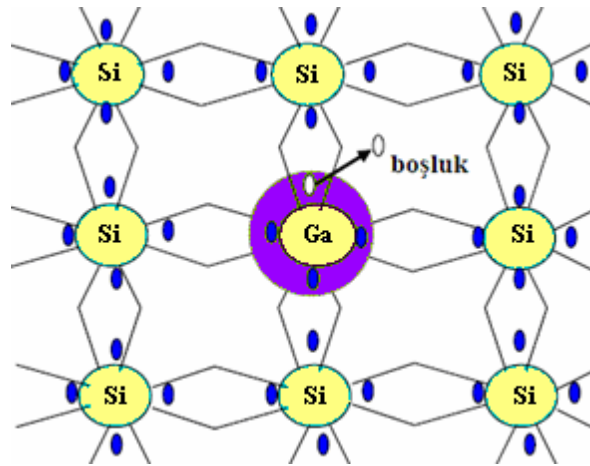
Katkılama işlemi şöyledir; yarıiletken endüstrisinde kullanılan % 99,999999 safliktaki Si kristaline bir As atomu ilave edilirse, bu As atomu ile bir Si atomu yer değiştirir ve kristaldeki komşu Si atomlarıyla dört elektron paylaşarak dört bağ oluşturur (Şekil 3.4). As atomunun beşinci elektronu bağ yapmaz, ancak As atomuna çok zayıf bir elektriksel kuvvetle bağlıdır. Bu beşinci elektronu, bağlı olduğu atomundan koparmak için gerekli olan enerji Ge için 0.01 eV, Si için 0.05 eV mertebesindedir. As atomunun yapıya girmesiyle Si kristali fazla bir elektron kazanmıştır. Bu nedenle As atomu, elektron verici (donör) atomdur. Bu beşinci elektron iletkenlik bandındadır ve kristal içinde serbest halde hareket ederek elektriksel iletkenliğe katkıda bulunur (Pierret, 1988).

Bununla birlikte, n-tipi yarıiletkenlerde donör atomlarının iyonlaşma enerjileri, Şekil 3.5.'de gösterildiği gibi, iletim bandına yakın olduğu için oda sıcaklığında donör atomlarının hemen hemen tamamı iyonlaşır. İletkenlik bandına çıkan elektronlara karşılık valans bandında holler oluşmaz. Dolayısıyla iletim bandındaki elektronların yoğunluğu, valans bandındaki hollerin yoğunluğundan daha fazladır. Ayrıca yeterli ısı enerjisi temin eden valans bandındaki elektronlar da iletim bandına geçebilirler. Bu nedenle iletkenliğin büyük bir kısmı elektronlarla sağlanmış olacaktır (Pierret, 1988).



Şekil 3.5. Oda sıcaklığında n – tipi yarıiletkenin bant yapısı.

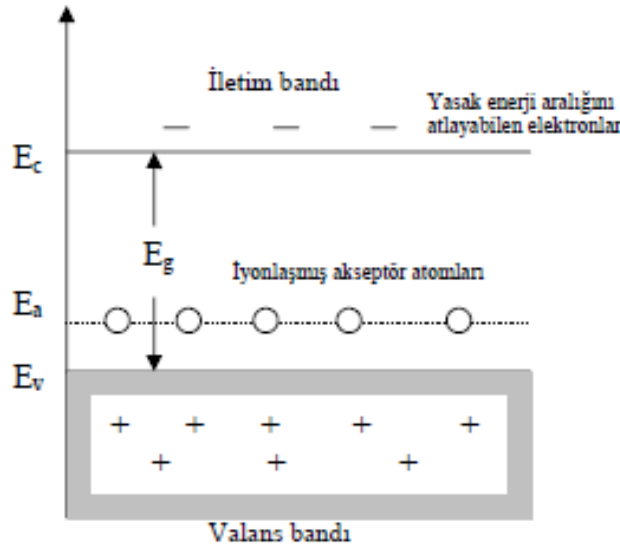
Bir yarıiletken kristal, akseptör (alıcı) atomlarıyla katkılanırsa, çoğunluk taşıyıcıları boşluklar olur. Böyle yarıiletkenlere '*p-tipi yarıiletkenler*' denir. Periyodik tablonun IV. Grup elementlerinden olan Si veya Ge kristaline, belirli yöntemlerle III. grup elementlerinden (In, Ga, Al, B) herhangi birisinin 10^{-6} konsantrasyonunda katkılanması ile p-tipi yarıiletkenler elde edilir (Şekil 3.6) (Van Zeghbroeck, 2004).



Şekil 3.6. p-tipi yarıiletken, Ga katkılanmış Si kristali (Çolak, 2010).

Katkılama işlemi şöyle gerçekleşir; Si kristaline bir Ga atomu ilave edildiğinde bir Si atomu ile yer değiştirir ve sonuçta bir elektron eksikliği meydana gelir. Ga atomu, Si atomlarıyla dördüncü bağı oluşturmak için kolaylıkla bir elektron yakalayabilir ve bu sayede negatif yüklü Ga atomu oluşur. Bu durum kristalde değerlik bandına yakın bir hol oluşmasına sebep olur. Bu boşluk bir başka bağdan kapılan bir elektron tarafından doldurulur ve boşluk bu elektronun yerine geçer. Böylece boşluk kristal içerisinde hareket eder, ancak buna karşılık iletim bandına bir elektron çıkmaz. Boşluğun hareketi sayesinde iletkenlik sağlanmış olur. Burada Ga atomu akseptör görevi yapmaktadır (Pierret, 1988).

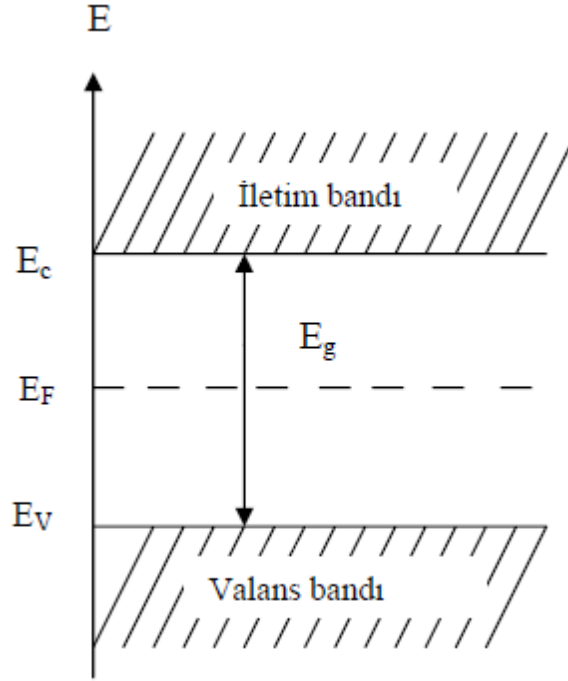
Genel olarak; p – tipi yarıiletkenlerde ilettime çoğunluk taşıyıcılar olarak holler, azımlık taşıyıcılar olarak elektronlar katkıda bulunurlar. Bu durum Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



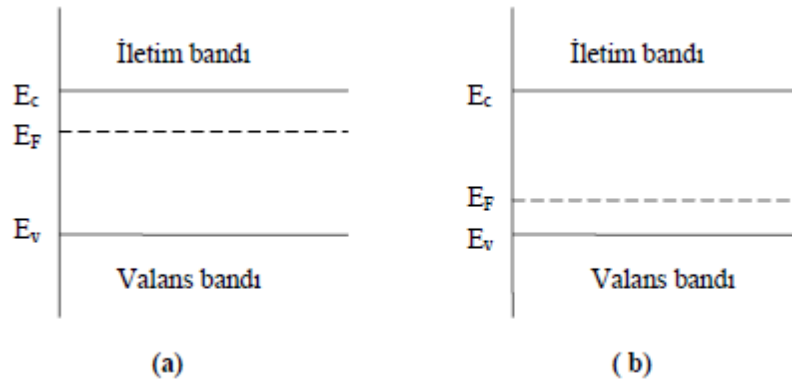
Şekil 3.7. Oda sıcaklığında p - tipi yarıiletkenin bant yapısı.

Sonuç olarak, has ve katılı yarıiletkenlere bakıldığında elektronlar ve holler arasında bir dağılımın olduğu söylenebilir. Fermi-Dirac istatistiği ile belirlenen bu dağılımda elektronların enerji dağılımı hangi enerji durumlarının dolu hangilerinin boş olduğunu tanımlar. Bu dağılım, elektronların sıcaklık ve Fermi Enerjisi (veya Fermi Seviyesi) ile karakterize edilir. Muklak sıfırın altındaki durumlarda Fermi Seviyesi elektronların işgal ettiği en üst enerji düzeyi olarak tanımlanabilir. Şekil 3.8’den has

yariletken Fermi enerji seviyesinin pozisyonu gösterilirken, Şekil 3.9’da n-tipi ve p-tipi yariletkenlerin Fermi enerji seviyeleri gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Has bir yariletken için enerji bant diyagramı ve Fermi enerji seviyesinin pozisyonu.



Şekil 3.9. a) n-tipi yariletkenlerde b) p-tipi yariletkenlerde Fermi enerji seviyeleri.

3.2. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Yarıiletkenler ile oluşturulan homojunction, heterojunction (p-n) eklemlerin bir çok yararlı ve kullanılabilir özelliği metal-yarıiletken eklem oluşturularak da yapılabilir. Burada metal, aşırı katkılanmış n-tipi malzeme olarak düşünülebilir.

Kontak (eklem); ideal şartlarda maddelerin sıfır dirençle birbirine temas ettirilmesidir. Metal, yarıiletken ile kontak edildiğinde termal denge kuruluncaya kadar metal ile yarı iletken arasında yük geçişleri olur. Metalden yarıiletkene, yarı iletken den metale elektron geçişi, metal ile yarıiletkenin Fermi enerji düzeylerinin eşit olduğu termal denge durumuna kadar devam eder. Böylece metal yarıiletken ara yüzeyinde yüklerin ayrılması ve yeniden dağılmasıyla yeni bir potansiyel engeli oluşur. Ara yüzey bölgesi, yarıiletken tarafında oluşan ve hareketli yüklerin olmadığı yüksek dirençli bir bölgedir. Metal-yarıiletken ara yüzeyinde bir potansiyel engel oluştuğunu ilk olarak Schottky açıklamıştır. Bunun ardından ekleme oluşun bu potansiyelin metal ile yarıiletken iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklandığını Mott yayınlamıştır. Böylece bu teoriler birleştirilerek Schottky-Mott adını almıştır. Schottky-Mott teorisine göre potansiyel engeli, metal ile yarı iletkenin iş fonksiyonları arasındaki fark sebebiyle oluşur (Sharma, 1984).

Metal-yarıiletken kontaklar, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına (Φ_m ; metalin iş fonksiyonu, Φ_s ; yarıiletkenin iş fonksiyonu) bağlı olarak, *omik* ve *doğrultucu kontak* (*Schottky kontak*) olmak üzere iki grupta incelenebilir (Uğur, 2015).

Metal-yarıiletken kontakta iletkenliği sağlayan yük taşıyıcıları (holler ve elektronlar) bir yönden diğer yöne daha kolay iletiliyorsa, kontakta *doğrultucu kontak* denir. Doğrultucu kontakta, doğru beslem altında akım çok iyi iletilirken, ters beslem altında hemen hemen hiç iletilmemektedir. Omik kontakta ise taşıyıcılar her yönde kolay iletilir. Kontakın omik veya doğrultucu olmasını, metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları belirler. Φ_m metalin, Φ_s yarıiletkenin iş fonksiyonları olmak üzere, metal-n tipi yarıiletken kontaklarda $\Phi_m > \Phi_s$ ise "*doğrultucu kontak*" ve $\Phi_m < \Phi_s$ olması durumunda ise "*omik kontak*" oluşur. Metal-p tipi yarıiletkenlerde ise durum bunun tersidir (Kaya, 2010).

Çizelge 3.1. İş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve omik kontaklar

İş fonksiyonları ilişkisi	Yarıiletken türü	Kontak türü
$\Phi_m > \Phi_s$	n-tipi	Doğrultucu
$\Phi_m < \Phi_s$	n-tipi	Omik
$\Phi_m > \Phi_s$	p-tipi	Omik
$\Phi_m < \Phi_s$	p-tipi	Doğrultucu

İş fonksiyonlarına bağlı olarak değişen metal yarıiletken kontak oluşumunu açıklamadan önce bu konuda sıkça kullanılan bazı kavramların bilinmesi faydalı olacaktır.

Metalin iş fonksiyonu (Φ_m): Bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için veya serbest hale getirmek için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarına denir.

Yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s): Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Fermi enerjisi, katılan atomların yoğunluğu ile değiştiği için Φ_s de değişen bir özelliktir.

Fermi enerjisi (E_f): Fermi enerjisi mutlak sıfır sıcaklığında (T=0 K) en son dolu enerji seviyesindeki elektronun enerjisine denir. Fermi enerjisinin üstündeki bütün seviyeler boştur.

Yarıiletkenin elektron yatkınlığı (χ): Yarıiletkenin vakum seviyesi ile iletkenlik bandı arasındaki enerji seviyeleri farkıdır ve χ ile gösterilir.

Vakum seviyesi: Bir metalin en dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi veya bir elektronu yüzeyden koparıp serbest hale gelmesi için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır.

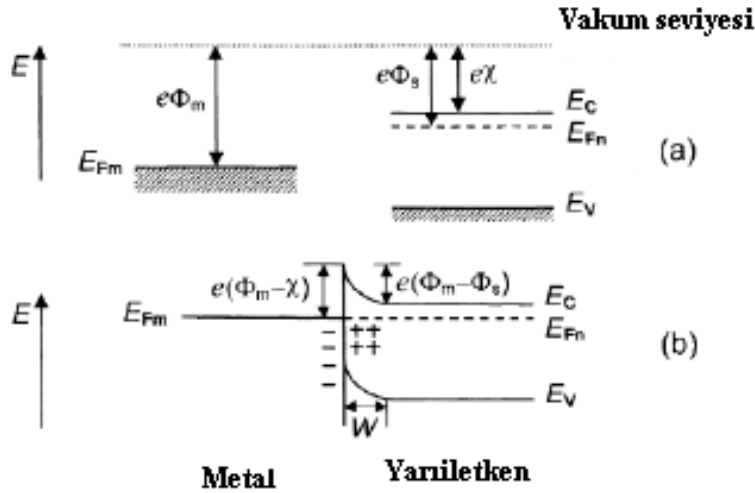
3.2.1. Metal -yarıiletken kontaklarda engel oluşumu

Metal ile bir yarıiletken arasında kontak yapılması istendiği zaman metal-yarıiletken arayüzeyinde bir potansiyel engeli oluşur. Metal-yarıiletken kontakların özelliklerini belirleyen birçok faktör olmasına rağmen, bunlardan en önemlisi metal-yarıiletken arayüzeyinde oluşan potansiyel engelinin yapısıdır. Oluşan bu engel hem akım iletim kontrolünden hem de kapasitans davranışından sorumludur (Rhoderick, 1988; Sze, 2007).

3.2.1.1. İdeal metal-yarıiletken kontaklarda engel oluşumu

Şekil 3.10'da metal/n-tipi yarıiletken kontak $\Phi_m > \Phi_s$ (doğrultucu kontak) için elektron enerji-band diyagramını gösterilmektedir (Yakobi, 2003). Şekilde gösterilen vakum seviyesi, metalin dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi olup Şekil 3.10a'da referans olarak verilmiştir. Şekil 3.10a'da gösterilen yarıiletken yüzey durumları içermediğinden yüzeyin band yapısı, yarıiletken gövde (bulk) band yapısına uygun olarak herhangi bir bükülmeye uğramamıştır. Şekil 3.10b'de kontaktan sonra dengeye ulaşmış durumun enerji-band diyagramını göstermektedir.

Metal yarıiletkenle kontak oluşturulduğunda, metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahip olan yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar, yarıiletkenin fermi seviyesi ile metalin fermi seviyesi eşit olana kadar yarıiletkenden metale doğru akarlar. Bu durumun sonucunda yarıiletkenin sınıra yakın bölgesinde serbest elektron konsantrasyonu azaldığı için yarıiletkendeki fermi enerji seviyesi yasak enerji aralığının ortasına doğru kaymaya başlar. Böylece iletkenlik band seviyesi E_C ile fermi seviyesi E_F arasındaki fark, azalan elektron konsantrasyonu ile artar ve termal dengede E_F tamamen sabit kaldığı için iletkenlik ve valans band kenarları Şekil 3.10b'deki gibi bükülürler (Sharma, 1984).



Şekil 3.10. Metal/n-tipi yarıiletken kontak için ($\Phi_m > \Phi_s$) enerji bant diyagramı (a) Kontaktan önceki nötral materyaller (b) kontaktan sonra termal denge durumu (E_{Fm} , E_{Fn} sırasıyla metal ve n-tipi yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleridir).

Metale geçen yarıiletkenin iletkenlik bandı elektronları arkalarında pozitif yüklü vericiler (donörler) bırakırlar. Bunun sonucunda yarıiletkenin metale bakan ön yüzeyinde hareketli yükler azalır. Arayüzeyin yarıiletken tarafında pozitif yükler oluşurken aynı zamanda metal tarafında da yarıiletkenden metale geçen elektronlar ince bir negatif yük tabakası oluştururlar. Sonuç olarak, yarıiletkenden metale doğru doğal bir elektrik alan oluşur. Yarıiletkenin vakum seviyesi bantlarla orantılı bir şekilde bükülür. Sonuç olarak, termal dengedeki metal-yarıiletken sistemde, engel yüksekliğini belirlemek için önemli bir nokta olan geçiş bölgesinde vakum seviyesinin sürekli olması sağlanmış olur. Band bükülme miktarı, metal ile yarıiletken materyallerin iş fonksiyonları arasındaki farka eşit olur. Bu fark;

$$eV_i = \Phi_m - \Phi_s \quad (3.1)$$

olarak ifade edilir. Burada V_i , birimi volt olup eklemde kurulan potansiyel ya da kontak potansiyel fark olarak bilinir. eV_i yarıiletkenden metale giden elektronun sahip olması gereken enerji yani engel yüksekliği olarak tanımlanabilir. Bunun yanında metal tarafından gözüken engel yüksekliği, yarıiletken tarafından gözüken engel yüksekliğinden farklıdır ve

$$\Phi_B = (\Phi_m - \chi_s) \quad (3.2)$$

ile verilir (Sharma, 1984; Rhoderick, 1988). Ayrıca $\Phi_s = \chi_s + \Phi_n$ ve $\Phi_m = qV_i + \Phi_s$ olduğundan;

$$\Phi_B = (qV_i + \Phi_n) \quad (3.3)$$

ifadesi elde edilir. Burada $\Phi_n = (E_c - E_F)$ farkı olup, $q = e$ elektronik yük olarak verilir. Eşitlik 3.2, birbirlerinden bağımsız olarak Schottky ve Mott tarafından ifade edilmiştir (Sharma, 1984).

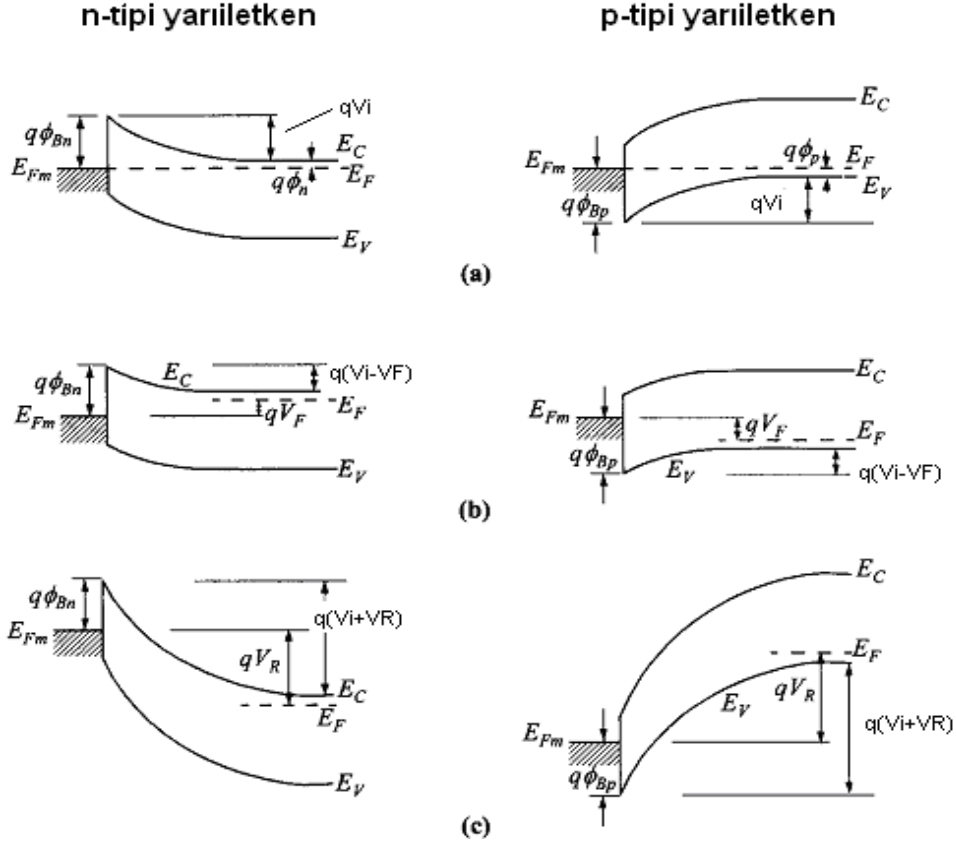
Potansiyel engelinin tam formu, uzay yük bölgesindeki yük dağılımından hesaplanabilir. Genellikle potansiyel engeli kT/q 'dan büyüktür ve çok az sayıdaki elektron bu engeli atlamak için yeterli enerjiye sahiptir. Yarıiletkenin uzay yükü bölgesi

hareketli yüklerden yoksun, yüksek dirençli yalıtkan bir tüketim bölgesine dönüşmeye başlar.

Termal denge durumunda, metalden yarıiletkenine geçen elektronlar ile yarıiletkenden metale geçen elektronlar dengelenir ve net bir akım oluşmaz. Yarıiletkenin tüketim bölgesi çok az sayıda hareketli taşıyıcı içerdiği için, bu tüketim bölgesinin direnci metalin ve yarıiletkenin nötral kısmının direnci ile kıyaslandığında çok yüksektir (yani iletkenlik küçüktür). Bundan dolayı uygulanan dış gerilimin neredeyse tamamı bu bölgeye düşer. Tüketim bölgesine düşen potansiyelin değişmesi ve band bükülmelerindeki değişiklikler sebebiyle uygulanan doğru veya ters ön gerilim voltajı termal denge durumundaki enerji-band diyagramını değiştirir (Kaya, 2010).

Şekil 3.11'de farklı voltajlar altında metal/n ve p-tipi yarıiletken kontakların enerji band diyagramları gösterilmektedir. Metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda, yarıiletken tarafı metale göre negatif olacak şekilde $V = VF$ gerilim uygulandığında, tüketim bölgesinin genişliği azalır ve Şekil 3.11b'de gösterildiği gibi termal dengedeki potansiyel engel yüksekliği, qV_i 'den $q(V_i - VF)$ 'ye iner. Bu durumda yarıiletkenden metale geçen elektronlar, azalmış bir engel ile karşılaşır ve bunun sonucunda yarıiletkenden metale doğru olan elektron akımı termal denge değerine göre artar. Metalde herhangi bir gerilim düşmesi oluşmadığı ve potansiyel engel yüksekliği Φ_B uygulanan gerilimden etkilenmediği için metalden yarıiletkenine doğru olan elektron akımı termal denge değerine göre değişiklik göstermez. Sonuç olarak yarıiletken tarafı negatif, metal tarafı pozitif olacak şekilde kontakta bir potansiyel uygulandığı zaman, yarıiletkenden metale doğru olan net bir akım vardır. Bu durumda eklem (doğru beslem) olduğu söylenebilir. Doğru beslem akımı, uygulanan V_F voltajı ile üstel olarak artmaktadır (Rhoderick, 1988; Sze, 2007; Sze, 1981; Sharma, 1984). Ters beslemde kontakın enerji band diyagramı Şekil 3.11c'de verildiği gibidir. Yarıiletken metale göre pozitif olacak şekilde $V = -V_R$ gerilimi uygulandığında tüketim bölgesindeki potansiyel engel yüksekliği qV_i 'den $q(V_i + V_R)$ 'ye doğru artacaktır. Yarıiletkenden metale doğru elektron akımı termal denge durumuna göre azalmaktadır. Metalden yarıiletkenine elektron akımı ise anlaşılacağı üzere termal dengedeki akımın aynısı olur. Yarıiletkenden metale doğru geçen akım doğru beslem ile kıyaslandığında daha küçük kalmaktadır. Sonuç olarak oluşturulan kontak tek yönde akım ileten doğrultucu kontak olur. Şekil 3.11b ve 3.11c'deki enerji-band diyagramlarının denge

şartlarında olmadığı ve tek bir fermi seviyesinin olmadığı söylenebilir. Elektronların gittiği bölgenin fermi enerji seviyesinin elektronların geldiği bölgenin fermi enerji seviyesinden daha yüksek olduğu görülmektedir (Sharma, 1984).



Şekil 3.11. Farklı voltajlarda n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler üzerine metal doğrultucu kontaktların enerji band diyagramları (a) Termal denge (b) Doğru beslem (c) Ters beslem.

Metal/p-tipi ($\Phi_m < \Phi_s$) doğrultucu MS kontak yapıldığında, termal denge kuruluncaya kadar yani her iki malzemenin fermi seviyeleri eşit oluncaya kadar, daha yüksek enerjiye sahip metal elektronları yarıiletkene doğru akarlar. Şekil 3.11'de gösterildiği gibi p-tipi yarıiletkenler için elektronlar azınlık taşıyıcılarıdır, akım holler tarafından oluşturulmaktadır. Yarıiletkene geçen elektronlar, metal-yarıiletken arayüzünde metal tarafında pozitif yüklü bir tabaka oluştururlar ve yarıiletkenin metale bakan sınırında elektronlar hollerle birleşirler. Elektronların hollerle birleşmesi sonucunda, yarıiletkende iyonize akseptörlerden dolayı bir uzay yük tabakası oluşur. Yarıiletkende bulunan uzay yükü tabakasındaki hol konsantrasyonu, elektron

konsantrasyonuna göre oldukça az olduğundan, uzay yük bölgesi negatif yüklü iyonize akseptör atomlarının konsantrasyonuna bağlı 'W' genişlikli bir tüketim tabakası içerir ve bir potansiyel engeli meydana getirir. Boşluklar için, oluşan bu potansiyel engel yüksekliği,

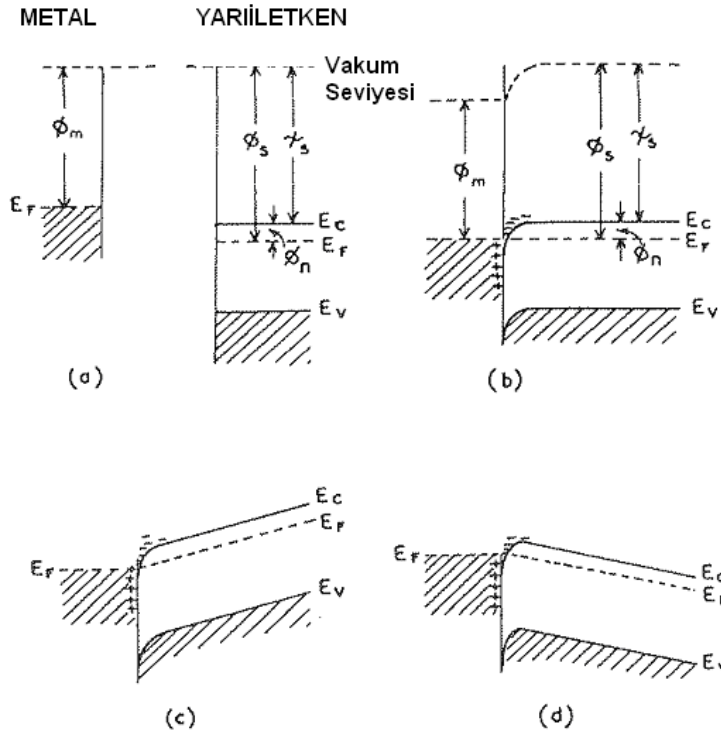
$$\Phi_B' = E_g + \chi_s - \Phi_m \quad (3.4)$$

ile verilir. 3.2, 3.3 ve 3.4 eşitlikleri yeniden düzenlenirse;

$$\Phi_B + \Phi_B' = E_g \quad (3.5)$$

ifadesi elde edilir.

Şekil 3.12'de n-tipi yarıiletken için ($\Phi_m < \Phi_s$) durumunda elektron enerji bant diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 3.12. $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda metal/n-tipi yarıiletken kontak için enerji bant diyagramı (a) ayrı ayrı metaryaller (b) Termal denge (c) Ters beslem (d) Doğru beslem.

Şekil 3.12a'da ayrı ayrı metal ve yarıiletkenin bant diyagramları görülmektedir. Metal ile yarıiletken kontak oluşturulduktan sonra elektronlar metalden yarıiletkenin iletim bandına doğru akarlar. Bu elektronlar metal tarafında arkalarında pozitif yükler bırakırlar ve bu pozitif yükler metal tarafında pozitif bir yük tabakası oluştururlar bunun sonucunda yarıiletken tarafında negatif yükler birikir. Dengeye ulaşıldığında fermi seviyesi Şekil 3.12b'de görüldüğü gibi ($\Phi_s - \Phi_m$) farkı kadar yukarı çıkar.

Yarıiletkende, yükün toplandığı tabaka Debye uzaklığı sınırlarında olan bir kalınlık ile sınırlandırılmıştır. Şekil 3.12c ve Şekil 3.12d'de görüldüğü gibi yarıiletken içinde bir tüketim bölgesi oluşmamaktadır ve dolayısıyla potansiyel engel yoktur. Elektronlar metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metale kolayca geçerler. Arayüze yakın bölgede elektron konsantrasyonu artarken sistemdeki en yüksek dirençli bölgenin (bulk) yarıiletken bölgesi olduğu söylenebilir. Pratik olarak uygulanan tüm dış voltaj değerleri, yüksek dirençli bulk bölgeye düşmektedirler. Böylece akım uygulanan dış voltajın yönünden bağımsızken, bu bulk bölge tarafından kontrol edilir. Bu doğrultma yapmayan kontak '*omik kontak*' olarak adlandırılır. Metal/p-tipi yarıiletken omik kontakların açıklaması da benzer şekilde yapılabilir.

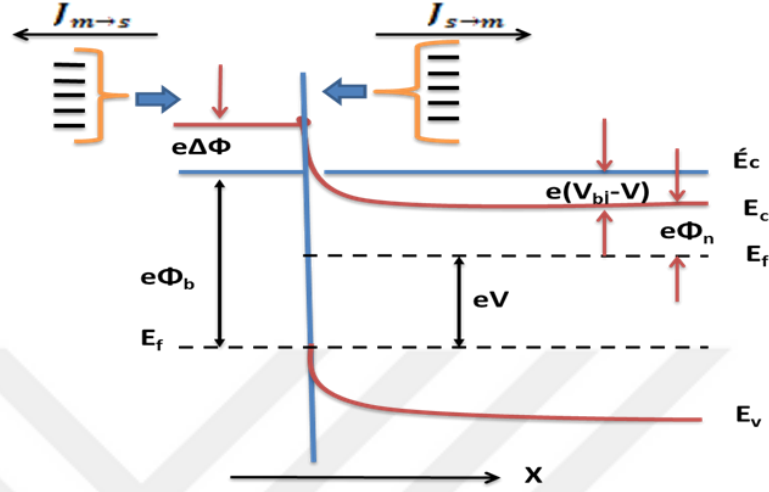
3.2.2. Metal-yarıiletken kontaklarda akım iletim mekanizmaları

Metal- yarıiletken (MS) kontaklarda akım iletim mekanizmalarını aşağıda verilen üç teori ile açıklanabilir.

3.2.2.1. Termiyonik emisyon teorisi

MS kontaklarda, bir potansiyel engeli üzerinden elektron taşınması işlemi, termiyonik alan emisyon teorisi ile açıklanır. Sıcak bir yüzeyden termal enerjileri nedeniyle taşıyıcıların salınması olayı, termiyonik emisyon olarak adlandırılır. Metal-yarıiletken diyotlarda termiyonik emisyon teorisi; taşıyıcıların termal enerjileri nedeniyle potansiyel engelini aşarak yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmesidir. MS diyotlarda akım, çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanır. Metal p-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda iletimi boşluklar sağlarken Metal n-tipi yarıiletken diyotlarda ise akımı elektronlar sağlar. Termiyonik emisyon teorisi oluşturulurken, temel varsayımlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 1) $e\Phi_b$ engel yüksekliği, kT 'den çok büyüktür ($e\Phi_b \gg kT$).
- 2) Tükenim bölgesi içerisindeki elektron çarpışmaları ihmal edilir.
- 3) Hayali kuvvetin etkisi de ihmal edilir.



Şekil 3.13. Düz beslem altındaki metal/yarıiletken kontakta imaj kuvvet azalma etkisi.

Yukarıdaki varsayımlardan dolayı, akım iletimi sadece engel yüksekliğine bağlıdır. Yarıiletkenden metale doğru olan $J_{s \rightarrow m}$ akım yoğunluğu, bu durumda, standart-termiyonik emisyon denklemi ile verilir (Bethe, 1942).

$$J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (3.6)$$

Doyma akım yoğunluğunu

$$J_{0,T} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \quad (3.7)$$

denklemlerle ifade edilirken, buradaki A^* Richardson sabiti olup aşağıdaki gibi gösterilir (Dündar, 2007).

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (3.8)$$

3.2.2.2. Difüzyon teorisi

Schottky'nin ileri sürdüğü difüzyon teorisinde temel varsayımlar kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir (Crowell ve ark., 1966):

- 1) $e\Phi_b$ engel yüksekliği, kT 'den çok büyüktür. ($e\Phi_b \gg kT$),
- 2) Tükenim bölgesinde elektron çarpışmaları etkindir.
- 3) Tükenim bölgesinin sınırları içerisinde ($x = 0$ ve $x = w$) taşıyıcı konsantrasyonu akım akışından etkilenmez.
- 4) Yarıiletkenin safsızlık konsantrasyonu dejenere değildir.

Tükenim bölgesinde akım, yerel elektrik alana ve taşıyıcıların yoğunluk gradyentine bağlı olduğundan akım yoğunluğu denklemi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$J = \left(\frac{q^2 D_n N_c}{kT} \right) \left(\frac{q(V_{bi} - V) 8\pi N_D}{\epsilon_s} \right) \exp \left(-\frac{q\Phi_b}{kT} \right) \left[\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right] \quad (3.9)$$

Burada doyma akım yoğunluğunu veren ifade de aşağıdaki gibi olur:

$$J_{0,D} = \left(\frac{q^2 D_n N_c}{kT} \right) \left(\frac{q(V_{bi} - V) 8\pi N_D}{\epsilon_s} \right) \exp \left(-\frac{q\Phi_b}{kT} \right) \quad (3.10)$$

Sonuç olarak termiyonik emisyon akım yoğunluğu ($J_{0,T}$) ile difüzyon akım yoğunluğu ($J_{0,D}$) birbirine bezer. Ancak termiyonik emisyon yoğunluğu $J_{0,T}$ sıcaklığa bağlı iken, doyma akım yoğunluğu $J_{0,D}$ 'nin gerilimdeki değişimlerden çabuk etkilendiği görülüyor.

3.2.2.3. Termiyonik emisyon-difüzyon teorisi

Yukarıda tanımlanan termiyonik emisyon ve difüzyon teorilerinin bir sentezi olan bu teori metal-yarıiletken ara yüzeyi yakınında termiyonik tekrardan birleşim hızı (v_R)'nin sınır koşullarından türetilir (Sze, 1981). Ayrıca, metal-yarıiletken arayüzeyindeki kuantum mekaniksel yansıma ve elektron optik-fonon saçılma etkileri de göz önüne alınır. Termiyonik emisyon-difüzyon teorisi için akım yoğunluğu ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$J = \left(\frac{q N_c v_R}{1 + \frac{v_R}{v_D}} \right) \exp \left(-\frac{q \Phi_b}{kT} \right) \left[\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right] \quad (3.11)$$

Buradaki v_R , termiyonik yeniden birleşme hızı; v_D , difüzyon kaynaklı yeniden birleşme hızı olarak tanımlanıp 10^6 - 10^7 cm/s dir. Bu iki terimi aşağıdaki gibi hesaplayabiliriz.

$$v_R = \frac{A^* T^2}{q N_c} \quad (3.12)$$

$$v_D = \mu E \quad (3.13)$$

Burada iki durum göz önüne alındığında;

- 1) $v_R \leq v_D$ ise termiyonik emisyon baskındır.
- 2) $v_R > v_D$ ise difüzyon baskındır.

Difüzyonun baskın olduğu ikinci durum için akım yoğunluğu denklemi aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$J \cong q N_c v_D \exp \left(-\frac{q \Phi_b}{kT} \right) \left[\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right] \quad (3.14)$$

Buradaki $v_D = \mu E$ olduğundan, Eşitlik 3.14 yeniden düzenlenebilir:

$$J \cong q N_c \mu E \exp \left(-\frac{q \Phi_b}{kT} \right) \left[\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right] \quad (3.15)$$

Doyma akımı yoğunluğu ise aşağıdaki gibi verilir.

- 1) $v_R \leq v_D$ için:

$$J_0 = \left(\frac{q N_c v_R}{1 + \frac{v_R}{v_D}} \right) \exp \left(-\frac{q \Phi_b}{kT} \right) \quad (3.16)$$

2) $v_R > v_D$ için:

$$J_0 \cong qN_c \mu E \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \quad (3.17)$$

3.2.3. Cheung fonksiyonları yardımı ile diyot parametrelerinin belirlenmesi

Metal-yarıiletken yapılarda idealite faktörü n , engel yüksekliği Φ_b ve seri direnç R_s değerlerinin akım gerilim (I - V) karakteristikleri yardımı ile belirlenmesinde yaygın olarak Cheung ve arkadaşları tarafından sunulan metot kullanılır. MS diyotun karakteristik akım denklemi; I_0 : ters belsem doyma akımı, k : Boltzmann sabiti ($= 8,6 \times 10^{-5}$ eV/K = $1,38 \times 10^{-23}$ Joule/K) ve kT değeri elektronun ortalama termal enerjisi olmak üzere;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.18)$$

şeklinde ifade edilir. Oda sıcaklığında ($T=27$ °C); $kT = 0,0258$ eV $\approx 1/40$ eV olarak tanımlanır. Bu denklemdeki ters belsem doyma akımı I_0 ifadesi açılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$I = AA^*T^2 \left[\exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.19)$$

Termiyonik emisyon teorisinin 1. varsayımını dikkate aldığımızda ($eV \gg kT$) denklemdeki '-1' ifadesi ihmal edilebilir. Denklem aşağıdaki gibi yeniden düzenlenirse:

$$I = AA^*T^2 \left[\exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (3.20)$$

Diyottaki seri direnç, gerilimin azalmasına neden olduğu için voltaj ifadesinin yerine ($V - IR_s$) ifadesi yazılarak denklem tekrar düzenlenir.

$$I = AA^*T^2 \left[\exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{e(V-IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (3.21)$$

Eşitliğin her iki tarafının \ln 'i alındığında,

$$\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = \ln\left[\exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right)\right] + \ln\exp\left(\frac{e(V-IR_s)}{nkT}\right) \quad (3.22)$$

$$\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = -\frac{e\Phi_b}{kT} + \frac{e(V-IR_s)}{nkT} \quad (3.23)$$

$$\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = -\frac{e\Phi_b}{kT} + \frac{eV}{nkT} - \frac{eIR_s}{nkT} \quad (3.24)$$

$$\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) - \frac{eV}{nkT} = -\frac{e\Phi_b}{kT} - \frac{eIR_s}{nkT} \quad (3.25)$$

$$\frac{eV}{nkT} - \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = \frac{e\Phi_b}{kT} + \frac{eIR_s}{nkT} \quad (3.26)$$

$$V - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = n\Phi_b + IR_s \quad (3.27)$$

denklemleri elde edilir. Elde edilen bu denklemde aşağıdaki adımlar takip edilir:

- 1) Denklem, V 'yi yalnız bırakacak şekilde düzenlenip daha sonra eşitliğin her iki tarafının $\ln I$ 'ya göre türevi alınır.

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) + n\Phi_b + IR_s \quad (3.28)$$

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln I - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln(AA^*T^2) + n\Phi_b + IR_s \quad (3.29)$$

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \left(\frac{nkT}{e}\right) \frac{dV}{d(\ln I)} - \left(\frac{nkT}{e}\right) \frac{dV[\ln(AA^*T^2)]}{d(\ln I)} + \frac{d(n\Phi_b)}{d(\ln I)} + \frac{d(IR_s)}{d(\ln I)} \quad (3.30)$$

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \left(\frac{nkT}{e}\right) - 0 + 0 + R_s \frac{dI}{d(\ln I)} \quad (3.31)$$

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \left(\frac{nkT}{e}\right) + R_s \left[\frac{1}{\frac{d(\ln I)}{dI}}\right] \quad (3.32)$$

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \left(\frac{nkT}{e}\right) + R_s \left[\frac{1}{\frac{1}{I}}\right] \quad (3.33)$$

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \left(\frac{nkT}{e}\right) + IR_s \quad (3.34)$$

Elde edilen 3.34 eşitliği '1. Cheung&Cheung' fonksiyonu olarak adlandırılır. Bu denklem yardımı ile $\frac{dV}{d(\ln I)} - I$ grafiği çizilerek, R_s (seri direnç) ve n (idealite faktörü) parametreleri bulunabilir.

- $\frac{dV}{d(\ln I)} - I$ grafiğinin eğiminden seri direnç (R_s) değeri bulunur.
- $\frac{dV}{d(\ln I)} - I$ grafiğinin düşey eksenini kestiği nokta yardımı ile idealite faktörü (n) bulunur.

2) Eşitlik 3.27'de, eşitliğin sağ tarafı $H(I)$ olarak ifade edilirse denklem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = n\Phi_b + IR_s \quad (3.35)$$

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (3.36)$$

Elde edilen 3.36 eşitliği '2. Cheung&Cheung' fonksiyonudur. 1. Cheung&Cheung fonksiyonu ile bulunan n (idealite faktörü) burada kullanılarak seri direnç (R_s) ve engel yüksekliği (Φ_b) hesaplanır.

Bu denklemden $H(I) - I$ grafiği çizilirse R_s ve Φ_b parametreleri bulunur.

- $H(I) - I$ grafiğinin eğimi seri direnç (R_s) değeri bulunur.

- $H(I) - I$ grafiğinin düşey ekseni kestiği nokta ve 1. Cheung&Cheung fonksiyonu yardımı ile hesaplanmış olan idealite faktörü (n) kullanılarak engel yüksekliği (Φ_b) bulunur.

3.2.4. Norde fonksiyonları yardımı ile diyot parametrelerinin belirlenmesi

Termiyonik emisyon teorisindeki standart termiyonik emisyon denklemi olan 3.6 eşitliği, diyotun etkin alanını ifade eden A ile çarpıldığında toplam I_n akımının değeri aşağıdaki gibi bulunur. ($eV \gg 3kT$) alındığında,

$$I_n = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad (3.37)$$

İdeal bir MS diyot için termiyonik emisyon etkili akım ifadesi,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV_d}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.38)$$

ile verilir. Burada V_d difüzyon potansiyeli $\beta = e/kT$ ve I_0 , doyma akımı olup

$$I_0 = AA^*T \exp(-\beta\Phi_b) \quad (3.39)$$

ifadesi ile belirtilir. $\left(\frac{eV_d}{kT}\right) \gg 1$ için;

$$I \cong I_0 \exp\left(\frac{eV_d}{kT}\right) \quad (3.40)$$

elde edilir. Burada $\ln(I)$ 'nin V 'ye karşı grafiği ($e\Phi_b$) engel yüksekliğinin tayini için alternatif imkân sağlamaktadır. Bu durum yarıiletken diyotta bir seri dirence neden olur. Akım-gerilim karakteristiği, aralığındaki gerilimler için doğru şekilde iken, R çok büyük ise doğru kısım oldukça dar olacaktır. Bu seri direnç etkisini ortadan kaldırmak için $F(V)$ fonksiyonu kullanılır:

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (3.41)$$

Seri dirençli bir diyot için akım ifadesi; $V_d = V - IR$ olarak alınır, $I = I_0 [\exp(\beta V_d) - 1]$ ifadesi sağlanırken, buradan da V_d yerine $V - IR$ yazılırsa aşağıdaki bağıntı elde edilir.

$$I = I_0 [\exp [\beta(V - IR)] - 1] \quad (3.42)$$

$V_d \gg \frac{kT}{e}$ olduğu kabul edilip eşitlik 3.42, eşitlik 3.41'de yerine yazılırsa,

$$F(V) = \Phi_b + IR - \frac{V}{2} \quad (3.43)$$

denklemini elde edilir. İdeal durumda $R=0$ kabul edilir. Bu durumda denklem yeniden düzenlenirse:

$$F(V) = \Phi_b - \frac{V}{2} \quad (3.44)$$

ifadesi elde edilir. Bu fonksiyon eğimi (-1/2) olan bir doğru denklemini ifade eder. Ancak Eşitlik 3.42'de Ohm yasası gereğince $I=V/R$ 'dir. Bu ifade Eşitlik 3.41'de yerine yazılırsa,

$$F(V) = F_R(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (3.45)$$

olarak elde edilir. Çok büyük gerilimler için bu ifade eğimi 1/2 olan bir doğruya ulaşacaktır. Burada $F(V)$ nin küçük akımlar için ideal hale, büyük akımlar için $F_R(V)$ eğrisine yaklaşacağı sonucuna varılabilir. $F(V)$ fonksiyonu bu iki nokta arasında bir minimum değere sahiptir. Daha sonra eşitlik 3.43'ün V 'ye göre türevi alındığında,

$$\frac{dF(V)}{dV} = R \left(\frac{dI}{dV} \right) - \frac{1}{2} \quad (3.46)$$

denklemleri elde edilir. Ayrıca,

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV} \left[1 + R \left(\frac{dI}{dV} \right) \right]^{-1} \quad (3.47)$$

ve

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV} [I_{min} \exp(\beta V)] = \beta I \quad (3.48)$$

olduğundan, fonksiyonun türevi,

$$\frac{dF(V)}{dV} = \frac{\beta R I}{1 + \beta R I} - \frac{1}{2} \quad (3.49)$$

olarak elde edilir. $\frac{dF(V)}{dV} = 0$ değeri $F(V)$ 'nin minimum noktasındaki I_{min} akımını verecektir. Buna göre eşitlik 3.49 yardımcı ile I_{min} akımı,

$$I_{min} = \frac{1}{\beta R} = \frac{kT}{qR} \quad (3.50)$$

olarak bulunur. I_{min} akımına karşılık gelen gerilim ise,

$$V_{min} = I_{min} R + V_d(I_{min}) = V_{min} = \frac{1}{\beta} + \ln \left(\frac{I_{min}}{AA^* T^2} \right) \quad (3.51)$$

olarak elde edilir. Buna göre $F(V)$ 'nin minimum değeri,

$$F(V_{min}) = \frac{V_{min}}{2} - \frac{1}{\beta} \left(\frac{I_{min}}{AA^* T^2} \right) \quad (3.52)$$

ifadesiyle bulunur. I_{min} ve V_{min} 'nin ölçülen değerleri kullanılarak doğru gerilim uygulanan diyotta akım;

$$I = AA^* T^2 \exp \left(- \frac{e\Phi_b}{kT} \right) \exp \left(\frac{eV_d}{nkT} \right) \quad (3.53)$$

şeklinde ifade edilir. Burada n idealite faktörü olup $1 < n < 2$ arasındadır. n , sıcaklık ve uygulama geriliminden bağımsız ve birimsiz bir sabittir. Eşitlik 3.43'de 3.44 bağıntısını yerine yazarsak, $F(V)$ için;

$$F(V) = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n}\right)V + \Phi_B + \frac{IR}{n} \quad (3.54)$$

ifadesi elde edilir. $R = 0$ ideal durumu için $F(V)$ fonksiyonu $((n-2)/2n) < 0$ eğimli bir doğru olacaktır. $n = 1$ iken eğim $(-1/2)$ 'ye eşittir. O halde $n = 1$ durumu ideal diyot durumudur. Eşitlik 3.54'ün V 'ye göre diferansiyeli alındığında;

$$\frac{dF(V)}{dV} = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n}\right) + \left(\frac{R}{n}\right)\left(\frac{dI}{dV}\right) \quad (3.55)$$

eşitliği elde edilir. Ayrıca 3.53 eşitliğinin V_d 'ye göre diferansiyeli;

$$\frac{dI}{dV_d} = \frac{\beta I}{n} \quad (3.56)$$

$$V_d = V - IR \quad (3.57)$$

olur ve bu eşitliğin de I 'ya göre diferansiyeli alındığında,

$$\frac{dV_d}{dI} = \frac{dV}{dI} - R \quad (3.58)$$

elde edilir. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra,

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI/(dV_d)}{1 + R dI/dV_d} \quad (3.59)$$

bağıntısı elde edilir. Eşitlik 3.59'u eşitlik 3.55'de yerine yazarsak,

$$\frac{dF(V)}{dV} = \frac{n-2+\beta RI}{2(n+\beta RI)} \quad (3.60)$$

elde edilir. $dF(V)/dV=0$ durumu ele alınırsa $F(V)$ 'nin minimum noktasındaki akımı elde edilecektir. 3.60 eşitliğinden seri direnç,

$$R = \frac{2-n}{\beta I_{min}} \quad (3.61)$$

şeklilde elde edilir. Buna karşılık gelen akım eşitlik 3.56'dan

$$V_{min} = V_d(I_{min}) + IR \quad (3.62)$$

olarak yazılır. Eşitlik 3.54'de V yerine V_{min} , I yerine I_{min} ve R 'nin değerleri yerlerine yazılırsa,

$$F(V_{min}) = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n}\right)V_{min} + \Phi_B - \frac{2-n}{\beta n} \quad (3.63)$$

ifadesi elde edilir. $n = 1$ için R ve Φ_B değerleri hesaplanırsa, $R = (2 - n)/\beta I_{min}$ ise $R = \left(\frac{kT}{e}\right)I_{min}$ için,

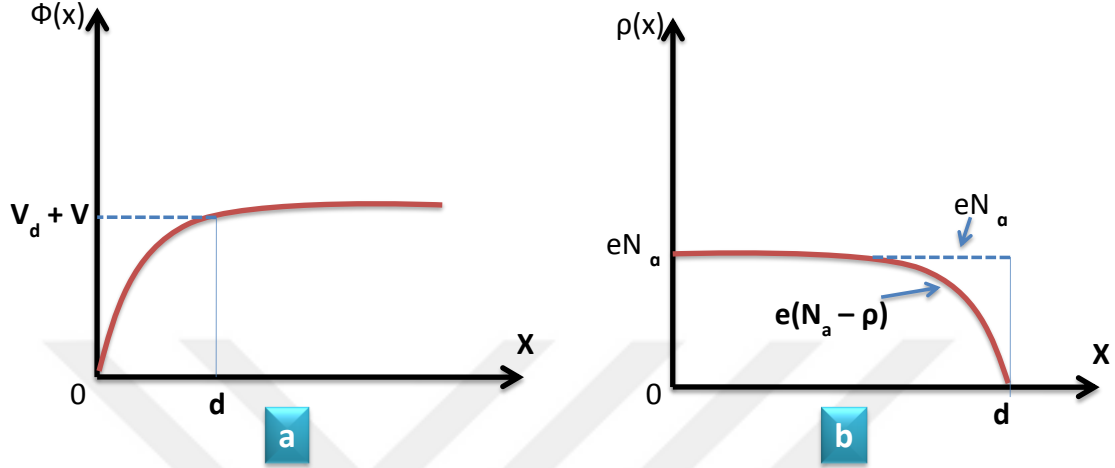
$$\Phi_B = F(V) + \frac{V_{min}}{2} - \frac{kT}{q} \quad (3.64)$$

ifadesi elde edilir.

3.2.5. Metal-yarıiletken diyotlarda Schottky kapasitesi

Kapasite-gerilim karakteristiği diyotların en önemli özelliklerinden biri olmakla birlikte Schottky diyotların $C-V$ karakteristiği ara yüzey durumlarına karşı çok hassastır ve aygıtların elektriksel özellikleri üzerine kuvvetli bir etkiye sahiptir. Düşük frekanslarda kapasitenin artması, uygulanan AC sinyalinin yük taşıyıcıları tarafından takip edilebilmesine bağlıdır. Yeterince yüksek frekansta kapasite-gerilim ölçümleri alınabilirse ara yüzeydeki yükler AC sinyallerini takip edemezler. Metal-yarıiletken kontak yapılarında, tükenim bölgesi (dipol tabakası), yarıiletken tarafındaki uzay yükleri ve metal tarafındaki yüzey yükleriyle bir kondansatör gibi davranır. Ters belsem

durumunda, gerilim arttırıldığında arınma bölgesinin genişliği artar. Yarıiletkende, metale yakın kısımda, bir boşluk yoğunluğu varsa, yeni Fermi seviyesi metaldeki Fermi seviyesi ile çakışacağından boşluk yoğunluğu düşecektir (Uğur, 2015).



Şekil.3.14. Metal p-tipi yapılarda doğrultucu kontağın a) potansiyel dağılımı ve b) yük dağılımı (Uğur, 2015).

Schottky bölgesinin kapasitesi, oluşan yük değişiminden dolayı değişecektir. Bu özelliklerinden dolayı Schottky diyotları, gerilim kontrollü değişken kapasitörler olarak kullanılabilir. Schottky bölgesinin kapasitesini bulmak için, diyotun engel tabakasındaki potansiyel dağılımının Poisson eşitliği;

$$\nabla^2 \Psi(x) = \frac{d^2 \Psi}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (3.65)$$

şeklinde ifade edilir. Burada ϵ_s yarıiletkenin, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti olarak tanımlanırken $\rho(x)$ ise konuma bağlı uzay yükü yoğunluğudur. Uzay yükü yoğunluğu,

$$\rho(x) = e(N_a + N_d) \quad (3.66)$$

olarak yazılabilir (Rhoderick ve Williams, 1988). Burada N_d , yarıiletkenin donör yoğunluğu, N_a yarıiletkenin akseptör yoğunluğudur. $\Psi(x)$ potansiyel fonksiyonu ile

uzay yük yoğunluğu, $\rho(X)$ nun konumuna göre değişimleri yukarıdaki Şekil.3.14'te gösterilmiştir.

Engel tabakasının difüzyon potansiyelini V_D ve kontağa uygulanan potansiyeli V ile gösterilirse: $e(V_d-V) \gg kT$ olduğundan $0 \leq x \leq d$ aralığındaki yük taşıyıcılar d uzunluğunda, Debye difüzyon uzunluğu olarak verilen bir bölgede kısmi olarak bulunacaklardır. Dolayısı ile p-tipi yarıiletken için uzay yük yoğunluğu,

$$\rho(X) \cong eN_a \quad (3.67)$$

olarak yazılabilir. 3.65 ve 3.67 eşitliklerinden,

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} = -\frac{eN_a}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (3.68)$$

denklemini elde edilebilir. Bu denklemin çözümü bulmak için aşağıdaki sınır değerleri kullanılırsa;

- 1) $x=0$ için $\psi(x) = 0$
- 2) $x > d$ için $\psi(x) = V_d + V$
- 3) $x=d$ için $\frac{d\psi(x)}{dx} = 0$

Eşitlik 3.68 için, üçüncü sınır şartı göz önüne alınıp, integral alındığında;

$$E(x) = -\frac{d\psi(x)}{dx} = -\frac{eN_a}{\epsilon_s \epsilon_0} (x - d) \quad (3.69)$$

ifadesi elde edilir. Bu eşitlikte birinci sınır şartı dikkate alınarak integral alınırsa;

$$\psi(x) = -\frac{eN_a}{\epsilon_s \epsilon_0} \left(\frac{1}{2} x^2 - xd \right) \quad (3.70)$$

elde edilir. Bu son denklemin ikinci sınır şartı için çözümü yapılırsa;

$$d = \left[\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0}{eN_a} (V_d \pm V) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.71)$$

bulunur. Bulunan bu ifade Schottky bölgesinin genişliğini temsil eder. Burada $V>0$ için, kontak doğru $V<0$ için ise kontak ters belsemedir. Yarıiletkende birim alan başına düşen yük yoğunluğu;

$$Q = eN_a \cdot d \quad (3.72)$$

ile verilir. 3.71 ve 3.72 eşitliklerinden,

$$Q = [2\varepsilon_s\varepsilon_0 eN_a (V_d \pm V)]^{\frac{1}{2}} \quad (3.73)$$

eşitliği elde edilir. Schottky kapasitesi, 3.73 eşitliğini sağlayan Q yükünün, uygulanan gerilime göre değişimi olarak tanımlanır. Dolayısı ile kapasite,

$$C = \frac{\partial Q}{\partial V} \quad (3.74)$$

olarak yazılıp, 3.73 ve 3.74 eşitliklerinden,

$$C = \left[\frac{\varepsilon_s\varepsilon_0 eN_a}{2(V_d \pm V)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.75)$$

veya

$$C = \frac{\varepsilon_s\varepsilon_0}{d} \quad (3.76)$$

bulunur. Buradan anlaşıldığı üzere tüketim bölgesi kapasitesi, uygulanan gerilim ve Schottky bölgesinin genişliği ile ters, akseptör yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Eğer uygulanan gerilim artarsa kapasite azalır ve Schottky tabakasının genişliği de artar. Benzer olarak, akseptör yoğunluğu artarsa, kapasite yine artar ve buna bağlı olarak schottky tabakasının genişliği azalır. Eşitlik 3.75 yardımıyla,

$$C^{-2} = \frac{2(V_d+V)}{\epsilon_s \epsilon_0 e N_a} \quad (3.77)$$

olarak yazılabilir. Buradan anlaşıldığı gibi C^{-2} - V grafiği bir doğru verir ve bu doğrunun eğiminden akseptör yoğunluğu N_a ,

$$N_a = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_0 e} \frac{dV}{d(C^{-2})} \quad (3.78)$$

şeklinde elde edilir. Ayrıca doğrunun yatay eksenini kestiği noktadan ise difüzyon potansiyeli V_d bulunur.

3.3. Deneyde Kullanılan Kimyasal Malzemeler Ve Özellikleri

Deneylerde kullanılan ana malzemelerin her biri bir elementle bileşik oluşturmuş durumdadır. SnO_2 , $\text{Cl}_2\text{Sn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Tin(II) chloride dehydrate)'dan, Y elementi $\text{Cl}_3\text{Y} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Yttrium(II) chloride hexahydrate) bileşiğinden elde edilmiştir. Kalay oksidin özellikleri açıklanmadan önce, onun oksitlenmemiş hali olan kalaydan bahsedilecek, daha sonra kalay oksit ve itriyum özelliklerine geçilecektir.

3.3.1. Kalay elementi (Sn)

Kalay elementinin, milattan önce 2000 yıllarında orta doğuda, az da olsa kullanıldığı bilinmektedir. O tarihlerde kullanılan kalayın kaynağın İran ve Kafkasya olduğu düşünülmektedir. O zamanlardan günümüze kalay birçok alanda kullanılmaktadır.

Periyodik cetvelde kalay, 4A grubunda yer alır ve atom numarası 50 olan elementtir. Latince *stannum* kökenli olan kalayın simgesi Sn'dir. Kalay, SnO_2 (kalay oksit) ve $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ (*stannit*) madeninde bulunur. Gümüş beyaz renkli, yumuşak, işlenebilir (dövülebilir) ve sünek bir metaldir. Yumuşak olması sebebiyle kolayca tel ve levha haline getirilebilir. Oda sıcaklığında dövülebilir olmasına karşın ısıtıldığında kırılabilir. Kuvvetli asitlerden, alkali metallere ve asit tuzlarından etkilenir. Havada ısıtıldığında SnO_2 meydana gelir. Klor ve oksijenle birleşerek seyreltik asitlerden

hidrojeni uzaklaştırma görevi görür. Metalik kalaya, 100 °C'den yüksek sıcaklıklarda halojenler ve hidrojen sülfür etki eder. Kalayın 10 adet kararlı ve doğada bulunan, 21 adet ise yapay ve radyoaktif izotopu vardır. Kalay, kovalent ve metalik bağ arasında bir sınır elementi olup normal basınç altında iki allotropik forma sahiptir. 286.2 K'in altında elmas yapıda olup gri görünümlüdür ve bu tip kalay, α -Sn olarak adlandırılır. Bu sıcaklığın üstünde ise, beyaz (gümüşümsü) görünümlü ve tetragonal yapıdadır ve β -Sn olarak adlandırılır. Bu iki forma ilave olarak 434 K-504.97 K arasında bir γ formunun olduğuna inanılmaktadır (Düzgün, 1985). Şekil 3.15'de kalay elementinin katı formu verilmiştir.



Şekil 3.15. Kalay kristalinin katı hali.

Kalay; gıda sektöründen otomotiv sektörüne, hediyelik eşya yapımından tümleşik (entegre) devrelere kadar pekçok alanda karşımıza çıkmaktadır. Havada kolaylıkla okside olmaması ve yüksek korozyon direncine sahip olması nedeniyle, diğer metallerin (korozyondan korumak amacıyla) kaplamasında kullanılır. Buna ek olarak zehirli olmamasından dolayı, yiyeceklerin saklanma ve depolanma sürecinde, bunun yanında elektronik sektöründe (özellikle entegre devrelerde kullanılan elemanların birleştirilmesinde) lehimleme başta olmak üzere geniş bir kullanıma sahiptir. Tüm bunlara ek olarak yüksek aşınma direnci ve yağlayıcı özelliğinden dolayı hareket halindeki tüm parçalarda sürtünmeden kaynaklanan problemleri azaltmak amacıyla yatak malzemesi olarak da kullanılır.

3.3.2. Kalay oksit (SnO₂)

Kalay oksit (TO), kimyasal formülü SnO₂ olan inorganik bir bileşiktir. Kalay oksitin mineral formu *kasiterit* diye isimlendirilir, bu kalayın ana madeni olarak kabul edilir ve kalayın kimyasında bulunan en önemli ham maddedir. Bu ham madde renksiz ve diamanyetik katı bir amfoterdir (bazen asit, bazen baz gibi davranır). Kalay oksit, madde olarak kokusuz ve toz haldedir. Yüksek kimyasal ve mekanik dayanıklılığa sahip, saydam bir malzemedir (Kuhlmann, 2004). Çizelge 3.2’de SnO₂’nin temel özellikleri verilmiştir (Koçyiğit, 2014).

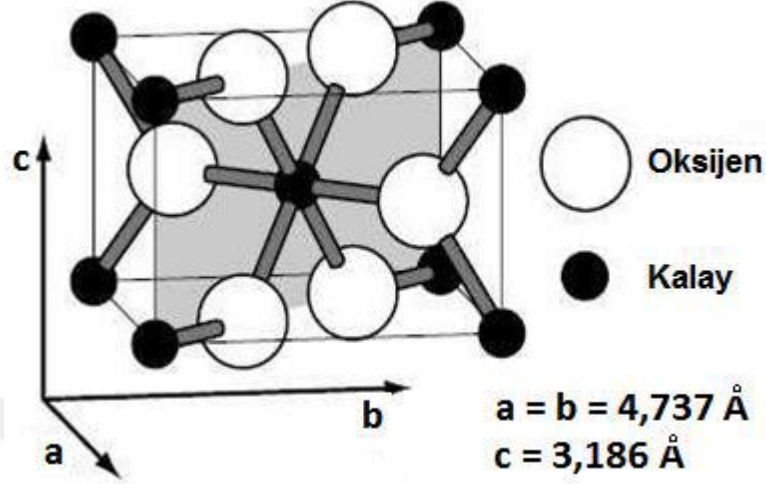
Çizelge 3.2. Kalay oksitin temel özellikleri

Kalay oksitin bazı özellikleri	
Moleküler formülü	SnO ₂
Moleküler ağırlık	150.71 g/mol
Yoğunluğu	6.95 g/cm ³
Erime noktası	1630 °C
Kaynama noktası	1800 °C-1900 °C
Kristal yapısı	Tetragonal(rutile)
Bant aralığı	3.5-4.2 eV
Görünümü	Beyaz ya da gri
Mineral ismi	Cassiterite
Latis parametreleri (nm)	a= b= 0.474 c= 0.319
Kırılma indisi (n)	2.006

SnO₂, geniş bant aralığına sahip n-tipi bir yarıiletkenidir. Tetragonal rutil yapıda olan kalay oksidin örgü yapısı, 2 kalay ve 4 oksijen atomu içermektedir. Kalay atomu düzgün oktahedranların köşelerindeki 6 oksijen atomunun merkezindedir. Her oksijen atomu eşkenar üçgenin köşelerindeki 3 kalay atomu tarafından çevrelenmiştir (Mol 2003). O-O mesafesi 4,6646 Å ve O-Sn mesafesi 3,7662 Å dur. Örgü parametreleri a=b=4.738 Å ve c=3.187 Å dur (Sinner-Hettenbach, 2000).

Tamamen stokiometrik olan kalay oksit yalıtkandır, ancak kafes yapısının mükemmel olmayışı ve oksijen boşluklarının bulunmasından dolayı iletkenlik özelliği kazanabilir. Kalay oksitin iletkenliği, mükemmel olmayan kafes yapısından dolayı çeşitli elementlerin katkılanmasıyla artırılabilir (yarıiletken özelliği). Bu katkılanan

elementler In, Nb, Sb, F gibi elementlerdir. Şekil 3.16'da, kalay oksidin örgü yapısı gösterilmiştir (Alaf, 2007).



Şekil 3.16. Kalay oksit kristal yapısı (Sinner-Hettenbach, 2000).

Kalay oksit, düşük maliyeti ve atmosferik şartlara karşı uygunluğundan dolayı oldukça tercih edilen bir materyaldir. Yüksek optik geçirgenlik, düşük elektriksel özdirenç, kızılötesi ışınlar için yüksek yansıtıcılık, yüksek mekanik sertlik ve iyi çevresel kararlılık en belirgin özelliklerindedir. Kalay oksit (özellikle film formunda elde edildiğinde), elektromanyetik spektrumun görünür bölgesindeki yüksek optik geçirgenliğe sahiptir. Bunun nedeni, 3.0–4.5 eV gibi geniş bir bant aralığı enerjilerinin mevcut olmasından kaynaklanmaktadır. Geçirgenlik, serbest elektronların absorpsiyonundan dolayı, taşıyıcıların artmasıyla birlikte azalır. Yaklaşık 8 mikron dalga boyu üzerinde kalay oksit, yüksek kızılötesi yansıtıcılık gösterir. Bu yansıtıcılık iletkenlik bandındaki foton ve elektronların etkileşimiyle ilgilidir ve bu da kaplamanın direkt olarak iletkenliğini etkiler. Özetle; kalay oksit, optik geçirgenliği yaklaşık % 90 civarında olan, kızıl ötesi yansıtıcılığı % 90'ın üzerine çıkan ve yüksek iletkenliğe sahip bir malzemedir (Mo1, 2003).

İyi optik geçirgenlik ve yüksek elektriksel iletkenliği ile bilim ve teknolojide geniş bir uygulama alanına sahip olan kalay oksit, özellikle optoelektronik uygulamalar için önemli bir bileşen olma özelliğine sahiptir. Bu özelliğinden dolayı elektronikte ve elektriksel kontaklarda kullanılır. Ayrıca elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinde yüksek oranda gelen elektromanyetik radyasyonu yansıtma özelliğine sahip

olmasından dolayı, iletkenlik bandında serbest halde bulunan elektronlar ve gelen elektromanyetik dalganın etkileşimi açısından son derece önem arz etmektedir. Kalay oksit, sahip olduğu bu özellikleriyle araştırılmaya ve farklı teknolojilerde kullanılmaya değer bir malzeme olarak kendini ortaya koymaktadır. SnO₂'nin kullanım alanları aşağıdaki gibi verilebilir;

- Li iyon piller
- Gaz sensörleri
- Güneş hücreleri
- Mimari camlar (kıızıl ötesi yansıtıcı olarak)
- Uçak camları (ısıtıcı elaman olarak)
- Elektroluminesans ışık ve göstergeleri (geçirgen elektrot olarak)
- Cam konteynırlar (koruyucu ve aşınma dirençli kaplama olarak)

Kalay oksit, kimyasal kararlılığı ve yarıiletken özelliğinden dolayı gaz sensörleri eldesinde tercih edilir. Geçirgen ve iletken özelliğinden dolayı ise amorf Si güneş hücrelerinde, flor katkılanmış kalay oksit, sıklıkla üst elektrot olarak kullanılır. Uçak pencerelerinde kullanılmasının nedeni ise pencerenin üzerine uygulanan ince kalay oksit filmi buhar veya buzu buharlaştırarak uzaklaştırma görevi görmesidir (Alaf, 2007).

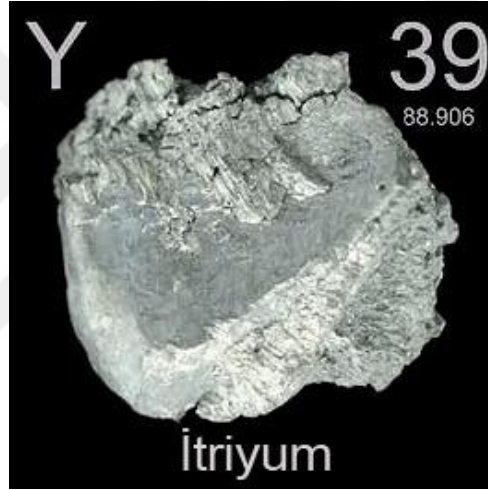
3.3.3. İttriyum (Y)

İttriyum, izlediğimiz televizyonların ekranlarında bulunan bir element olup nadir toprak elementleri olarak bilinen elementlerdendir. Oksit formu, önemli özellikler içerir. İttriyum kullanılarak üretilen lazerler, metalleri kesen lazer türündendir.

İttriyumunun keşfi, 1787 yılında Carl Axel Arrhenius 'un İsveç'in Ytterby kasabası yakınlarındaki bir feldspat-kuvars madeninde kömüre benzeyen bir mineral bulmasıyla başladı. 1794 yılında, Finlandiya'da, "ittria" adı verilen bu mineralden bir örnek alan Finlandiyalı kimyager Johan Gadolin, bu minerali incelediğinde % 31 oranında silika, % 19 alümin, % 12 demir oksit ve % 31 oranında da bilinmeyen yeni bir maddenin olduğu sonucuna vardı. Gadolin, analiz sonuçlarını 'yeni bir oksit' olarak yayınladı. Gadolin'in sonuçları 1797 yılında İsveçli kimyager Anders Ekeberg tarafından 'yeni bir oksit' olarak teyit edildi. Bu yeni oksidin yayınlanmasının ardından, 1828 yılında ittriyumun metal formu ilk olarak Alman kimyager Friedrich Wöhler

tarafından susuz itriyum kloridin potasyum ile ısıtılmasıyla gri bir toz olarak elde edildi. Daha sonra 1843 yılında Carl Gustav Mosander, itriyum oksidin üç oksitten oluştuğunu keşfetti. Bu keşfin ardından 1953 yılında, en yüksek saflık derecesi olan itriyum, Frank Spedding tarafından iyon değişim tekniği ile elde edildi. 1987 yılında ise Amerikalı profesörler Maw-Kuen Wu ve Paul Chu, itriyum baryum bakır oksit bileşiğinin süper iletkenlik özelliğini keşfetti.

İtriyum kelimesi, İsveç Vauxholm yakınlarındaki *Ytterby* kasabasından esinlenerek verilmiştir. Stockholm'e yakın olan bu kasabada, nadir toprak elementleri olarak bilinen elementleri içeren madenler bulunduğu bilinmektedir. Kasabanın adı, erbiyum, terbiyum ve iterbiyum gibi elementlerin isimlerine de esin kaynağı olmuştur.



Şekil 3.17. İtriyum elementi yapısı.

Periyodik tabloda 3B grubunda yer alan itriyumun simgesi 'Y' dir. Atom numarası 39, atom ağırlığı 88.90'dır. Erime noktası 1522 °C, kaynama noktası 3338 °C'dir ve 1509 °C'de baz özelliği gösterir. 450 °C'nin üzerinde hızla oksidasyona uğrar. Katı, gümüşî beyaz renginde geçiş metali olan itriyum metalik bir parlaklığa sahiptir. Kırılgan olmayışı, orta derecede yumuşaklığı ve yüzeyindeki oksit filmi sebebiyle havada oldukça kararlıdır. Bu sebeple yüksek korozyon ve oksidasyon direncine sahiptir. Suda çözülebilen bileşikleri toksiktir olmakla birlikte bileşiklerinin çoğu renksizdir (Eskier, 2017).

İtriyumun en önemli bileşiği itriyum oksittir. İtriyum oksit, sülfat, klorür ve karbonat gibi bir takım tuzlar ile bileşikler oluşturur. İtriyum klorür tuzu renksizdir ve

talaşları 400 °C üzerine havada kolayca tutuşabilir. Su ile ayrışarak hidrojen gazı salınır ve mineral asitlerle reaksiyona girer. Gadolinit, öksenit, sarmarskit ve ksenotim minerallerinden elde edilen itriyum doğada saf olarak bulunmaz. Xenotime minerali, % 50 oranında itriyum fosfat içerebilir ve doğada kurşundan daha fazla bulunur (Eskier, 2017).

İtriyum sanayide iyon değişimi yoluyla ayrıştırılarak üretilir. Ticari anlamda metal formu monazit kumu ve bastnaezit minerallerinin kalsiyum ile indirgenmesi sonucu elde edilir. İtriyumun bilinen 9 izotopu vardır. Doğadaki tek kararlı izotopu İtriyum-89 izotopudur. Öteki yaygın izotopları 86 ve 80 atom kütle numaralı izotoplardır. İtriyum-90 izotopu, kanser tedavilerinde kullanılan radyoaktif izotop olarak bilinir (Eskier, 2017).

İtriyumun en yaygın kullanılan bileşiği itriyum oksittir. Bazı alaşımların katkı maddesidir, metalürji uygulamalarında tercih edilir. Bazı bileşikleri çeşitli ürünlerde katalizör görevi görür. Renkli televizyonların üretilmesinde önemli etkileri olan fosforişil maddeler arasında yer alır. Evropiyum elementi ile etkinleştirilen itriyum ortovanadat ve itriyum oksit, en önemli fosforişil maddeler arasında yer alır. İtriyum oksit kullanılarak üretilen çeşitli maddeler, elektronik mikrodalga aygıtlar, radarlar ve iletişim sistemlerinde kullanılır. İtriyum-demir alaşımı, elektriği çok az kayıpla iletir. İtriyum-demir granitler, mikrodalga filtrelerinin üretiminde kullanılır. En yaygın kullanılan alaşımı itriyum-alüminyum alaşımıdır. İtriyum-alüminyum lazerleri, neodimle güçlendirilmiş 100 voltluk bir kaynakla çalışır ve metalleri kesebilir. Elektron tüplerinin boşaltılması için elektron alıcı özelliğinden faydalanılır. Alüminyum ve magnezyum alaşımlarının dayanıklılığını artırır. Vanadyumun oksidasyonunu önler. İtriyum, demir, alüminyum ve gadolinyum garnetleri, ilginç manyetik özelliklere sahiptir. İtriyum-demir garneti, çok verimli akustik enerji üreticisi ve dönüştürücüsüdür. Yüksek erime noktası sebebiyle cama direnç kazandırır. Seramik ve camlara düşük genleşme özelliği kazandırdığı için bu sektörde kullanımı yaygındır. İtriyumdan yapılan bazı sentetik taşlar, kaliteli takıların yapıtaşdır (Eskier, 2017).

İtriyum, bileşikleri ve alaşımlarının kullanıldığı bazı ürünler şunlardır; televizyon ekranları, lazerler, yüksek sıcaklık süper iletkenler, LCD ve LED ekran ve monitörler, bujiler, enerji tasarruflu lambalar, optik camlar, özel seramikler, ateşe dayanıklı tuğla, kamera ve fotoğraf makinesi mercekleri, mikrodalga filtreleri, lal

taşları, floresan lambalar, kırmızı fosforlar, katot ışını tüpleri, sentetik taşlar, elektrik nakil hatları, tıbbi iğneler, yakıt hücreleri, elektrotlar, elektrolitler. Nadir elementler grubunda yer almasına rağmen kullanım alanları oldukça yaygın olan itriyum ile ilgili bazı bilgiler aşağıda verilmiştir:

- Televizyonlardaki kırmızı fosforlu maddeler arasında itriyum da yer alır.
- Renkli televizyonların ekranlarında resim elde edilmesi için genellikle itriyum oksit kullanılır. Ekranlardaki kırmızı rengi sağlayan evroppyum-öropyum fosforları itriyum sayesinde üretilir.
- İtriyum, televizyonlarda kullanıldığı için ev ortamında havaya karışan gazlar arasında yer alabilir. İtriyum içeren havanın teneffüs edilmesi halinde akciğer ve karaciğer sorunlarına yol açabilir ve kanserojendir.
- Çevreye atılan çeşitli ürünlerden ve atıklardan su ve toprağa itriyum karışabilir. Bu durum, çok nadir de olsa insan ve hayvanlar için risk faktörüdür.
- İtriyuma maruz kalan hayvanların üreme ve sinir sistemlerinde hasara yol açtığı tespit edilmiştir.
- İtriyum kullanılarak üretilen lazerler metalleri kesebilir.
- İtriyum-alüminyum taşı, yapay elmas olarak bilinir. Bu sentetik elmasın sertlik değeri 8.5'tir.
- Apollo ay yolcuğu sırasında elde edilen kaya parçalarında yüksek oranda itriyum tespit edilmiştir.
- İtriyum rezervi bulunan ülkeler; Çin, Rusya, ABD ve Malezya'dır. Üretimi de bu ülkelerde yapılmaktadır.
- Dünyada itriyum rezervinin 9 milyon ton olduğu tahmin ediliyor. Yıllık itriyum üretimi 600 ton civarındadır (Eskier, 2017).

3.4. Kalay Oksit Filmlerin Bazı Teknolojik Uygulamaları

Daha önce de bahsedildiği gibi yarıiletken filmlerin teknolojiye birçok kullanım alanı vardır. Ancak burada konu SnO₂ olduğundan daha çok kalay oksit ince filmler üzerinde durulacaktır. Kalay oksitin en belirgin özelliklerinden olan görünür bölgede yüksek iletkenlik ve yüksek geçirgenlik, kızıl ötesi bölgede yüksek yansıtıcılık, yüksek mekanik sertlik ve iyi çevresel kararlılık durumları daha önce açıklanmış ve kalay

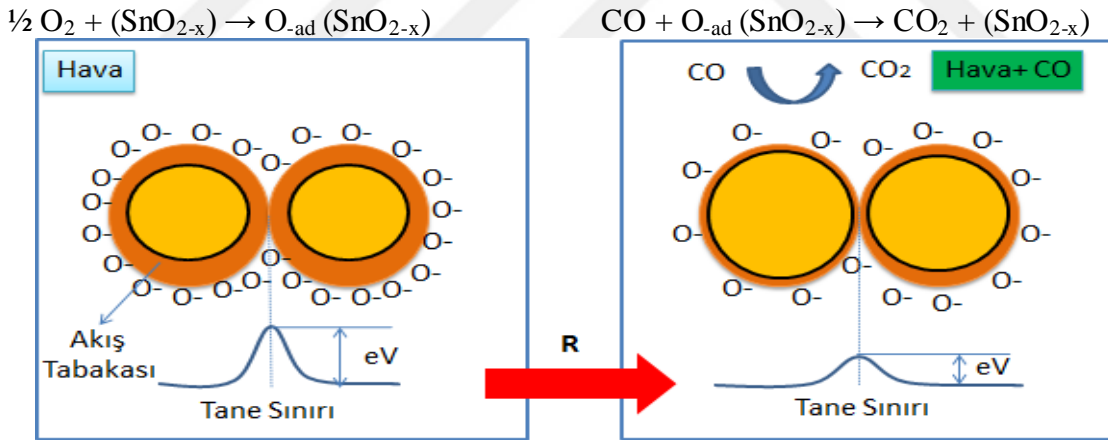
oksidin bu özelliklerinden dolayı pek çok kullanım alanı mevcut olduğu belirtilmişti. Bu kullanım alanları; gaz sensörleri, varistörler, güneş hücreleri için saydam elektrotlar, cam ergitme elektrotları ve optoelektronik cihazlar gibi alanlardır. Özellikle saydam iletken (TCO) olarak görünür bölgede geçirgen olmaları ve aynı zamanda kızılötesi bölgede yüksek miktarda yansıtıcı olmaları enerji dönüşüm materyali olarak kullanılmalarını oldukça yaygınlaştırmaktadır. Örneğin; güneş pillerinde, yüksek optik geçirgenliği, geniş bant aralığı enerjisi ve iyi elektriksel iletkenliği ile üst elektrot malzemesi olarak tercih edilmektedir. SnO₂ kaplı mimari camlar, görünür ışığın geçmesini sağlarken, iklim şartlarına bağlı olarak binanın içinde ya da dışında ısıyı muhafaza etmeyi sağlarlar. Akıllı camlar olarak adlandırılan daha bol içerikli mimari camlar, bir voltaj uygulanarak geçirgenliği ve renkleri değiştirebilen elektrokromik filmlere elektriksel kontak yapılan TCO'lara dayanır. SnO₂'nin bazı kullanım alanları aşağıda verilmiştir (Koçyiğit, 2014).

3.4.1. Gaz sensörleri

Gaz sensörleri ortamdaki zararlı gazları tespit etmek için kullanılan ve yarıiletken malzemeden yapılan aygıtlar olarak tanımlanır. Gaz sensörleri, yarıiletken metal oksitlerin film şeklinde bir altlık üzerine çöktürülmesi sonucu elde edilir ve farklı kalınlıklarda üretilebilirler (Sberveglieri, 1992). Gaz sensörü uygulamalarında ince ya da kalın film formunda kullanılan sensörler oldukça etkin olarak çalışmaktadır. Bu sensörler, küçük boyutlu olma, kolay üretilebilme, düşük maliyetli olma, hafif olma ve düşük güç tüketimi yapma gibi avantajlara sahiptirler. Bu özellikleri elde etmek için birçok yarıiletken, metal oksit (SnO₂ ve ZnO gibi) gaz sensörü üretiminde kullanılmaktadır (Soliman Selim, 2000). Bu avantajların yanı sıra yarıiletken metal oksitlerden elde edilen gaz sensörlerinden beklenen özellikler ise, yüksek hassasiyet, düşük çalışma sıcaklığı, yüksek kararlılık, tekrarlanabilirlik ve seçicilik, gazlara karşı hızlı reaksiyon ve hızlı olarak ilk haline dönme ve kararlı ölçüm için düşük dirençtir.

Gaz sensörlerinin çalışma prensibi, ortamdaki gaz miktarına göre yüzeydeki taşıyıcı elektron miktarının değişmesi ve sonucunda elektriksel direnç değişiminin ölçülmesi şeklinde ifade edilmektedir (Korotcenkov ve Cho, 2012). Bu durum ise yarıiletken oksit ve çevresindeki oksit ya da redükleyici atmosfer ile kimyasal ya da elektronik etkileşimin sonucu oluşturulan değişimin tespiti şeklindedir. Belirtilen

etkileşim sonucunda yarıiletken yüzeyinde elektriksel dirençte değişiklik meydana gelir ve bu şekilde ortamdaki gaz tespit edilmiş olur. SnO₂ gaz sensörü için çalışma prensibi Şekil 3.18’de verilirken yüzeydeki elektriksel direncinin nasıl değiştiği temsil edilmiştir. SnO₂ gaz sensörleri genelde yüksek sıcaklıklarda (400 °C gibi) çalışmaktadır. Sensör bu sıcaklığa ısıtıldığında oksijen olmaksızın serbest elektronlar SnO₂’in tane sınırlarında kolayca hareket ederler. Temiz havada ise oksijen, sahip olduğu elektron afinitesinden dolayı serbest elektronları tutar ve SnO₂ partikülleri üzerinde tane sınırlarında potansiyel bir bariyer oluşturur. Bu potansiyel bariyer elektronların akışını sınırlandırır ve elektriksel direnci artırır. Eğer sensör CO gibi redükleyici gaza maruz kalırsa, kalay oksit yüzeyinde adsorplanır (yüzeğe tutunma) ve CO yüzeğe oksidasyona maruz kalarak CO₂ oluşumuna neden olur. Bunun sonucunda yüzeğe oksijen miktarı azalır. Yüzeğe meydana gelen bu oluşumlardan dolayı potansiyel bariyer azalır ve elektronların daha kolay akmasına neden olur. Sonuçta elektriksel direnç azalır. Oluşan direnç değişimi ile sensörün algılama karakteristiği belirlenmektedir. SnO₂ tanesi üzerinde oluşan CO ve oksijen arasındaki reaksiyon aşağıdaki gibidir (Gürbüz, 2007).



Şekil 3.18. Kalay oksidin gaz algılama mekanizması.

Yarıiletken SnO₂ esaslı gaz sensörleri yanıcı, zehirli ve havayı kirletici gazları ortaya çıkarma konusunda çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Kalay oksitin gaz sensörü uygulamalarında, gaz sensörünün seçiciliğini, sensörün hassasiyetini ve tekrar üretilebilirliğini etkileyen parametreler vardır. Bunlar kristal boyutu, yüzey alanı ve mikro yapı olarak sıralanabilir. Kalay oksitin tane boyutunun azalması ve yüzey alanının artmasıyla gaz sensörünün hassasiyeti artmaktadır. Bu taneler yaklaşık 2-50 nm

yarıçaplarında pora sahip olup porlar mezopor olarak adlandırılmaktadır (Gürbüz, 2007).

3.4.2. Lityum iyon piller

En genel tanımıyla piller, enerjiyi elektrokimyasal formda biriktirebilen hücreler olup, kimyasal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürebilen ve enerji ihtiyacı olan birçok cihazda kullanılabilen materyallerdir. İki temel tip pil vardır:

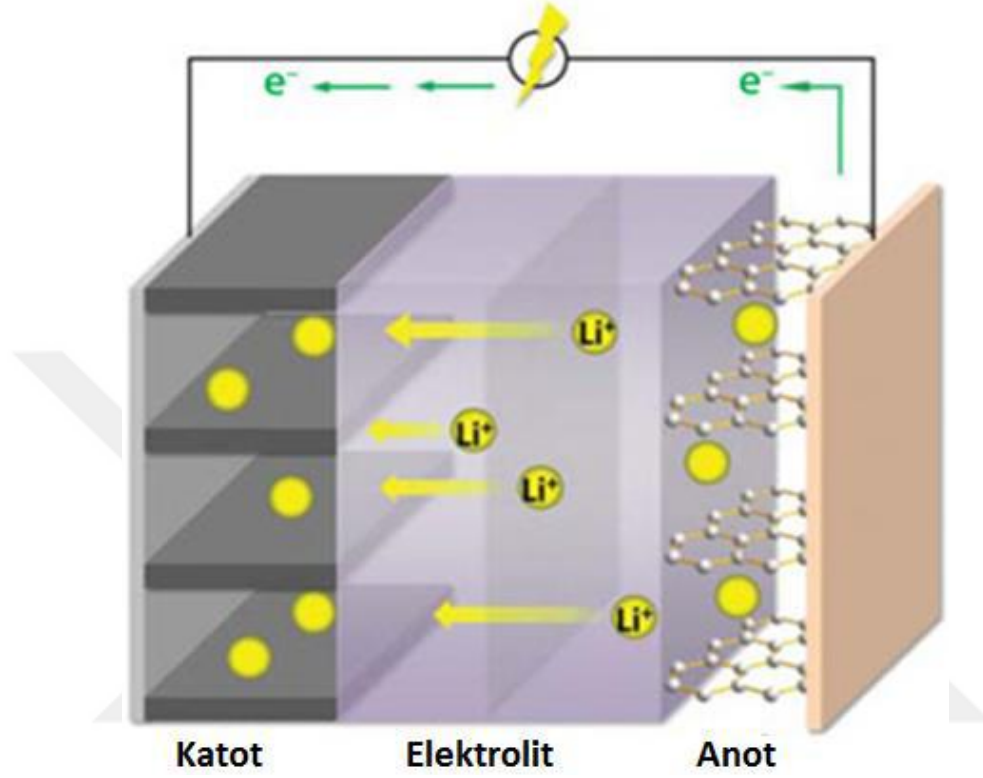
Birincil Piller: Bu tür pillerde elektrokimyasal reaksiyon dönüşümlü değildir yani bu tip piller tamamen boşaldıktan sonra tekrar kullanılamazlar. Bu sebeple tek kullanımda yüksek enerji yoğunluğu isteyen uygulamalarda tercih edilirler.

İkincil Piller: Elektrokimyasal reaksiyonun dönüşümlü olduğu bu tip piller boşaldıktan sonra tekrar akım verilerek yeniden şarj edilebilen pillerdir. İkincil bir pil türü olan lityum iyon pil ailesi ismini metal anot olan lityumdan almıştır (Alaf, 2007).

Temel bir lityum iyon pili bir pozitif elektrottan (anot), bir negatif elektrottan (katot), çözülmüş tuzlar içeren bir elektrolitten (çözelti) ve iki elektrotu birbirinden ayıran bir separatörden meydana gelmektedir. Lityum iyonları, elektrotlar arasında sürekli olarak bir geliş ve gidiş sağlarlar. Tipik bir lityum iyon pil hücresinin şematik gösterimi Şekil 3.19'da verilmiştir. Deşarj süreci boyunca lityum iyonları katottan ayrılarak elektrolit yoluyla separatörden geçer ve anot malzemesi ile bileşik oluştururlar. Benzer şekilde katottan serbest hale geçen elektronlar ise dış bir devre yoluyla anot malzemesi tarafından tutulurlar. Bunun tam aksi durumunda ise şarj süreci meydana gelir. Döngüler esnasında yüksek etkinlik ve uzun çevrim ömrü elde edebilmek için anotta bulunan lityum iyonlarının katot malzemesine herhangi bir zarar vermeden ya da kristal yapıda bir değişiklik gerçekleştirilmeden geçmesi oldukça önemli bir husustur. Bir lityum iyon pil sisteminin tasarımında çok yüksek bir çalışma voltajı elde edebilmek için doğru elektrot çiftlerinin ve elektrolitin seçilmesi büyük önem taşımaktadır (Alaf, 2007).

Yarıiletken metal oksitler, lityum iyon pillerde anot malzemesi olarak kullanılmaktadırlar. Ancak en çok tercih edilen kalay oksittir. Lityum iyon pillerde SnO₂'nin tercih edilmesinin sebebi; geleneksel karbon anot malzemesinin aksine SnO₂'nin iki kat daha fazla Li⁺ iyonu depo edebilmesidir. Bu durum pillerin şarj ve

depolama kapasitesinde önemli bir artış sağlamaktadır. Bundan nedenle SnO_2 'nin Li-iyon pil teknolojisinde anot malzemesi olarak kullanımı oldukça önem arz etmektedir (Alaf, 2007).



Şekil 3.19. Tipik bir lityum iyon pil hücresinin şematik olarak gösterimi (Ano nim, 2013a).

3.4.3. Güneş pilleri

Genel bir tanımla, güneş pili, güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çevirebilen bir p-n eklem diyotudur. Yüksek verime sahip güneş pilleri, ilk kez 1954 yılında difüze edilmiş bir silisyum p-n eklemi kullanılarak geliştirilmiştir. Yarıiletken bir diyot olarak çalışan güneş hücresi, güneş ışığının taşıdığı enerjiyi iç fotoelektrik reaksiyondan faydalanarak doğrudan elektrik enerjisine dönüştürür. Şekil 3.20'deki resim tek kristalden yapılmış bir güneş pilini göstermektedir (Koçyiğit, 2014).

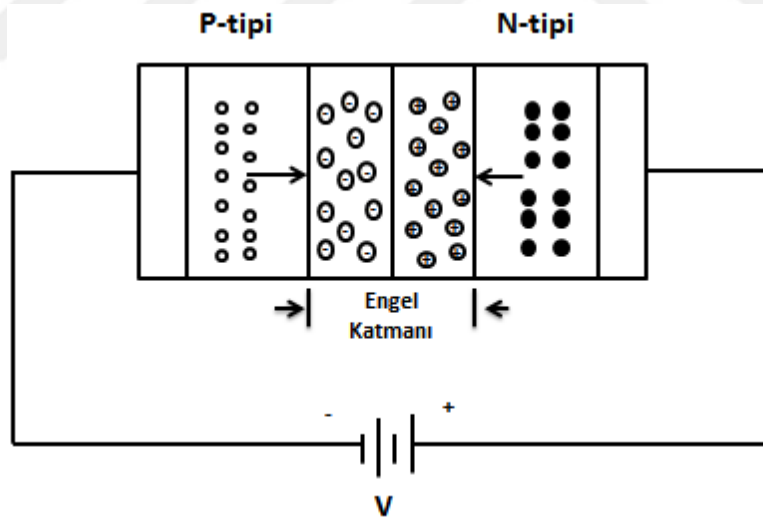
p-n eklem diyotu, yarıiletken materyallerden n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin birleşmesiyle elde edilen bir diyot çeşididir. Serbest yük taşıyıcısı olarak n-tipi yarıiletkende donör atomlarının fazlalık elektronları ile p-tipi yarıiletkende akseptör

atomlarının elektron eksikliğinden kaynaklanan boşluklar vardır. Eklem oluşturulduğunda meydana gelen bu yeni denge hali p-n eklemi olarak adlandırılır (Koçyiğit, 2014).



Şekil 3.20. Tek kristalden yapılmış bir güneş pili (Anonim 2011a).

Şekil 3.21’de bir p-n eklemi görülmektedir. Şekilde gösterildiği gibi p-n eklemleri elektron akışının sadece bir yönlü akmasına müsaade ederler. Yani p’den n’ye geçmeleri yönünde kuvvet uygularken, ters yöndeki geçişlere izin vermezler. Bu sebeple p-n eklemi bir diyot görevi görmektedir (Şafak, 1989).

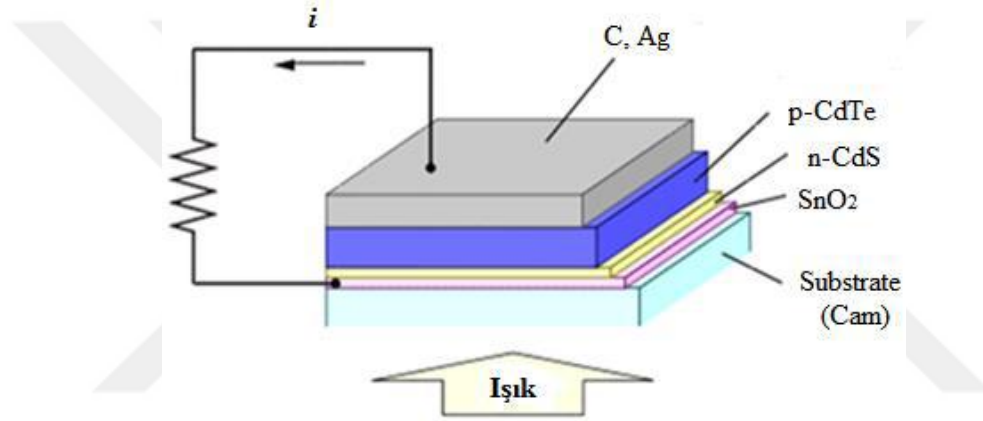


Şekil 3.21. p-n eklem diyotu.

p-n Ekleminde akım üretilmesi, p-n eklemine ışığın gelmesiyle enerji kazanan elektronların ekleminden geçerek devreye güç sağlamasıyla meydana gelir. Elektronların bu hareketi sayesinde devreden akım geçer. Yani, yarıiletken tarafından soğurulan ışık akısının fotonları, yarıiletken parçanın iki tarafında ayrı ayrı toplanan elektron-hol çiftlerini oluşturur. Bu durum sonucunda, eklem aydınlanan yüzü ve eklemeye düşen

ışığın yoğunluğuyla orantılı bir elektrik akımı meydana gelir. Bu akım, atmosfer ve güneş ışığının geliş açısı gibi çeşitli etkenlere bağlıdır (Şafak, 1989).

Kalay oksit ince filmleri, güneş pillerinde pencere materyali olarak yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Şekil 3.22’de CdTe (Kadmiyum tellür) güneş hücresinin temel yapısı gösterilmektedir. Burada SnO₂’nin üst elektrot olarak kullanıldığı görülmektedir. Saydam iletken kalay oksitler, güneş hücrelerinin verimi açısından son derece önemlidir. Daha kaliteli saydam iletken kalay oksit malzemeler üretilerek güneş hücrelerinin verimini arttırmak yönündeki çalışmalar hızla devam etmektedir (Wang ve ark., 2014).



Şekil 3.22. CdTe güneş pili (Anonim 2011b).

Güneş pilinin üreteceği gücün maksimum olması için aşağıdaki şartlar sağlanmalıdır;

- Kısa devre akımı maksimum olmalıdır, bu şartın sağlanması için foton şiddeti yoğunlaştırıcı sistemler kullanılabilir.
- Açık devre gerilimi yüksek olmalıdır, bu şartın sağlanması için yükseltmek için sızıntı akımı küçük olmalıdır.
- Seri direnç düşük olmalıdır, böylece güneş pilinin dolun faktörü değeri artırılabilir (Uğur, 2015).

3.4.4. Mimari camlar (kızıl ötesi yansıtıcı olarak)

Camın optik özellikleri; cam kalınlığı, rengi, katman sayısı, tekstürü, camın yüzeyine uygulanan kaplama malzemeleri ve güneş ışığının geliş açısı (θ) ile

değiştirilebilirken; istenen dalga boylarındaki ışınımı geçirip, istenmeyen dalga boylarındaki ışınımı dışarıda bırakabilecek malzeme türleri ile üretilebilmektedir (Ayçam ve Utkutuğ, 1999). Mimari camlar, elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesindeki ışığı güçlü bir şekilde yansıtabilirler. Camdan içeriye alınan ışınım, üzerine düştüğü yüzeylerde soğurulduğu oranda ısı enerjisine dönüştürülmekte ve bir kısmı malzeme içinde depolanırken bir kısmı konveksiyon ve uzun dalga kızılötesi ışınım yolu ile çevreye yayılmaktadır. Neredeyse bütün mimari camlar 120 °C'nin altındaki sıcaklıklardaki yüzeyler tarafından yapılan uzun dalga kızılötesi ışımaya karşı korumalı olup, bu özellikleri çeşitli film kaplamalar ile daha çok geliştirilebilmektedir. Mimari camların bu özelliği, sera etkisi oluşturarak güneşten gelen ışıklardan özellikle görülebilir alan ve kısa dalga kızılötesi ışınım tarafından taşınan enerjinin ısı enerjisi olarak mekanlarda tutulması ve yığılmasını sağlamaktadır. Şeffaf yüzeyler uzun dalga kızılötesi ışınım geçirgenliklerine bağlı olarak, ışınım yolu ile kendisinden daha sıcak yüzeylerden ısı kazanabilir ya da kendisinden daha soğuk yüzeylere ısı kaybedebilirler (Ayçam ve Utkutuğ, 1999). Kalay oksit kaplamalar, kızıl ötesi bölgede iyi bir yansıtıcı olmaları ve görünür bölgede iyi bir geçirgen olma özellikleri ile mimari camlar açısından son derece önem arz etmektedirler.

3.4.5. Uçak camları (ısıtıcı eleman olarak)

Kalay oksit filmlerin uçak pencerelerinde kullanılmasının nedeni; pencerenin üzerine uygulanan ince kalay oksit filmlerin buzları buharlaştırarak uzaklaştırmasının sağlanmasıdır. Bu şekilde yükseklerde uçan uçakların camlarının -50 ila -60 °C civarındaki sıcaklıklarda buz tutması engellenmiş olur (Alaf, 2007).

3.5. İnce Film Büyütme Teknikleri

Günümüz teknolojisinde ince filmlerin elde etme metotları da filmlerin kullanılacakları alanlara göre son derece önemlidir. Mühendislikte, endüstride ve temel elektronik cihazlarda kullanılacak olan yarıiletken filmlerin kaliteli ve kullanıldıkları cihazların performansları yüksek olmalıdır. Bu koşullar direkt olarak filmlerin elde edilmesinde kullanılan metotlarla ilgilidir (Gürbüz, 2007).

İnce filmlerin üretimi için kullanılan teknikler iki ana başlık altında incelenebilir. Bunlardan ilki fiziksel teknikler, ikincisi ise kimyasal tekniklerdir. Yukarıda bahsedildiği gibi oluşturulan ince filmin mikroyapısı ve buna bağlı olarak fiziksel özelliklerinin üzerinde çökeltme yöntemlerinin etkisi büyüktür. Depolama tekniklerinin tamamında, üretilen filmlerin kararlılığı ve tekrarlanabilirliği ve homojen bir tabaka elde edilmesi son derece önemlidir. Bu kaplama yöntemlerinden bazıları Çizelge 3.3’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.3. İnce Film Elde Etme Metotları (Gürbüz, 2007)

Fiziksel Kaplama Metotları	Kimyasal Kaplama Metotları
<ul style="list-style-type: none"> • Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) <ul style="list-style-type: none"> - Reaktif Buharlaştırma - Aktif Reaktif Buharlaştırma - İyon Kaplama (Ion Plating) • Sputter (Saçtırma) Yöntemi 	<ul style="list-style-type: none"> • Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) <ul style="list-style-type: none"> - Thermal CVD - Plazma CVD - Foto CVD • Sol – Jel <ul style="list-style-type: none"> - Santrifüjle Kaplama (Spin Coating) - Daldırma Yöntemi (Dip Coating) - Akma (Flow) Yöntemi - Elek Baskı (Screen Printing) Yöntemi - Elektrosprey (Electrospraying) Yöntemi • Spray Pyrolysis

Genel olarak ince film kaplama yöntemleri üç basamakta gerçekleştirilir:

- a) Kaplaması yapılacak olan malzemenin sentezi (Atomik, moleküler veya iyonik numunelerin oluşturulması)
- b) Bu numunelerin bir ortamdan geçirilmesi (Kaplanacak malzeme kaynağından altlık üzerine olan kütle transferi)
- c) Altlık üzerinde çekirdeklenme ve büyüme (Bir alt tabaka üzerine bu numunelerin toplanması)

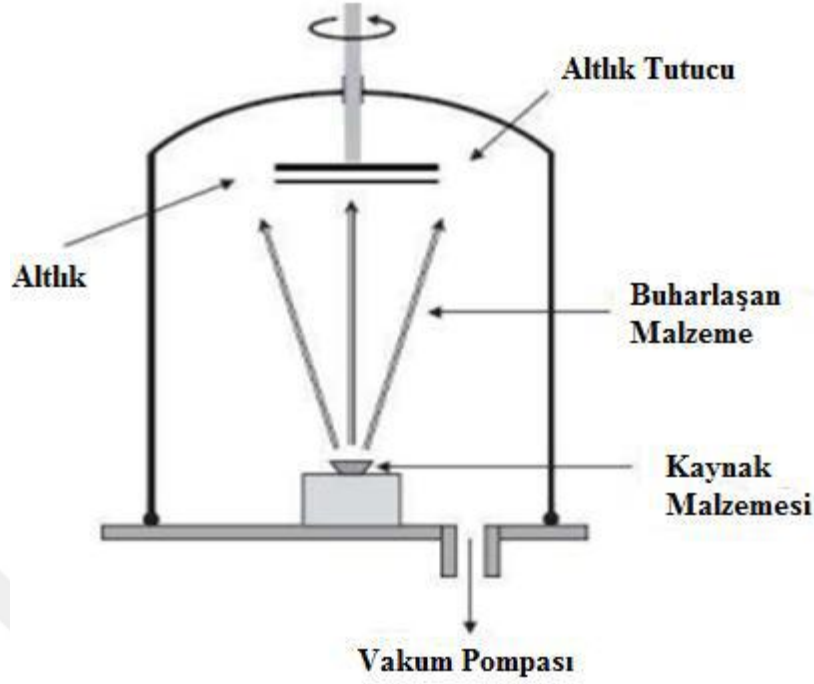
Yukarıdaki adımlar sürece bağlı olarak birbirinden bağımsız gerçekleşebileceği gibi, birbirini izleyen adımlar şeklinde de gerçekleşebilirler. Her bir adımın birbirinden bağımsız olarak gerçekleştiği süreçler esneklik ve kaplama malzemesi özelliklerinin ayarlanması açısından avantaj sağlamaktadır. Kaplama tekniğinin seçiminde belirleyici rol oynayan önemli parametreler, sistem maliyeti ve kaplama malzemesinden beklenen performanstır (Gürbüz, 2007).

Yukarıda verilen bazı ince film tekniklerinin yanı sıra günümüzde yeni yeni uygulanmaya başlayan; Kimyasal banyo depolama, Moleküler demet epitaksi (molar beam epitaxy, MBE), Palslı filtreli katodik vakum ark depolama (PFCVAD), Atmalı lazer depolama (pulsed laser deposition-PLD, Langmuir-blodgett tekniği (organik ince film yapımı), Elektrokimyasal çöktürme yöntemi, Elektroforez kaplama yöntemi, Sıralı iyonik tabaka adsorbsiyon ve reaksiyonu tekniği (SILAR) gibi film kaplama teknikleri de bulunmaktadır. Aşağıda bazı tekniklerle ilgili ayrıntılı bilgiler verilmektedir.

3.5.1. Fiziksel buhar depolama (physical vapour deposition-PVD)

Fiziksel buhar biriktirme (çöktürme) yöntemi; katı bir kaynaktan çıkan, kaplaması yapılacak olan bir veya birden çok bileşenin, ısı enerjisi yardımıyla önce gaz fazına dönüştürülüp, ardından altlık üzerine uygulandığı kaplama tekniği olarak tanımlanabilir. Gerekli olan gaz fazını elde etmek için, kaynak vakum altında yeterli bir sıcaklığın üzerinde tutulurken aynı anda buharlaşma için gerekli olan enerjiyi verecek bir destek sıcaklığının da sağlanması gerekmektedir. Kullanılacak malzeme bir kroze içinde ısıtılarak gaz fazı elde edilebildiği gibi elektron bombardımanı veya lazer ışını ile de istenilen gaz fazı oluşturulabilir. PVD tekniğinin en önemli özelliği, fiziksel yardımla buharın kaynaktan altlığa geçmesi işlemidir. Bu işlem, oluşturulan bir vakum ortamındaki gaz moleküllerinin ortalama serbest yolunun büyüklüğünün, depolama haznesinin boyutundan ve kaynak-altlık uzaklığından daha büyük olmasıyla oluşturulabilir. Düşük basınç ortam şartları altında molekül hazneleri olarak malzemenin kaynaktan altlığa geçişi gerçekleşir (Koçyiğit, 2014).

Vakum altında kararlı kalabilen her türlü malzemenin biriktirilmesi bu yöntemle yapılabilmektedir. Bu yöntem ile elde edilen kaplamaların uygulama alanı çok geniştir. Dekoratif uygulamalarda, çeşitli mühendislik uygulamalarında, kimyasal, nükleer, mikroelektronik ve diğer ilgili endüstri alanlarında ve birçok yerde kullanılır. Bu yöntemin kullanımı, modern teknolojinin talepleri doğrultusunda artmaktadır. Yüksek sıcaklık dayanıklılığı, darbe direnci, spesifik optik, elektrik veya manyetik özellikler, aşınma direnci, kompleks şekilli parçaların kaplanabilmesi, biyolojik uyum ve fiyat gibi birçok özelliklerin bir arada istenmesinden dolayı PVD tekniklerinin kullanımı sürekli artış göstermektedir (Jarligo ve ark., 2014).

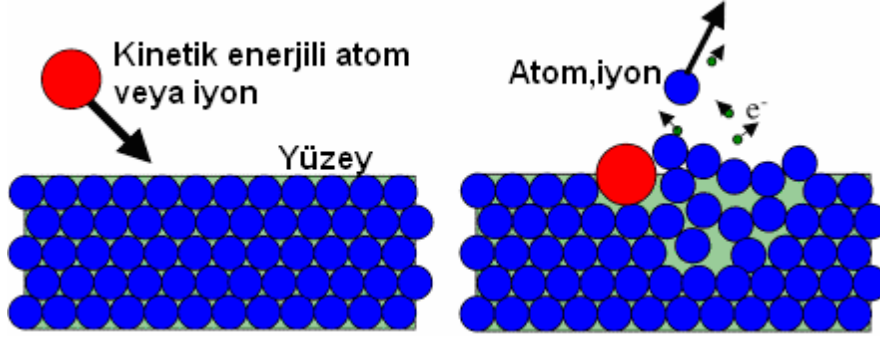


Şekil 3.23. Fiziksel buhar depolama deney düzeneği (Stenier, 2004).

3.5.2. Sputter (saçtırma) kaplama yöntemi

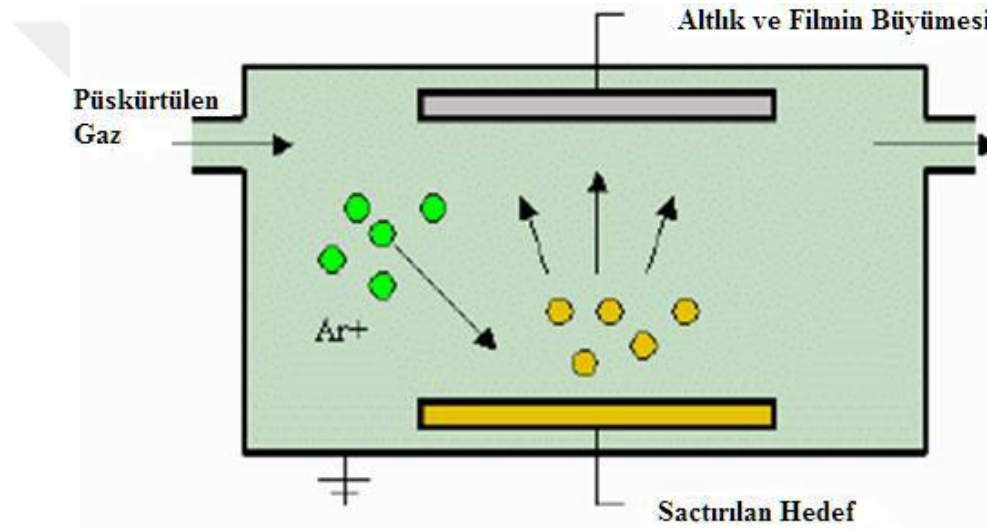
Sputtering (saçtırma) kaplama işlemi, bir hedef malzemenin yüzey atomlarının, iyonize olmuş gaz atomları (genellikle nötr bir gaz) tarafından kopartılarak fırlatılması ve bu fırlatılan atomların, ince bir tabaka ile kaplanması istenen taban malzeme üzerine transferi olayıdır. Buhar numuneleri, buharlaştırılacak malzeme yüzeyinin (hedef malzeme) yüksek enerjili ve reaktif olmayan iyonlar ile bombardımanı sonucu atom veya moleküllerin fırlatılmasıyla elde edilir. Sputtering olarak adlandırılan bu fırlatma işlemi, yüzeye çarpan iyonlar ile hedef malzeme yüzeyinin atomları arasında momentum aktarımının bir sonucudur. Saçtırma yöntemlerinin hepsinde, kinetik enerjili parçacıklar ve yüzey atomları arasında momentum transferi söz konusudur. Şekil 3.24'de basitçe saçtırma mekanizması görülmektedir.

Fırlatılan atomlar, bir alt tabaka üzerinde yoğunlaştırılır ve istenen ince film yapı oluşturulur. Bu yöntemde, basıncı 0,1 Pa'dan 10 Pa'a kadar olan soy gaz atmosferinde, DC (Doğru akım) veya RF (radyo frekans) güç kaynağı yardımı ile plazma üretilir. Genel olarak argon veya azot gazı kullanılır. Biriktirmesi yapılacak malzeme RF jeneratörüne veya DC güç kaynağının negatifine bağlanır (Koçyiğit, 2014).



Şekil 3.24. Saçırma kaplama teknikleri için temel mekanizma (Çalışkan, 2009).

DC güç kaynağı ile elde edilmiş bir saçırma sistemi Şekil 3.25'te verilmiştir.



Şekil 3.25. DC saçırma yönteminin şematik diyagramı (Karaağaç, 2010).

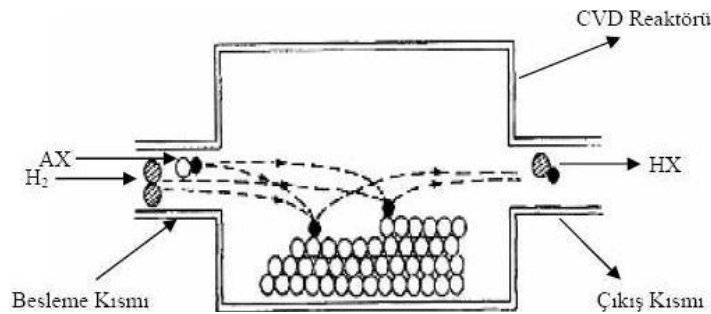
Bu yöntem, fırlatılan atom sayısı ve gelen iyon sayısı ile orantılı olduğundan, film çökeltme hızı üzerinde oldukça basit ve hassas bir kontrol mekanizmasına sahiptir. Bu yöntemin eksikliği, enerji açısından verimsiz olması ve enerjinin çoğunun ısıya dönüşerek yüksek çökeltme hızları için ciddi bir sınırlama oluşturmasıdır. Hedef-altlık sisteminin geometrisine ve iyon geçiş yoluna (tarzına) bağlı olarak çeşitli saçırma (sputtering) şekilleri vardır (Alfonso ve ark., 2012). Parlamalı boşalımla saçırma, iyon-hazne saçırma, diyot deşarj (boşalma) saçırma, magnetron saçırma, iyon demet saçırma, iyon kaplama (plating) ve reaktif saçırma bunların bir kısmı olarak sıralanabilir.

3.5.3. Kimyasal buhar depolama (CVD)

Kimyasal buhar depolama (CVD) tekniği temelde, alt tabakanın bir veya birkaç buharlaştırılmış bileşik veya reaktif gazla maruz bırakılması yöntemi olarak tanımlanır. Bu gaz veya bileşiklerden bazısı veya tümü çökeltilmesi istenen malzemenin elemanlarını içerir. Biriktirilmesi istenen malzeme altlık üzerine kimyasal buhar olarak biriktirilir. Bu buhar altlık üzerinde kimyasal olarak parçalanarak film tabakası oluşturulur. Tepkime sonucu çıkan, istenmeyen ürünler buhar olarak sistemden uzaklaştırılır (Şafak, 1989).

Kimyasal buhar depolama (CVD) metodunda kullanılan başlangıç malzemelerinin çoğu elektron, foton veya ısı etkileriyle daha reaktif parçacıklara ayrılabilen halojenler, hidratlar, metal-organikler, hidrokarbonlar ve amonyak bileşikleri gibi yüksek moleküler ağırlığa sahip gazlar veya uçucu sıvılardır. Bu parçacıklar seramik malzemenin ikincil bileşeniyle rahatlıkla reaksiyona girebilirler ve katı malzemeyi oluşturabilirler (Gürbüz, 2007). Şekil 3.26'da CVD kaplamanın şekli gösterilmektedir. Kimyasal buhar birikim işlemi, kullanılan güç kaynağına göre termal, plazma ve foto CVD gibi alt başlıklar altında toplanabilir.

Pek çok açıdan bu yöntem buharlaştırma ve püskürtme gibi fiziksel çökeltme tekniklerine benzemektedir. Her iki tip yöntemde de çökeltme işlemi bir buhar fazından oluşturulmaktadır. Fakat kimyasal buhar çökeltme ile fiziksel çökeltme yöntemleri arasındaki farklılık; bu teknikte film oluşturma işleminin, kimyasal bir reaksiyondan yararlanarak gerçekleştirilmesi ve fiziksel çökeltme tekniklerinde olan gaz moleküllerinin ortalama serbest yolunun çökeltme odası boyutları ile karşılaştırılabilir mertebede veya daha büyük olması gibi birtakım sınırlamaların bulunmamasıdır (Şafak, 1989).

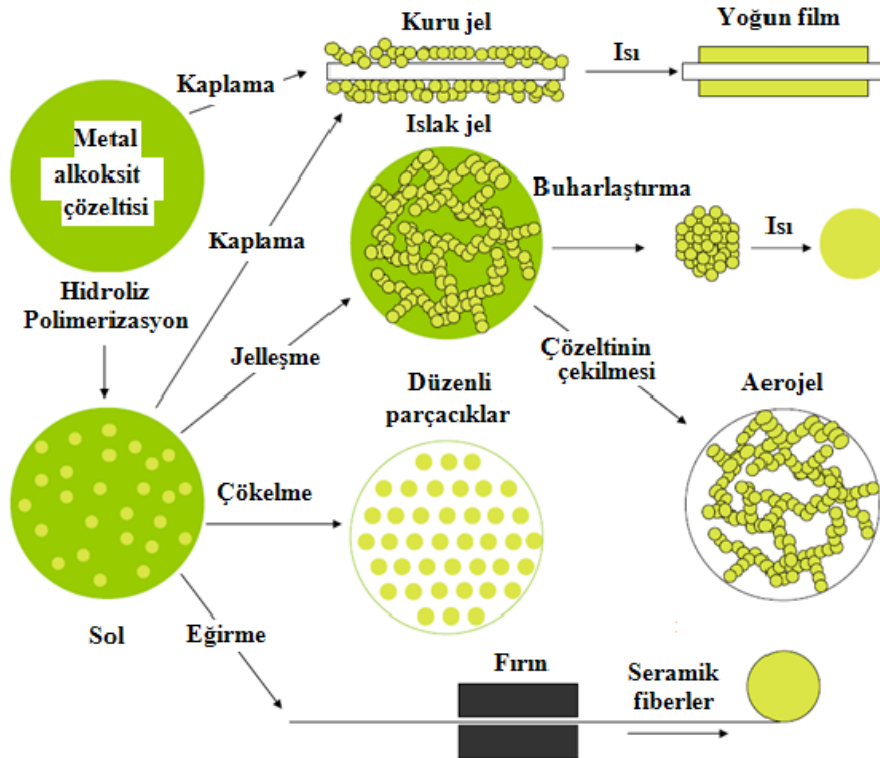


Şekil 3.26. Kimyasal buhar biriktirme sisteminin şematik gösterimi (Bunshah, 2001).

3.5.4. Sol-jel kaplama tekniği (SCM)

Sol, katı maddelerin sıvı süspansiyonu içindeki haline verilen isim olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, katı maddeler, sıvılar içinde dağılmış olarak dururlarsa bu sisteme *sol* denir. Moleküller arası Van Der Waals ve elektriksel itme kuvvetlerinin etkisi yerçekimi kuvvetine oranla daha fazladır. Bu sebeple solü oluşturan malzemeler dibe çökmezler. Eğer molekül çözelti içinde genişleyerek büyük bir boyuta ulaşırsa bu maddeye *jel* denir. Genel bir ifade ile sol-jel işlemi cam/seramik malzemelerin elde edilmesi için kullanılan bir yöntemdir.

Bu yöntem, sıvı fazdan (kolloidal “sol”) katı faza (“jel”) geçiş işlemlerinden oluşur. Sol-jel işlemi ile oldukça değişik özelliklere sahip malzemeler üretilebilir. Dünyanın en hafif maddeleri, yansıma engelli silikon güneş pilleri, yarı yansımali güneş pilleri, ultraviyole ışın filtreleri, süperiletken film yapımı, pirinç ve demir metallere oksidasyon direnci, nemden koruma amaçlı optik camlar ve güçlendirilmiş normal camlar ve tok seramikler bu yöntem kullanılarak üretilebilmektedir. Şekil 3.27’de sol-jel yönteminin işlemleri ve bazı ürünleri görülmektedir (Koçyiğit, 2014).



Şekil 3.27. Sol-jel teknolojileri ve ürünleri (Akçay, 2011).

SCM ile oluşturulan ince filmlerin özellikleri, film kalınlığına, elde edilmiş şekli ve şartlarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Sol-jel tekniği ile kaplama yapılacak altlıklar materyaller kimyasal olarak temizlendikten sonra hidroliz olabilen metal bileşik içine daldırılırlar. Numuneler atmosferde hidroliz olur, yoğunlaşır ve uygulanan ısı işlem basamakları ile numunelerin tam olarak yoğunlaşması sağlanır. Bu teknikte oluşabilecek en büyük sorun anizotropik büzülmedir. Bunun önüne geçebilmek için yanal yüzeyin yapışma (adhezyon) yolu ile genişletilmesi gerekmektedir. SCM ile çok fazla kaplama şekli vardır. Bunlar; Daldırarak kaplama, döndürerek kaplama, püskürterek kaplama, akış kaplama, laminer kaplama, merdane kaplama ve baskı kaplama olarak sıralanabilir (Evcin, 2006).

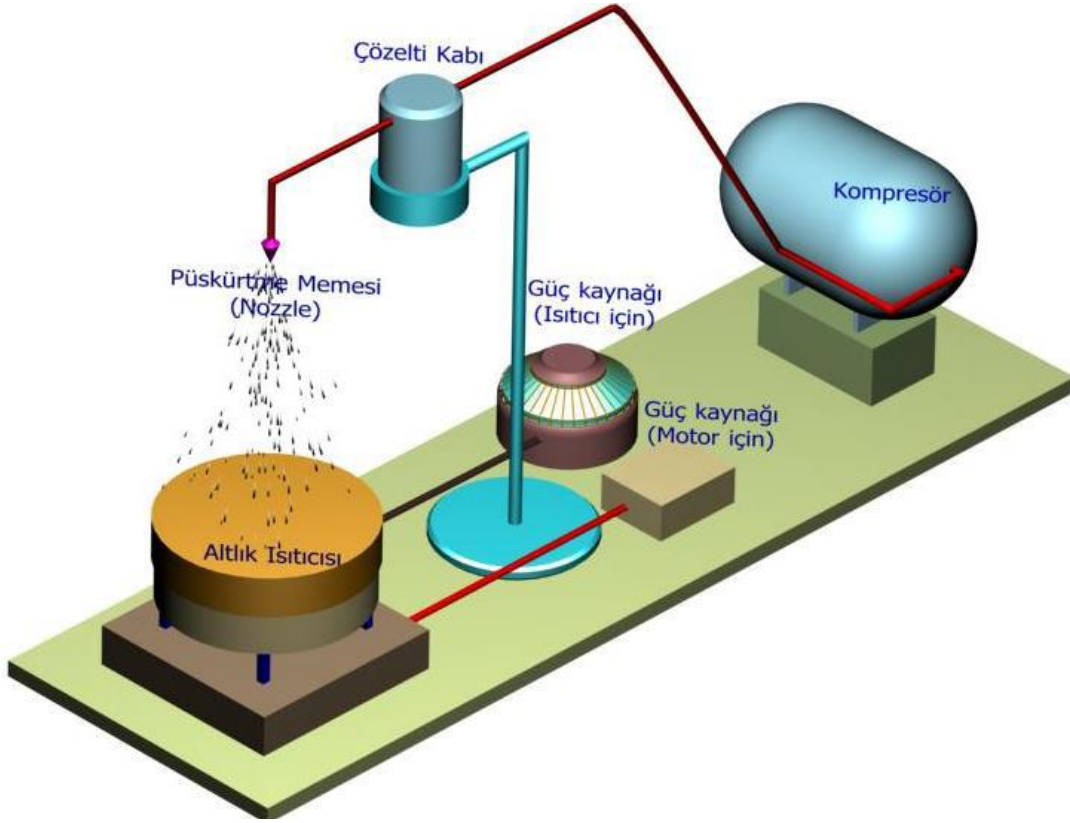
3.5.5. Spray pyrolysis (püskürtme) yöntemi

Püskürtme ile kaplama yöntemi ilk olarak Chamberlin ve Skarman tarafından güneş pili uygulamalarında CdS ince filmlerin elde edilmesi için uygulanmıştır. Daha sonra bu işlem Indium Tin oxide (ITO), PbO, ZnO, ZrO₂ gibi pek çok film yapımında uygulanmıştır (Ilican ve ark., 2005).

Sprey püskürtme yöntemi, kimyasal püskürtme veya sıcak püskürtme yöntemi olarak da adlandırılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, elde edilecek ince film için hazırlanan uygun çözeltiler, ısıtılmış tabakalar üzerine basınçlı azot gazı veya hava yardımıyla Bernoulli prensibine uygun şekilde atomize edilerek püskürtülür. Sıcak taban üzerine gelen püskürtülmüş tanecikler, kaplanacak altlık yüzeyine çözeltilerin buharlaşmasıyla yapışır. Yapışmayan tanecikler ise gaz olarak ortamdan uzaklaşır. Sonuçta altlık yüzeyinde film elde edilmiş olur. Genellikle elde edilen filmler polikristal yapıya sahip olmaktadır. Bu yöntem, basit ve ekonomik bir yöntem olması nedeniyle çokça tercih edilmekte ve yöntemle olan ilgi her geçen gün daha da artmaktadır. Özellikle yarıiletken tabakaların çöktürülmesindeki başarılı kullanımı ile önem kazanmaktadır. Spray pyrolysis yöntemi ile film elde etmenin diğer yöntemlere göre bazı dezavantajları olmasına rağmen; ekonomik ve kolay bir yöntem olmasının yanı sıra elde edilecek filmlerin çözelti olarak hazırlanıp püskürtülmesiyle, çözeltilere istenen miktarda katkı yaparak filmin fiziksel özelliklerini değiştirebilmek gibi büyük avantajlara sahiptir (Ilican ve ark., 2005).

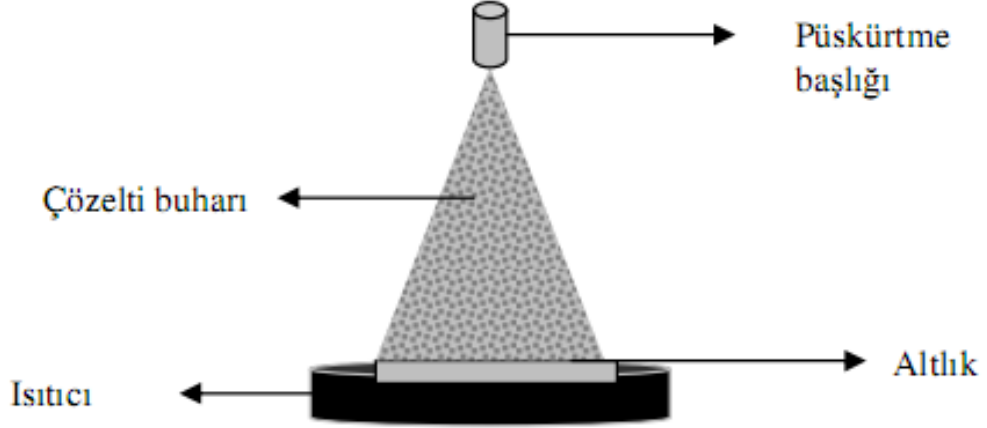
Tipik bir püskürtme sistemi; atomizer, püskürtme başlığı, başlangıç çözeltisi, altlık ısıtıcısı ve sıcaklık ayarlayıcıdan oluşmaktadır (Şekil 3.28). Püskürtme tekniğinde genellikle şu atomizerler kullanılmaktadır;

- Sıvının hava akımına maruz bırakıldığı hava püskürtme sistemi (air blast),
- Ultrasonik frekanslarla daha iyi atomizasyon için gerekli olan kısa dalga boyları üreten ultrasonik nebulizatör,
- Sıvının yüksek elektrik alanına maruz bırakıldığı durgun elektrikli sistem (Balkenende ve ark., 1996)



Şekil 3.28. Kimyasal püskürtme yönteminin şematik gösterimi (Tomakin, 2008).

Film elde etme işleminin kontrol edilebilir olması için sprej aygıtı havasız bir ortamda tutulmalıdır. Ayrıca kaplamanın yapılacağı altlık sıcaklığı istenilen oranlarda ayarlanmalıdır. Ancak havasız ortam olmasa dahi film oluşumu yine de dikkatli kontrollerle sağlanabilir. Şekil 3.29’da bir püskürtme başlığı şematik olarak gösterilmiştir (Kılınç, 2006).



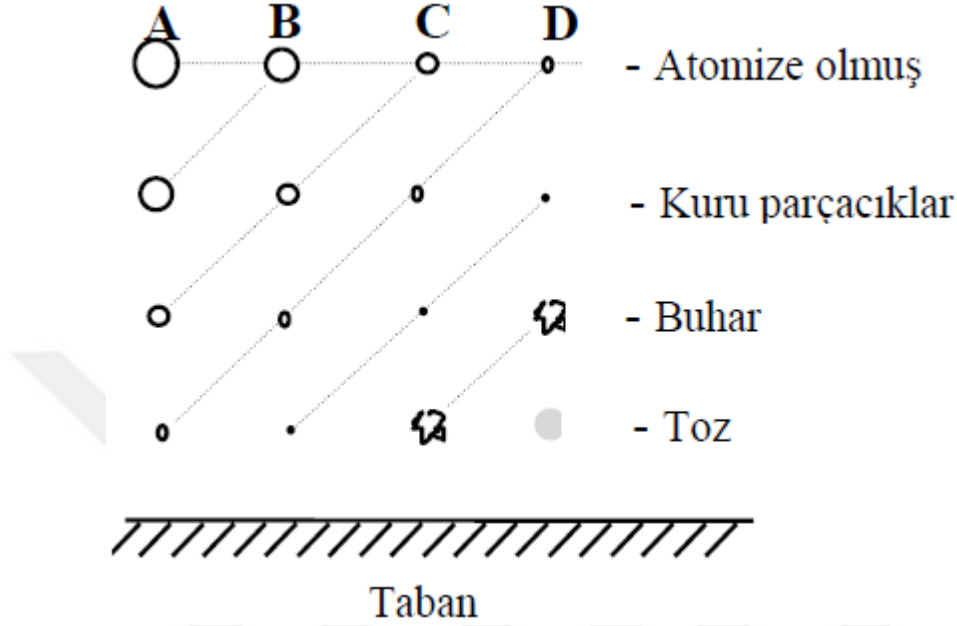
Şekil 3.29. Püskürtme başlığı (Kılınç, 2006).

Oluşturulan kaplamanın yapısı ve özellikleri; altlık sıcaklığı, püskürtme mesafesi, püskürtme basıncı, sprej hızı, sprej yoluyla püskürtülen parçacıkların büyüklüğü ve sprejin püskürtme deseni, sprej başlığının geometrisi gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Alt tabaka yüzey sıcaklığı; filmin yüzeyinin pürüzlenmesi, çatlaması, parçalanması ve kristalleşmesi gibi özelliklerini etkilerken, film yapımı için kullanılan başlangıç çözeltisi; filmin yapısını, saflığını ve uygulama alanını doğrudan etkilemektedir (Turgut ve ark., 2013).

Başka bir önemli parameter olan püskürtme mesafesi, çözelti damlacıklarının boyutlarını önemli derecede etkiler (Turgut ve ark., 2013). Çözelti damlacıklarının film oluşturacak alt tabana yaklaştığı sırada tamamen buharlaşmış olması istenen ideal taşınma durumudur. Çözelti damlacıkları tabana ulaşmadan önce tamamen buharlaşarak heterojen bir reaksiyon meydana getirirler. Bu heterojen reaksiyon olayı, yüzeyde oluşan reaksiyon moleküllerinin tabana difüzyonu, yüzeyde bir veya birden çok molekülün absorbe ve desorbe olması, molekülün örgü içerisinde birleşmesi, tabana ulaşan bazı moleküllerin yüzeyden uzaklaşması gibi fiziksel ve kimyasal olayları içerir (Koçyiğit, 2014). Bu sebeplerle, püskürtme mesafesi iyi ayarlanmalıdır. Şekil 3.30'da farklı damlacık boyutları için altlıkta filmlerin oluşma süreçleri gösterilmektedir.

A sürecinde, çözelti damlacıklarının boyutları istenen ölçülere göre oldukça büyüktür. Bu büyük damlacıkların çevrelerinden soğurduğu ısı, tabana ulaşmaya kadar buharlaşmasına yeterli olmayacaktır. Bu damlacık tabana çarptığı anda kuru bir çökelti bırakarak tamamen buharlaşır ve filmi oluşturacak kimyasal reaksiyon oluşamaz.

Damlacığın taban üzerinde belirli bir yerde buharlaşması sonucunda tabanın sıcaklığı düşer. Sonuç olarak yüzeyi pürüzlü ve kötü bir film oluşur ve iletim önemli derecede azalır (Irmak, 2006).



Şekil 3.30. Spreyden çıkan çeşitli boyuttaki damlacıkların altlığa ulaşması (Irmak, 2006).

B sürecinde, çözelti damlacıklarının boyutu A sürecindekilere oranla daha küçüktür. B sürecindeki damlacık tabana ulaşmadan içerisindeki su buharlaşır ve tabana ulaşan damlacıkların bir kısmı yoğunlaşır. Damlacıkların buharlaşması için gerekli ısı az olduğundan dolayı süreçte oluşan filmlerin yüzeylerinde delik ve çatlaklar oluşur (Irmak, 2006).

C sürecinde, çözelti damlacıklarının boyutları A ve B sürecindeki damlacık boyutlarına göre daha küçüktür. En uygun filmler bu süreçte elde edilir (Turgut ve ark., 2013). C sürecindeki bu damlacıklar tabana ulaşmadan önce tamamen buharlaşarak heterojen bir reaksiyon meydana getirirler. Bu durum uygun püskürtme mesafesi ve dolayısıyla atomizasyonla elde edilebilir (Irmak, 2006).

D sürecinde, damlacıkların boyutları öylesine küçüktürler ki damlacıklar tabandan uzakta tabana ulaşmadan erir ve buharlaşırlar. Kimyasal tepkime buhar fazında meydana gelir ve bu homojen bir reaksiyondur. Çünkü bütün reaksiyon ve ürün

molekülleri buhar fazında gerçekleşir. Bu durumda moleküller tabana toz halinde tutunduğundan film oluşumunu bozarlar ve bu süreçte de iyi bir film oluşamaz.

Bu süreçlerin hepsinde polikristal film elde edilir, ancak istenen en ideal film C sürecinde oluşmaktadır. Yapılan herhangi bir deneyde C durumu için kesin olarak koşullardan emin olmak mümkün değildir. Homojen reaksiyondan heterojen reaksiyona geçiş durumu söz konusu olduğundan damlacıkların çoğu yüksek bir depozisyon verimine erişmek için C durumuna maruz kalmalıdır (Irmak, 2006).

Püskürtme yönteminin bazı avantajları:

- Oldukça basit yapıda olması,
- Gerekli malzeme ve ortam yönünden daha ekonomik olması,
- Üretim sırasında müdahale için elverişli olması,
- Vakum ortamına ihtiyaç duyulmaması,
- Üretim aşamalarının adım adım takip edilebilmesi,
- n-tipi ve p- tipi katkılama yapıları sağlanması,
- Kompleks geometrideki alttaşların kullanılabilir olması,
- Düzgün ve yüksek kalitede film elde edebilme imkanı,
- Çok yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulmaması,
- Otomasyona uygunluğu ile seri üretimlere imkan sağlanması olarak sıralanabilir.

Bu avantajların aksine çözeltideki büyük tanecik oranlarından doğan kusurlar ortaya çıkabilir. Özellikle düşük maliyet bu tekniğin ticari işlemlerde çokça talep edilmesini sağlamaktadır. Bunun yanında; cam üzeri saydam tabaka kaplamalar, gaz sensörü uygulamaları (SnO_2 tabaka için), güneş pili uygulamaları, lityum-ion bataryalarda anot oluşumu ve yüksek kapasiteli anot uygulamaları, optoelektronik cihazların üretimi, seramik toz sentezi, nanokablo sentezi gibi pek çok alanda kullanılan bir kaplama tekniğidir.



4. MATERİYAL VE YÖNTEM

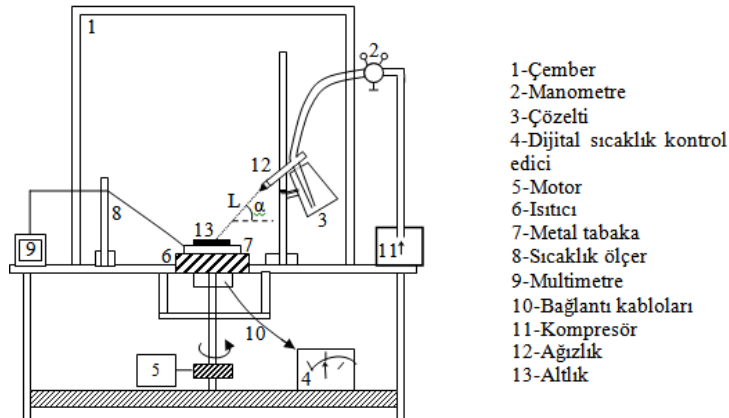
Bu bölüm kapsamında; SnO₂:Y ince filmlerin elde edilme aşamaları, kullanılan yöntemler ve bu yöntemlerle alakalı bilgilere yer verilmiştir. Daha sonra filmlerin hangi cihazlarla karakterize edildiğine değinilmiştir.

4.1. Püskürtme (Spray Pyrolysis) Yöntemi

Püskürtme yöntemi, ince film büyütme işlemlerinde çokça tercih edilmektedir çünkü son derece basit, düşük maliyetli bir yöntemdir ve bu sistemde malzeme ilavesi gayet basittir. Yöntemin çalışma aşamaları şu şekildedir:

- Sisteme eklenecek malzeme, bir çözücü yardımıyla çözüldükten sonra büyütülecek filmin çözelti formu elde edilir.
- Çözelti karıştırılarak homojen hale getirilir, daha sonra ısıtılmış tabakalar üzerine basınçlı hava yardımıyla, bernoulli prensibine uygun olarak atomizer şekilde püskürtülür.
- Sıcak taban üzerine gelen tanecikler, altlık yüzeyine buharlaşarak yapışırken, yapışmayan tanecikler gaz olarak ortamdan uzaklaştırılırlar.

Bu şekilde istenen malzemenin ince filmleri elde edilmiş olur. Deney düzeneği geometrisi Şekil 4.1 'de verilmiştir.

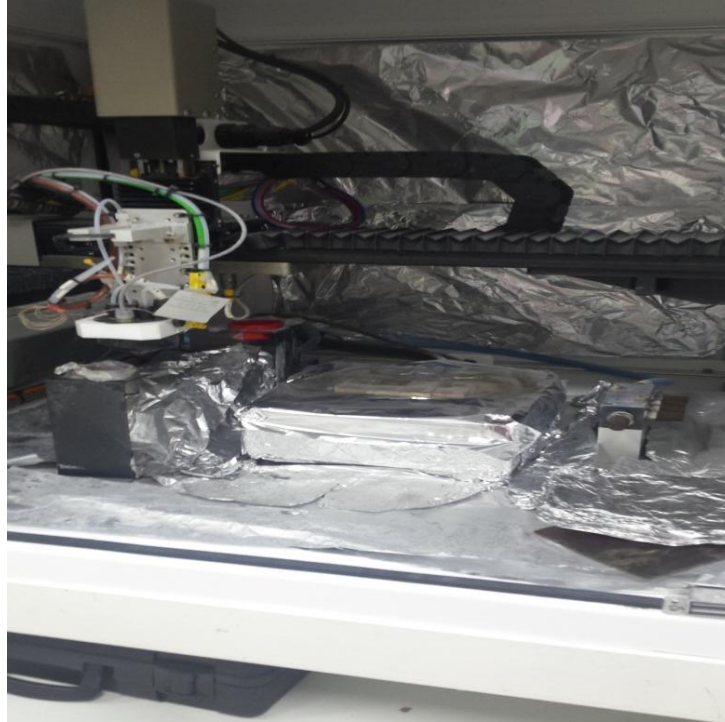


Şekil 4.1. Püskürtme (Spray Pyrolysis) sisteminin deney düzeneği (Turgut ve ark., 2012; Tatar ve ark., 2013b).

Filmlerin elde edilmesinde Sono-Tek Exacta Coat püskürtme cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.2. Sono-Tek Exacta Coat püskürtme cihazı.



Şekil 4.3. Sprey kaplama cihazı.

Deney süresince, alttaşların konulduğu metal tabaka, az çözeltiyle sayıca çok ve homojen filmler elde edilebilmek için 350 °C sıcaklıkta sabit tutulurken sprey cihazının hızı 2 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Özetle, bu parametreler baz alınarak püskürtme yöntemiyle, başta katkısız olmak üzere sırasıyla % 1, % 2, % 3 ve % 5 itriyum katkılı kalay oksit ince filmler cam ve silisyum alttaşlar üzerine kaplanmıştır.

4.2. Deneyde Kullanılan Altlıkların Hazırlanması

Püskürtme yönteminde kullanılacak olan cam alttaşlar istenen boyutlarda, cam kesici ile kesilmiş, daha sonra temizleyici solüsyonda temizlenmiştir.

Cam altlıklarda herhangi bir kir kalması camın yüzeyinde büyütülmek istenen malzemenin büyümesini büyük oranda etkilemektedir. Bu sebeple, kesilen cam altlıklar, ilk adımda ultrasonik olarak sırasıyla 5 dk. deiyonize suda, 10 dk. aseton içerisinde ve son olarak 10 dk. tekrar saf suda bekletilmiştir. Azot ile kurutulduktan sonra HCl ve su ile 10 dk. kaynatılan alttaşlar tekrar 10 dk. saf su, 15 dk. aseton ve ardından 10 dk. saf suda bekletilmişlerdir. Kurutma işlemi için tekrar azot (N₂) gazı kullanılmıştır.

Ayrıca bu çalışmada (100) yönelime ve 1–10 Ω-cm özdirenge sahip p-Si alttaş kullanılmıştır. Alttaş yüzeyinin organik ve mekanik kirlerden arındırılmış olması çok önemlidir. Altlıkların temizlemede uluslararası literatürde yaygın olarak kullanılan temizleme metodu kullanılmıştır. Bu metoda göre aşağıda belirtilen işlemler sırasıyla takip edildi:

- 1) Asetonda ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.
- 2) Metanolda ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.
- 3) Deiyonize su ile iyice yıkandı.
- 4) RCA1 (H₂O:H₂O₂:NH₃;6:1:1)'de 60 °C'de 10 dakika kaynatıldı.
- 5) Seyreltik HF (H₂O:HF;1:10) ile 30 saniye yıkandı.
- 6) RCA2 (H₂O:H₂O₂:HCl;6:1:1) 'de 60 °C'de 10 dakika kaynatıldı.
- 7) Deiyonize su ile iyice yıkandı.
- 8) Seyreltik HF (H₂O:HF;1:10) ile 30 saniye yıkandı.
- 9) 15-20 dakika akan deiyonize su içerisinde yıkandı.
- 10) Azot gazı (N₂) ile kurutuldu.

4.3. Çözeltilerin Hazırlanması ve Deneyin Yapılışı

İtriyum katkılı kalay oksit filmlerinin çözeltilerinin elde edilme aşamaları aşağıda sıralanmıştır.

0.05 M konsantrasyonlu çözelti için; 1.64 gram $\text{Cl}_2\text{Sn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ tartılıp beher içine konarak, üzerine 150 mL 2-Propanol (isopropanol) ilave edilmiştir.

Hazırlanan çözelti bir saat süresince manyetik karıştırıcıyla ısıtılarak karıştırılmıştır.

Çözelti filtreden geçirilerek püskürtme işlemi için hazır hale getirilmiştir.

0.01M konsantrasyonlu itriyum çözeltisi için; 0.15 gram $\text{Cl}_3\text{Y}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ tartılıp beher içine konarak üzerine 50 mL deiyonize su eklenmiştir.

Bir saat boyunca manyetik karıştırıcıda ısıtılarak karıştırılan çözelti filtreden geçirilerek hazır hale getirilmiştir.

Katkılama için yüzde oranı şu şekilde yapılmıştır:

% 1 itriyum katkılı kalay oksit için, 3 mL Y:59.4 mL SnO_2

% 2 itriyum katkılı kalay oksit için, 5 mL Y:49 mL SnO_2

% 3 itriyum katkılı kalay oksit için, 7 mL Y:45.2 mL SnO_2

% 5 itriyum katkılı kalay oksit için, 11 mL Y:41.8 mL SnO_2 .

Çözeltilerin hazırlanmasından sonra deneyin yapılmasına şu şekilde devam edilmiştir; püskürtme yapılacak olan alt tabaka ısıtılmaya başlanmış ve hazırlanan altlıklar her bir deney için 5 adet cam alttaş ve 1 adet silikon alttaş olacak şekilde alt tabakanın üzerine yerleştirilmiştir. Camlar yerleştirildikten sonra alt tabakanın sıcaklığı $350\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye sabitlenmiştir. Çözelti ultrasonik püskürtme cihazına, cihazın hızı 2 mm/dk olacak şekilde ayarlanarak yerleştirilmiştir. Daha sonra basınçlı hava yardımıyla ısıtılmış alttaşlar üzerine çözelti püskürtülmüştür. Son tavlama işlemi $450\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 30 dakika olarak yapılmıştır. Her bir katkılama oranı için bu işlemler tekrarlanarak itriyum katkılı kalay oksit filmler elde edilmiştir. Daha sonra katkısız, % 1, % 2, % 3 ve % 5 Y katkılı kalay oksit numuneler sırasıyla YTO, YTO1, YTO2, YTO3 ve YTO5 şeklinde isimlendirilmiştir. Tezin devamında bu haliyle kullanılacaktır.

4.4. Numunelerin Karakterizasyon İşlemleri

Püskürtme metoduyla elde edilen filmlerin XRD ölçümleri, D8 Advance, Bruker Davinci modeli X-ışınları difraktometresiyle alınmıştır (Şekil 4.4). Kullanılan ışığın dalga boyu $1,5406 \text{ \AA}$ 'dur ve ölçümlerde Cu-K α katot kullanılmıştır.



Şekil 4.4. XRD ölçüm cihazı.

Filmlerin yüzey yapısını incelemek amacıyla, mikroyapı analizleri, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile alınmıştır. Görüntüler FEI Quanta 250 FEG marka ve modellenli taramalı elektron mikroskobu yardımıyla alınmıştır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. SEM cihazı.

Elde edilen ince filmlerin görünür ışıktaki optik geçirgenliklerini (saydamlık) ve bant aralığı enerjilerini tespit etmek amacıyla UV-Vis spektrometre ölçümleri Shimadzu UV-3600 UV-Vis-nir marka ve modelli ultraviyole spektrometresi kullanılmıştır.



Şekil 4.6. UV-Vis optik soğurma ölçüm cihazı.

4.5. Akım-Gerilim Ölçümlerinin Alınması

p-Si altaşlar üzerine hazırlanan filmlerin diyot yapımı için maskeleme işleminde bu adımlar izlendi:

İki parça (5-8 mm civarında) gümüş (Ag) asetondan geçirilerek hava ile kurutuldu.

Termal buharlaştırma cihazının numune tutucu bölümüne parlak yüzeyi yukarı bakacak şekilde p-Si filmi, tungsten ısıtıcı bölümüne ise Ag metali yerleştirildi.

Basınç değeri 10^{-5} Torr değerine ulaştığında tungsten flamana ~ 30 A'lik akım verilerek gümüş metali, p-Si'un mat yüzeyine kaplandı.

Bu maskeleme işlemi cihazın basınç değeri 10^{-2} Torr değerine ulaştığında cihaz kapatılarak sonlandırıldı.

Maskeleme işlemi Nano-Vak NVBJ-400TH marka ve modelli termal buharlaştırma cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 4.7. Termal buharlaştırma cihazı.

Elde edilen $\text{Ag/Y:SnO}_2/\text{p-Si}$ yapısının, elektriksel karakterizasyonunun belirlenmesi için, bu yapının önce karanlıkta sonra solar simülatör yardımıyla 100 mW/cm^2 aydınlanma şiddeti altında $-3.0\text{-}3.0 \text{ V}$ değerleri arasında 0.02 V artışlarla akım-gerilim ($I\text{-}V$) ölçümleri alındı. Keithley 2400 sourcemeter adlı cihaz kullanılarak yapılan ölçümler ve elde edilen datalar incelendi. Işık altında yapılan $I\text{-}V$ ölçümleri sonucunda, % 1, % 2, % 3 ve % 5 katkıli diyotların ışığa duyarlılıkları az olsa da doğrultucu özelliğe sahip olduğu gözlemlendi. Saf kalay oksit yapısında diyot oluşumu gözlenememekle birlikte aygıt oluşturulamayacağı sonuçlar kısmında aktarılmak üzere kaydedildi.



Şekil 4.8. $I\text{-}V$ ölçümünde kullanılan Keithley 2400 cihazı.

Oluşturulan diyotların kapasitans-gerilim ($C-V$) ölçümleri farklı frekans değerleri için Agilent 4294A Impedance Analyzer (40 Hz-110 MHz) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin ($C-V$) ölçümleri (-3 ile 3) V 30 mV artışlarla 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 ve 2000 kHz frekans değerlerinde alınmıştır.

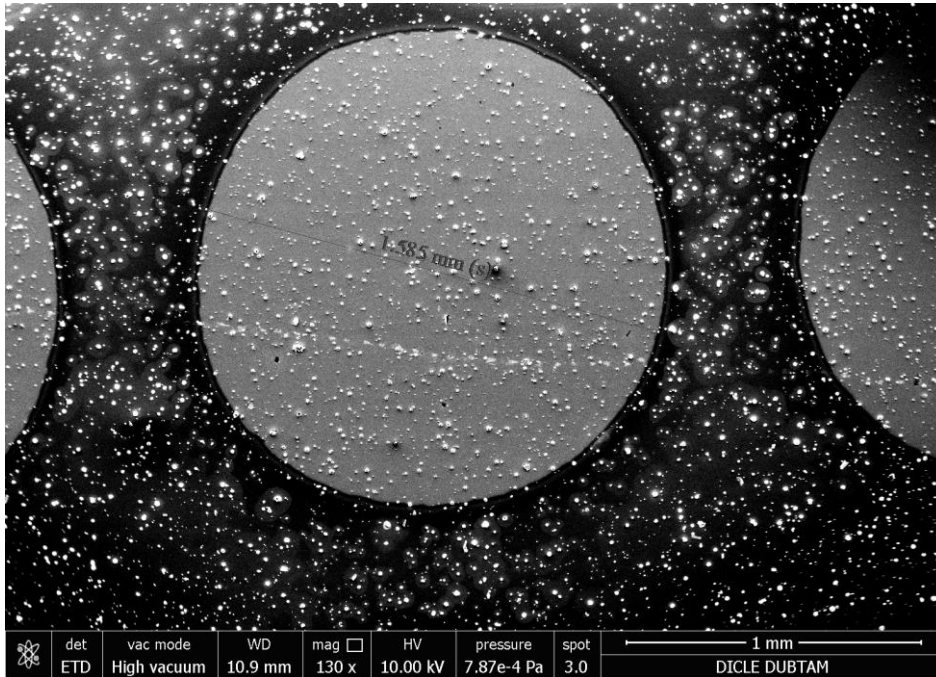


Şekil 4.9. $C-V$ ölçümünde kullanılan analizör cihazı.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

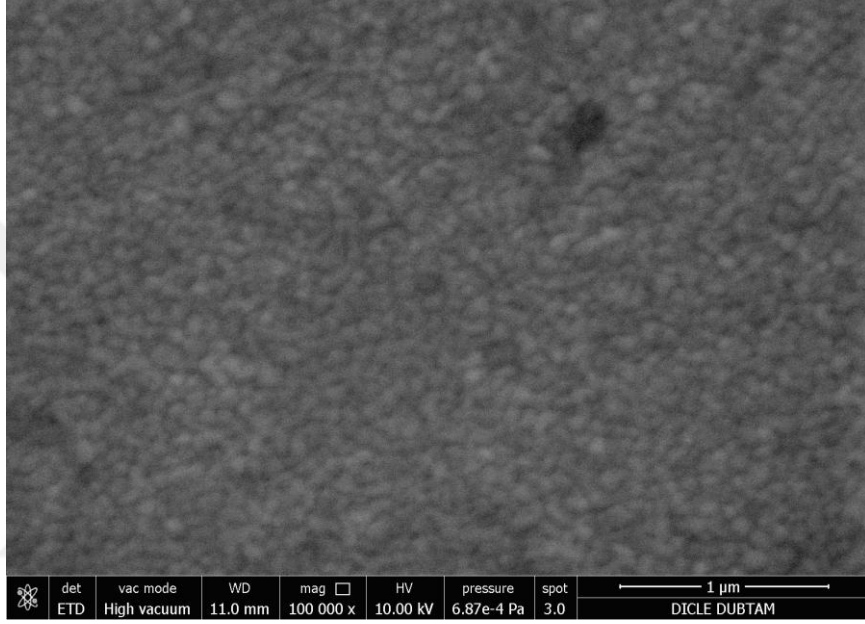
Bu bölümde, katkısız ve itriyum katkılı kalay oksit filmlerin optik özellikleri ve Ag/Y:SnO₂/p-Si diyotlarının elektriksel özelliklerinin tesbiti için alınan ölçümler ve elde edilen sonuçlar ayrıntılı olarak verilmektedir. Alınan ölçümlerle katkısız kalay oksit ve % 1, % 2, % 3, % 5 itriyum katkılı kalay oksitlerin yasak enerji band aralıkları hesaplandı. Hazırlanan Ag/Y:SnO₂/p-Si diyotlarının oda sıcaklığında karanlıkta ve farklı ışık şiddeti altındaki akım-gerilim ölçümleri ve farklı frekanslar altında kapasitans-gerilim ölçümleri alındı. Diyotların elektriksel karakteristik parametreleri olan idealite faktörü (n), seri direnç (R_s), engel yüksekliği (Φ_b) değerleri akım-gerilim ölçümlerinden Norde ve Cheung' fonksiyonları kullanılarak hesaplandı. Kapasitans-gerilim ($C-V$) ölçümleri farklı frekans değerleri için alındıktan sonra, bu ölçümler kullanılarak (C^2-V) grafikleri çizilip engel yüksekliği değerleri hesaplandı. XRD ölçümleri alınarak TC (texture coefficient), D (size), a (lattice parameter) ve ϵ (strain) sonuçları değerlendirildi. SEM görüntüleri alındı ve diyot çapı gözlemlendi.

5.1. SEM Görüntülerinin İncelenmesi

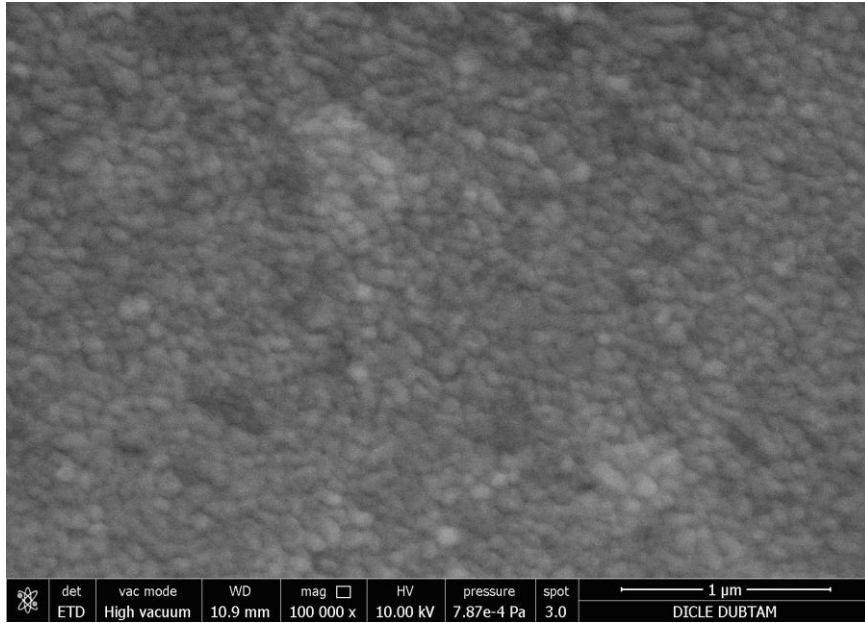


Şekil 5.1. Katkılı kalay oksit diyotundan alınan SEM görüntüsü.

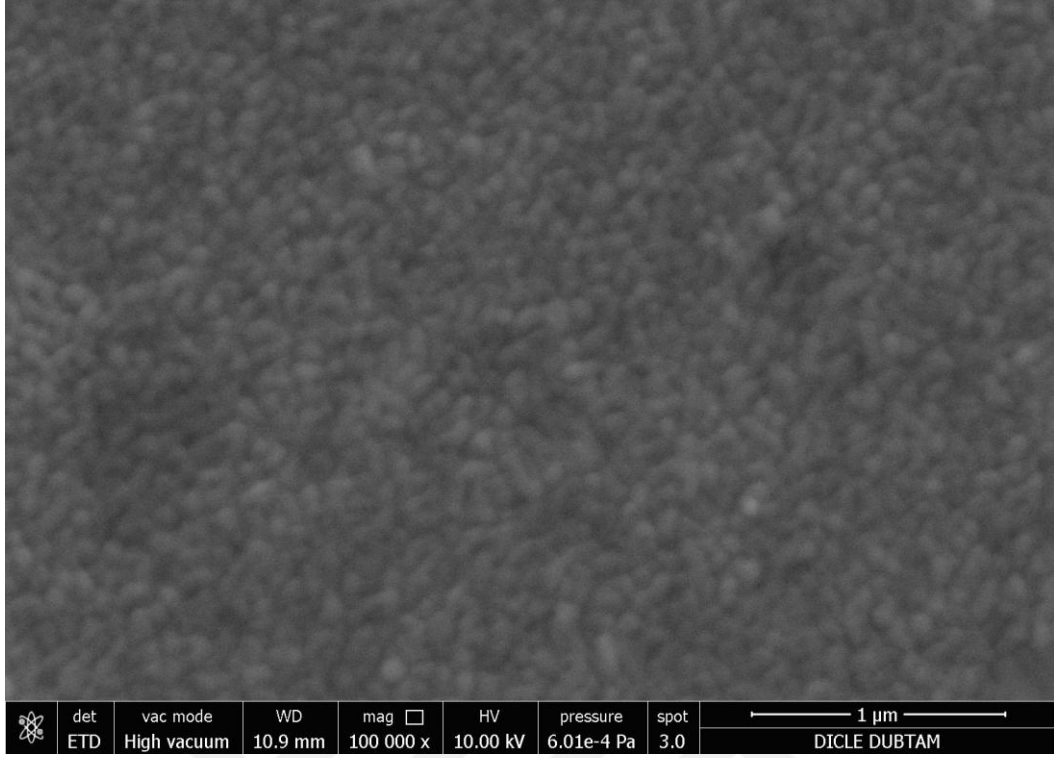
Şekil 5.1’de yüzde bir itriyum katkılı kalay oksit diyotunun 130x büyütmede görüntüsü verilmektedir. Alınan bu SEM görüntüsündeki diyotun çapı 1.585 mm olarak kaydedilmiştir. Elde edilen taramalı electron mikroskobu 100000 kat büyütme görüntüleri aşağıda verilmiştir. Bu görüntülerde filmlerin homojen yapısı görülmektedir. Konsantrasyon arttıkça homojen film yapısı bozulmayıp katkılama etkisi takip edilebilmektedir.



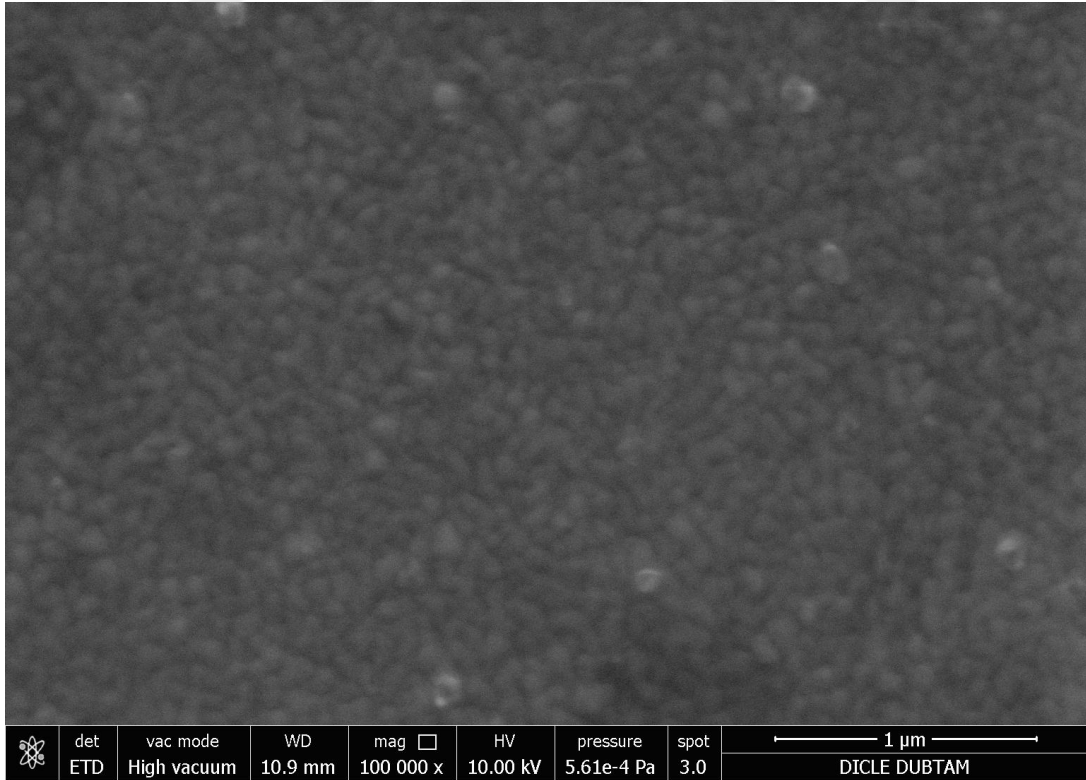
Şekil 5.2. YTO filminin SEM görüntüsü.



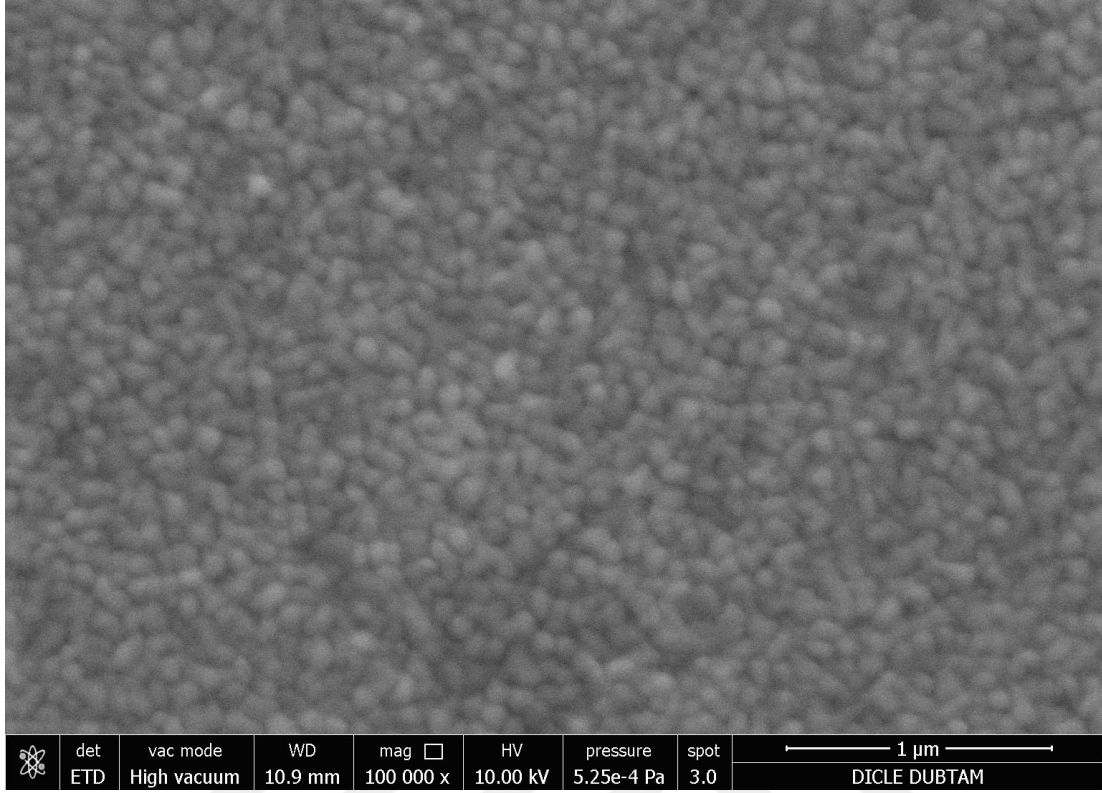
Şekil 5.3. YTO1 filminin SEM görüntüsü.



Şekil 5.4. YTO2 filminin SEM görüntüsü.



Şekil 5.5. YTO3 filminin SEM görüntüsü.

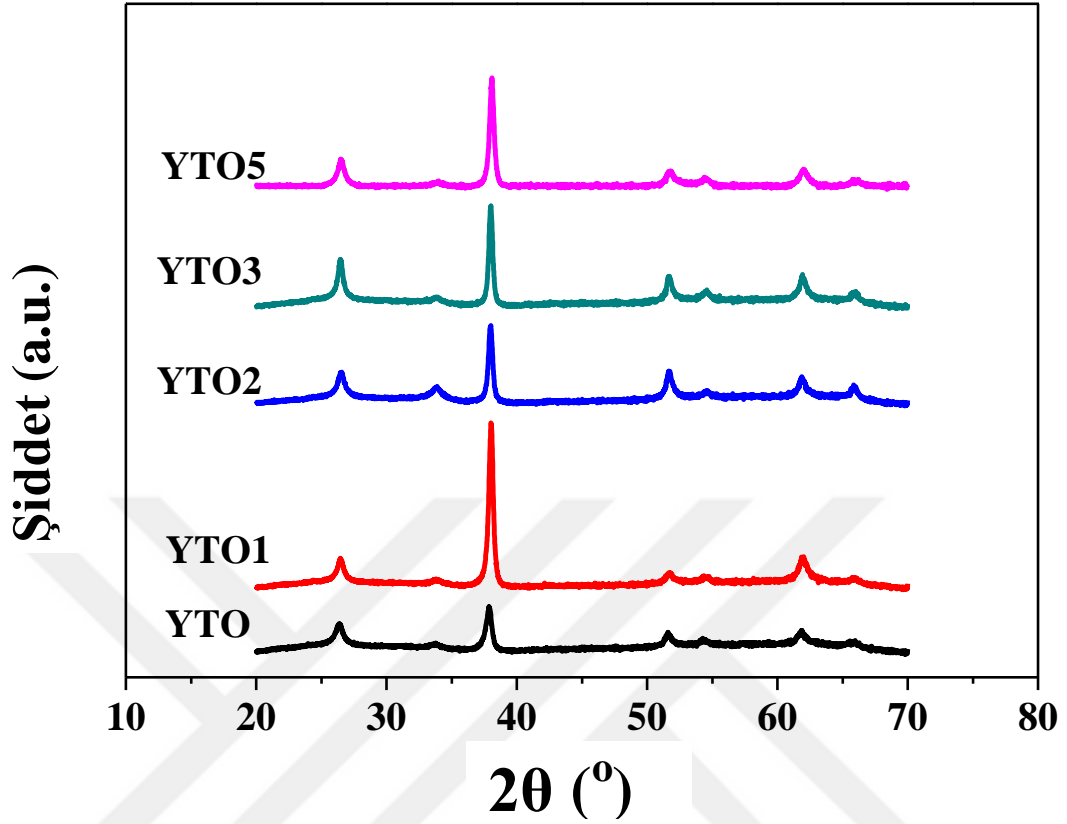


Şekil 5.6. YTO5 filminin SEM görüntüsü.

5.2. XRD sonuçlarının incelenmesi

Ultrasonik püskürtme yöntemiyle elde edilen katkısız ve itriyum katkılı kalay oksit filmlerin X-ışınları kırınım difraktometresiyle analizleri yapılmış ve XRD desenleri bir arada verilmiştir.

Katkısız kalay oksit filminin kırınım desenine bakılarak, en yüksek şiddete sahip pikin (111) yönelimli pik olduğunu söyleyebiliriz. Kristallenmenin iyi olduğu söylenebilirken, yapının örgü parametrelerinin, $a(\text{Å})=4.7380$, $b(\text{Å})=4.7380$, $c(\text{Å})=3.1900$ olduğu ve *cassiterite* olarak bilinen tetragonal yapıda olduğu ICSD kartından yararlanılarak tespit edilmiştir. Yüzde 1, 2, 3 ve 5 itriyum katkılı kalay oksit filmlerin X-ışını kırınım desenleri de benzer şekilde görünmektedir (PDF kart no: 262768). Yüzde 5 itriyum katkılı kalay oksit filminin kırınım desenine bakıldığında (110) yönelimli pikin ikinci en şiddetli pik olduğu görülmektedir. Tüm filmlerde kristallenmenin iyi olduğu ve piklerin uluslararası kartlara uygun olduğu görülmektedir. Genel olarak oluşturulan filmlerin tercihli yönelimleri (110) düzlemidir.



Şekil 5.7. Tüm filmler için XRD kırınım desenleri.

En şiddetli pikler için katkılama oranına bağlı olarak elde edilen filmlerin XRD analizlerinin sonuçları kullanılarak hesaplanabilen bazı parametreler Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Sonuç olarak, yapılanma katsayıları hesaplanmış ve tercihli yönelimlerin katkı oranına bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Tercihli yönelim değerleri:

$$TC = \frac{I(hkl)/I_o(hkl)}{N^{-1} \sum_{i=1}^N I(h_i, k_i, l_i)/I_o(h_i, k_i, l_i)} \quad (5.1)$$

Formülü ile belirlenir. Burada, yapı sabiti TC (texture coefficient) tercihli yönelimi gösterirken $I(hkl)/I_o(hkl)$; kırınımına uğramış ışının ve filme gelen ışının şiddetlerinin oranı verir. N ise kırınım piklerinin sayısı göstermektedir. Tercihli yönelim değeri kristalin kalitesi hakkında bilgi verir. Bu değer 1 den ne kadar büyükse yönelim o yönde o kadar çok ve iyi demektir (Kittel, 1996).

Çizelge 5.1. Püskürtme yöntemiyle elde edilen Y katkılı SnO yapıları filmlerin yapısal parametrelerinin katkılama oranına bağlı olarak değişimi

	YTO	YTO1	YTO2	YTO3	YTO5
TC (110)	0.55	0.52	0.53	0.54	0.02
TC (111)	1.28	1.32	1.30	1.30	2.08
D (nm) (110)	11.74	12.46	13.31	14.92	83.10
D (nm) (111)	10.97	11.51	12.85	13.66	37.45

Örneklerdeki ortalama tanecik boyutlarını hesaplamak için *Scherrer* formülü kullanılmıştır.

$$D = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (5.2)$$

D (nm) tanecik boyutu, λ kırınımında kullanılan X-ışınının dalga boyu (=1,54059 Å), β kırınım deseninde gözlenen maksimum piklerin yarı maksimumdaki genişliklerinin radyan cinsinden değeri (FWHM), θ (derece) dikkate alınan pikin Bragg yansıma açısı olarak verilmiştir. Tanecik boyutlarının yüzde katkı arttıkça arttığı gözlenmiştir. Ayrıca lattice parametreleri;

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (5.3)$$

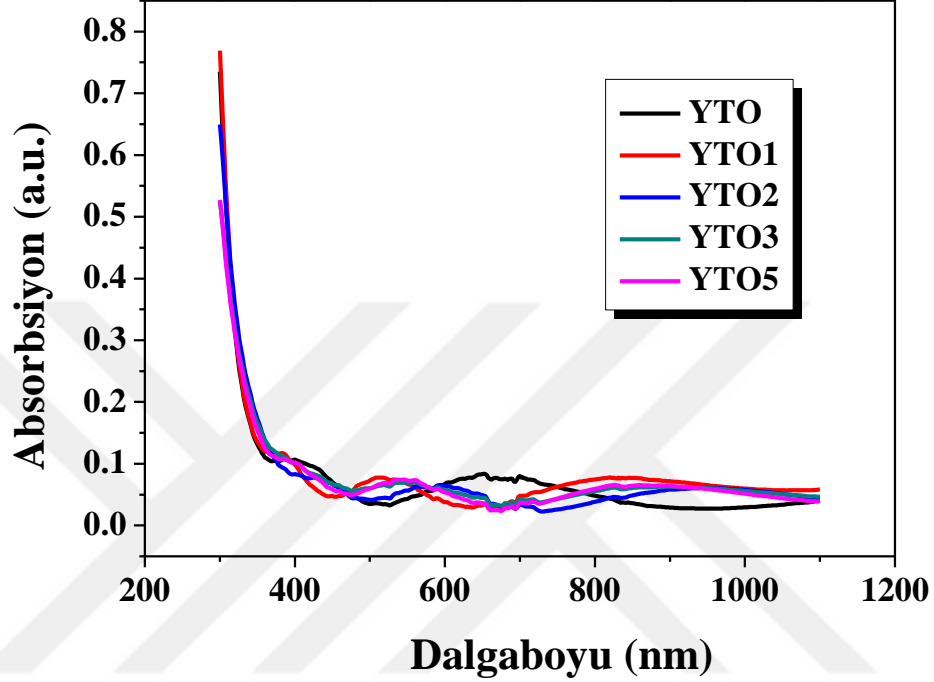
eşitliği ile hesaplanarak ICSD kartıyla uyumuna bakılmıştır.

5.3. UV-Vis Spektroskopisi Ölçümleri

Oluşturulan ince filmin görünür bölge soğurma ölçümü 300-1100 nm aralığında Shimadzu UV-3600 UV-Vis-nir spektrofotometresi kullanılarak alındı. Optik bant aralığı (E_g),

$$\alpha h\nu = B(h\nu - E_g)^m \quad (5.4)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Burada α soğurma katsayısı, B sabit sayı, $h\nu$ gelen ışığın enerjisi ve m doğrudan bant aralığı için $\frac{1}{2}$ 'dir (Pankove, 1975).

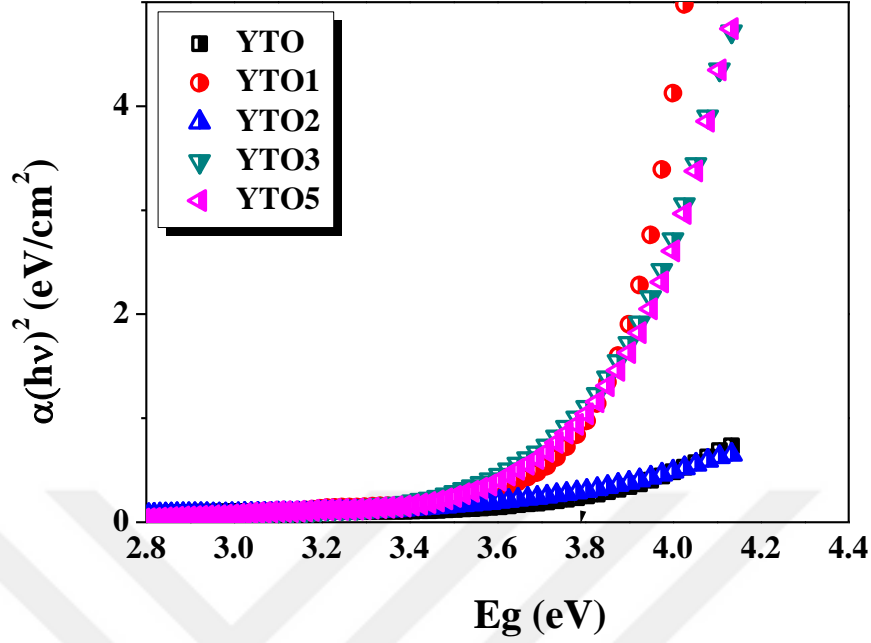


Şekil 5.8. Katkısız ve Y katkılı kalay oksit molekülünün soğurma grafiği.

Şekil 5.8 verileri ve Eş. 5.4 kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen $(\alpha(h\nu))^2 - h\nu$ grafiği Şekil 5.9'da görülmektedir. Katkısız ve Y katkılı kalay oksit moleküllerinin E_g bant aralığı $(\alpha(h\nu))^2 - h\nu$ grafiğinin lineer kısmının foton enerjisi eksenini kestiği noktadan hesaplandı. Elde edilen sonuçlara göre, bu bant aralığı ile oluşturulan filmin bir yarıiletken olarak elektriksel ve optik devre elemanı üretiminde kullanılabileceği öngörüldü.

Çizelge 5.2. $(\alpha(h\nu))^2 - h\nu$ grafiklerinin enerji eksenini kestikleri noktalardan alınan bant aralığı değerleri

Numune Adı	Katkılama yüzdesi (%)	Bant aralığı (E_g)
YTO	0	3.66 eV
YTO1	1	3.77 eV
YTO2	2	3.79 eV
YTO3	3	3.82 eV
YTO5	5	3.85 eV



Şekil 5.9. İtiryum katkılı ve katkısız kalay oksit molekülünün $(\alpha(hv))^2-hv$ grafiği.

Katkılama oranı arttıkça bant aralığının arttığı görülmektedir. Katkılama miktarının değişimi ile teknolojik amaca uygun band aralığında filmler üretilebilirliği denenebilir. Bu durum katkılamanın kalay oksit filmleri teknolojide daha kullanışlı hale getirebileceğini göstermektedir.

5.4. Y/SnO₂/p-Si Diyodunun Akım-Gerilim Karakteristiği

Akım-gerilim (I - V) ölçümlerinden üretilen Y/SnO₂/p-Si yapısının doğrultucu özelliğe sahip olduğu görüldü. Sabit V potansiyeli altında tutulan bir diyottan geçen akım,

$$I = I_0 \exp\left[\frac{e(V-IR_s)}{nkT}\right] \quad (5.5)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir. Bu denklemde; e elektronik yük, V uygulanan gerilim, R_s seri direnç, n boyutsuz idealite faktörü, k Boltzman sabiti, T mutlak sıcaklık ve I_0 doyma akım değeri olarak tanımlanır. I_0 doyma akımının değeri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$I_0 = AA^* \exp \left[-\frac{e\Phi_b}{kT} \right] \quad (5.6)$$

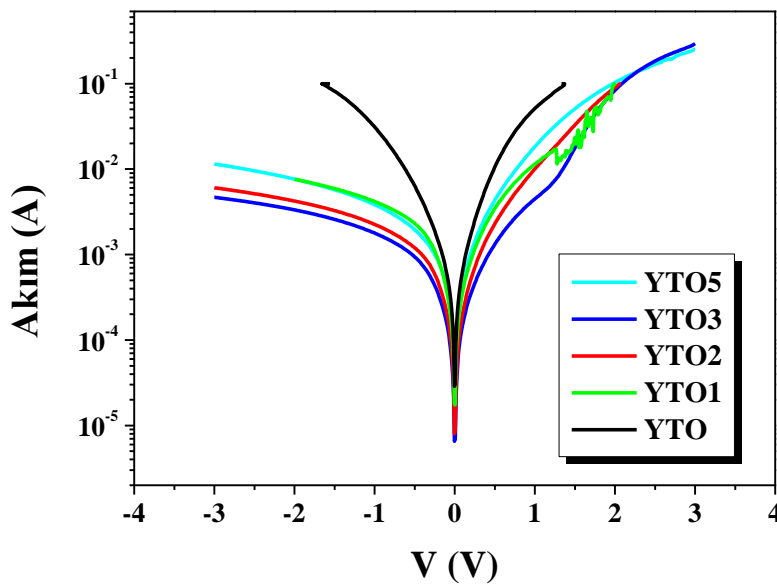
Burada; A diyotun yüzey alanı, A^* Richardson sabiti ve Φ_b ise engel yüksekliğidir. Bir diyotun idealite faktörü değeri $\ln I$ - V grafiğinin lineer bölgesinin eğimi yardımıyla,

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (5.7)$$

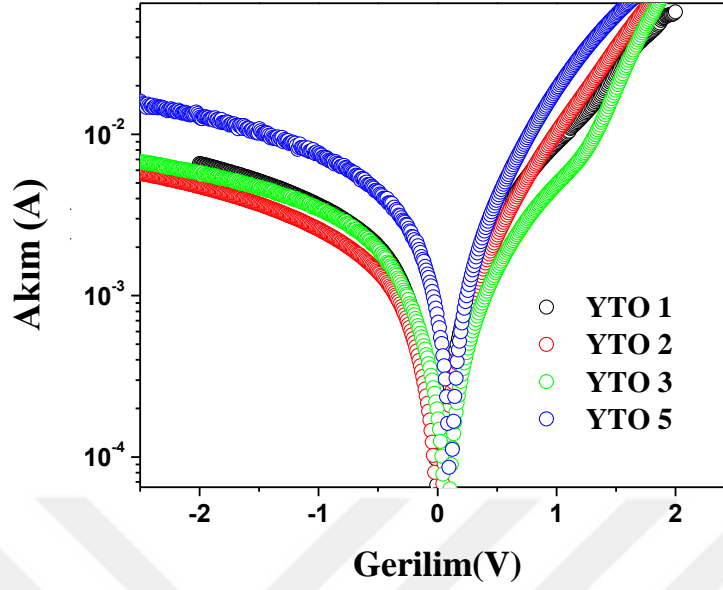
formülü kullanılarak hesaplanır. Diyota ait engel yükseklikleri $\ln I$ - V grafiğinin *akım* eksenini kestiği noktadaki doyma akım değeri olan I_0 kullanılarak,

$$\Phi_b = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^* T^2}{I_0} \right) \quad (5.8)$$

formülü ile hesaplanabilir. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen ortalama engel yüksekliği 0.505 eV olarak bulundu. Bu değerın literatüre uygunluğu kalay oksit kontaktların aygıt yapımında rahatlıkla kullanılabileceğini göstermektedir (Karadeniz, 2001).



Şekil 5.10. Oluşturulan Ag/ Y:SnO₂ /p-Si diyotlarının karanlıkta $\ln(I)$ - V grafiği.



Şekil 5.11. Oluşturulan Ag/ Y:SnO₂ /p-Si diyotlarının ışık altında ln(I)-V grafiği.

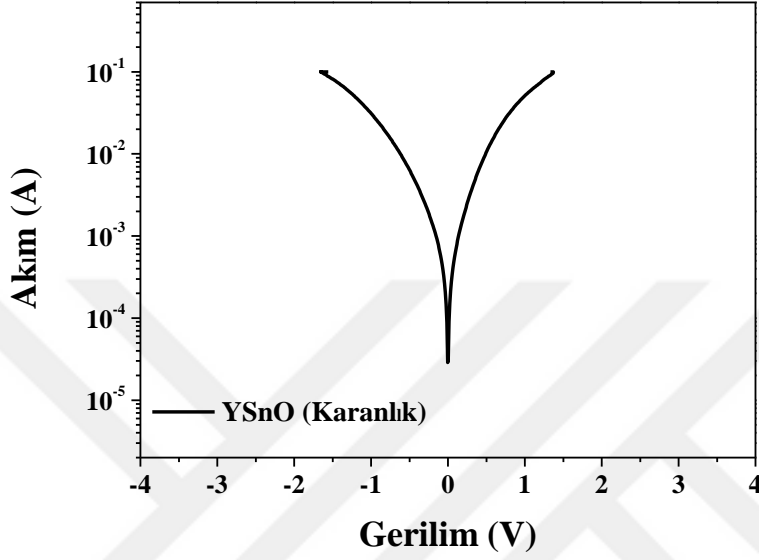
Bunun yanında karanlık ölçümleri alınarak her bir kontak için elde edilen n ve Φ_b değerleri Çizelge 5.3’de verilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi idealite faktörü değeri her bir kontak noktası için 1’den büyük çıkmıştır. İdealite faktörünün 1’den büyük olması diyotların ideallikten saptığının göstergesidir. Bu durumun sebebi deneysel hatalar, ölçüm sapmaları veya malzeme hataları olarak gösterilebilir ancak tam olarak bilinmemektedir.

Çizelge 5.3. Oluşturulan Ag/ Y:SnO₂ /p-Si diyotlarının ln(I)-V grafiklerinden elde edilen elektriksel parametreleri

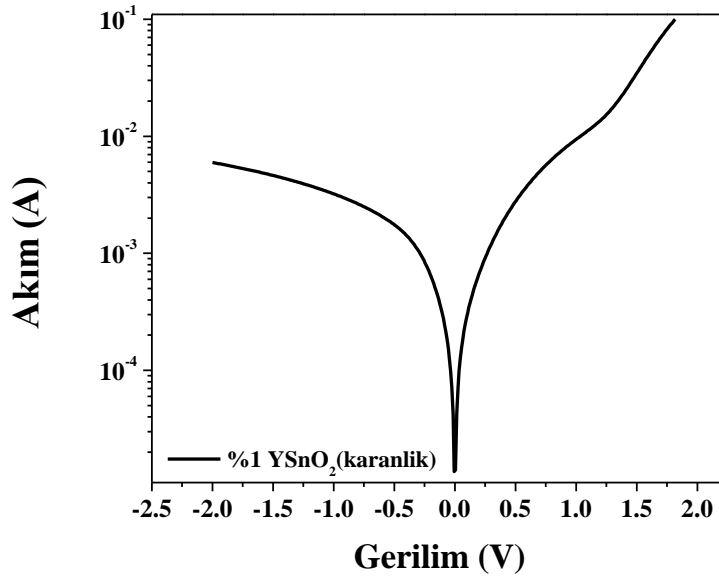
Diyot no	I_0 (A)	n	Φ_b (eV)
YTO	2.38×10^{-4}	3.93	0.486
YTO1	1.68×10^{-4}	4.88	0.496
YTO2	6.85×10^{-5}	3.70	0.503
YTO3	5.52×10^{-5}	4.12	0.518
YTO5	1.47×10^{-5}	3.52	0.523

Karadeniz’in 2001 yılında yayınladığı doktora tezinde açıkladığı gibi oluşturulan diyotların engel yükseldikleri, uygulanan gerilimin bir kısmının SnO₂ tabaka üzerinde düşmesinden dolayı MS yapılar nazaran düşük çıkmıştır. Oluşturulan ln(I)-V eğrilerinin eğimleri sabit değildir. Bunun sonucunda diyot ideallik faktörü n sabit

kalmayıp değeri de I den büyüktür. İdeallik faktörünün I den büyük ve $\ln I$ - V eğrilerindeki çizgiselliğin çok küçük bir gerilim bölgesinde olması, TE veya azınlık taşıyıcı enjeksiyonu ihtimalini güçlendirmektedir (Karadeniz, 2001).

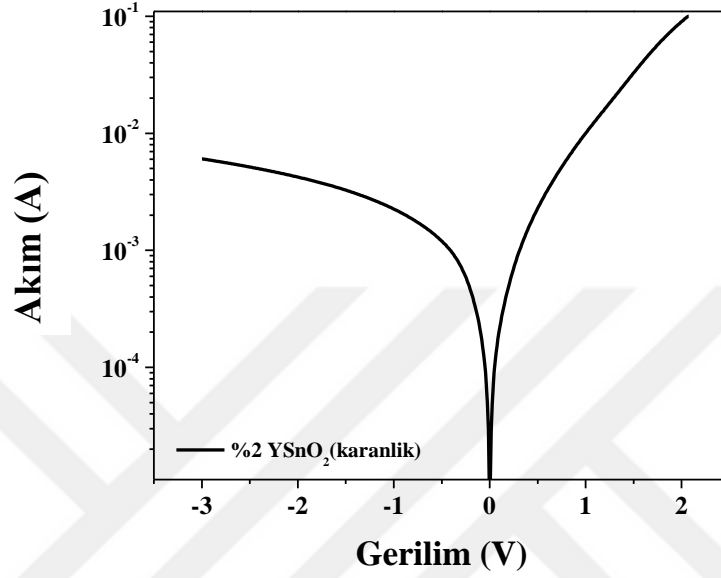


Şekil 5.12. Oluşturulan katkısız Ag/Y:SnO₂ /p-Si diyotunun karanlık altında $\ln(I)$ - V grafiği.

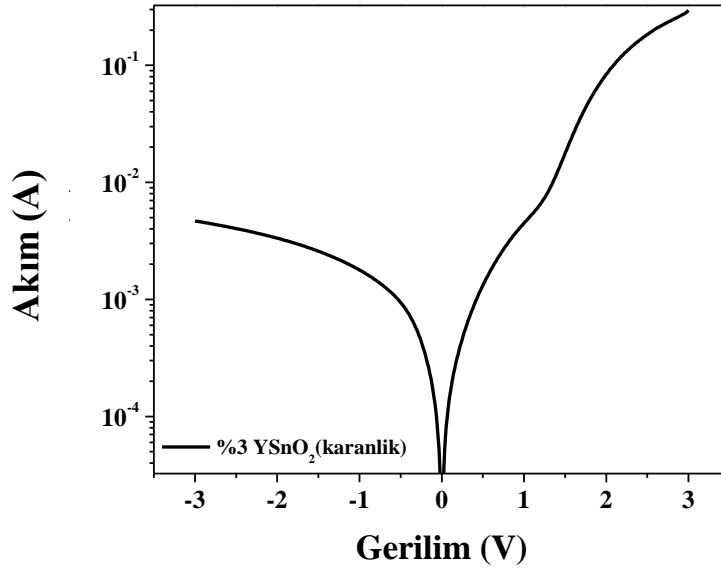


Şekil 5.13. Oluşturulan % 1 İtiryum katkılı Ag/Y:SnO₂ /p-Si diyotunun karanlık altında $\ln(I)$ - V grafiği.

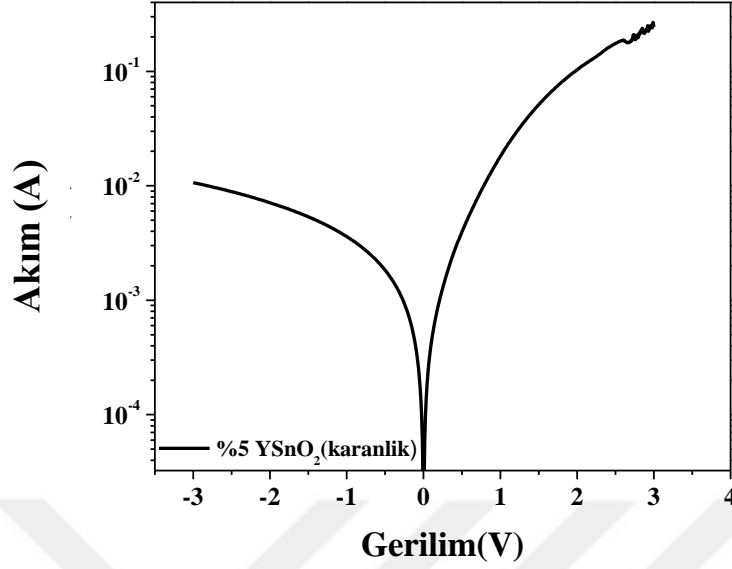
Yüzde katkılı kalay oksit diyotlarının karanlık ve ışık altındaki fotoelektrik duyarlılığını gösteren $\ln(I-V)$ grafikleri Şekil 5.10 ve Şekil 5.11’de verilmiştir. Işığa duyarlılığın yok denecek kadar az olduğunu söylemek mümkündür (Karadeniz, 2001).



Şekil 5.14. Oluşturulan % 2 itriyum katkılı Ag/Y:SnO₂ /p-Si diyotunun karanlık altında $\ln(I)-V$ grafiği.



Şekil 5.15. Oluşturulan % 3 itriyum katkılı Ag/Y:SnO₂ /p-Si diyotunun karanlık altında $\ln(I)-V$ grafiği.



Şekil 5.16. Oluşturulan % 5 itriyum katkılı Ag/Y:SnO₂ /p-Si diyotunun karanlık altında $\ln(I)$ - V grafiği.

5.5. Cheung Fonksiyonları İle Karakteristiklerin Belirlenmesi

Diyotlara ait seri direnç değerleri bu metot ile hesaplanabilir. Cheung bağıntıları,

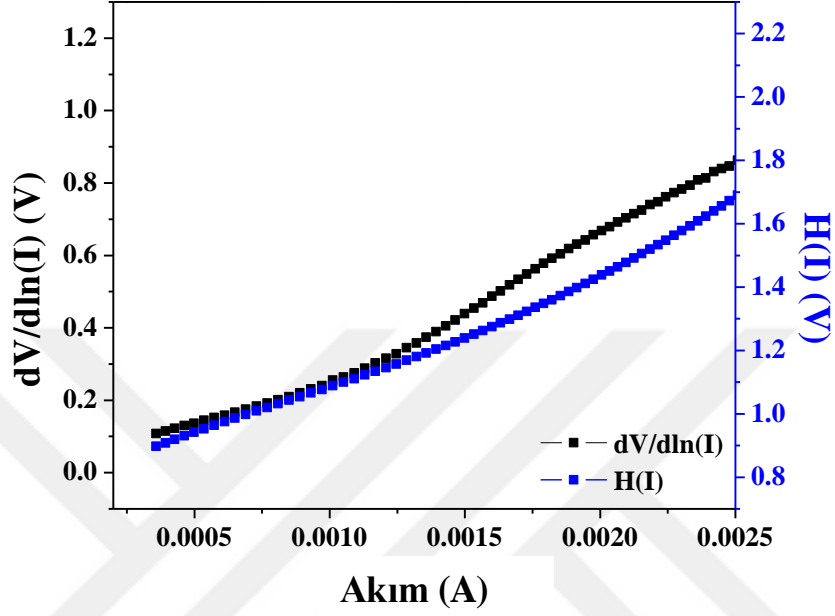
$$\frac{dV}{d\ln(I)} = IR_s + n \left(\frac{kT}{q} \right) \quad (5.9)$$

$$H(I) = IR_s + n\Phi_b \quad (5.10)$$

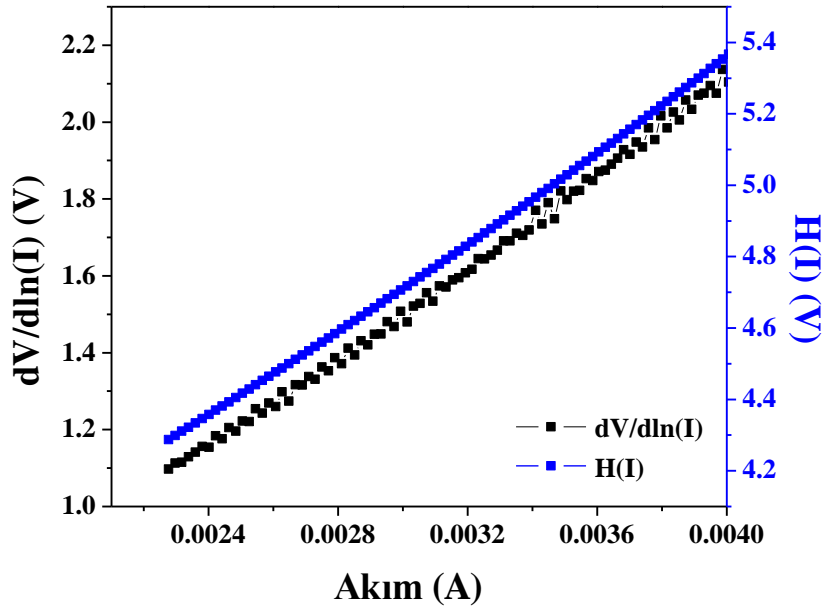
şeklinde verilir.

$dV/d\ln(I)$ - I ve $H(I)$ - I eğrileri seri direnç bölgelerinde lineer doğrular vermelidir. Tüm kontaklara ait $dV/d\ln I$ - I ve $H(I)$ - I eğrileri aşağıda gösterilmiştir. $dV/d(\ln I)$ - I grafiklerinin eğimlerinden R_s ve y eksenini kestiği yerden $n(kT/q)$ değerleri hesaplanabilir. Benzer şekilde $H(I)$ - I eğrilerinin eğimlerinden R_s ve y eksenini kestiği yerden Φ_b değerleri bulunabilir. Her iki grafikten elde edilen R_s değerleri yöntemin doğruluğunu kontrol amaçlı kullanılır (Uğur, 2015). Grafiklerden de anlaşılacağı gibi ışık altı ölçümleri lineer olmamakla birlikte bunun sebebinin ölçüm hatası veya yanlış

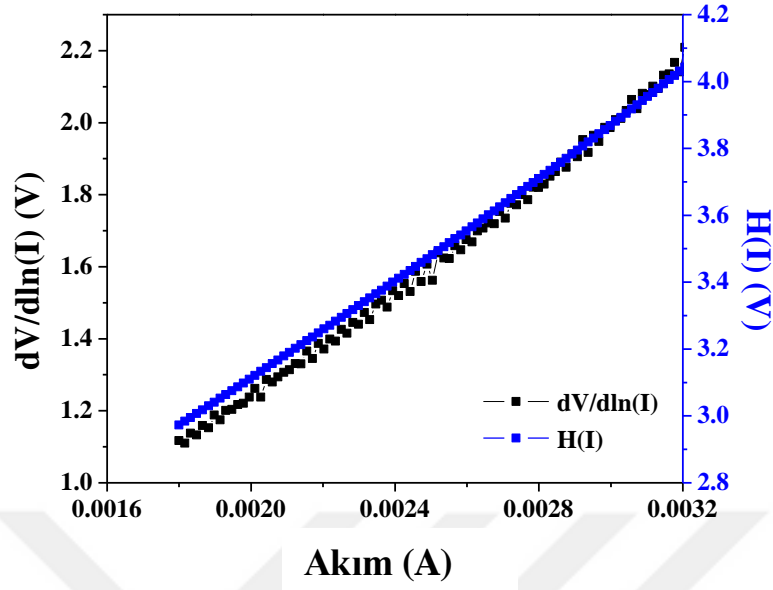
veri kaydı olabileceği düşünülmektedir. Grafik ve çizelgede okunan değerlere bağlı olarak bir kez daha bu diyotların ışığa duyarlılığı yoktur denebilir.



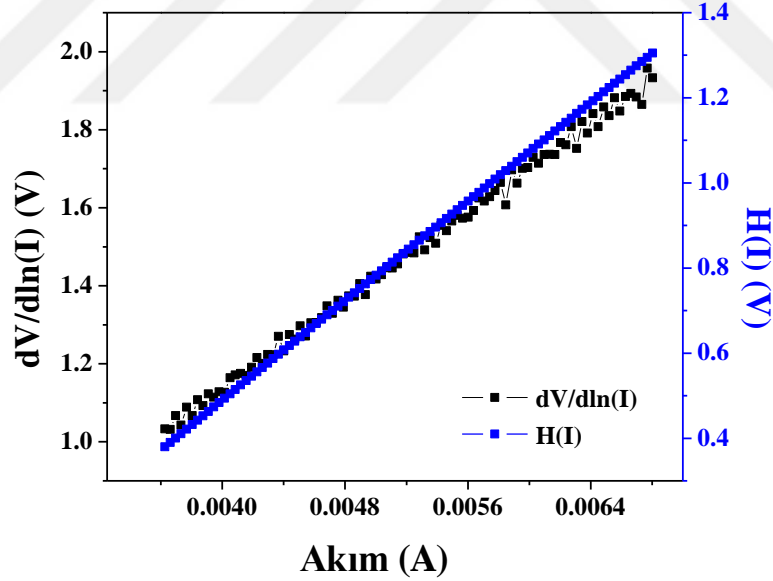
Şekil 5.17. % 1 katkılı Ag/ Y:SnO₂/ p-Si diyotuna ait $H(I)-I$ ve $dV/d(\ln I)-I$ eğrileri.



Şekil 5.18. % 2 katkılı Ag/ Y:SnO₂/ p-Si diyotuna ait $H(I)-I$ ve $dV/d(\ln I)-I$ eğrileri.



Şekil 5.19. % 3 katkılı Ag/ Y:SnO₂/ p-Si diyotuna ait $H(I)-I$ ve $dV/d(\ln I)-I$ eğrileri.



Şekil 5.20. % 5 katkılı Ag/ Y:SnO₂/ p-Si diyotuna ait $H(I)-I$ ve $dV/d(\ln I)-I$ eğrileri.

Çizelgeden görüldüğü gibi Cheung 1 ve Chenug 2 fonksiyonları yardımıyla hesaplanan Seri direnç değerleri birbiri ile uyumludur. Bunun yanında engel yüksekliği değerleri de $\ln(I)-V$ grafiğinden elde edilen bulgularla uyum içindeyken idealite faktörleri farklılıklar göstermektedir.

Çizelge 5.4. Oluşturulan tüm Ag/Y:SnO₂/p-Si diyotlarının Cheung fonksiyonları kullanılarak hesaplanan elektriksel parametreleri

Diyot	Cheung-1		Cheung-2	
	n	R _s (Ω)	R _s (Ω)	Φ _b (eV)
YTO1	3.89	380	398	0.500
YTO2	4.56	622	623	0.468
YTO3	6.31	755	756	0.477
YTO5	1.47	276	290	0.457

5.6. Norde Fonksiyonu İle Karakteristiklerin Belirlenmesi

Norde engel yüksekliği ve seri direncin hesaplanmasında yeni bir metot önermiştir (Norde 1979). Yeniden düzenlenmiş Norde fonksiyonu,

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (5.11)$$

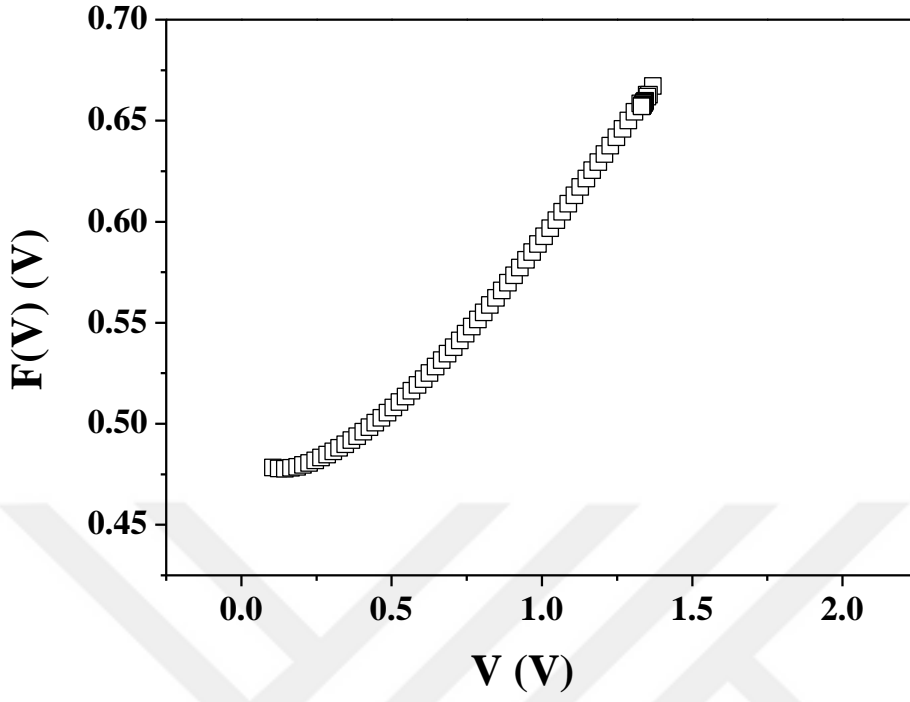
şeklinde yazılmaktadır (Karataş ve ark., 2007). Burada γ ifadesi n değerinden büyük olan ilk tam sayıdır ve $I(V)$ ifadesi I - V eğiminden elde edilen akım değeridir. Norde metodu ile engel yüksekliği,

$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (5.12)$$

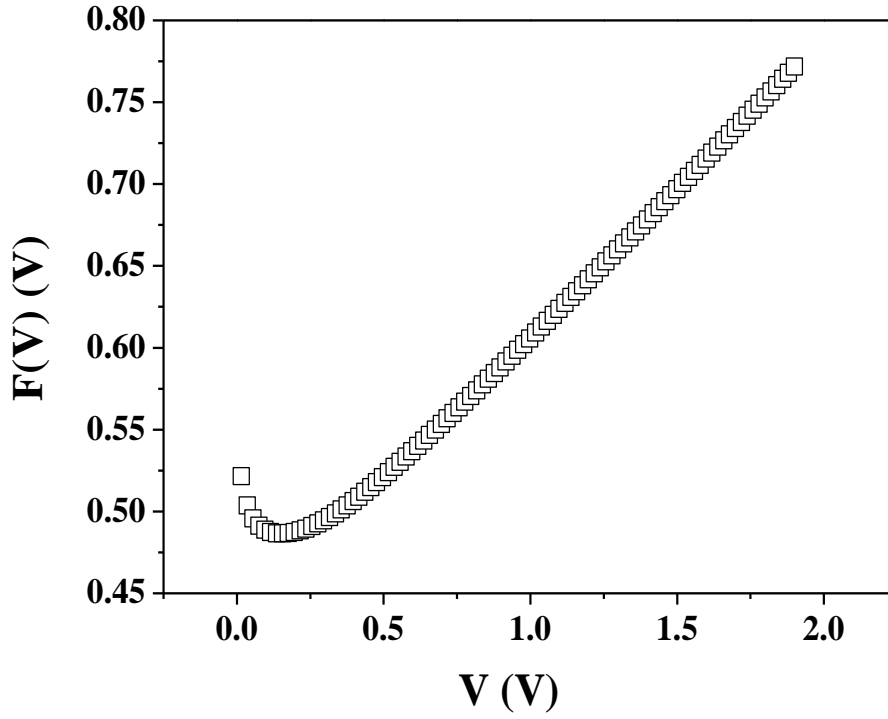
olarak verilir. Burada $F(V_0)$ ifadesi F - V grafiğinin minimum $F(V)$ değeridir, V_0 ise bu değere karşılık gelen gerilim değeridir. Norde metodunda seri direnç değerleri,

$$R_s = \frac{kT(\gamma-n)}{qI} \quad (5.13)$$

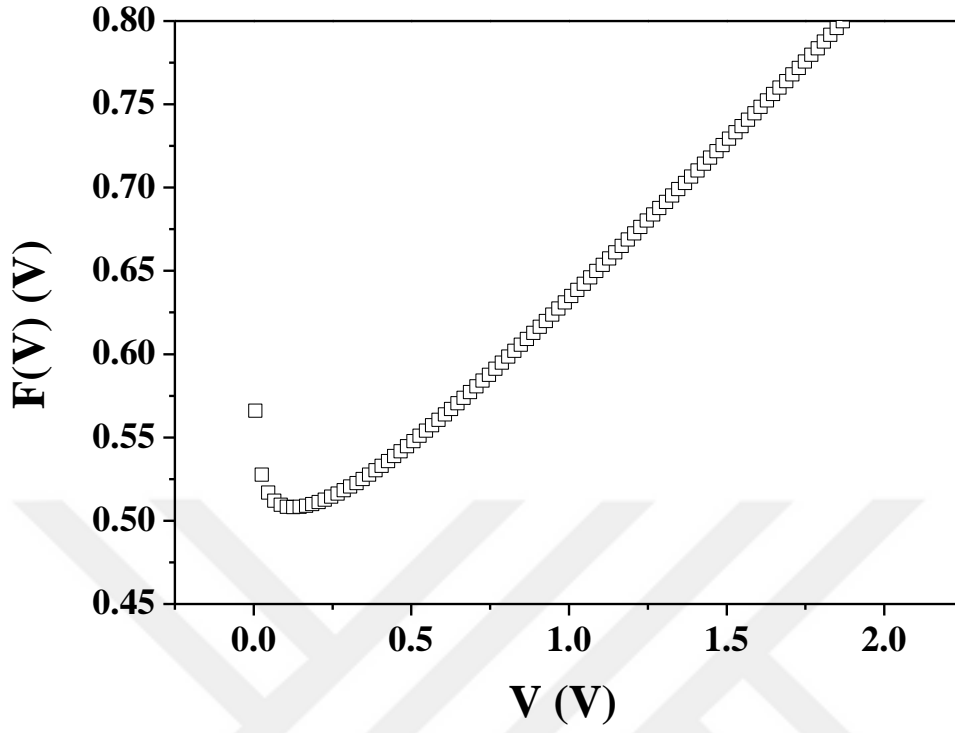
formülü ile bulunur. Burada I değeri V_0 değerine karşılık gelen akım değeridir. Aşağıda üretilen tüm diyotların $F(V)$ - V grafikleri gösterilmektedir.



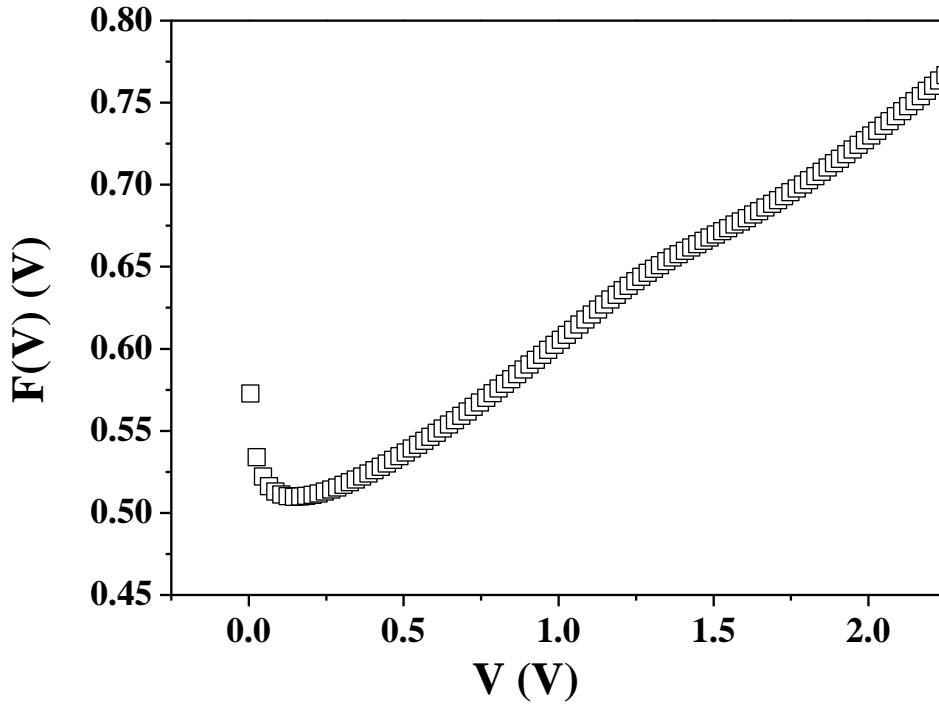
Şekil 5.21. YTO diyotunun $F(V)$ - V grafiği.



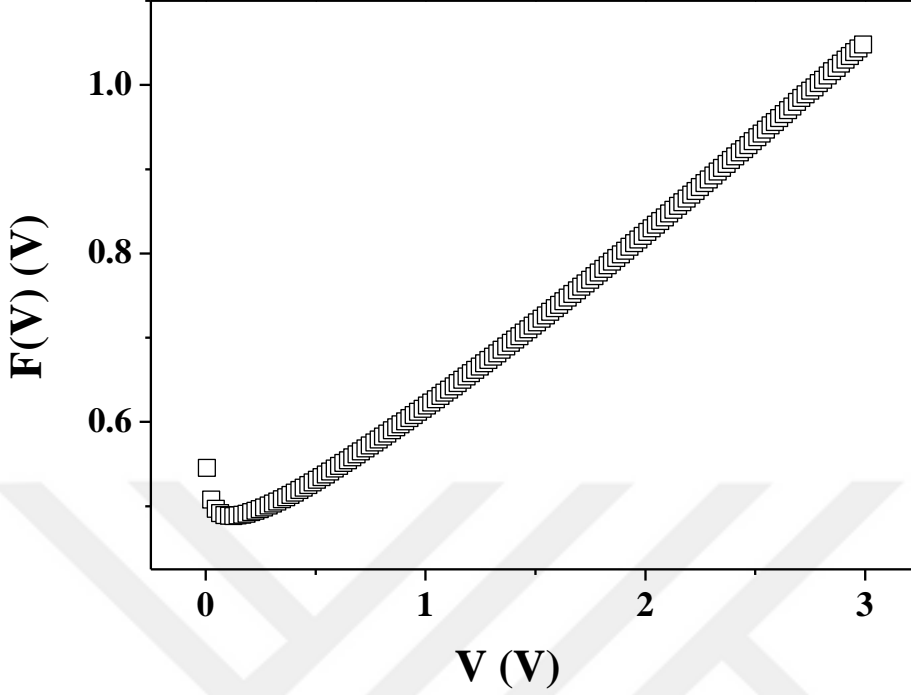
Şekil 5.22. YTO1 diyotunun $F(V)$ - V grafiği.



Şekil 5.23. YTO2 diyotunun $F(V)$ - V grafiği.



Şekil 5.24. YTO3 diyotunun $F(V)$ - V grafiği.



Şekil 5.25. YTO5 diyotunun $F(V)$ - V grafiği.

Çizelge 5.5'te elde edilen diyotların Norde fonksiyonları tarafından bulunan engel yüksekliği ve seri direnç sonuçlarını göstermektedir.

Çizelge 5.5. Oluştulan Ag/Y:SnO₂/p-Si diyotlarının Norde fonksiyonları ile hesaplanan elektriksel parametreleri

Diyot	F_{\min} (V)	V_{\min} (V)	R_s (Ω)	Φ_b (eV)
YTO	0.4777	0.1454	0.192	0.488
YTO1	0.4865	0.1554	1.527	0.492
YTO2	0.5081	0.1266	30.633	0.514
YTO3	0.5098	0.1563	90.660	0.515
YTO5	0.4882	0.1261	2.0978	0.497

Bulunan engel yüksekliği değerlerinin hem $\ln(I)$ - V grafiklerinden hem de Cheung fonksiyonları ile elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir. Buna karşın, Cheung fonksiyonları ile elde edilen seri direnç değerleri Norde fonksiyonları ile elde edilen seri direnç değerlerinden çok farklıdır. Bu farklılık metodların yapılarından kaynaklanmaktadır. Bu durumu; Norde metodunda sadece seri direnç bölgesi hesaba

katılırken, Cheung metodunda tüm doğru beslem değerleri üzerinde hesaplama yapılması şeklinde açıklayabiliriz (Güllü ve ark., 2008).

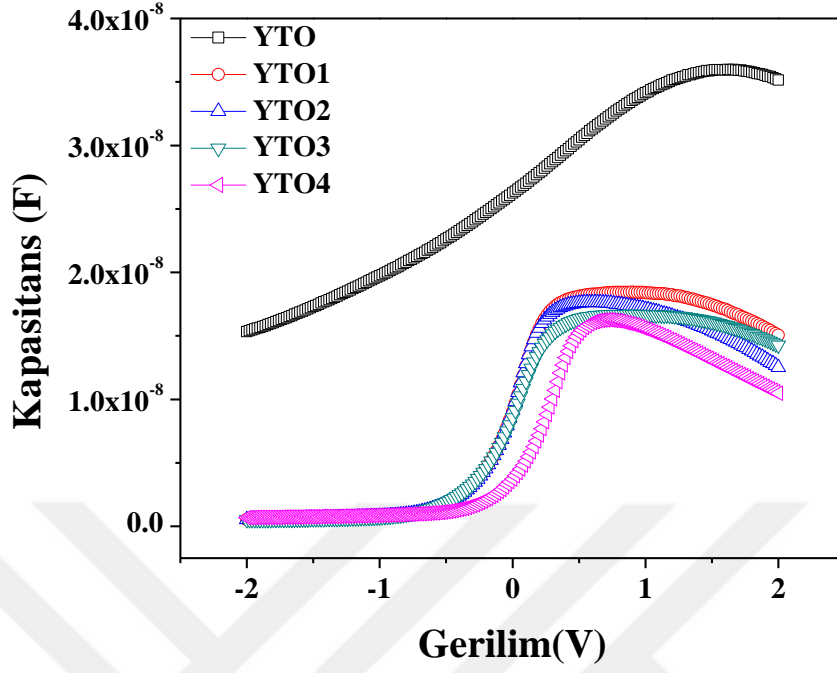
5.7. Y/SnO₂ /p-Si Diyotlarının Kapasitans-Gerilim Karakteristiği

Kapasitans-gerilim ($C-V$) karakteristiği diyotların en önemli özelliklerinden biridir. Bu bölümde, Ag/YSnO₂/p-Si diyotlarından bazılarının 100-1000 kHz ve 2000 kHz frekanslarda -2.0 ile 2.0 V aralığında alınan ölçümlerinin $C-V$ grafiklerini gösterilmektedir. Grafiklerden görüldüğü gibi kapasite değerleri frekans artarken artmaktadır. Bu durum düşük frekanslarda AC sinyalinin elektronlar tarafından takip edilebildiğini göstermektedir (Uğur, 2015). Bunun yanında Şekil 5.29, 5.30, 5.31 ve 5.32’de verilen katkılı kalayoksit filmlerinde frekans arttıkça kapasitansın düştüğü görülmektedir.

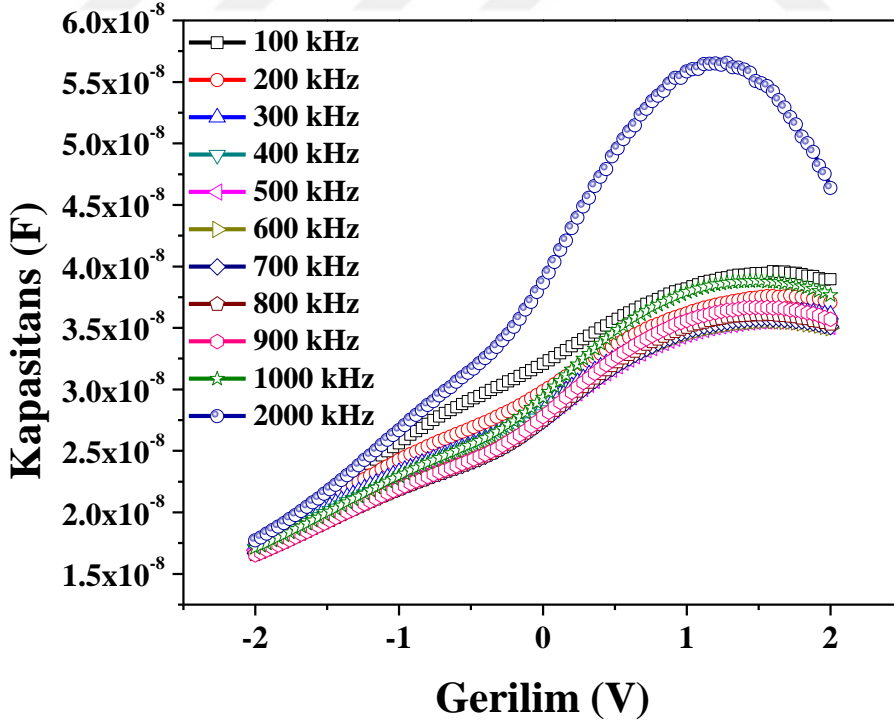
Diyotların karakteristik parametreleri ters beslem $C^{-2}-V$ eğrilerinden de hesaplanabilir. Artan ters besleme gerilimi ile yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar geriye doğru çekilirken tükenim bölgesinin genişliği $w+\Delta w$ kadar artar. Tükenim bölgesindeki yüklerde meydana gelen değişim, kapasitede bir değişime neden olur. Ara yüzey bölge kapasitesi metal/p-Si diyotlar için (Rhoderick ve ark., 1988).

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d+V)}{q\epsilon_S\epsilon_0 A^2 N_d} \quad (5.14)$$

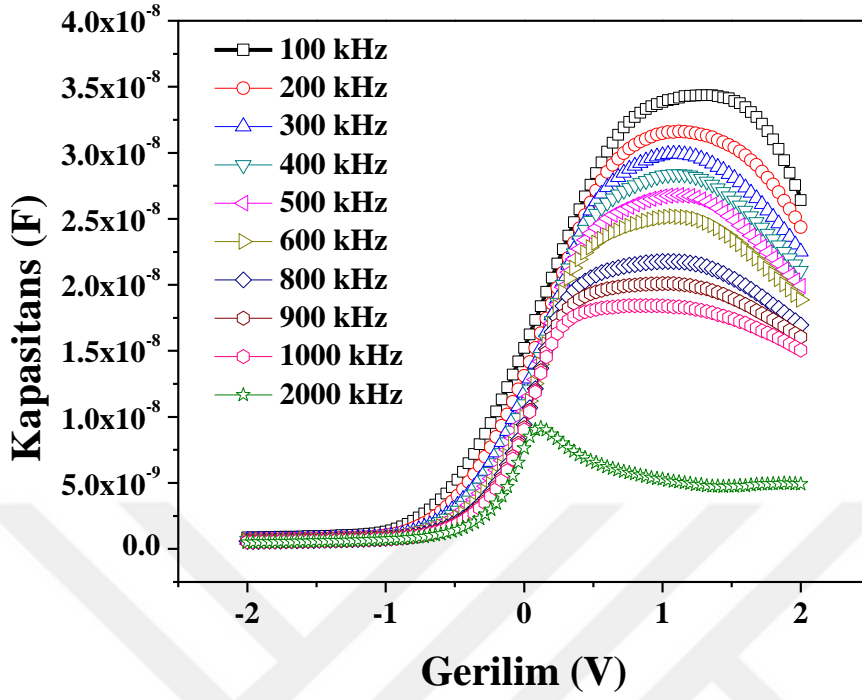
olarak verilir. Bağlantıda, A diyotun etkin alanı, ϵ_S yarıiletkenin dielektrik sabiti, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, V_d ise $C^{-2}-V$ eğrisinin V eksenini kestiği yerden hesaplanan sıfır beslem difüzyon potansiyeli olarak verilmektedir. Tüm yapılar için $C^{-2}-V$ eğrileri Şekil 5.33’de gösterilmektedir.



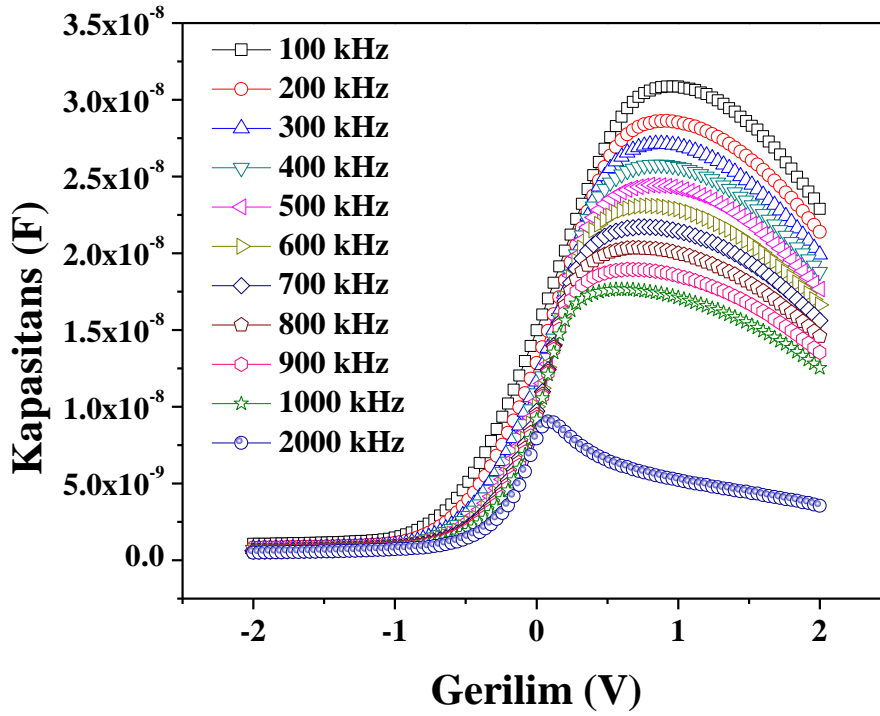
Şekil 5.26. Ag/Y:SnO₂/p-Si diyotlarının 1000 kHz frekans altında C-V grafiği.



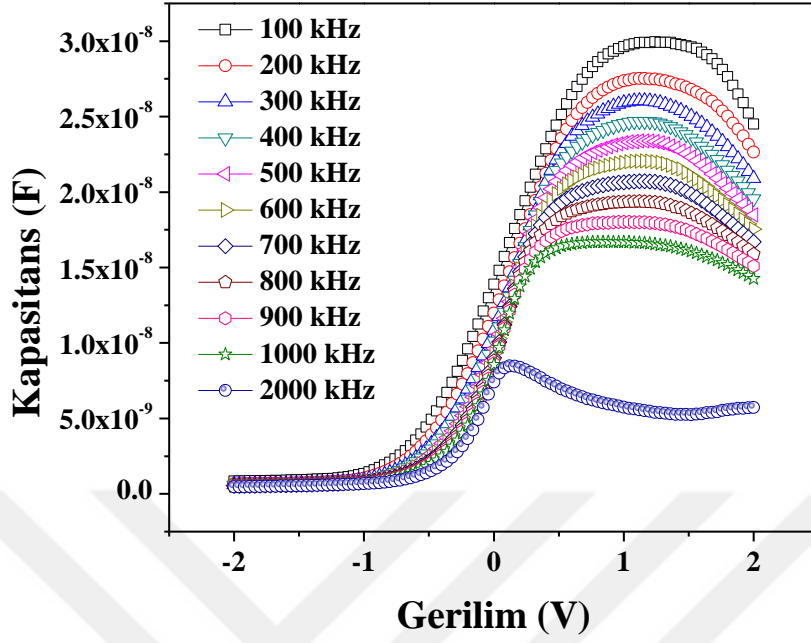
Şekil 5.27. YTO diyotunun tüm frekanslardaki C-V grafiği.



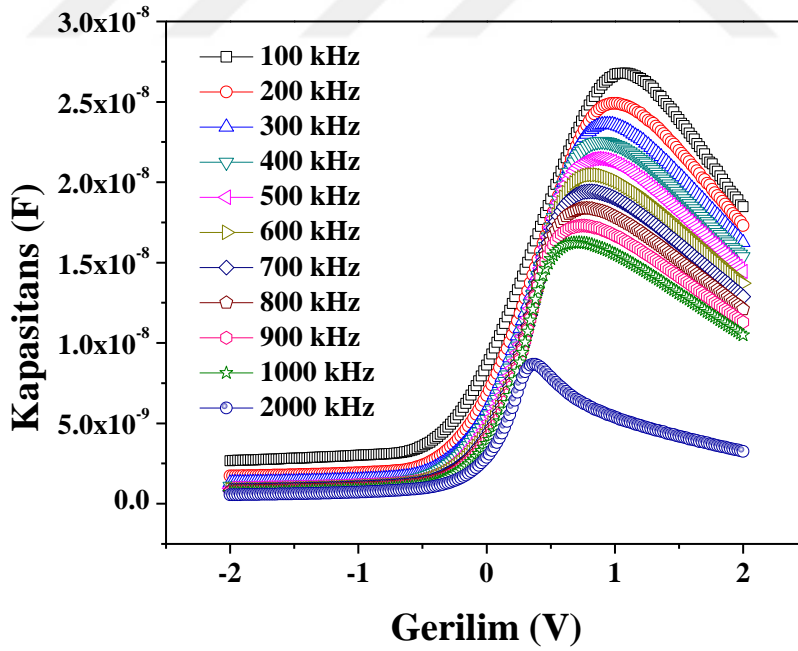
Şekil 5.28. YTO1 diyotunun tüm frekanslardaki C-V grafiği.



Şekil 5.29. YTO2 diyotunun tüm frekanslardaki C-V grafiği.



Şekil 5.30. YTO3 diyotunun tüm frekanslardaki C-V grafiği.



Şekil 5.31. YTO5 diyotunun tüm frekanslardaki C-V grafiği.

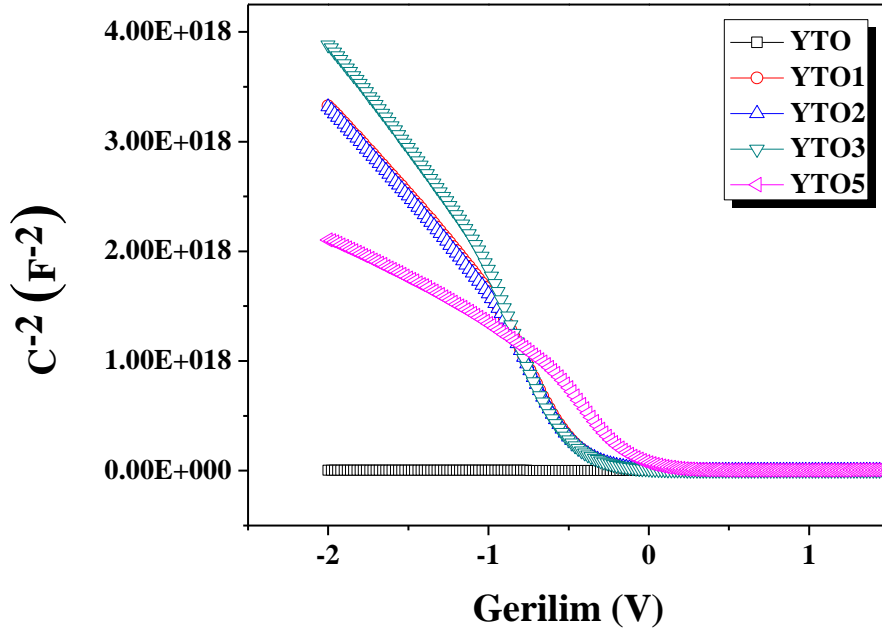
Oluşturulan diyotlara ait engel yüksekliği aşağıda verilen eşitlik yardımı ile hesaplanabilir.

$$\Phi_b(C - V) = E_f + V_p \quad (5.15)$$

Bu deneylerde kullanılan p-Si kristalinin özdirenci 1-10 ohm-cm olup, oda sıcaklığında mobilitesi 380 cm²/ V-sn olarak verilmiştir. Ayrıca valans bandındaki durum yoğunluğu $N_v=1.04 \times 10^{19}$ olarak üretici firma tarafından verilmektedir. Akseptör yoğunluğu N_a , C^{-2} - V grafiğinin lineer kısmının eğimi kullanılarak hesaplandı. Fermi enerji seviyesi,

$$E_f = kT \ln \left(\frac{N_v}{N_a} \right) \quad (5.16)$$

eşitliği yardımıyla hesaplandıktan sonra, oluşturulan diyotların engel yükseliği değerleri Eşitlik 5.15. yardımıyla hesaplanarak kaydedildi. Elde edilen tüm diyotların 1000 kHz frekans değerindeki C^{-2} - V grafiklerinin lineer kısmı yardımıyla hesaplanan yüzde katkılı ve katkısız diyotların karakteristik parametrelerinin değerleri Çizelge 5.6'da gösterildiği gibidir.



Şekil 5.32. Ag/Y:SnO₂/p-Si diyotlarının 1000 kHz frekans altında C^{-2} - V grafiği.

Çizelge 5.6. Ag/YSnO₂/p-Si diyotlarının C^{-2} - V grafiği yardımıyla hesaplanan elektriksel parametreleri

Diyot	N_a (cm ⁻³)	E_f (eV)	V_d (eV)	Φ_b (eV)
YTO	0.859×10^{15}	0.202	0.297	0.499
YTO1	1.270×10^{16}	0.202	0.406	0.608
YTO2	3.658×10^{17}	0.202	0.371	0.573
YTO3	1.758×10^{17}	0.202	0.397	0.599
YTO5	1.057×10^{17}	0.202	0.422	0.624



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ultrasonik püskürtme yöntemi kullanılarak saf SnO₂ ve % 1, % 2, % 3, % 5 itriyum katkılı kalay oksit filmler çözücü olarak kalay oksit için isopropanol ve itriyum için deiyonize su kullanılarak üretilmişlerdir. Yüzde katkılı Y:SnO₂ ince filmler, XRD, UV-Vis, akım-gerilim, kapasitans-gerilim ve SEM ölçüm cihazlarıyla karakterize edilerek filmlerin bazı fiziksel özellikleri araştırılmıştır.

Püskürtme yöntemiyle elde edilen filmlerden Ag/Y:SnO₂/p-Si kontaklar oluşturuldu. Oluşturulan kontakların karanlık ortamda alınan akım-gerilim ölçümlerinden yapıların doğrultucu özelliğe sahip olduğu gözlemlendi. Katkısız SnO₂ ile oluşturulan kontakta ölçüm alınamadığı ve diyot yapımına uygun olmadığı kaydedildi. Alınan ölçümler Çizelge 5.3'e kaydedilerek ortalama idealite faktörünün 4.03 olarak elde edildiği görülmüştür. Bu durumun sebebi cihaz kusurları veya ölçüm hataları olarak açıklanabilir ancak bu değer beklenen 1 değerinden büyüktür. Ters beslem doyma akım değerleri ve engel yükseklikleri literature yakın değerler olsa da idealite faktörünün değeri bu filmlerin iletkenliklerinin iyi olduğunu söylememize engel olmaktadır. Seri direnç ve engel yüksekliği değerleri Cheung ve Norde tarafından geliştirilen hesaplama metodları kullanılarak yapıldı. Cheung fonksiyonlarına göre seri direnç değerleri ortalaması 508 ve 517 Ω ve engel yüksekliği ortalama değeri 0.476 eV olarak hesaplandı. Engel yüksekliği değerinin akım-gerilim datalarından elde edilen sonuçlarla uyum içinde olduğu görülmesine rağmen idealite faktör değerleri oldukça farklı sonuçlar vermiştir. Norde metoduna göre seri direnç değerleri ortalaması 25.02 k Ω ve engel yüksekliği ortalaması 0.501 eV olarak hesaplandı. Burada seri direnç değerinin farklı çıkmasının nedeni metodun Cheung fonksiyonları metodlarından farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

Sonraki adımda oluşturulan yapının C-V ölçümleri yapılmış ve % 5 katkılı diyotun düşük frekanslarda kapasite değerlerinin, frekans artarken arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yüzde katkı oranı arttıkça gerilime karşılık gelen kapasitans değerinde azalma gözlenmektedir. Oluşturulan diyotların engel yükseklikleri $C^{-2}-V$ eğrisi ile hesaplanarak çizelge 5.6'ya kaydedilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda ters beslem $C^{-2}-V$ eğrisinden hesaplanan değer ortalama 0.580 eV, $\ln(I)-V$ eğrisinden elde edilen değer ise ortalama 0.505 eV olduğu görülmüştür. Değerler birbirine çok

uzak olmasa da bu durumun sebebi, kapasitenin tüketim bölgesindeki potansiyel dalgalanmaya karşı hassas olmaması ve ölçülen engel yüksekliği değerinin, engel yüksekliği dağılımının ortalama değeri olmasına karşılık ara yüzeyden geçen akımın engel yüksekliğine üstel olarak bağlı olması ve ara yüzey dağılımına karşı hassas olması olarak açıklanabilir.

Hazırlanan Ag/Y:SnO₂/p-Si diyotlarının ışığa karşı duyarlılığını ölçmek için AM1.5 filtreye sahip güneş similatörü kullanılarak, 100 mW/cm² gücünde ışık şiddetine sahip ışık kaynağı altında ölçülmüş ve tüm yapıların akım gerilim ölçümleri yapılmıştır. Oluşturulan tüm diyotlar için ışığa duyarlılık yok denecek kadar az olduğundan, ölçümler akım-gerilim ölçümleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere, diyotların optoelektronik uygulamalarda kullanılabilirliği mümkün görünmemektedir.

Filmlerin UV-Vis spektrometresi ölçümlerinden bant aralığı değerlerinin 3.66 eV ile 3.85 eV arasında değiştiği gözlenmiştir. Ayrıca Çizelge 5.2'de görüleceği üzere, yüzde oranı arttıkça bant aralığı değerinin düştüğü kaydedilmiştir. Saf SnO₂ ile % 5 YSnO₂ filmlerin bant aralığı değerleri arasında 0.19 eV fark olduğu görülmektedir.

XRD ölçümlerinden, filmlerin pek çok pik veren düzlemi olmasına rağmen bu düzlemler arasında tercihli yönelimin en şiddetli pik olarak (111) yöneliminde çıktığı görülmüştür. *TC* değerinin birden büyük olması bu filmin kalitesinin iyi olduğunu göstermektedir. En şiddetli ikinci pikin SnO₂'nin tetragonal yapılı (110) düzlemi olduğu görülmüştür (Şekil 5.7). Bu tercihli yönelim, itriyum katkısı için başka çalışmalarda da ortaya çıkmıştır (Maridurai, 2016).

Üretilen filmlerin tanecik boyutu hesabı XRD parametrelerine bağlı kalınarak yapılmış ve alınan sonuçlar Çizelge 5.1'de verilmiştir. Yüzde katkısı arttıkça tanecik boyutunun da arttığı ve alınan sonuçların en net % 5 itriyum katkılı kalay oksit filminde olduğu görülmüştür. Kristal örgü parametrelerinin yüzde katkı oranı ile değişmediği anlaşılmıştır.

SEM görüntüleri alınarak kaydedilen Ag/YSnO₂/p-Si diyotların görüntülerine bakıldığında XRD sonuçlarıyla karşılaştırma yapılabileceği gözlenmiştir. Yüzde katkısı arttıkça tanecik boyutunun da arttığı rakamsal olarak ifade edilirken bu durum görsel olarak alınan SEM görüntülerinde de belirgin olarak gözlenmiştir.

Sonuç olarak yapılan bu çalışmada hazırlanan Ag/Y:SnO₂/p-Si diyotlarının bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi, diyot performansı ve iletkenlik mekanizmaları hakkında detaylı bilgiler sunmaktadır. Bu malzemeler ile üretilecek ince filmler ve diyotlar hakkında daha detaylı bilgilerin sunulabilmesi ileriki çalışmalarda sağlanabilir. Optoelektronik uygulamalara uygun görünmemesine karşın diyot yapımı ve doğrultucu özelliği ile elektronik uygulamaların pek çok alanında kullanıma uygun olduğu görülmektedir.





KAYNAKLAR

- Akçay, N., 2011. *CdSe Nanokristallerin Sentezi Ve Karakterizasyonu* (yüksek lisans tezi, basılmamış). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Alaf, M., 2007. *Kalay (Sn) ve Kalay Oksit (SnO₂) İnce Filmlerinin Üretim ve Karakterizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi, basılmış). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Alfonso, E., Olaya, J. Cubillos, G., 2012. Thin film growth through sputtering technique and its applications. <http://www.intechopen.com/download/get/type/pdfs/id/39143>. Crystallization - Science and Technology, Marcello Andreetta. (Online) 397-432. Erişim tarihi: 23.12.2013.
- Amanullah, F.M., Pratap, K.J., Babu, V.H., 1998. Compositional analysis and depth profile studies on undoped and doped tin oxide films prepared by spray technique. *Materials Science and Engineering B*, **52**: 93-98.
- Anonim, 2011a. Güneş pilleri. http://tr.wikipedia.org/wiki/G%C3%BCne%C5%9F_pili. Erişim tarihi: 08.07.2011.
- Anonim, 2011b. Güneş pilleri. <https://wiki.illinois.edu/wiki/display/solarcellsim/CdTe>. Erişim tarihi: 08.04.2011.
- Anonim, 2013a. Lityum iyon piller. <http://www.sigmaaldrich.com/technicaldocuments/articles/material-matters/electrode-materials-for-lithium-ion-batteries.html>. Erişim tarihi: 10.09.2013.
- Arivazhagan, V., Rajesh S., 2010. Preparation of nanocrystalline SnO₂ thin films for micro gas sensors. *Journal of Ovonic Research*, **6** (5): 221-226.
- Ashcroft, N.W., Mermin, N.D., 1976. *Solid State Physics*. W.B. Saunders Company, Orlando, ABD.
- Ayçam, İ., Utkutuğ G.S., 1999. *Farklı Malzemelerle Üretilen Pencere Tiplerinin Isl Performanslarının İncelenmesi ve Enerji Etkin Pencere Seçimi*. IV. Ulusal tesisat mühendisliği kongresi, İzmir.
- Babar, A. R., Shinde, S. S., Moholkar, A. V., Bhosale, C. H., Kim, J. H., Rajpue, K. Y., 2010. Structural and optoelectronic properties of antimony incorporated tin oxide thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, **505** (2): 416-422.
- Balkenende A.R., Bogaerts A. A. M. B., Scholtz J.J., Tjburg R.R.M., Willems H.X., 1996. Thin MgO layers for effective hopping transport of electrons. *Philips Journal of Research*, **50**: 365-373.
- Battal, A., Tatar, D., Kocyigit, A., Düzgün, B., 2014. Comparison effect of spin speeds and substrate layers on properties of doubly doped tin oxide thin films prepared by sol-gel spin coating method. *Journal of Ovonic Research*, **10** (2): 23 – 34.
- Bethe, H.A., 1942. Theory of the Boundary Layer of Crystal Rectifiers. *MIT Radia. Lab. Rep.*, **43**: 12.
- Biswas, P.K., Dua, L. De, A., Chaudhuri D., 2006. Aquo-organic sol-based F-doped SnO₂ (Sn:F = 90:10) coatings on glass. *Materials Science-Poland*, **24** (2/1): 367-374.
- Briand, D., Labeau, M., Currie, J.F., Delabouglise, D., 1998. Pd-doped SnO₂ thin films deposited by assisted ultrasonic spraying CVD for gas sensing: selectivity and effect of annealing. *Sensors and Actuators B*, **48**: 395-402.
- Bunshah, R.F., 2001. *Handbook of Hard Coatings*. William Andrew Publishing/Noyes Publication, New York, USA. 550.

- Caferov, T., 1998. *Yarıiletken Fiziği*. Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, İstanbul.
- Chamberlin, R.R., Skarman, J.S., 1966. Chemical spray deposition process for inorganic films. *Journal of Electrochemical Society*, **113** (1): 86-89.
- Chambouleyron, I., Saucedo, E., 1979. Properties of Chemically Sprayed SnO₂ Antireflecting Films on Si Solar Cells. *Sol. Energy Mater*, **1**: 299–311.
- Crowell, C.R., Sze, S.M., 1966. Current Transport in Metal-Semiconductor Barriers. *Sol. Sta. Electron.*, **9**: 10-35.
- Çağlar, Y., Çağlar, M., Ilıcan S., Yakuphanoglu, F., 2007. Single-oscillator model and determination of optical constants of spray pyrolyzed amorphous SnO₂ thin film. *Eur. Phys. J. B.*, **58**: 251-256.
- Çağlar, Y., Çağlar, M., Ilıcan S., Yakuphanoglu, F., 2009. Determination of the electronic parameters of nanostructure SnO₂/p-Si diode. *Microelectronic Engineering*, **86**: 2072-2077.
- Çalışkan, H., 2009. *SiO₂ Ve ZrO₂ İnce Filmlerin Hazırlanması ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Çolak, H., 2010. *Değişik Metal Katkılı II-VI Tipi Yarı İletkenlerin Sentezlenmesi Karakterizasyonu ve Elektriksel İletkenliğinin Ölçülmesi* (Doktora Tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Dua, L.K., De, A., Chakraborty, S., Biswas, P.K., 2008. Study of spin coated high antimony content Sn–Sb oxide films on silica glass. *Materials Characterization*, **59** (5): 578 – 586.
- Dündar, T., 2007. *Ag/GaAs Schottky Yapıların I-V ve C-V Karakterizasyonu* (yüksek lisans tezi). Selçuk Ün., Fen Bil. Ens., Konya.
- Düzgün, B., 1985. *β-Sn Monokristalinde Noktasal Kusurların Dislokasyonlar Üzerine Etkisi ve Zorlanma Tensörünün Hesaplanması* (Doktora Tezi, basılmamış). Atatürk Üniversitesi, Fen Bil. Ens., Erzurum.
- Düzgün, B., 2008. *Katıhal Fiziği Ders Notları* (yayınlanmamış). Kazım Karabekir Eğitim Fakültesi, Erzurum.
- Elangovan, E., Singh, M. P., Dharmaprasanth, M. S., Ramamurthi, K., 2004a. Some physical properties of spray deposited SnO₂ thin films. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, **6** (1): 197-203.
- Elangovan, E., Ramesh, K., Ramamurthi, K., 2004b. Studies on the structural and electrical properties of spray deposited SnO₂:Sb thin films as a function of substrate temperature. *Solid State Communications*, **130** (8): 523–527.
- El-Maghraby, E.M., Nakamura, Y., Rengakuji, S., 2008. Composite TiO₂-SnO₂ nanostructured films prepared by spin-coating with high photocatalytic performance. *Catalysis Communications*, **9**: 2357-2360.
- Eskier, Uğur, 2017. İtiryum Nedir? (Özellikleri, Kullanımı). <https://www.makaleler.com/itiryum-nedir-ozellikleri-kullanimi>. Erişim tarihi: 31.07.2018.
- Evcin, A., 2006. *Kaplama Teknikleri Ders Notları*. Afyonkarahisar Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar.
- Ferrere S., Zaban A., Gregg B.A., 1997. Dye Sensitization of Nanocrystalline Tin Oxide by Perylene Derivatives. *J. Phys. Chem. B*, **101**: 4490.
- Güllü, Ö., Aydoğan, S., Türüt, A., 2008. DNA- Based Organic-On-Inorganic Semiconductor Schottky Structures: Barrier enhancement and Temperature effect issues. *Microelectron. Eng.*, **85**: 1647.

- Gürbüz, M., 2007. *Elektrosprey Yöntemiyle Nanoboyutlu Yarı İletken Metal Oksitlerin Sensör Amaçlı Kaplanması* (yüksek lisans tezi). Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Ilıcan, S., Çağlar, Y., Çağlar, M., 2005. Spray pyrolysis yöntemi ile elde edilen CdZnS filmlerinin yapısal özelliklerine hazırlama parametrelerinin etkisi. *C.Ü. Fen-Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, **26** (2): 22-30.
- Irmak, S., 2006. *Flor Katkılı Cdo Yariletken Bileşiminin Spray Pyrolysis Yöntemi Ile Elde Edilmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Jarligo, M. O., Mauer, G., Bram, M., Baumann, S., Vassen, R., 2014. Plasma spray physical vapor deposition of $La_{1-x} Sr_{(x)} Co_{(y)} Fe_{1-y} O_{3-\delta}$ thin-film oxygen transport membrane on porous metallic supports. *International Thermal Spray Conference (ITSC)*, Busan, South Korea.
- Jeng, J.S., 2012. The influence of annealing atmosphere on the material properties of sol-gel derived $SnO_2:Sb$ films before and after annealing. *Applied Surface Science*, **258** (16): 5981– 5986.
- Jeffrey Brinker, C., Sherer, G.W., 1990. *The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*. Sol-Gel Science, Academic Press.
- Karaağaç, H., 2010. *Electrical, Structural And Optical Properties Of Aggase2-Xsx Thin Films Grown By Sintered Powder* (Ph. D. Thesis). Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Karabay, I., 2006. Yıldız Teknik Üniversitesi, ders notları. <http://www.yifiz.com/bolum8.pdf>. Erişim tarihi: 08.07.2011.
- Karadeniz, S., 2001. *Al/SnO₂/P-Si/Al Yapılarında Yüzey Şartlarının Elektroniksel İletkenliğe Etkisi* (Doktora Tezi). Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara.
- Kasar, R. R., Deshpande, N. G., Gudage, Y. G., Vyas, J. C., Sharma, R., 2008. Studies and correlation among the structural, optical and electrical parameters of spray-deposited tin oxide (SnO_2) thin films with different substrate temperatures. *Condensed Matter*, **403** (19-20): 3724-3729.
- Kaya, İ., 2010. *Metal-Yarıiletken Schottky Diyotların Elektriksel Karakteristiklerin Frekans Ve Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kılınç, T., 2006. *Zn_{1-n}FeS İnce Filmlerinin Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Kahramanmaraş S. İ. Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Kittel, C., 1996. *Katıhal Fizikine Giriş* (Çev. B. KARAOĞLU). Güven, İstanbul, Türkiye.
- Kocyyigit, A., Tatar, D., Battal, A., Aydın, S., Turgut, G., Düzgün, B., 2013. Investigation of some properties of $SnO_2:Sb:F$ thin films by an economic spray pyrolysis technique. *Optoelectronics and Advanced Materials – Rapid Communications*, **7** (7-8): 530 – 535.
- Koçyyigit, A., 2014. *Spray Pyrolysis ve Spin Coating Metotlarıyla Elde Edilen SnO₂:Sb:F İnce Filmlerin Bazı Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması* (Doktora Tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Korotcenkov, G., Cornet, A., Rossiyol, E., Arbiol, J., Brinzari, V., Blinov, Y., 2005. Faceting characterization of tin dioxide by spray pyrolysis from stannic chloride water solution. *Thin Solid Films*, **471**: 310–319.

- Korotcenkov, G., Cho, B.K., 2012. The role of grain size on the thermal instability of nanostructured metal oxides used in gas sensor applications and approaches for grain-size stabilization. *Progress In Crystal Growth And Characterization of Materials*, **58** (4): 167-208.
- Kuhlmann, F. J., 2004. *Deposition Of SnO₂ Thin Films Using Reactive Of Sputtering* (MS thesis). Teksas Univ, USA.
- Laurent, J.M., Smith, A., Smith, D.S., Bonnet, J.P., Clemente, R.R., 1997. Morphology and physical properties of SnO₂-based thin films deposited by the pyrolysis process from dibutyltin diacetate. *Thin Solid Films*, **292**: 145-149.
- Laverty S. J., Maguire P. D., J. 2001. Low resistance transparent electrodes for large area flat display devices. *Vac. Sci. Technol*, **19** (1), 1-6.
- Lee, J.H., Soon, J.P., 1992. Preparation of Spherical SnO₂ Powders by Ultrasonic spray pyrolysis. *J.Appl.Phys.*, **22**: 1204–1210.
- Lin Y.J., Wu, C.J., 1996. The properties of antimony-doped tin oxide thin films from the sol-gel process. *Surface and Coatings Technology*, **88**: 239-247.
- Madelung, O., 1996. *Semiconductors-Basic Data*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, 313 p.
- Maridurai, T., Balaji, D., Sagadevan, S., 2016. Synthesis and Characterization of Yttrium Stabilized Zirconia Nanoparticles. *Materials Research*, **19**: 1516-1439.
- Moholkar, A. V., Pawar, S. M., Rajpure, K. Y., Bhosale, C. H., Kim J. H., 2009. Effect of fluorine doping on highly transparent conductive spray deposited nanocrystalline tin oxide thin films. *Applied Surface Science*, **255** (23), 9358-9364.
- Mol, A. M. B. V., 2003. *Chemical Vapour Deposition Of Tin Oxide Thin Films* (Ph. D. thesis). Eindhoven University, Holland.
- Mulla, I.S., Soni, H.S., Rao, V.J., Sinha, P.B., 1986. Deposition of improved optically selective conductive tin oxide films by spray pyrolysis. *Journal of Materials Science*, **21**: 1280–1288.
- Mwamburi M., Wackelgard E., Roos A., 2000. Preparation and characterisation of solar selective SnO_x:F coated aluminium reflector surfaces. *Thin Solid Films*, **374**: 1-9.
- Norde, H., 1979. A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance . *J. Appl. Phys.*, **50**: 5052.
- Oral, M., 1979. *Güneş Pilleri*. Ege Üniversitesi Yayınları, İzmir.
- Pankove, J., 1975. *Optical Process in Semiconductors*, Dover Publications, Inc. New York.
- Park, S.S., Mackenzie, J.D., 1995. Sol-gel-derived tin oxide thin films. *Thin Solid Films*, **258**: 268-273.
- Patil, P.S., Kavar, R.K., Seth, T., Amalnerkar , D.P., Chigare, P.S., 2003. Effect of substrate temperature on structural, electrical and optical properties of sprayed tin oxide (SnO₂) thin films. *Ceramics International*, **29**: 725–734.
- Pierret, R. F., 1988. *Semiconductor Fundamentals*. Pearson Education (US), USA.160 p.
- Racheva, T.M., Cnitchlow, G.W., 1997. SnO₂ thin films prepared by the solgel process. *Thin Solid Films*, **292**: 299-302.
- Rajpure, K.Y., Kusumade, M.N., Spallart, M.N.N., Bhosale, C.H., 2000. Effect of Sb doping on properties of conductive spray deposited SnO₂ thin films. *Materials Chemistry and Physics*, **64**, 184-188.

- Ravichandran, K., Muruganatham, G., Sakthivel, B. and Philominathan, P., 2009a. Nanocrystalline doubly doped tin oxide films deposited using a simplified and low-cost spray technique for solar cell applications. *Journal of Ovonic Research*, **170,5** (3), 63-69.
- Rhoderick, E. H., Williams, R. H., 1988. *Metal-Semiconductor Contacts*, Clarendon Press (Oxford), Oxford.
- Rhoderick, E.H., Williams, R.H., 1988. *Surfaces, Interfaces, and Schottky Barriers. Metal-Semiconductor Contacts 2nd ed.*, 1- 47. Clarendon Press, Oxford.
- Rozati, S.M., 2006. The effect of substrate temperature on the structure of tin oxide thin films obtained by spray pyrolysis method. *Material Characterization*, **57** (3):150-153.
- Sberveglieri, G., 1992. *Gas Sensors Principles, Operation and Developments*. Kluwer Academic Publishers, London, England. 424 p.
- Serin, T., Serin, N., Karadeniz, S., Sarı, H., Tuğluoğlu, N., Pakma, O., 2006. Electrical, structural and optical properties of SnO₂ thin films prepared by spray pyrolysis. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **352** (3), 209–215.
- Shanthi, S., Anuratha, H., Subramanian, C., Ramasamy, P., 1998. Effect of fluorine doping on structural, electrical and optical properties of sprayed SnO₂ thin films. *Journal of Crystal Growth*, **194**: 369-373.
- Sharma, L. H., 1984. *Metal Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*, Plenum Press, New York & London. 176.
- Sharma R.K., Chan P.C.H., Tang Z., Yan G., Hsing I.M., Sin J. K. O., 2001. Investigation of stability and reliability of tin oxide thin-film for integrated micro-machined gas sensor devices. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **81**: 9-16.
- Sinner-Hettenbach, M., 2000. *SnO₂ (110) and Nano-SnO₂: Characterization by Surface Analytical Techniques* (Ph.D. thesis). Tubigen University, Germany.
- Soliman Selim, M., 2000. Room temperature sensitivity of SnO–ZrO sol–gel thin films. *Sensors and Actuators*, **84** (1-2): 76–80.
- Stenier, T., 2004. *Semiconductor Nanostructures for Optoelectronic Applications*. Artech House, Norwood MA.
- Stjerna, B., Olsson, E., Granqvist, C.G., (1994), *J.Appl.Phys.*, **76**: 3797.
- Sze, S.M., 1981. *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons, Inc., USA. 868.
- Sze, S. M., 1981. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley Publisher, 2. Edition, New York, USA. 832 p.
- Sze, S.M., Kwok K. Ng, 2007. *Metal-Semiconductor Contacts, Physics of Semiconductor Devices, 3rd ed.*. John Wiley & Sons, New York, 245-300.
- Şafak, H., 1989. *İnce Film CuxS/CdS Güneş Pilleri* (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Tatar, D., Düzgün, D., 2012. The relationship between the doping levels and some physical properties of SnO₂:F thin films spray-deposited on optical glass. *Pramana Journal of Physics*, **79** (1): 137-150.
- Tatar, D., Turgut, G., Düzgün, B., 2013a. Effect of substrate temperature on the crystal growth orientation and some physical properties of SnO₂:F thin films deposited by spray pyrolysis technique. *Romanian Journal of Physics*, **58** (1-2): 143-158.
- Tatar, D., Turgut, G. Sönmez, E., Düzgün, B., 2013b. Comparison of some physical properties for SnO₂, SnO₂:F and SnO₂: Sb films deposited on glass substrates. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, **15** (9-10): 1026-1031.

- Terrier, C., Chatelon, J.P., Roger, J.A., 1997. Electrical and optical properties of Sb:SnO₂ thin films obtained by the sol-gel method. *Thin Solid Films*, **295**: 95-100.
- Thanganaju, B., 2002. Structural and electrical studies on highly conducting spray deposited fluorine and antimony doped SnO₂ thin films from SnCl₂ precursor. *Thin Solid Films*, **402**: 71-78.
- Tomakin, M., 2008. *CdS İnce Film Örneklerinin Soğuk Altık Üzerine Üretilmesi, Yapısal, Elektriksel ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi* (Doktora Tezi). Karadeniz teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Turgut, G., Tatar, D., Düzgün, B., 2012. Effect of nozzle-substrate distance on electrical, structural and optical properties of SnO₂ thin films prepared by spray pyrolysis. *EÜFBED- Erzincan University Graduate School of Natural and Applied Sciences Journal*, **5** (13): 13-24.
- Turgut, G., Tatar, D., Düzgün, B., 2013. Relationship between the doping levels and some physical properties of SnO₂:Sb thin films spray-deposited on optical glass. *Asian Journal of Chemistry*, **25** (1): 245-250.
- Ugur, A., 2015. *Organik Bileşenli Schottky Diyotların Elektriksel Özellikleri* (Doktora Tezi). Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Unaogu, A.L., Okeke, C.E., 1990. Antimony-doped tin oxide films prepared by spray pyrolysis. *Solar Energy Materials*, **20**: 29-36.
- Van Zeghbroeck, B., 2004. Principles of Semiconductor Devices, <http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/contents.htm>. Erişim tarihi: 10.07.2011.
- Wang, J. T., Shi, X. L., Liu, W., W., Zhong, X. H., Wang, J. N., Pyrah, L., Sanderson, K. D., Ramsey, P. M., Hirata, M. Tsuru, K., 2014. Influence of preferred orientation on the electrical conductivity of fluorine-doped tin oxide films. *Scientific Reports*, **4**: 1-9.
- Yacobi, B. G., 2002. *Semiconductor Materials: An Introduction Basic Principles*. Kluwer Academic Publisher, 172, USA. 238 p.
- Yacobi, B. G., 2003. *Applications of Semiconductors, Semiconductor Materials An Introduction to Basic Principles*. Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow, 116-117.
- Yin L.T., Chou J.C., Chung W.Y., Sun T.P., Hsiung S.K., 2000. Separate structure extended gate H⁺-ion sensitive field effect transistor on a glass substrate. *Sens. Actuators B*, **71** (1-2): 106.
- Yoon, K.H., Song, J.S., 1993. Properties of fluorine-doped SnO₂ films prepared by the pyrosol deposition method. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **28**: 317-327.
- Zaouk, D., Zaatar Y., Khoury, A., Llinares, C., Charles, J.P. Bechara, J., 2000. Electrical and optical properties of pyrolytically electrostatic sprayed fluorine-doped tin-oxide: Dependence on substrate-temperature and substrate-nozzle distance. *Journal of Applied Physics*, **87** (10): 7539-7543.
- Zhou, Z.B., Cui, R.Q., Pang, Q.J., Wang, Y.D., Meng, F.Y., Sun, T.T., Ding, Z.M. Yu, X.B., 2001. Preparation of indium tin oxide films and doped tin oxide films by an ultrasonic spray CVD process. *Applied Surface Science*, **172**: 245-245.

ÖZ GEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Esra KAYA

Doğum tarihi ve yeri: 1986/ Şemdinli

Adres: Serhat Mah. Milli Egemenlik Cad. Güven Apt. No: 2, 65000 Van (Türkiye)

Tel: (+90) 507 6135101

E-posta: esrakaya1446@gmail.com

Sürücü belgesi B

EĞİTİM VE ÖĞRETİM

09/1999–06/2003 Van Atatürk Lisesi (Süper Bölüm)
Fen Bilimleri, Van (Türkiye)

08/2005–05/2010 Arbil Medicine College
Tıp, Erbil (Irak)

Ailevi sorunlardan dolayı 2010 yılında terk etti.

10/2010–09/2014 Fen Fakültesi-Fizik Bölümü(İngilizce ağırlıklı)
Anadolu Üniversitesi (örgün öğretim), Eskişehir (Türkiye)

07/2014–01/2015 Pedagojik Formasyon Sertifikası
Anadolu Üniversitesi, Eskişehir (Türkiye)

08/2015–Devam ediyor Tezli Yüksek Lisans-Fizik
Yüzüncü Yıl Üniversitesi-Fen Bilimleri Enstitüsü, Van (Türkiye)

İŞ DENEYİMİ

04/2007–12/2009 Tercüman

Bawer Company, Erbil (Irak)

Irak Erbil Tıp Koleji'nde okuduğu dönem boyunca firmanın çalışma faaliyetleri ile ilgili olarak farklı ülkelerden gelen kuruluş yetkilileri için konferans ve çeşitli toplantılarda tercümanlık görevinde bulundu.

03/2006–04/2010 Kişisel Öğretmenlik

Eğitim Danışmanlığı, Erbil (Irak)

Irak Arbil Tıp Koleji'nde okuduğu dönem boyunca okula destek amaçlı ek iş olarak özel öğretmenlik yaptı. Lise ve ortaokul düzeyinde Matematik (İngilizce), Fizik (İngilizce), Kimya (İngilizce), Biyoloji (İngilizce), Tarih (İngilizce), İngilizce ve Türkçe derslerini verdi.

06/2014–05/2015 Stajyer Öğretmen
Gelişim Gurubu- Mat fkb Dershanesi, Eskişehir (Türkiye)

09/2014–01/2015 Stajyer Öğretmen
MEB-Fatih Anadolu Lisesi, Eskişehir (Türkiye)

10/2016–6/2017 İngilizce Öğretmenliği
MEB, Hakkari (Türkiye)
11. Sınıf Dil sınıfı dahil olmak üzere etkin İngilizce öğretmenliği yaptı.

09/2017– (Devam ediyor) İngilizce Öğretmenliği
MEB, Van Özel Edremit Kültür Koleji

KİŞİSEL BECERİLER

Ana dili Türkçe

Yabancı Dil İngilizce (İyi Derecede)

Dijital Beceriler

Microsoft Office (Word- Excel- Powerpoint)

Linux-Temel

Origin Pro8

PeakFit

Mathcad

VMD

Online Sunum Programları (Prezi vb.)

Poster Bildirisi:

Gencer İmer, A., Kaya, E., Tombak, A., Yakuphanoglu, F., Dere, A., 2016.
Investigation of the Electrical Properties of Au SY n Si Hybrid Schottky
Structures. *Nanoscience Nanotechnology for Next Generation*. 20-22
Ekim 2016, Antalya.

T.C
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
LİSANSÜSTÜ TEZ ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 23/01/2019

Tez Başlığı / Konusu: Ultrasonik Püskürtme Yöntemi İle Üretilen Y:SnO₂ Nanoyapılı Filmlerin Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Yukarıda başlığı/konusu belirlenen tez çalışmamın Kapak sayfası, Giriş, Ana bölümler ve Sonuç bölümlerinden oluşan toplam 120 sayfalık kısmına ilişkin, 23/01/2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 14 (ondört)'dür.

Uygulanan filtreler aşağıda verilmiştir:

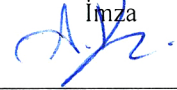
- Kabul ve onay sayfası hariç,
- Teşekkür hariç,
- İçindekiler hariç,
- Simge ve kısaltmalar hariç,
- Gereç ve yöntemler hariç,
- Kaynakça hariç,
- Alıntılar hariç,
- Tezden çıkan yayınlar hariç,
- 7 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç (Limit inatch size to 7 words)

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Lisansüstü Tez Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılmasına İlişkin Yönergeyi inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim.

23/01/2019

İmza



Adı Soyadı: Esra KAYA

Öğrenci No: 159102025

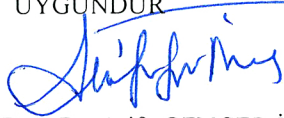
Anabilim Dalı: Fizik A. B. D.

Programı: Tezli Y. L.

Statüsü: Y. Lisans

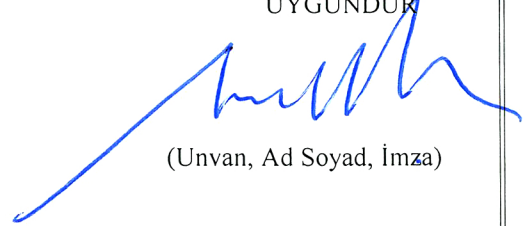
Doktora

DANIŞMAN ONAYI
UYGUNDUR



Doç. Dr. Arife GENÇER İMER
(Unvan, Ad Soyad, İmza)

ENSTİTÜ ONAYI
UYGUNDUR



(Unvan, Ad Soyad, İmza)