

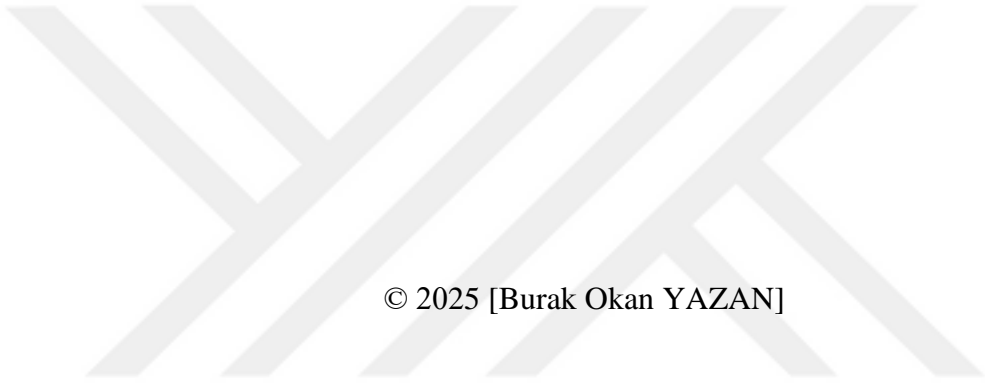
T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**Cu KATKILI PbO İNCE FİLMLEİN SİLAR TEKNİĞİ İLE
ÜRETİLMESİ, KARAKTERİZASYONU VE
Al/(%2-4-6-8)Cu:PbO/P-Si SCHOTTKY DİYOTUN
ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ**

Burak Okan YAZAN

**Danışman
Prof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
ISPARTA- 2025**



© 2025 [Burak Okan YAZAN]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
3. KURAMSAL TEMELLER	8
3.1. Yarıiletkenler.....	8
3.1.1. Saf yarıiletkenler.....	9
3.1.2. Katkılı yarıiletkenler.....	10
3.1.3. Yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluğu.....	12
3.1.4. Yarıiletkenlerin optik özellikleri.....	13
3.2. Metal-Yarıiletken Kontaklar	15
3.2.1. Metal / p-tipi yarıiletken Schottky kontaklar.....	15
3.2.2. Metal / p-tipi yarıiletken omik kontaklar.....	17
3.3. Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları.....	18
3.3.1. Termoionik emisyon teorisi.....	19
3.3.2. Difüzyon teorisi	21
3.3.3. Engel boyunca tünelleme.....	22
3.4. Schottky Diyotun Akım Gerilim Özelliklerinin İncelenmesi.....	23
3.4.1. Cheung yöntemi.....	23
3.4.2. Norde yöntemi	24
3.4.3. Ohm yasası.....	25
3.4.4. Akım-voltaj verilerinden arayüzey durumlarının belirlenmesi	26
3.5. İnce Film Üretim Teknikleri.....	27
3.5.1. SILAR tekniği.....	28
3.6. Karakterizasyon Teknikleri	31
3.6.1. X-ışını kırınımı (XRD)	31
3.6.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	32
3.6.3. UV- Vis spektrometresi	33
4. MATERYAL VE YÖNTEM, DENEYSEL ÇALIŞMA, TEORİ	35
4.1. Materyal.....	35
4.1.1. PbO temel özellikleri	35
4.1.2. Altaşların temizlenmesi	37
4.1.3. Çözeltinin hazırlanması	37
4.2. Yöntem	39
4.2.1. SILAR tekniği ile filmlerin kaplanması	39
4.2.2. Metal-yarıiletken yapıların hazırlanması	40
4.2.3. Üretilen MIS diyotların elektriksel parametrelerinin hesaplanması	41
5. ARAŞTIRMA BULGULARI	42
5.1. Yapıların Karakterizasyonları	42
5.1.1. X-ışını kırınım analizleri.....	42
5.1.2. SEM-EDS analizleri	43
5.1.3. UV- Vis analizleri.....	46

5.1.4. Elektriksel karakterizasyon analizleri.....	50
6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	55
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	66



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Cu KATKILI PbO İNCE FİLMLEİN SILAR TEKNİĞİ İLE ÜRETİLMESİ, KARAKTERİZASYONU VE Al/(%2-4-6-8)Cu:PbO/P-Si SCHOTTKY DİYOTUN ELEKTRONİK ÖZELLİKLERİ

Burak Okan YAZAN

**Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR

Bu tez çalışmasında SILAR (Ardışık İyonik Tabaka Adsorpsiyonu ve Reaksiyonu) tekniği ile katkısız PbO ve farklı oranlarda (%2-4-6-8) Cu katkılı kurşun oksit (PbO) filmler cam ve Si altaş üzerine SILAR tekniği ile kaplandı. Silisyum kristalinin ön yüzüne PbO ince filmi biriktirildikten sonra alüminyum (Al) metali fiziksel buharlaştırma yöntemi (PVD) ile buharlaştırılarak Al/katkısız PbO-(%2-4-6-8)Cu:PbO/p-Si MIS Schottky kontaklar (SD) oluşturuldu. Kaplanan katkısız ve katkılı PbO ince filmlerin yapısal, yüzeysel, optik ve elektriksel özellikleri XRD, SEM-EDS, UV-Vis spektrometresi kullanılarak belirlendi. PbO ince filmlerin polikristal yapıya sahip olduğu, yüzeylerde dikey ve yatay pullarla sürekli bir PbO film oluştuğu gözlemlendi. İnce filmlerin bant aralığı 3.0-3.2 eV aralığında belirlendi. İmal edilen farklı oranlarda Cu katkılı PbO arayüzeyli Al/p-Si MIS Schottky diyotların elektriksel özelliklerini belirlemek amacıyla I-V ölçümleri alındı. Elektriksel parametreler doyma akımı (I_0), idealite faktörü (n), doğrultma oranı (RR), engel yüksekliği (Φ_b), seri/şönt dirençler (R_s , R_{sh}) ve arayüzey hallerinin yoğunluğu (N_{ss}) belirlendi. Deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında %2 Cu katkılı PbO arayüzüne sahip diyotun, daha düşük I_0 , n , N_{ss} ve daha yüksek RR, BH ve R_{sh} değerleri açısından diğer diyotlara kıyasla MS tipi SD'lerin kalitesini önemli ölçüde iyileştirdiği görüldü.

Anahtar Kelimeler: İnce film, SILAR, kurşun oksit, Schottky kontak, omik kontak

2025, 66 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF Cu-DOPED PbO THIN FILMS BY SILAR TECHNIQUE AND ELECTRONIC PROPERTIES OF Al/(2-4-6-8%)Cu:PbO/P-Si SCHOTTKY DIODE

Burak Okan YAZAN

Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR

In this thesis study, undoped PbO and Cu doped lead oxide (PbO) films with different ratios (2-4-6-8%) were coated on glass and Si substrate using the SILAR (Sequential Ionic Layer Adsorption and Reaction) technique. After depositing PbO thin film on the front surface of the silicon crystal, aluminum (Al) metal was evaporated using the physical evaporation method (PVD) to form Al/undoped PbO-(2-4-6-8%Cu):PbO/p-Si MIS Schottky contacts. The structural, surface, optical and electrical properties of the coated undoped and doped PbO thin films were determined using XRD, SEM-EDX, UV-Vis spectrometry. It was observed that PbO thin films had a polycrystalline structure and a continuous PbO film was formed with vertical and horizontal flakes on the surfaces. The band gap of the thin films was determined in the range of 3.0-3.2 eV. I-V measurements were taken to determine the electrical properties of the manufactured Al/p-Si MIS Schottky diodes with different Cu doping ratios and PbO interfaces. Electrical parameters were determined as saturation current (I_0), ideality factor (n), rectification ratio (RR), barrier height (Φ_b), series/shunt resistances (R_s , R_{sh}) and density of interface states (N_{ss}). When the experimental results were compared, it was seen that the diode with 2% Cu doping PbO interface significantly improved the quality of MS type SDs compared to other diodes in terms of lower I_0 , n , N_{ss} and higher RR, BH and R_{sh} values.

Keywords: Thin film, SILAR, lead oxide, Schottky contact, ohmic contact

2025, 66 pages

TEŞEKKÜR

Tez danıőmanım değerli hocam Prof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR' e yüksek lisans tez çalıőmalarım boyunca bilimsel katkı, deneyim ve tecrübeleriyle yönlendirmesi ve desteği için sonsuz teőekkürlerimi, sevgi ve saygılarımı sunarım.

Deneyisel çalıőmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen Batman Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ' ye teşekkür ederim.

Eğitim hayatımın her aőamasında beni yalnız bırakmayan, dualarını ve desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Her zaman bana inanan, desteğini ve sevgisini hiçbir zaman esirgemeyen yol arkadaşım Damla Kübra'ya tüm kalbimle teşekkür ederim.

Ve oğluma...

Burak Okan YAZAN
ISPARTA, 2025

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Yalıtkan, yarıiletken ve metallerde enerji bant yapıları.....	8
Şekil 3.2. Saf yarıiletkende enerji bant aralığı ve fermi enerji seviyesi.....	9
Şekil 3.3. n-tipi yarıiletken şematik bağ yapısı	11
Şekil 3.4. p-tipi yarıiletken şematik bağ yapısı	11
Şekil 3.5. Yarıiletken ile foton arasındaki etkileşimleri gösteren diyagram	13
Şekil 3.6. Fotonların l kalınlıklı bir yarıiletkende soğurulması	14
Şekil 3.7. Metal/p-tipi yarıiletken Schottky kontakların enerji-bant seviyeleri..	16
Şekil 3.8. Metal/p-tipi yarıiletken omik kontakların enerji-bant seviyeleri	18
Şekil 3.9. Tünel diyotun a) şematik bant yapısı b) I-V karakteristiği	22
Şekil 3.10. Metal-yarıiletken kontakta I-V karakteristiğinde seri direnç etkisi ..	26
Şekil 3.11. İnce film üretim teknikleri	28
Şekil 3.12. SILAR döngüsü	30
Şekil 3.13. Kristal düzlemde X-ışını kırınımı	31
Şekil 3.14. SEM çalışma prensibi	33
Şekil 3.15. UV-Vis çalışma prensibi.....	34
Şekil 4.1. PbO kristal yapısı.....	35
Şekil 4.2. Tetragonal (α -PbO) ve ortorombik PbO'nun (β -PbO) kristal yapısı...	36
Şekil 5.1. PbO ince filmlerin X-ışını kırınım desenleri	42
Şekil 5.2. (a) α -PbO ve (b) β -PbO nanopartiküllerinin X-ışını kırınım desenleri	42
Şekil 5.3. PbO ince filmler için SEM görüntüleri a) katkısız b) %2 Cu katkılı c) %4 Cu katkılı d) %6 Cu katkılı e) %8 Cu katkılı	44
Şekil 5.4. PbO ince filmler için EDS görüntüleri a) katkısız b) %2 Cu katkılı c) %4 Cu katkılı d) %6 Cu katkılı e) %8 Cu katkılı	46
Şekil 5.5. PbO ince filmlerin optik soğurma grafiği	47
Şekil 5.6. PbO ince filmlerin Tauc eğrileri a) katkısız b) %2 Cu katkılı c) %4 Cu katkılı d) %6 Cu katkılı e) %8 Cu katkılı.....	49
Şekil 5.7. KEITHLEY 4200-SCS cihazı.....	50
Şekil 5.8. Al/PbO/p-Si/Al MIS tipi diyotlarda LnI -V değişimi.....	51
Şekil 5.9. Al/PbO/p-Si/Al MIS tipi diyotlarda Ri -V değişimi.....	53
Şekil 5.10. Al/PbO/p-Si/Al MIS tipi diyotlarda Nss ve Ess değişimi.....	54

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. İş fonksiyonlarına göre Schottky ve omik kontaklar	15
Çizelge 4.1. PbO temel özellikler	36
Çizelge 5.1. β -PbO kristal özellikleri.....	43
Çizelge 5.2. KatkıSIZ ve Cu katkılı PbO numuneleri için hesaplanan E_g değerleri	50
Çizelge 5.3. Al/PbO/p-Si/Al MIS tipi diyotların I-V karakteristiklerinden elde edilen parametreler	52



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Å	Angström
A*	Richardson sabiti
A	Diyotun etkin alanı
Al	Alüminyum
C	Kapasite
Cu	Bakır
d	Düzlemler arası uzaklık
e	Elektron yükü
E _o	Vakum seviyesi
E _c	İletkenlik bandı enerjisi
E _f	Fermi seviyesi
E _g	Yarıiletkenin yasak enerji bant aralığı
E _{ss}	Arayüzey halleri enerjisi
eV	Elektron volt
E _v	Valans bandı enerjisi
h	Planck sabiti
hkl	Miller indisi
I	Akım
I _o	Ters beslem akımı
k	Boltzmann sabiti
m	Kütle
M	Molarite
M _A	Molekül kütlesi
n	Mol
N _{ss}	Arayüzey hal yoğunluğu
Pb	Kurşun
PbO	Kurşun oksit
R _s	Seri direnç
q	Elektron yükü
T	Mutlak sıcaklık
V	Gerilim
n	İdealite faktörü
λ	X-ışınlarının dalga boyu
Ω	Direnç birimi
Φ _b	Engel yüksekliği
Φ _m	Metalin iş fonksiyonu
Φ _n	n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ _p	p-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ _s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
Υ	Norde fonksiyonu
θ	Bragg açısı

1. GİRİŞ

Teknoloji dünyasında yarıiletken fiziğin önemi çok büyüktür. Günlük yaşamımızda neredeyse bütün alanlarda kullanılan yarıiletken cihazlar arasında ince filmler çok önemli bir yere sahiptir. İnce filmlerin yapısal, morfolojik, optiksel ve elektriksel analizlerinin incelenmesi bilimsel olarak oldukça önemlidir.

İnce filmler, kalınlığı 1 µm'den daha küçük olan kaplamalardır. Cam, silisyum, kuartz gibi alttaşların üzerine, farklı kaplama teknikleri uygulanarak hedef malzemenin molekül veya atomlarının biriktirilmesi ile ince filmler elde edilir. Bu teknikler molekül demet epitaksi, DC ve RF magnetron püskürtme, sol-jel, SILAR, darbeli lazer biriktirme, kimyasal banyo biriktirme vb. tekniklerdir. İnce film teknolojisine olan ilgi 1940'lerden başlayarak günümüze kadar gelmiş ve devam etmektedir. Malzeme endüstrisinin temelini oluşturan ince filmler, bilimsel ve teknolojik çalışmalarda da önemlidir ve en çok araştırma yapılan konulardan biridir.

Geçiş metal oksit ince filmler, gösterdikleri çeşitli özellikler nedeniyle ilgi çekici bir malzeme sınıfını oluşturur. Metal oksit filmler genellikle geniş bant aralığı değerlerine sahiptir. Hazırlama koşullarına bağlı olarak bu oksit filmlerin iletkenliği yalıtkandan iletkene değişir. Geliştirilmiş optik ve elektronik özelliklerinden dolayı metal oksit bazlı ince filmler, elektrolüminesans cihazlar, manyetik bellekler ve dielektrik katmanlar vb. gibi çok çeşitli mikroelektronik ve optoelektronik uygulamalarda kullanıldığı görüldü. Çeşitli geçiş metal oksit ince filmleri arasında PbO, çekici özelliklerinden dolayı teknolojik olarak önemlidir (Suganya vd., 2015).

Yarıiletken aygıtların uygulaması, ilk kez Braun tarafından 1874 yılında yarıiletken kristal yüzeyine bazı metaller ile kontak uygulanması sonucu doğrultucu özellik sergilemesi ile bilinir. Metal-yarıiletken (MS) kontaklar ile ilgili Alman fizikçi Walter Schottky ilk kez uygulamalı bir teori geliştirildi. Geliştirilen bu yapı Schottky engelli cihazlar olarak tanımlanmıştır (Sharma, 1984). Daha sonra yapılan çalışmalarda Schottky ve Mott kendi çalışmalarında metal-yarıiletken ara yüzeyde elektronların potansiyel engel üzerinden sürüklenmesi ile difüzyon etkisini 1938 yılında açıklamışlardır. Mott potansiyel engelin, yarıiletkenin iş fonksiyonu ve metalin iş fonksiyonu arasındaki bağlantı ile ilgili olduğunu ifade etmiştir. Schottky ise Poisson

denklemlerini dikkate alarak, elektrik alanının lineer olması ve elektrostatik potansiyelin ikinci dereceden artması sebebiyle engel bölgesinde değişmeyen serbest yüklerin bulunmasının gerekli olduğu ifade etmiştir (Rhoderick, 1988). Nobel ödüllü Alman fizikçi Bethe ise, Schottky engelli cihazlarda akım iletim mekanizması için Termoyonik Emisyon teorisini 1942 yılında ileri sürdü (Bethe, 1942). Bu teoriye göre akım, elektronların yarıiletken metal doğru emisyon yapması ile ilerler. Metal-yarıiletken ile ilgili yapılan çeşitli çalışmalar 1960'lı yıllarda hız kazanmış ve daha sonraki yıllarda da çalışmalara önem verildiği görüldü. Yarıiletken fotodedektörler, Schottky diyotlar, alan etkili transistörler ve güneş hücreleri gibi birçok devre elemanı metal-yarıiletken kontaklar kullanılarak geliştirilir.

Schottky ve omik kontaklar birçok elektronik cihazın tamamlayıcı elemanlarıdır. Her iki kontakın temeli bitişik metal-yarıiletken kontaklara dayanır fakat özellikleri oldukça farklıdır. Schottky kontaklar, akım akışına tek yönlü olacak şekilde izin verirler. Bir Schottky diyot, engel yüksekliği ile ayırt edilir. Bu durum eklemden geçen akımı etkiler ve önemli bir tasarım parametresidir. Omik kontaklar ise metal-yarıiletken eklemde iki yönde de eşit kolaylıkta yük geçişine izin verirler. Aynı zamanda düşük kontak direncine sahip olmaları gerekir (Barnard, 1996).

Son yıllarda, durum yoğunluğunun kuantizasyonu ile değiştirilen yapısal ve elektronik durumlar nedeniyle katkılı yarıiletken nanopartiküllere daha fazla ilgi gösterilmeye başlandı. Genel olarak, taban sıcaklığı, katkı konsantrasyonu ve başlangıç çözeltilisinin konsantrasyonu elde edilen filmlerin yapısında önemli bir etkiye sahiptir. Aynı zamanda oksitli yarıiletken malzemelerin elektriksel özellikleri ısı ileme veya uygun katkı ile tamamen değiştirilebilir. PbO, geniş sıcaklık aralığına sahip malzemelerde, gaz sensörlerinde, ağ değiştiricilerde ve yüksek güç yoğunluklu cihazlarda yaygın olarak kullanılan fotoaktif bir yarı iletkenidir (El-Damrawi ve Mansour, 2005). Schottky tipi fotovoltaik aygıtlarda fotoaktif tabaka olarak ve ters polimer güneş hücrelerinde yüzey modifikasyon tabakası olarak gösterilmiştir (Droessler vd., 2012). Kurşun oksidin sahip olduğu farklı fazlar arasında, PbO, düşük elektrik iletkenliği, ilginç yarı iletken ve foto iletken özellikleri ile ilgi çekici bir malzemedir ve bu da PbO'yu lazer teknolojisi ve görüntüleme cihazı uygulamalarında önemli bir yere sahip olmasını sağlamaktadır (Trinquier ve Hoffmann, 1984). PbO sıcaklık ve basınca göre iki polimorfik form sergiler. Düşük sıcaklıklarda stabil olan tetragonal faz (α -PbO) ve

yüksek sıcaklıklarda stabil olan ortorombik faz (β -PbO) (Zhang vd., 2005). Her iki fazdaki PbO filmler farklı yansıtma seviyeleri sergiler ve optik depolama aygıtları olarak kullanılabilirler (Chao vd., 1990). PbO'nun bu özelliği enerji boşluğunun, kristalliğin ve foto iletkenliğin ayarlanmasına yardımcı olur (Mythili ve Arulmozhi, 2014). Aynı zamanda düşük maliyetli ve doğada kolay bulunması, geniş kullanım alanı PbO'ya olan ilgiyi arttırmaktadır. Literatür incelendiğinde güneş pili ön penceresi için uygun maliyetli, zehirsiz olması ve oksijen sensörü gibi uygulama alanlarında kullanılabilir olması PbO'yu ticari açıdan da tercih edilebilir kılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, katkısız PbO ve farklı oranlarda (%2-4-6-8)Cu katkılı PbO ince filmler SILAR tekniği ile cam alttaş üzerine ve p-Si yarıiletkenin önyüzüne biriktirilerek elde edildi. Elde edilen ince filmlerin yapısal, yüzeysel, optik ve elektriksel özellikleri incelendi. p-Si ön yüzü üzerine oluşturulan ince filme metal Al buharlaştırılarak farklı oranlarda Cu katkılı PbO arayüzeyli Al/p-Si Schottky diyotlar oluşturuldu. İlave ten elde edilen arayüzey tabakalı diyotların elektriksel parametrelerini karşılaştırabilmek için Al/p-Si arayüzey tabakasız Schottky diyot referans diyot olarak üretildi. Yapının I-V ölçümleri alınarak elektriksel parametreleri belirlendi ve karşılaştırıldı. Literatür taraması sırasında SILAR tekniği ile Cu katkılı PbO kullanılarak ince film üretimi ile ilgili çalışmaların neredeyse hiç olmadığı görülmektedir. Bu bakımından yapılan bu tez çalışmasının bilim dünyasına önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Nwodo (2011), yaptığı çalışmada, kimyasal banyo biriktirme tekniği ile biriktirilen PbO ince filmin kimyasal, yapısal ve optiksel karakterizasyon analizlerini incelemiştir. PbO ince filmlerin yüksek geçirgenlik özelliği gösterdiğini gözlemiştir. XRD analizi, yüksek sıcaklıkta tavlamanın filmlerin daha iyi kristalleşmesine yol açtığını ortaya çıkarmıştır. Aynı şekilde optik çalışmaların ve yasak enerji bant aralığı analizlerinin de yüksek sıcaklıkta tavlamanın ince film özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ifade etmiştir. İnce filmin yasak enerji bant aralık değerini 2.6-2.8 eV aralığında olduğunu ileri sürmüştür.

Droessler vd. (2012), yaptıkları çalışmada PbO, bir Schottky tabanlı fotovoltaik cihazında aktif katman olarak ilk defa uygulamışlardır. Kurşun ince filmleri termal olarak biriktirip çok kristalli PbO filmleri üretmek için oksitleme yapmışlardır. Oksitleme işlemini farklı sıcaklıklarda ve 5, 15, 40 saat olmak üzere farklı süreler uygulamışlardır. Oksitlenen Pb ince filmlerin XRD desenleri gösterilmiştir. Aynı zamanda sürenin artmasıyla birlikte piklerin kaybolduğu ifade etmişlerdir. 15 saate kadar tetragonal PbO, 40 saatten sonra ise ortorombik PbO gözlenmiştir. Filmlerin tanecik boyutunu 20-30 nm olarak ifade etmişlerdir. Ayrıca üretilen yapıların yasak enerji bant aralık değerlerini hesaplamışlardır. PbO'nun yasak enerji bant aralık değerlerini, ortorombik PbO için 2.8 eV ve tetragonal PbO için 1.9 eV olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Pasha vd. (2012), solvo-termal teknikle düşük sıcaklıkta bir PbO numunesi hazırlamışlardır. XRD desenleri incelendiğinde, 75 °C'de kararlı kristal fazın oluştuğunu ifade etmişlerdir. PbO numunesinin iletkenlik çalışmaları geniş bir frekans ve sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Geçirimli elektron mikroskobu ve seçilen alan elektron kırınım analizi, 15-30 nm değer aralığında PbO kristalin nanorodlarını ileri sürmüşlerdir.

Arulmozhi ve Mythili (2013), PbO nanopartikülleri, Kurşun (II) asetat öncüsü kullanarak kimyasal olarak sentezlemişlerdir. Oleik asit, Setril Tri Metil Butoksit (CTAB) ve Etilen Diamin Tetra Asetik asit (EDTA) gibi organik kapatma maddelerinin nano partiküllerin morfolojisi ve boyutu hakkındaki etkilerini

araştırmışlardır. Bu çalışmada X ışını kırınımı (XRD), fotoluminesans (PL), alan emisyon tarama elektron mikroskopisi (FE-SEM), Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), iletim elektron mikroskopu (TEM) ve enerji dağılım spektroskopisi (EDS) gibi yapısal, optiksel ve morfolojik özellikleri açısından analiz edilmesi için kullanılmıştır. Karakterizasyon çalışmaları, saf PbO'nun tanecik boyutunu yaklaşık olarak 40 nm ve yasak enerji bant aralık değerini ise yaklaşık olarak 3.73 eV olduğunu hesaplamışlardır. Araştırma sonuçlarına göre nano partiküllerin sentezinde kapatma maddelerin kullanılması biyo uyumlu olan ve biyo sensörlerin imalatına çok iyi uyum sağlayabilecek ürünler vereceğini ileri sürmüşlerdir.

Mythili ve Arulmozhi (2014), Zn katkılı PbO nanopartikülleri kimyasal buhar biriktirme tekniği ile sentezlemişlerdir. XRD analizi, Zn'nin katkılılaşma konsantrasyonlarının artmasıyla birlikte kristalliğin ve pik genişliğinin arttığını bunun da partikül seviyesinde karışmayı işaret ettiğini ifade etmişlerdir. UV-Vis spektrometresinden optimum Zn konsantrasyonu için maviye kayan absorpsiyon zirvesi ve artan yasak enerji bant aralığı gözlemlendiğini, PL emisyon analizi ile Zn katkısı nedeniyle değiştirilmiş kusur seviyelerini gösterdiğini ifade etmişlerdir. Katkılı PbO ince filmler için yasak enerji bant aralık değerleri biraz daha yüksektir; bunun katkılı atomların yarattığı ek enerji seviyelerinden kaynaklanıyor olabileceğini ifade etmişlerdir. Optimum Zn konsantrasyonundan sonra enerji bant aralığı değerleri azalmaya başlamış ve bu durumun XRD analizlerinden hesaplanan kristalit boyutuyla ilişkilendirilebileceğini ileri sürmüşlerdir.

Mythili ve Arulmozhi (2014), α ve β fazındaki PbO nanopartikülleri kimyasal çöktürme tekniği ile sentezlemişlerdir. Numuneleri, X-ışını kırınımı (XRD), UV-Vis ve fotoluminesans (PL) spektroskopisi kullanarak karakterize etmişlerdir. XRD analizi, ortalama kristalit boyutunun sırasıyla 36 ve 47 nm α -PbO için tetragonal yapıyı ve β -PbO nanopartikülleri için ortorombik yapıyı doğruladığını ifade etmişlerdir. UV-Vis spektrometresinden doğrudan yasak enerji bant aralık değerlerini, α -PbO için 3.91 eV ve β -PbO için 3.85 eV olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Suganya vd. (2015), PbO ince filmleri, düşük maliyetli kimyasal tekniklerden olan püskürtme ve SILAR tekniğini kullanarak uygun şekilde temizlenmiş cam alttaşlar üzerinde üretmişlerdir. PbO ince filmler, X-ışını kırınımı, taramalı elektron

mikroskobu (SEM), UV-Vis spektrometresi karakterize etmişlerdir. XRD analizleri ile hem püskürtme hem de SILAR ile kaplanmış ince filmlerin, (0 0 2) yöneliminde tetragonal faza sahip olduğunu ve polikristal gibi görüldüğünü ileri sürmüşlerdir.

Cıbrır (2017), tez çalışmasında PbO ince filmleri, ısı buharlaştırma yöntemi kullanarak p-Si alttaşı üzerinde biriktirerek Al/PbO/p-Si (MIS) yapıları üretmiştir. Üretilen Al/PbO/p-Si yapıların akım-gerilim (I-V), kondüktans-gerilim (G-V) ve kapasite-gerilim (C-V) ölçüm sonuçları kullanılarak bariyer yüksekliği, saturasyon akımı, seri direnç ve idealite faktörü gibi kontak parametreleri termoyonik emisyon teorisini kullanarak hesaplamıştır. Hesaplamalar ve deneysel ölçümler bu ve benzeri kontak yapısına sahip yapılar için arayüzey durumlarının, yalıtkan tabaka ve seri direncin I-V, G-V ve C-V ölçümleri üzerine etkisinin çok önemli olduğunu göstermiştir. Bundan dolayı yapının elektriksel karakteristiklerinin analizinde bu parametreler kesinlikle dikkate alınması gerektiğini, ayrıca sonuçların güvenilirliği ve doğruluğu açısından oldukça önemli olduğunu ileri sürmüştür.

Suryawanshi vd. (2018), farklı oranlarda Mn katkılı PbO ince filmleri cam alttaş üzerine püskürtme tekniği kullanarak üretmişlerdir. İnce filmlerin yapısal ve morfolojik özellikleri X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelemiştir. XRD analizleri, biriktirilen PbO ve Mn katkılı PbO filmlerinin polikristal olduğunu ve ince filmlerinin kristalliği, Mn konsantrasyonunun artmasıyla birlikte giderek bozulduğunu ifade etmişlerdir PbO yapısına Mn katkılanması sonucunda güçlü morfolojik ve yapısal farklılıklar gözlemiştir. Katkısız PbO ince filmi için yasak enerji bant aralık değeri 2.59 eV, Mn konsantrasyonunun artmasıyla PbO ince filmlerin yasak enerji bant aralık değerlerinin 1.66 ile 2.72 eV arasında değiştiğini ifade etmişlerdir. Dalga boyuna bağlı salınımların Mn katkılı PbO ince filmlerin kırılma indisi ve dielektrik sabitleri için açıkça görüldüğünü dolayısıyla dalga boyunu ayarlayarak optoelektronik cihazların imalatı için istenilen malzeme elde edilebileceğini ileri sürmüşlerdir.

Hashim ve Mohaimed (2018), PbO ince filmleri, cam alttaş üzerine 130 nm kalınlıkta 0.7 nm/s çökeltme hızı ile vakumlu termal biriktirme tekniğini kullanarak üretmişlerdir. Tavlama sıcaklığını, 2 saat için 523 K ile 723 K arasında değiştirmişlerdir. PbO ince filmin yapısal ve kristal boyutunu incelemek için X-ışını kırınım analizi kullanılmıştır.

Tavlama etkisinden önce XRD sonuçları PbO ince filminin amorf yapıda olduğunu göstermiş, tavlama sonrası karşılık gelen kırınım desenleri, filmlerin (020) yönelimli, tetragonal PbO ve ortorombik PbO'nun polikristal yapıda olduğunu ifade etmişlerdir. Ortalama kristalit boyutlarını; 15.11- 36.80 nm aralığında hesaplamışlardır. Morfolojik özelliklerine bakıldığında AFM görüntülerinden PbO ince filmlerin iyi bir homojen yüzeye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Tavlama sıcaklıklarının artmasıyla pürüzlülük ortalaması ve RMS (ortalama karekök değerleri) artmıştır. 523 K' de tavlanan PbO ince filmin daha yüksek optik geçirgenlik değerine sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Optik özellikler, PbO ince filmlerin doğrudan bant geçişlerine izin verdiğini ve artan tavlama sıcaklığıyla beraber yasak enerji bant aralıklarının azaldığını ileri sürmüşlerdir.

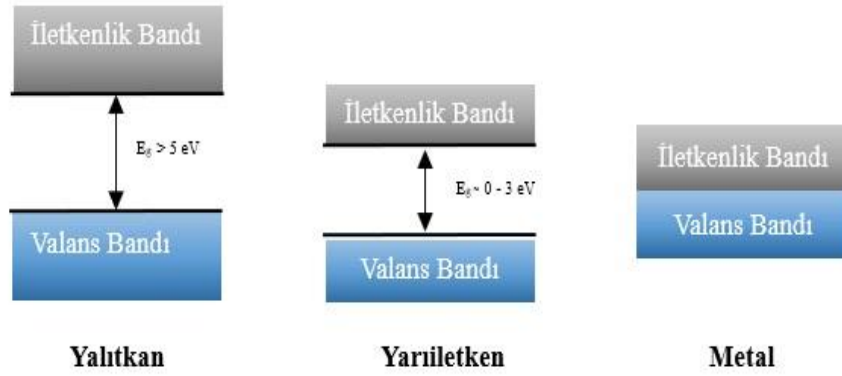
Kaymak vd. (2018), PbO bazlı MOS (metal oksit yarı iletken) tipi yedi farklı Schottky bariyer diyotlarının Al/PbO/p-Si yapısı üzerindeki elektriksel özellikleri araştırmışlar ve bir karşılaştırma yapmışlardır. Al/PbO/p-Si yapıları üretmişler ve bunların akım-voltaj (I-V) özelliklerini oda sıcaklığında ve karanlık ortamda ölçüm yaptıklarını ifade etmişler. Yedi tane Al/PbO/p-Si Schottky bariyer diyotunun doyma akımı, idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnci gibi elektriksel karakteristik parametreleri, termiyonik emisyon teorisi kullanılarak ileri ön gerilim I-V karakteristiklerinden inceleme yapmışlardır. Yedi diyot için idealite faktörlerinin deneysel değerleri 1.09 ile 2.95 aralığında, seri dirençleri $dV/d\ln(I)-I$ karakteristikleri kullanılarak 1.18-3.20 k Ω aralığında, bariyer yükseklikleri 0.64-0.74 eV aralığında ve seri dirençleri 1.41-3.38 k Ω aralığında olduğunu ileri sürmüşlerdir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Yarıiletkenler

Elektrik iletkenliklerine göre maddeler yalıtkan, yarıiletken ve metal olarak üç gruba ayrılır. Yalıtkanlar, yarıiletkenler ve metaller arasındaki farklar, katıların bant teorisi ile açıklanır. Yarıiletken malzemeler normal koşullar altında elektriksel olarak yalıtkan özellik gösterirler fakat ısı, manyetik alan, optik uyarım, elektriksel gerilim gibi dış etmenlerle uyarıldıklarında iletken özellik gösterirler. Dış etmenler ortadan kalktığında ise yalıtkan duruma geri dönerler (Neamen, 2012).

Yarıiletken malzemeler, iletkenler ve yalıtkanlar arasında oda sıcaklığında $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ ile $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ aralığında elektriksel bir özdirence sahiptir (Pech-Canul, 2019). Yarıiletken malzemenin elektriksel direnci; ışık, voltaj, sıcaklık, manyetik ve elektrik alan gibi dış etmenlerle değişebilir (Kittel, 1996).



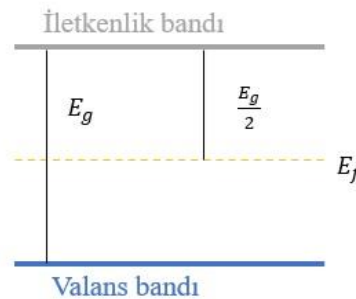
Şekil 3.1. Yalıtkan, yarıiletken ve metallerde enerji bant yapıları

Kristal örgünün periyodikliğiyle yarıiletken malzemelerde izinli bant ve yasak bant olarak adlandırılan Şekil 3.1'de verildiği gibi enerji bölgeleri vardır. Yarıiletkenler, serbest elektronların olduğu iletkenlik bandı ile bağlı elektronların olduğu valans bandı ve bunların arasında bulunan yasak enerji bant aralığına sahiptir (Kittel, 1996). Yarıiletken malzemelerde iletimin gerçekleşmesi için valans bandındaki serbest dolaşan elektronların iletkenlik bandına geçmesi gerekir. Termal bir şekilde uyarılan valans bandındaki elektronlardan, yasak enerji bant aralığını aşabilecek kadar bir

enerjiye sahip olan elektronlar buradan iletkenlik bandına geçerler ve serbest hareket edebilirler. İletkenlik bandında dolaşan elektronlar ve valans bandında uyarılmış halde bulunan elektronların geride bırakmış oldukları deşikler elektriksel iletimde oldukça önemlidir (Neamen, 2012). Yalıtkanlarda, yasak enerji bant aralığı geniş olduğundan dolayı dış etmen yasak enerji bant aralığını geçmeyecektir. Metallerde ise valans ve iletkenlik bandı çakışıktır böylelikle bantlar arasında bir enerji farkı yoktur. Bundan dolayı valans bandında bulunan bir elektron bir dış etmen uygulanmadan iletkenlik bandına geçer ve böylelikle iletkenlik sağlanmış olur. Optik, elektriksel ya da termal uyarılar yarıiletken malzemenin elektriksel özelliklerini değiştirecektir (Boylestad ve Nashelsky, 1998; Seeger, 2004).

3.1.1 Saf yarıiletkenler

Saf yarıiletkenler, katkı atomu içermeyen yarıiletken malzeme türüdür. Mutlak sıfır sıcaklığında yarıiletkenlerin valans bandı doludur ve yasak enerji bant aralığı E_g kadar bir enerji farkı ile boş olan iletkenlik bandından ayrılır. Sıcaklık değeri arttırıldığında termal uyarılma yardımıyla hareketlilik kazanan elektronlar, valans bandından iletkenlik bandına geçer. Böylelikle iletkenlik sağlanır. Yeterli enerji alarak iletkenlik bandına geçen elektronlar valans bandında deşik bırakır. İletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu, valans bandındaki deşik yoğunluğuna eşit olduğunda yarıiletkenler saf, katkısız yarıiletkenler olarak adlandırılır. Böylece Fermi seviyesi iletkenlik ve valans bandının tam ortasında bulunur. Saf yarıiletkende enerji bant aralığı ve Fermi enerji seviyesinin şematik gösterimi Şekil 3.2’de verildi.



Şekil 3.2. Saf yarıiletkende enerji bant aralığı ve fermi enerji seviyesi

Saf yarıiletkenlerin Fermi seviyesi, sıcaklıktan bağımsız olarak, yasak enerji bant aralığının yarısına eşit olduğu Eş. 3.1' de verildi.

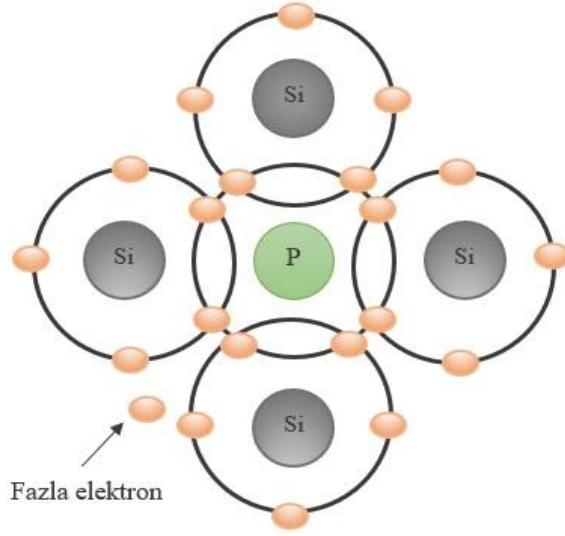
$$E_f = \frac{1}{2} E_g \quad (3.1)$$

Valans bandında yer alan elektronlar oda sıcaklığında da yasak enerji bant aralığının yarısı kadar enerjiye sahiptir. Bu eşitlik aynı zamanda saf yarı iletkenlerde Fermi enerji seviyesinin (E_f) değiştirilemez olduğunu gösterir. Saf yarıiletkenlerin en temel örnekleri 4A grubundan, 0.72 eV ve 1.1 eV enerji bant aralığındaki Germanyum (Ge) ve Silisyum (Si) dur. Oda sıcaklığında Ge atomu iletken özellik gösterirken Si atomu yalıtkan özellik gösterir. Bundan dolayı Si bütünleşmiş diyot, transistör gibi devrelerde Ge'ye göre daha çok tercih edilir (Sharon, 2016).

3.1.2 Katkılı yarıiletkenler

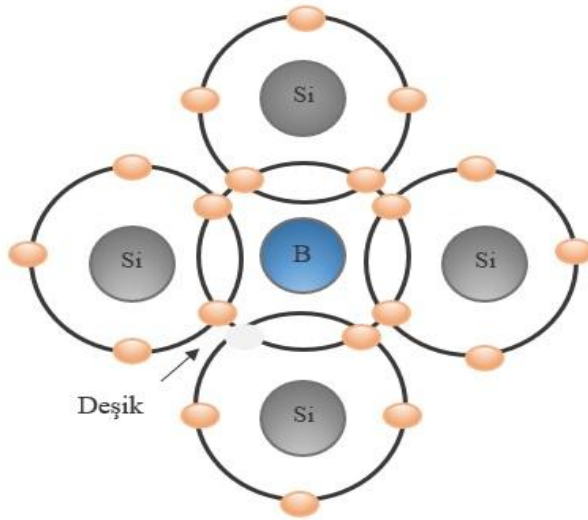
Katkılı yarıiletkenler, safsızlık atomları katkılama yapılarak bozulmuş olan yarıiletkenlerdir. Katkılama yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, katkılanan safsızlık atomunun miktarının katkılanacak yarıiletkenin örgü yapısını bozmaması gerekir. Katkılama yarıiletkenlerin elektronik dağılımında değişikliklere sebep olmaktadır. Katkılama, n-tipi ve p-tipi olmak üzere yarıiletkenlere iki tip özellik kazandırır. Yarıiletkene katkılanan atom malzemeye elektron verir. Elektron alarak boşlukların çok olduğu bir malzeme meydana gelmişse elektron alıcı atom ve elektronların çok olduğu akım iletim mekanizması meydana gelmişse elektron verici atom adını alır (Erol ve Balkan, 2015).

n-tipi yarıiletkenler, serbest elektron yoğunluğuna sahip yarıiletkenlerdir. Elektron verici (donör) atomların kristale katkılanması sonucu meydana gelir. Bu tip yarıiletkende elektron miktarı deşik miktarından fazla olduğu için burada yük taşıyıcı elektronlar çoğunluktadır. Örnek olarak, periyodik tabloda yer alan IV. grubundaki Si ve Ge elementine V. gruptaki (As, N, P, vb.) atomlardan biriyle katkılama yapılması sonucu n-tipi bir yarıiletken elde edilebilir. n-tipi yarıiletkenin şematik bağ yapısı Şekil 3.3'te verildi.



Şekil 3.3. n-tipi yarıiletken şematik bağ yapısı

p-tipi yarıiletkenler, alıcı atomlar ile malzemenin katkılanması sonucunda elde edilen yarıiletkenlerdir. Periyodik tablonun IV. Grubunda yer alan Si ve Ge gibi son yörüngesinde dört valans elektronu olan atomlara, III. Grupta bulunan Ga, Al ve B gibi son yörüngesinde üç valans elektronu olan atomlardan belirli bir oranda katkılanma yapılması durumunda, bu elementlerin üç elektronu Si ve Ge atomları ile birlikte kovalent bağ yaparlar. Böylece Si ve Ge atomlarının bir elektronu bağ yapamaz ve bir elektron eksikliği oluşarak deşik meydana gelir. Bu katkılama ile p-tipi yarıiletken elde edilir (Singh, 2003). p-tipi yarıiletkenin şematik bağ yapısı Şekil 3.4'te verildi.



Şekil 3.4. p-tipi yarıiletken şematik bağ yapısı

3.1.3. Yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluğu

Yarıiletken malzemenin çalışma yapısını ve özelliklerini belirleyen en önemli faktör taşıyıcı yoğunluğudur. Taşıyıcı yoğunluğunu yani hol ve elektronların sayısının belirlenmesinde Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu kullanılır. Bu fonksiyon Eş. 3.2’de verildi.

$$f(E) = \frac{1}{1+e^{\frac{(E-E_f)}{kt}}} \quad (3.2)$$

Burada Fermi enerji seviyesi (E_f) ve Boltzmann sabiti (k) olarak verildi.

Fermi enerji seviyesi, yasak enerji bant aralığında olduğu zaman $(E-E_f) \gg kT$ yaklaşımı varsayımıyla Maxwell-Boltzmann yaklaşımı ile dağılım denklemi Eş. 3.3’te verildi (Neamen, 2012).

$$f(E) = \frac{1}{1+e^{\frac{(E-E_f)}{kT}}} \approx \exp\left[-\frac{(E-E_f)}{kT}\right] \quad (3.3)$$

Yarıiletken malzemenin iletkenlik ve valans bantlarındaki hol ve elektronların sayısı Maxwell-Boltzmann yaklaşımı ile elde edilebilir. Saf ya da katkılı yarıiletkenler termal dengedeyken hol ve elektron konsantrasyonu Eş. 3.4 ve Eş. 3.5’te verildi.

$$n_0 = N_c \exp\left[-\frac{(E_c-E_f)}{kT}\right] \quad (3.4)$$

$$p_0 = N_v \exp\left[-\frac{(E_f-E_v)}{kT}\right] \quad (3.5)$$

Burada N_c ifadesi iletkenlik bandındaki, N_v ifadesi valans bandındaki etkin durum yoğunluğunu belirler. Bu etkin durum yoğunlukları sırasıyla, Eş. 3.6 ve Eş. 3.7’te verildiği gibi yazılabilir.

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} (m_n^*)^{\frac{3}{2}} \quad (3.6)$$

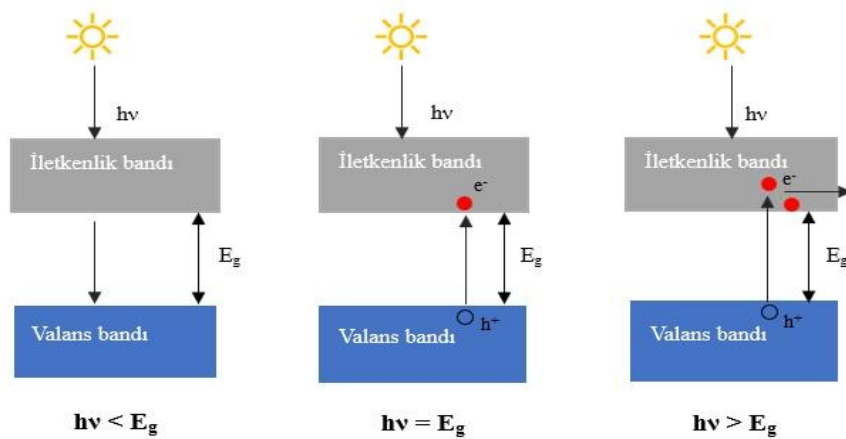
$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi kT}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}} (m_p^*)^{\frac{3}{2}} \quad (3.7)$$

Burada, m_n^* elektron kütleleri, m_p^* hollerin kütleleri olarak verildi ve h Planck sabitidir (Colinge ve Colinge, 2005; Neamen, 2012).

3.1.4. Yarıiletkenlerin optik özelliği

Yarıiletken malzeme üzerine düşürülen fotonlar, yüzeyde bulunan elektronlar ile optik olayların gerçekleşmesine sebep olur. Optik olaylar yansıma, soğurma ve geçirgenlik gibi farklı gruplarda incelenebilir.

Optik soğurma, yarıiletken malzemelerin bant aralıklarını belirlemek için kullanılan en yaygın metottur. Soğurma işleminde, enerjisi belli olan bir foton, düşük enerji seviyesinde olan bir elektronu daha yüksek bir enerji seviyesine uyarır. Malzeme yüzeyine gönderilen foton geçiriliyor ise fotonun enerjisi yasak enerji bant aralığından düşük eğer foton soğuruluyor ise fotonun enerjisi yasak enerji bant aralığından büyüktür. Yarıiletken malzeme yüzeyine fotonun gönderilmesiyle yarıiletkenin yasak enerji bant aralığı E_g ile fotonun enerjisi olan $h\nu$ arasındaki soğurma ve geçirgenlik olayları Şekil 3.5'te verildi.



Şekil 3.5. Yarıiletken ile foton arasındaki etkileşimleri gösteren diyagram

$h\nu < E_g$ durumunda fotonun enerjisi, yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığından daha düşüktür. Bundan dolayı fotonlar, elektronları iletkenlik bandına çıkartabilecek

kadar enerjiye sahip olmadıkları için soğrulma gerçekleşmez. Fotonun soğurulabilmesi için yasak enerji aralığındaki Fotonun soğurulabilmesi, yasak enerji aralığındaki kirliliklere ya da kristal yapı kusurlarına bağlı tuzak seviyelerinde gerçekleşir.

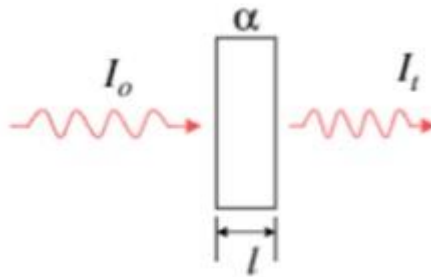
$h\nu=E_g$ durumunda fotonun enerjisi, yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığına eşittir. Burada yarıiletken malzemenin kristal yapısında titreşim meydana gelir ve bu durum malzemeden ısı enerjisi çıkmasına sebep olur.

$h\nu>E_g$ durumunda fotonun enerjisi, yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığından daha büyüktür. Foton, valans bandında bulunan elektronları iletkenlik bandına çıkartabilecek kadar bir enerjiye sahiptir. Foton ikinci durumdaki gibi elektron boşluk çifti oluşturmak için soğurma yapacaktır. Fakat arada oluşan fazla enerji ısı enerjisi şeklinde açığa çıkacaktır (Henry, 1980; Trupke ve Würfel, 2002).

Fotonların, yarıiletken malzeme tarafından soğurulması, yarıiletkenin soğurma katsayısı olan (α) değerine ve yarıiletkenin kalınlığına (l) bağlıdır. Kalınlığı l olan yarıiletkenin üzerine I_0 şiddetli ile foton gönderilir ve yarıiletken malzemeyi I_t şiddeti ile geçer. Beer-Lambert yasası ile I_0 ve I_t ilişkisi; Eş. 3.8'de verildiği gibidir (Sze, 2002).

$$I_t = I_0 e^{-\alpha l} \quad (3.8)$$

Fotonların l kalınlıklı bir yarıiletkende soğurulması Şekil 3.6'da verildi.



Şekil 3.6. Fotonların l kalınlıklı bir yarıiletkende soğurulması

3.2. Metal – Yarıiletken Kontaklar

Metal yarıiletken kontak (MS); yarıiletken ve metallerin birbirleriyle temas ederek birleşmesiyle oluşan ikili yapı kontaklarıdır. Metal yarıiletken kontakların iletkenlik özelliklerinin incelenmesi için kristal yüzeyine uygun olan metaller ile kontak oluşturulmalıdır. Kontak ideallığı için düşük temas direnci, kontak malzemelerin yüzeylerinin temiz ve pürüzsüz olması gerekir.

Omik kontaklar, yarıiletken ve metal arasında yük taşıyıcıların (elektron ve hol) hareketinin her yönde kolaylıkla sağlandığı kontaklardır. Schottky kontaklar ise elektron ve hollerin metalden yarıiletkene diğer yöndeki hareketinden daha büyük olduğu kontaklardır. Kontakın omik ya da Schottky kontak olmasını, metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları belirler. İş fonksiyonu (Φ), bir elektronun Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine geçmesi için gerekli olan minimum enerji olarak tanımlanmaktadır (Rhoderick, 1982).

Metalin iş fonksiyonu Φ_m olarak yarıiletkenin iş fonksiyonu ise Φ_s ile gösterildi. Buna göre; metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin iş fonksiyonu arasındaki ilişki Çizelge 3.1’de verildi.

Çizelge 3.1. İş fonksiyonlarına göre Schottky ve omik kontaklar

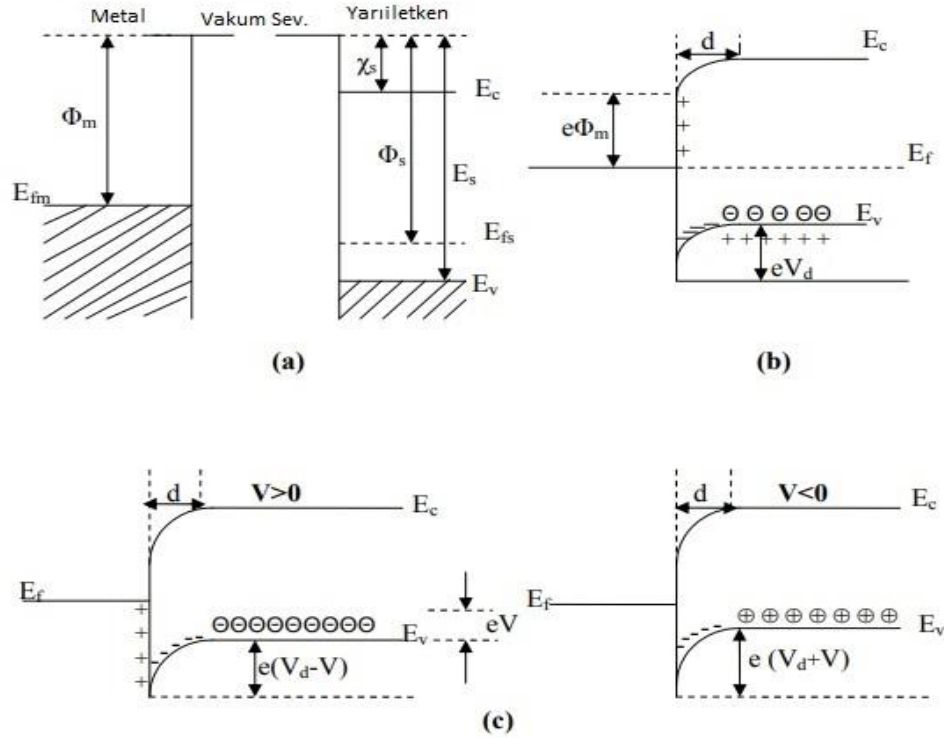
n-tipi	p-tipi	Kontak
$\Phi_m > \Phi_s$	$\Phi_m < \Phi_s$	Schottky
$\Phi_m < \Phi_s$	$\Phi_m > \Phi_s$	omik

n-tipi ve p-tipi metal-yarıiletken Schottky ve omik kontaklar Çizelge 3.1’de gösterilen durumlarda oluşmaktadır (Sze, 1981).

3.2.1. Metal/ p-tipi yarıiletken Schottky kontaklar

Metal/ p-tipi yarıiletken Schottky kontaklarda, akım iletimi holler tarafından sağlanır. Metalin ve p-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonuna göre metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ve yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) olarak verilir. $\Phi_m < \Phi_s$ olduğu durumda metal / p tipi

Schottky kontak oluşur. Akım iletimi holler tarafından sağlanan p-tipi yarıiletkenin metal ile kontak edilmesi sonucunda metalin iş fonksiyonunun p-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük olması durumundaki enerji bant seviyeleri Şekil 3.7’de verildi.



Şekil 3.7. Metal/p-tipi yarıiletken Schottky kontakların enerji-bant seviyeleri

Şekil 3.7’de görüldüğü gibi $\Phi_m < \Phi_s$ ve oda sıcaklığında yarıiletkendeki tüm alıcılar iyonize olmuş olsun. Kontakta önce (a) durumunda Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar aşağıdadır. Burada kontak oluşumu sırasında metal ve yarıiletkendeki elektron dağılımı farklıdır. Bundan dolayı oluşan farkı kaldırmak ve yük denge dağılımını sağlamak için bu iki madde arasında bir yük alışverişi olur. Kontakta sonra (b) durumunda Fermi seviyeleri aynı düzeye gelinceye kadar metalden yarıiletkene doğru bir elektron akışı meydana gelir. Bunun sonucunda, yarıiletkendeki holler iyonize olurlar. Yarıiletkenin yüzey tabakasında bulunan negatif yüklü iyonize olan akseptörler d kalınlığındaki bir uzay yükü tabakası içerisinde dağılır. Yarıiletken gövdedeki Fermi enerji seviyesi $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükseldiği için, yarıiletken tarafındaki hollerdeki yüzey engeli;

$$\phi_s - \phi_m = eV_d \quad (3.9)$$

eşitliği ile verilir. Burada V_d difüzyon potansiyelidir. Kontakın metal kısmındaki holler için engel yüksekliği;

$$(\phi_s - \phi_m) + (E_s - \phi_s) = E_s - \phi_m \quad (3.10)$$

eşitliği ile verilir. Termal uyarılmadan dolayı bazı holler potansiyel engeli aşabilecek kadar enerji kazanırlar ve böylece metalin içinden geçebilirler. Metalin içinde termal dengeden dolayı holler potansiyel engeli aşarak yarıiletken tarafa geçecek kadar yeterli enerjisi bulurlar. Böylelikle kontakta engeli geçen aynı yönlü ve zıt yönlü I_0 akımı oluşur. Yarıiletkene V potansiyeli uygulandığında, yarıiletken tarafındaki elektronların enerjisi eV azalır ve buna bağlı olarak yarıiletkendeki holler için engel eV kadar azalmış olur ve metalden yarıiletkene giden hol akımı değişmez. Ancak yarıiletkenden metale doğru giden akımda artış meydana gelir. Burada yarıiletkenden metale doğru meydana gelen akımın yönü pozitif akım olarak kabul edilirse, karakteristik akım;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.11)$$

eşitliği ile verilir. Burada I_0 doyma akımıdır. Sonuç olarak yarıiletken tarafındaki elektronlar daha rahat geçer iken, metal tarafındakiler biraz daha zor geçerler ve bu şekilde oluşan kontaklara Schottky kontak adı verilir (Yahia vd., 2011).

3.2.2. Metal/ p-tipi yarıiletken omik kontaklar

Metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonuna bağlı olarak $\Phi_m > \Phi_s$ olduğu durumda metal/p-tipi omik kontak meydana gelir. Kontak alınmadan önce yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar farklıdır. Omik kontak oluşuktan sonra elektronlar, yarıiletkenden metalin içine arkada pozitif bir yüzey yükü bırakarak geçerler ve kontakın metal tarafı üzerinde bir negatif yüzey yükü oluşmasına neden olurlar. Yük alışverişi tamamlandığında, yarıiletkendeki Fermi seviyesi $\Phi_m - \Phi_s$ kadar düşerek metalin Fermi seviyesi ile aynı düzeye gelir. Burada hol yoğunluğu arttığı için yarıiletken yüzey p-tipi olur. Elektronlar metalden yarıiletkendeki boşluklara kolaylıkla geçebilirler. Meydana gelen yük hareketi hollerin yarıiletkenden metale

3.3.1. Termioyonik emisyon teorisi

Termioyonik emisyon, sıcak olan bir yüzeyden termal enerji nedeniyle taşıyıcıların salınması olayıdır. Schottky kontaklarda termioyonik emisyon teorisi, elektron ve hollerin termal enerjileriyle potansiyel engeli aşarak metalden yarıiletkene ya da yarıiletkenden metale geçişlerde meydana gelen akım iletim olayıdır. Termioyonik emisyon olayı, metal/p-tipi Schottky kontaklarda holler tarafından meydana gelirken, metal/n-tipi yarıiletken Schottky kontaklarda elektronlar tarafından sağlanır. MS kontaklarda akım iletiminin çoğunluk yük taşıyıcıları tarafından iletildiğini kabul eden termioyonik emisyon teorisinin temel varsayımları şunlardır.

- Schottky kantağın potansiyel engelini yüksekliği Φ_b , kT termal enerjisinden çok daha büyüktür.
- Schottky bölgesinde taşıyıcı çarpışmalarının hiç yaşanmadığı ya da çok az olduğudur.
- Görüntü (imaj) kuvvetlerin etkisinin göz ardı edildiğidir. (Rhoderick, 1988; Sze, 2007)

Buradaki ilk varsayım, termioyonik emisyon teorisinin gerçekleştirilebilmesi için, Maxwell-Boltzmann yaklaşımına uyabilmesine ve termal denge durumunun bu olaydan etkilenmemesine imkân sağlar.

MS Schottky kantağa V büyüklüğünde bir doğru beslem gerilimi uygulandığında, J_{MS} metalden yarıiletkene doğru akan akım yoğunluğunu, J_{SM} yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğu olarak gösterilir.

$$J_{SM} = \int_{E_C}^{\infty} e v_x dn \quad (3.12)$$

Eş. 3.12'de yarıiletkenden metale doğru olan akımın yoğunluğu verildi. Burada v_x , elektronların iletim mekanizması üzerinden $+x$ yönündeki sürüklenme hızı, E_C ise metal bölge içindeki termioyonik emisyon için gereken minimum enerjidir. Artan elektron yoğunluğu;

$$dn = N(E)F(E)dE \quad (3.13)$$

Eş. 3.13'te verildi. Burada $N(E)$ iletkenlik bandında bulunan durum yoğunluğu, $F(E)$ Fermi-Dirac dağılım fonksiyonudur. Yarıiletkenden metale doğru geçen elektronların akım yoğunluğu;

$$J_{SM} = \left(\frac{4\pi e k^2 m_e^*}{h^3} \right) T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad (3.14)$$

Termal dengede yarıiletkenden metale geçen elektronların akım yoğunluğu ile metalden yarıiletkene geçen elektronların akım yoğunluğu eşit olduğu Eş. 3.15'te verildi.

$$J_{SM} = J_{MS} \quad (3.15)$$

Bu durumda akım yoğunluğu;

$$J_{MS} = -A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \quad (3.16)$$

Eş. 3.16'da verildi. Metal-yarıiletken eklemdeki net akım yoğunluğu, $J = J_{SM} - J_{MS}$ denklemi ile yazılır ise;

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.17)$$

Eş. 3.17'deki verildiği gibi ifade edilir. Burada A^* Richardson sabitidir ve;

$$A = \frac{4\pi e k^2 m_e^*}{h^3} \quad (3.18)$$

Eş. 3.18'de verildi. Doyum akım yoğunluğu;

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \quad (3.19)$$

Eş. 3.19'da verildiği gibi ifade edilir ise bu durumda akım yoğunluğu da;

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.20)$$

Eş. 3.20'de verildiği şekilde gösterilir (Alialy vd., 2014).

3.3.2. Difüzyon teorisi

İki bölge arasında yoğunluk farkı ve çok yoğun bölgeden az yoğun bölgeye doğru bir yük geçişi olayı varsa bu olaya 'difüzyon' adı verilir.

İlk olarak Walter Schottky tarafından öne sürülen difüzyon teorisi belli varsayımlar üzerine kurulmuştur. Bu varsayımlar şu şekilde sıralanabilir;

- Tükenim bölgesi sınırındaki taşıyıcı yoğunluğu ısısal denge değerine sahiptir ve akımdan etkilenmez.
- Akım, sürüklenme ve difüzyon ile sınırlanmış ve burada tükenim bölgesinde bulunan elektronların çarpışma olasılıkları yani difüzyonu akıma dahil edildi.
- Potansiyel engel yüksekliği kT/q enerjisinden daha büyüktür.
- Yarıiletkendeki katkı atomlarının yoğunluğu değişmez.

Bu varsayımlardan yola çıkarak tükenim bölgesindeki akım yoğunluğu, metal/p-tipi yarıiletken kontaklar için, yoğunluk farkı ve bölgesel alana bağlı olarak Eş.3.21'de verildiği şekilde yazılabilir.

$$J = J_p = q \left[n(x)\mu_p E(x) + D_p \frac{\partial p}{\partial x} \right] = qD_p \left[\left(-\frac{qp(x)}{kT} \right) \left(\frac{\partial V(x)}{\partial x} \right) + \frac{\partial p}{\partial x} \right] \quad (3.21)$$

Burada D_p elektron difüzyon sabiti, μ_p taşıyıcı hareketliliği, $E(x)$ tükenim bölgesindeki elektrik alanı ve $p(x)$ herhangi bir x noktasındaki taşıyıcı yoğunluğudur.

$$J = J_{SD} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.22)$$

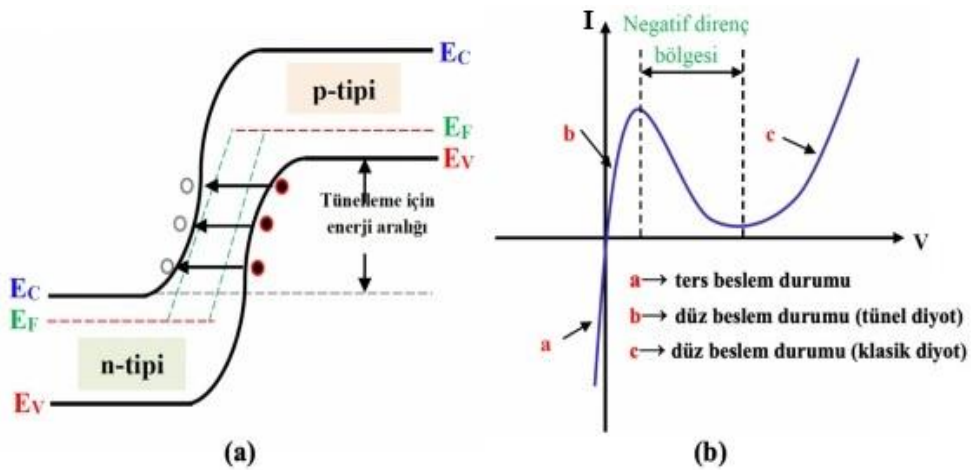
Burada J_{SD} doyum akım yoğunluğudur ve Eş. 3.23'te verildiği şekilde ifade edilir;

$$J_{SD} = \left(\frac{q^2 N_v D_p}{kT} \right) \left[\frac{2q(V_d - V) N_A}{\epsilon_s} \right]^{1/2} \exp \left(- \frac{q\phi_b}{kT} \right) \quad (3.23)$$

Burada N_v valans bandındaki etkin taşıyıcı yoğunluğu, ϵ_s yarıiletken maddenin dielektrik katsayısıdır. Termoiyonik emisyon teorisine göre difüzyon teorisinin voltaja olan bağıllığı daha fazladır, sıcaklığa bağıllığı ise daha azdır (Sharma, 1984).

3.3.3. Engel boyunca tünelleme

MS kontaklarda elektronlar potansiyel engelle karşılaşır. Potansiyel engelin az olduğu durumlarda elektronların engel üzerinden atlamasına gerek kalmaz, doğrudan engelin içinden metal tarafına tünelleme yolu ile geçebilirler (Cowley ve Sze, 1965). Engel boyunca tünelleme, yüksek katkılı yarıiletken ve düşük sıcaklıklara sahip Schottky diyotlarda görülebilir. Tünel diyot çalışma prensibi kuantum mekaniksel tünelleme olayına dayanır. Yüksek katkılı yarıiletken sahip olan Schottky diyot, tünel eklemde 10 nm kalınlığa sahip ince bir bariyer oluşturarak dar bir tükenim bölgesi meydana gelmesine sebep olur. Yüksek katkılı konsantrasyon nedeniyle Fermi enerjisi n-tipi yarıiletkenin iletkenlik bandının içine, p-tipi yarıiletkeninde de valans bandının içine kadar genişler. Burada oluşan bant yapısı, Şekil 3.9'da görüldüğü üzere hol ve elektronlar eklem potansiyel engelini aşmak yerine, engelin içinden tükenim bölgesinin diğer tarafına tünelleme yaparak geçmesini sağlar.



Şekil 3.9. Tünel diyotun a) şematik bant yapısı b) I-V karakteristiği (Ataşer, 2017)

Tünel diyota voltaj uygulandığı zaman bir tünelleme akımı oluşur. Düz beslem durumunda uygulanan voltaj artırılırsa tünelleme akımı artarak maksimum değere çıkar. Eğer voltaj değeri arttırılırsa tünel akımı azalmaya başlar. Bu bölgede diyot, negatif direnç özelliği gösterir. Uygulanan voltaj daha da arttırılırsa, tünel diyot tünelleme olayına değil, difüzyon olayının etkin olduğu klasik p-n eklemnin I-V karakteristiğini göstermeye başlar (Neamen, 2012).

3.4. Schottky Diyotun Akım Gerilim Özelliklerinin İncelenmesi

3.4.1. Cheung yöntemi

Metal-yarıiletken Schottky diyotlarda akım gerilim karakteristikleri yardımıyla idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) gibi parametrelerin belirlenmesinde Cheung fonksiyonları kullanılmaktadır. Schottky kontakların akım iletim mekanizması termiyonik emisyon teorisi ile açıklanmaktadır. Bu teoriye göre akım-gerilim bağlantısı; Eş. 3.24'te verilen denklem ile ifade edilir.

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.24)$$

Uygulanan voltajın tamamı Schottky bölgesinde düşmediği için Schottky diyotta I-V karakteristiklerinde ideal durumda sapmalar meydana gelir. Cheung fonksiyonları, oluşan bu ideal durum sapmalarını n idealite faktörünün eklenmesiyle akım yoğunluğunu Eş. 3.25'teki verilen denklem ile ifade eder.

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.25)$$

Schottky diyottan geçen toplam akım, kontağın etkin alanı ile çarpılarak elde edilir. Bu durumda toplam akım; Eş. 3.26'da verilen denklem ile ifade edilir.

$$I = AxJ = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.26)$$

Uygulanan V geriliminin IR_s kadarlık kısmı seri direnç üzerine düşeceği için V yerine $(V - IR_s)$ yazılır ise denklem Eş.3.27'de verildiği gibi yazılır.

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{e(V-IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (3.27)$$

Eş. 3.27’de verilen denklemin logaritması alındıktan V ifadesi çekilir ve $\ln I$ ’ya göre türevi alınır ise;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (3.28)$$

Eş. 3.28’de verilen denklem elde edilir. Bu denklem birinci Cheung fonksiyonudur. Denklem akıma bağlı olan grafiği lineerlik gösterir. Eğimi seri direnci verir ve idealite faktörü değerini verir. $I = 0$ ise $dV/d(\ln I)$ ekseninin kesim noktasından elde edilir. Potansiyel engel yüksekliği Φ_b ’yi bulmak için;

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln \left[\frac{I}{AA^*T^2} \right] \quad (3.29)$$

Eş. 3.29’da verilen denklem, bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlanır. Eşitlik 3.27 ve 3.28’den;

$$H(I) = n + IR_s \quad (3.30)$$

ifadesi elde edilir. Tanımlanan bu eşitliğe ikinci Cheung fonksiyonu denir. $H(I)$ ’ya karşı I grafiği doğrusal bir grafikdir. Bu doğrunun eğimi R_s değerini verirken, $H(I)$ ekseninde kestiği nokta ise Φ_b değerini verir (Cheung, 1986).

3.4.2. Norde yöntemi

Schottky diyot parametrelerini elde etmek için kullanılan bir diğer yöntem Norde tarafından ileri sürülmüştür. Norde yöntemi, idealite etmeni bir olan cihazlar için geçerli ve bir $F(V)$ fonksiyonu olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde $F(V)$ fonksiyonunun minimum noktasından faydalanılarak diyot parametreleri bulunur. Tek sıcaklıkta elde edilmiş akım-voltaj ölçümleri kullanılarak I-V eğrisinden seri direnç parametreleri ve potansiyel engel yüksekliği elde edilir.

Norde fonksiyonu;

$$F(V) = \frac{v}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (3.31)$$

Eş. 3.21'de verilen denklem ile ifade edilir. Burada Υ idealite faktöründen büyük en küçük bir tam sayıdır. Akım-gerilim grafiğinden alınan akım değeri ise $I(V)$ 'dir. Doğrunun $F(V)$ eksenini kestiği noktada ϕ_b engel yüksekliği bulunur. Engel yüksekliği Eş. 3.32'de verildi.

$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\Upsilon} - \frac{kT}{q} \quad (3.32)$$

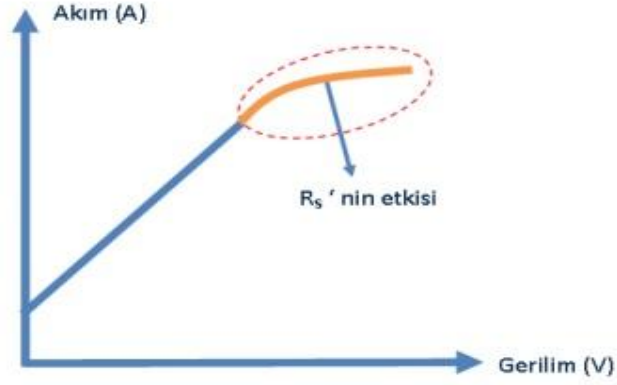
Burada $F(V_0)$, $F(V)$ Norde fonksiyonundaki minimum gerilim noktasıdır. Seri direnç (R_s) değeri ise; Eş. 3.33'te verildi.

$$R_s = \frac{kT(\Upsilon-n)}{I} \quad (3.33)$$

Burada (I) akım, $F(V)$ fonksiyonundaki minimum gerilime denk gelen değerdir (Norde, 1979).

3.4.3. Ohm yasası

Metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda kontak oluştuktan sonra yarıiletken kısımda oluşan, tüketim bölgesi dışında kalan nötral bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği bir direnç vardır. Bu dirence seri direnç denir ve R_s ile ifade edilir. Bu etki düşük gerilim bölgelerinde pek görülmez. Ancak yüksek gerilim değerlerinde yoğun bir şekilde görülür ve diyot akımının düşmesine sebep olur (Sze, 1981). Bu durum Şekil 3.10'da verildi. Bu şekilde Schottky diyota yüksek gerilim uygulandığı zaman seri direncin akımda oluşan doyum etkisi ile meydana gelen diyot akımındaki azalmayı gösterdiği söylenebilir.



Şekil 3.10 Metal-yarıiletken kontakta I-V karakteristiğinde seri direnç etkisi

İdeal Schottky diyotta R_s değeri yaklaşık olarak 0 (sıfır), R_{sh} değerinin ise $\geq 10^9 \Omega$ olmalıdır. Ancak pratikte ideal R_s değerine, kontakların alınmasında kullanılan teller, yüzey kirlilikleri, arka omik kontak, arayüzey durumları gibi birçok faktörden dolayı ulaşılamamaktadır. R_{sh} değerine ise, oksitlenme, eklem sınırındaki kusurlar, ölçüm sistemi kaynaklı olarak ulaşılamadığı söylenebilir.

Seri direnç (R_s) ve şönt direnç (R_{sh}) değerlerini Ohm yasasını I-V verilerine uygulanması sonucu elde edilebilir. Ohm yasasına göre diyotun uygulanan beslem voltajı aralığındaki direnç değeri R_i ; eşitlik 3.34'te verildi.

$$R_i = \frac{dv_i}{di_i} \quad (3.34)$$

Burada V_i ve I_i sırasıyla ilgili beslem voltajına karşılık gelen voltaj (V) ve akım (I) değerleridir. Bu eşitlikte, en ileri ters beslem voltaj değerleri kullanılır ise ve bu voltaj değerlerine karşılık gelen akım değerleri alınır ise hesaplanan direnç değeri R_{sh} değeri olur. Aynı şekilde bu eşitlikte, en ileri doğru beslem voltaj değerleri kullanılır ise ve bu voltaj değerlerine karşılık gelen akım değerleri kullanılır ise hesaplanan direnç değeri R_s değeri olur (Altındal Yerişkin, 2017).

3.4.4. Akım-voltaj verilerinden arayüzey durumlarının belirlenmesi

Arayüzey tuzakları/durumları yarıiletkenlerdeki cihaz performansını önemli ölçüde düşüren bir parametredir. İleriye dönük I-V datalarından türetilen arayüzey durumların

yoğunluğun (N_{ss}) enerjiye bağlı dağılımları (E_{ss}), Card ve Rhoderick tarafından geliştirilen denklemlere dayalı olarak hem idealite faktörünün hem de potansiyel bariyer yüksekliğinin voltaja bağlı olarak değiştiği dikkate alınarak elde edildi (Card ve Rhoderick, 1971). MS ve MIS/MPS diyotlarda, engel yüksekliği tükenim bölgesinde bulunan elektrik alana bağlıdır. Bu nedenle, engel yüksekliği (ϕ_b), yerine etkin engel yüksekliği (ϕ_e) alınır ve ϕ_e ifadesi,

$$\phi_e = \phi_b + \alpha(V) = \phi_b + \left(1 - \frac{1}{n(V)}\right)V \quad (3.35)$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemde, $\alpha(V) = \frac{d\phi_e}{dV} = 1 - \frac{1}{n(V)}$ dir. Buradan görüleceği üzere $\frac{d\phi_e}{dV}$ ifadesi, engel yüksekliğinin doğru besleme değişimini ifade edilir.

$$E_{ss} - E_v = q(\phi_e - V) \quad (3.36)$$

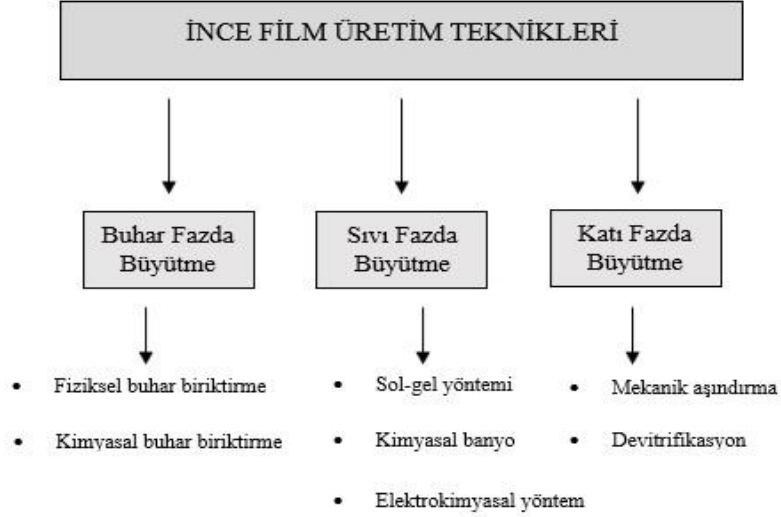
$$N_{ss}(V) = \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_i}{\delta} n(V) - 1 \right] - \frac{\epsilon_s}{w} \quad (3.37)$$

Eşitlik 3.37’de verilen ϵ_i arayüzey katman malzemesinin, ϵ_s ise yarıiletkenin geçirgenliğidir. δ ara katman kalınlığı, w tükenme katmanının genişliğidir.

3.5. İnce Film Üretim Teknikleri

İnce film, herhangi bir alttaş üzerine kaplanmış kalınlığı bir mikro metreden daha ince malzemeler olarak tanımlanmaktadır. İnce filmleri kaplama işlemleri üç temel aşamadan oluşur. Birinci aşama, kaplama için gerekli uygun iyonik, moleküler ve atomik türlerin üretilmesidir. İkinci aşama, bu türlerin bir alttaş yüzeyine aktarılmasıdır. Üçüncü aşama ise, bu türlerin doğrudan kimyasal yolla ya da elektrokimyasal reaksiyonlar ile alttaş yüzeyinde tutunmasıdır.

İnce film üretiminde kullanılan kimyasal ve fiziksel birçok teknik vardır. Genel olarak kaplama teknikleri, atomik türlerin başlangıç veya üretim formuna bağlı olarak; buhar fazda büyütme, sıvı fazda büyütme ve katı fazda büyütme olmak üzere üç grupta incelenir.



Şekil 3.11. İnce film üretim teknikleri

PbO ince filmleri kaplamak için kullanılabilecek birçok teknik vardır. Bunlar genel olarak; SILAR, sol-jel, kimyasal buhar biriktirme (CVD), fiziksel buhar biriktirme (PVD) gibi biriktirme teknikleridir. Bu tez çalışmasında, PbO ince filmler SILAR (daldırma) tekniği ile elde edildi ve bu teknik detaylı bir şekilde bir sonraki bölümde anlatılacaktır.

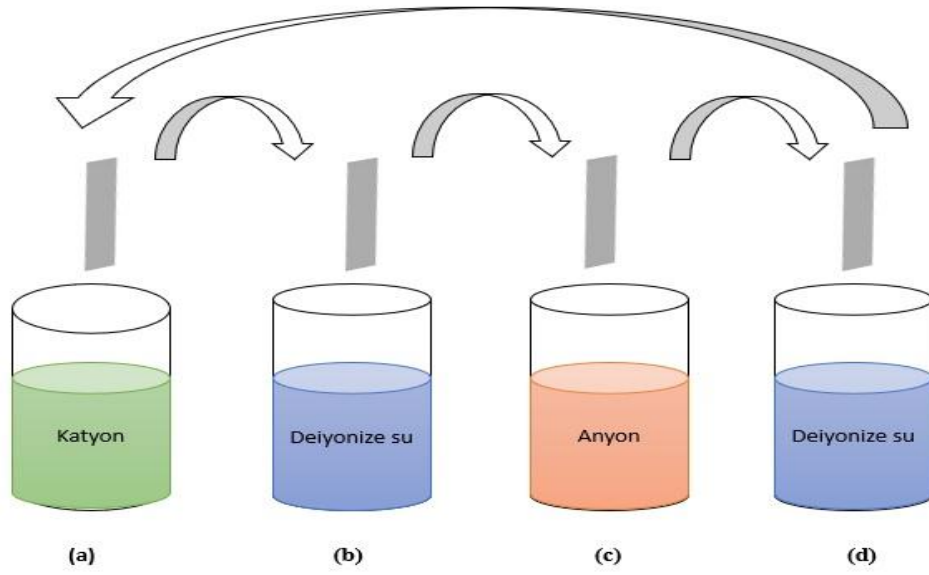
3.5.1 SILAR tekniği

İnce film biriktirme teknikleri arasında en iyilerden biri SILAR tekniğidir. SILAR tekniği, taban malzeme çözelti ara yüzeyindeki ardışık adsorpsiyonu ve reaksiyonu temeline dayanır ve çözültide homojen çökelmenin olması için her daldırma işleminde deiyonize su ile durulama işlemi uygulanır. Bu tekniğin özgünlüğü bir maddenin diğer bir maddenin üzerinde toplanması yani adsorpsiyonudur. Adsorpsiyon, bir sistemin iki fazı arasında bulunan arayüzey katmanını olarak tanımlanabilir. Burada iki heterojen fazın birbirleriyle temas ettiği durumlarda adsorpsiyon sağlanabilir. Gaz-katı, gaz-sıvı ve sıvı-katı olmak üzere üç olası adsorpsiyon sisteminden söz edilebilir. Adsorpsiyon, alttaş ve iyon yüzeyi arasındaki bir yüzey verisidir ve çözültide bulunan iyonlar ve alttaşın yüzeyi arasındaki çekim kuvveti sebebiyle mümkün olur. Bu kuvvetler, Van-der Waals kuvvetleri veya kimyasal çekim kuvvetleri olabilir. Bu süreçte çözültinin sıcaklığı, basınç, çözültinin konsantrasyonu, alttaşın yüzey alanı ve taban özelliği gibi faktörler adsorpsiyon işlemini doğrudan etkiler. Yeni adsorbe edilmiş anyonlar ve

önceden adsorbe edilmiş katyonlar içindeki reaksiyon istenen malzemenin ince filmlerini oluşmasını sağlar.

SILAR tekniğinin diğer tekniklere göre avantajları şunlardır:

- Bu teknik ince filmi, neredeyse her elementi herhangi bir oranda kaplamak için, onu katyonik çözeltinin bazı türlerine eklenmesi yeterlidir ve bu son derece kolay bir yoldur.
- Buhar biriktirme tekniklerinden farklı olarak SILAR tekniği, herhangi bir aşamada vakum gerektirmez ve aynı şekilde yüksek kalitede bir hedef veya alttaş da gerektirmez. Bu durum tekniğin endüstriyel bir uygulama için kullanıldığında büyük bir avantaj sağlar.
- Oda sıcaklığında yapılan kaplamalarda, az dayanıklı malzemeler üzerine filmler üretilebilir
- Film kaplama hızı ve filmin kalınlığı, kaplama döngüsünü değiştirerek geniş bir aralıkta kolay bir kontrol imkânı sağlar.
- Radyo frekansı magnetron püskürtme gibi yüksek enerjili tekniklerden farklı olarak bu teknik, kaplanacak materyaller için zararlı olan bir ısınmaya sebep olmaz.
- Alttaş malzemenin boyutları ve yüzey profili ile hemen hemen hiç sınırlama yoktur ve geniş yüzeylere kaplama için nispeten basit, ucuz ve kullanışlıdır.
- Kaplama cam beherde yapılabilir.
- Kimyasal bir yöntem olduğundan dolayı çok çeşitli sayıda alttaş kaplanabilir. Böylece, çözeltide serbest erişimi olan ve çözünmez herhangi bir yüzey kaplama için uygun bir örnek olacaktır (Pathan, 2004).



Şekil 3.12 SILAR döngüsü a) adsorpsiyon b) durulama c) reaksiyon d) durulama

Şekil 3.12’ de SILAR döngüsü verildi. Bu döngü dört adımda gerçekleşir.

- Adsorpsiyon: SILAR tekniğinin ilk aşamasıdır. Bu aşamada, kılavuz çözeltisindeki katyonlar altaşın yüzeyinde adsorbe edilir. Böylece Helmholtz elektrikli çift katman oluşur. Bu katman, pozitif yüklü iç ve negatif yüklü dış katman olmak üzere iki katmandan oluşur. Pozitif yüklü katman katyonlardan ve negatif yüklü katman ise katyonların karşı iyonlarından oluşur.
- Durulama: Bu aşamada, fazla adsorbe edilmiş olan iyonlar durulanır ve difüzyon katmandan uzaklaştırılır. Bu durum doymuş elektrikli çift katman oluşturur.
- Reaksiyon: Bu aşamada, anyonik kılavuz çözeltideki anyonlar işleme dahil edilir. Malzemenin düşük stabilitesi sebebiyle, arayüz yüzeyinde katı bir madde oluşur. Reaksiyon işlemi, anyonik kılavuz ile katyonik yüzey türleri arasındaki reaksiyonu içerir.
- Durulama: Bu aşamada, difüzyon katmanında tepkimeye giren yan ürünler ve reaksiyona girmemiş türler uzaklaştırılır.

Kaplama işlemi tek sıra veya birden fazla ardışık tekrar sırası ile gerçekleştirilebilir. Tur sayısını artırdıkça altaş yüzeyine kaplanan ince filmin kalınlığı da artar. Kalınlık arttıkça ince filmin kararlılığı artar. Ancak tur sayısının fazla olması da doğru değildir. Çünkü ince filmin kalınlığı belli bir değeri aştığında artık iyonlar tortu şeklinde yüzeyde birikir. Bu birikmelerin sonucunda, ince filmde kopmalar meydana gelir ve

ince filmin kalitesi düşer. Bu teknikte, kullanılan çözeltilerin pH değerleri, konsantrasyonları, tur sayısı, çalkalama ve daldırma süresi şeklinde ince film kaplanmasına etki eden parametreler bulunmaktadır (Pathan, 2004).

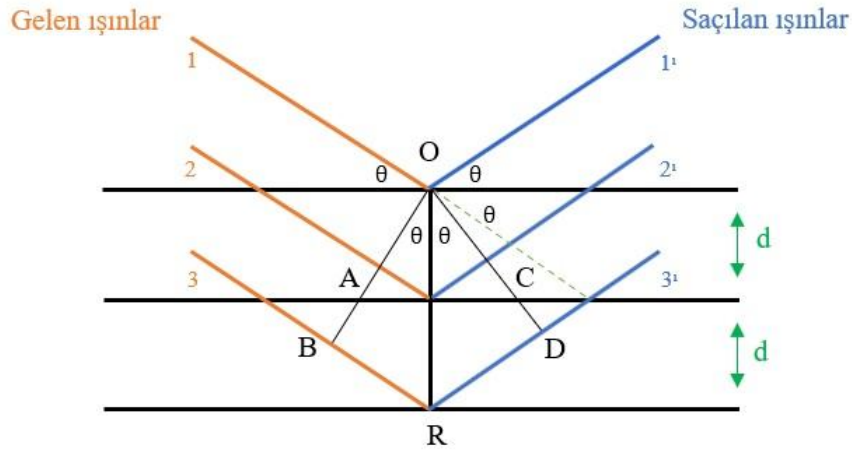
3.6. Karakterizasyon Teknikleri

3.6.1. X-ışını kırınımı

Alman fizikçi Wilhelm Röntgen tarafından 1895 yılında X-ışınları keşfetti. X-ışınları kristal bir yapı yüzeyine gönderilir ve ışınlar kristalin yüzeyinden küçük açılarla yansımaya uğrar. Yansımaya uğrayan bu ışınlar kristalde bulunan paralel düzlemler sayesinde saçılırlar ve bu saçılımlara kırınım (difraksiyon) denir. Bragg yasası, bütün kırınım olaylarının temelidir. Bragg yasası, paralel düzlemlerden saçılan ışınların saçılma açıları ile gelen X-ışınlarının dalga boyu arasındaki ilişki olarak tanımlanır. Bu saçılan ışın ile kaynaktan gelen ışın arasındaki yol farkı,

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (3.38)$$

Eş. 3.38’de verilen denklem ile ifade edilir. Bu denklemde n tamsayı, λ dalga boyu, d paralel kristal düzlemler arasındaki uzaklık, θ kaynaktan gelen ışın ile yansıdığı paralel düzlem arasındaki açıdır (Suryanarayana ve Norton, 1998). Kristal düzlemlerde X-ışını kırınımının şematik gösterimi Şekil 3.13’te verildi.



Şekil 3.13. Kristal düzlemlerinde X-ışını kırınımı

X-ışınları kristal malzemenin yüzeyine düşen atomların düzlemleri tarafından kırılıma uğrar. Bu kırınım deseni aracılığıyla Bragg yasası ile d düzlemler arasındaki uzaklık hesaplanır. Örgü uzunluğu parametrik denklemler ile hesaplanır. Örgü noktalarını ters örgü haritalamasıyla görülebilir.

Kübik kristal yapısına sahip olan bir malzemenin düzlemler arası boşluğu,

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \quad (3.39)$$

Eş. 3.39'da verilen denklem ile ifade edilir. Burada h,k,l kristal düzlemlerin miller indisleridir.

$$a = d_{hkl}\sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (3.40)$$

Örgü uzunluğu a , Eş. 3.40'ta verilen denklem ile ifade edilir.

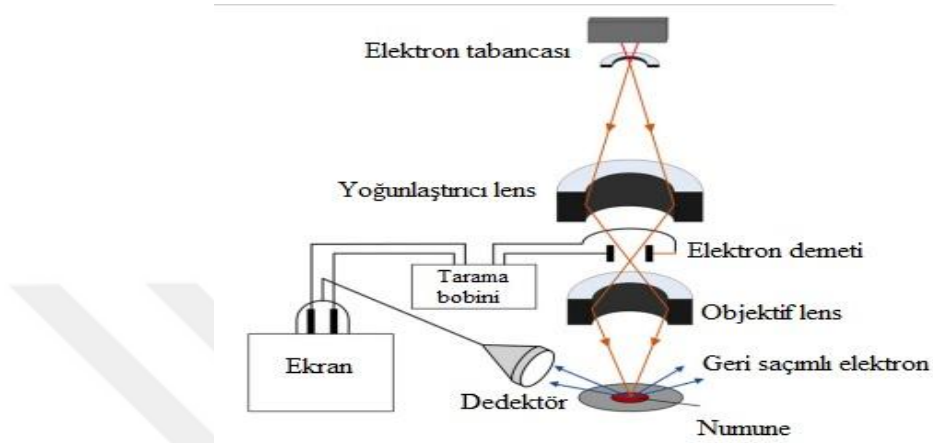
$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3.41)$$

XRD kırınım deseninden elde edilen sonuçlar doğrultusunda malzemenin tanecik boyutu; Eş. 3.41'de verilen Debye–Scherrer denklemi kullanılarak hesaplanır. Burada k , kristalit-şekil faktörüdür. β , pik yarı genişliği (FWHM) ve θ Bragg açısıdır (Cullity ve Stock, 2015). XRD analizleri piklerin yüksekliğinin yarı genişliği, pik şiddetleri ve pik alanları literatürde kristal kalitesini gösteren özelliklerdir. Burada piklerin yüksekliğinin yarı genişliği (FWHM) değeri ne kadar küçük olur ise malzemenin kristal kalitesi o kadar iyi olur.

3.6.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

SEM, malzeme yüzeyine odaklanan bir elektron ışını ile taranarak malzemenin yüzey görüntülerini oluşturan bir elektron mikroskobudur. Malzeme ile etkileşime giren yüksek enerji ışınının bir dedektör yardımı ile toplanarak işlenmesiyle görüntü oluşur. Malzeme yüzeyi ile elektron ışınının etkileşimi ile ikincil elektronlar oluşur ve bunun yanında yüzeydeki atomlar ile esnek çarpışmalar gerçekleştirerek geri saçılan

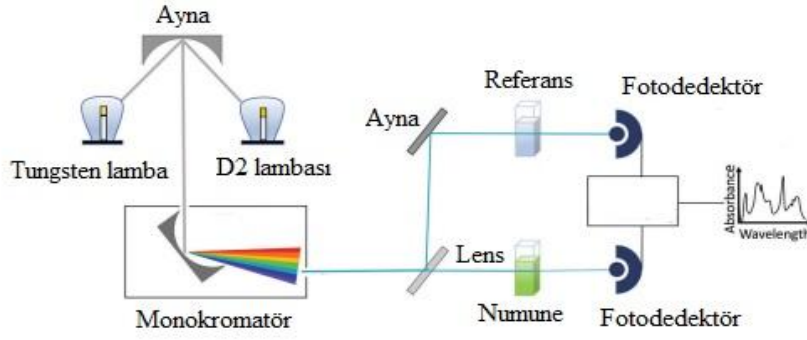
elektronlar da vardır. Geri saçılan elektron katsayısı, malzemenin artan atom numarası ile artar. İkincil elektron katsayısı ise atom numarasına oldukça duyarsızdır. Analitik sistem, görüntüleri oluşturmak için kullanılan yüksek enerjili birincil elektron ışını ile etkileşimin bir sonucu olarak malzeme içinde üretilen X-ışını fotonlarının toplanmasına dayanmaktadır (Echlin, 2009).



Şekil 3.14. SEM çalışma prensibi (Zhu vd., 2014)

3.6.3. UV- Vis spektrometresi

UV-Vis spektrometresi, morötesi (UV), görünür (Vis) ve yakın kızılötesi (NIR) spektral bölgelerinde bulunan fotonları inceler. UV-Vis spektrometresi; monokromatör, algılayıcı dedektör, ışık kaynağı ile malzeme tutucu olmak üzere dört bölümden oluşur. Bu spektrometre malzemenin ışığın; yansıtma, soğurma ve geçirgenlik gibi özelliklerinin belirlenmesi için kullanılır. Malzeme üzerine gönderilen optik sinyal, elektrik sinyaline algılayıcı dedektör aracılığı ile dönüştürülür. Bu durum malzemenin optik spektrumu hakkında bilgi verir. UV-Vis spektrometresinin çalışma prensibi Şekil 3.15'te verildi. Burada, çift ışınlı bir cihaz için UV- Vis spektrometre şeması verildi. Tungsten lamba görünür ışık yayar, D2 lambası ise ultraviyole ışık üretir. Elektromanyetik radyasyon, numunenin dalga boylarını seçen bir monokromatöre yönlendirir.



Şekil 3.15. UV- Vis çalışma prensibi (Rocha vd., 2018)

UV- Vis spektrometresi analiziyle elde edilen geçirgenlik spektrumu (T) ile d kalınlığına sahip bir ince filmin optik soğurma katsayısı (α) Eş. 3.42’de verilen Beer-Lambert denklemi ile belirlenir.

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln(T) \quad (3.42)$$

Yarıiletken ince filmlerde enerji bant aralığı (E_g) Tauc denklemi ile hesaplanır. Eş. 3.43’te Tauc denklemi verildi.

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^n \quad (3.43)$$

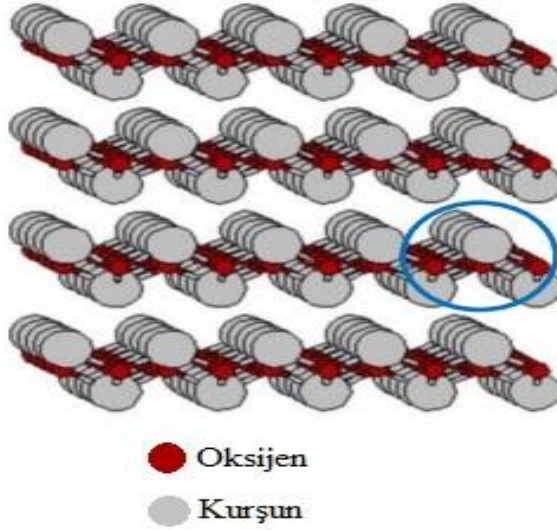
Burada E_g yasak enerji aralığı değerini, A bir sabiti, $h\nu$ gelen fotonun enerjisini ve n ise “1/2, 2, 3/2 ve 3” gibi geçiş modu katsayısını ifade eder. Bu geçiş modu katsayısı yarıiletkenin, $n = 1/2$ olduğunda direkt, $n = 2$ olduğunda indirekt, $n = 3/2$ olduğunda direkt ve $n = 3$ olduğunda indirekt yasak bant aralığına sahip olduğunu gösterir (Makula vd., 2018).

4. MATERYAL VE YÖNTEM, DENEYSEL ÇALIŞMA, TEORİ

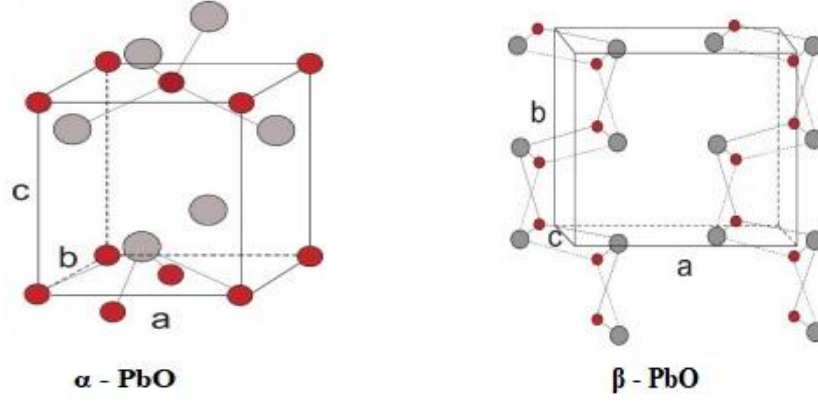
4.1. Materyal

4.1.1. PbO temel özellikleri

Kurşun oksit, genel olarak kimyasal formülü kurşun monoksit ya da kurşun (II) oksit (PbO) olarak bilinen olarak isimlendirilen bir bileşiktir. PbO moleküler formülüne sahip inorganik bileşiktir. Kurşunun (+2 veya +4) benimsediği farklı oksidasyon durumları nedeniyle, PbO ince filmi farklı formlarda mevcut olabilir ve belirli bir kristal yapıya sahip tek bir fazda biriktirilmesi zordur. PbO'nun iki polimorf formu vardır: biri düşük sıcaklıklarda stabil olan tetragonal faz (α -PbO) diğeri yüksek sıcaklıklarda stabil olan ortorombik faz (β -PbO) dir. PbO, tetragonal örgü yapısına sahip olduğunda litarge, ortorombik örgü yapısında olduğunda ise massicot adını alır. Şekil 4.1'de PbO kristal yapısı verildi. Şekil 4.2'de α -PbO ve β -PbO faz yapıları verildi.



Şekil 4.1. PbO'nun kristal yapısı (Semeniuk, 2017)



Şekil 4.2. Tetragonal (α -PbO) ve ortorombik PbO'nun (β -PbO) kristal yapısı (Semeniuk, 2017)

Her iki fazdaki PbO filmler farklı seviyelerde yansıma sergiler ve bu özellik optik depolama cihazları olarak kullanılmasını sağlar. PbO, düşük elektrik iletkenliğine, foto iletkenliğine ve ilginç yarı iletkenlik özelliklerine sahiptir ve bu özellikler PbO'yu lazer teknolojisi ve görüntüleme cihazı uygulamalarında uygun kılan bir malzeme haline getirir. (Suganya vd., 2015). Çizelge 4.1'de PbO temel özellikleri verildi.

Çizelge 4.1. PbO temel özellikler

Özellik	Parametre
Kimyasal formül	PbO
Rengi	Kırmızı veya sarı toz
Kristal yapısı	Tetragonal
Yoğunluk (g/cm^3)	9.53
Molar kütle (g/mol)	223.20
Erime noktası $^{\circ}\text{C}$	888
Kaynama noktası $^{\circ}\text{C}$	1477
Suda çözünürlük (g/L)	35
Çözünürlük	Konsantre alkalilerde çözünür Seyreltik alkalilerde çözünmez

Bu tez çalışmasında Cu katkılı PbO ince filmleri SILAR tekniğiyle üretildi ve filmlerin yapısal, morfolojik, optik ve elektriksel özellikleri incelendi.

4.1.2. Alttaşların temizlenmesi

Katkısız ve Cu katkılı PbO ince film tabakasının SILAR tekniği ile oluşturulması cam alttaş kullanıldı. Oluşturulan ince filmlerin yzeye uzerinde homojen olarak dağılabilmesi iwin en onemli nokta alttaş temizliğinin doğru bir şekilde yapılmasıdır. Alttaşlar yumuşak bir sungen ve sabunlu su yardımı ile alttaş yzeyeine zarar vermeyecek şekilde temizlendi. Alttaşlara deiyonize su ile durulama işlemi uygulandı. Daha sonra etil alkol ile yıkama işlemi ve yuiksek saflıktaki kuru azot yardımıyla kurutma işlemi yapıldı. Buylelikle alttaşlar kaplama iwin uygun hale geldi.

4.1.3. Cözeltinin hazırlanması

Bu tez çalışması kapsamında uiretilmesi planlanan katkısız ve Cu katkılı PbO ince filmler iwin yuiksek saflığa sahip kurşun asetat trihidrat ($Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$) tuzu kullanıldı.

Deneysel alışmalar sırasında cözelti hazırlamak iwin başlangıç malzemesi olarak 380 g/mol molekul ağırlığına sahip kurşun asetat trihidrat, 50 mL deiyonize su ile cözulme işlemi gerçekleştirildi. Burada cözelti rengi beyazlaştı. Oluşan cözelti manyetik karıştırıcı ile 10 dakika karıştırıldı. Daha sonra uzerine 5 mL amonyum hidroksit (NH_4OH) eklendi ve karıştırılmaya devam edildi. Burada ise cözeltinin rengi sarardı. İkinici aşamada %2'lik hidrojen peroksit (H_2O_2) hazırlamak iwin 50 mL'lik deiyonize suya 5 mL hidrojen peroksit eklendi. Daha sonra iki ayrı behere 50 mL deiyonize su eklendi ve buylelikle kaplama yapım aşamasına geçildi. Oluşturulan başlangıç cözeltilerinin hepsi deiyonize su ile hazırlanmış olan cözeltilerdir. Deiyonize suyun kullanılmasının sebebi cözelti stabilitelerinin sağlanmasıdır. Karıştırma işlemi manyetik karıştırıcı aracılığıyla gerçekleştirildi. Cözeltiler iwin gerekli oludeki kurşun asetat trihidrat tuzu ve deiyonize su karıştırdıktan sonra, her cözelti iwin 10 dakika surecek şekilde karıştırma işlemi yapıldı. PbO cözeltisi 0.1 M olarak hazırlandı. Solüsyon hesaplamaları aşağıda verildi.

$$n = \frac{m}{MA} \quad (4.1)$$

Burada; mol sayısı (n), kütle (m), mol kütle (MA) olarak ifade edildi.

$$M = \frac{n}{V} \quad (4.2)$$

Burada; molarite (M), hacim (V) olarak ifade edildi.

0.1 molar ve 50 mL çözelti hazırlamak için;

$$0.1 = \frac{n}{0.05}$$

$n = 0.005$ mol'dür.

$$0.005 = \frac{m}{380}$$

$m = 1.9$ g olarak hesaplandı ve çözeltiye kurşun asetat trihidrat tuzu eklendi.

0.1 M $[\text{Cu}(\text{NO}_3)_2]3\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi için, 242 g/mol molekül ağırlığına sahip $[\text{Cu}(\text{NO}_3)_2]3\text{H}_2\text{O}$ tuzu eklendi ve 50 mL deiyonize su ile çözülme işlemi gerçekleştirildi. 10 dakika boyunca 80°C alt sıcaklık ile ısıtıcıda manyetik karıştırıcı ile karıştırılıp ısıtıldı. Çözelti oranının korunabilmesi için her bir % değer için ayrı ayrı çözelti hazırlandı. %2, %4, %6 ve %8 Cu katkılama oranları için 4 ayrı $[\text{Cu}(\text{NO}_3)_2]3\text{H}_2\text{O}$ çözeltisi hazırlandı. Solüsyon hesaplamaları aşağıda verildi.

$$0.005 = \frac{m}{242}$$

$m = 1.21$ g olarak hesaplandı.

Çözeltilerin hazırlanmasından sonra çözünmenin gerçekleşebilmesi için ve kaplamada kullanılan malzemelerin hepsinin eşit sıcaklıkta olabilmeleri için tüm malzemeler 80°C sıcaklığa sahip ısıtıcıda 10 dakika bekletildi. Daha sonra kaplama aşamasına geçildi ve kaplama süresi boyunca sıcaklık değiştirilmedi.

4.2. Yöntem

4.2.1. SILAR tekniği ile filmlerin kaplanması

Katkısız ve Cu katkılı PbO ince film tabakasının SILAR tekniği ile oluşturulması için ilk olarak kaplanacak çözelti hazırlandı ve daha sonra kaplama işlemi cam alttaş üzerine yapıldı. Dört ayrı beher kullanıldı. Birinci beherde amonyum hidroksit eklenmiş kurşun asetat trihidrat çözeltisi, ikincide deiyonize su, üçüncüde hidrojen peroksit çözeltisi ve son beherde deiyonize su olacak şekilde yan yana sıralandı.

Şekil 3.12'deki düzeneğe göre PbO ince filmlerin oluşması için bir SILAR büyütme yöntemi aşağıdaki adımları içerir:

- Temizlenmiş cam alttaş ilk olarak sıvı amonyak ve kurşun iyonları içeren birinci behere 15 saniye daldırılır, böylelikle kurşun kompleks iyonları cam alttaş üzerine absorbe edilir.
- Daha sonra alttaş, deiyonize suyun bulunduğu ikinci behere 10 saniye daldırılır, böylelikle gevşek bağlı kurşun kompleks iyonları cam alttaş üzerinden ayrılır.
- Daha sonra alttaş, 50 mL su içinde çözülmüş olan %2 hidrojen peroksit çözeltisi içeren üçüncü behere 15 saniye daldırılır, böylelikle kurşun kompleks iyonları PbO oluşturmak için H₂O₂ ile reaksiyona girer.
- Son olarak alttaş, gevşek bağlı PbO iyonlarını ayırmak için deiyonize su içeren dördüncü behere 10 saniye daldırılır.

Hazırlanılan [Cu(NO₃)₂]₃H₂O çözeltileri her biri başka katkılamada kullanmak üzere;

- PbO çözeltisinden 1 mL alarak yerine [Cu(NO₃)₂]₃H₂O çözeltisinden 1 mL ekleyerek %2'lik Cu katkılama çözeltisi hazırlandı ve SILAR tekniğindeki aşamaların sırası takip edilerek metal katkılı PbO çözeltisi tek tarafı omik diyot üzerine biriktirilerek kaplama işlemi gerçekleştirildi.
- PbO çözeltisinden 2 mL alarak yerine [Cu(NO₃)₂]₃H₂O çözeltisinden 2 mL ekleyerek %4'lik Cu katkılama çözeltisi hazırlandı ve SILAR tekniğindeki aşamaların sırası takip edilerek metal katkılı PbO çözeltisi tek tarafı omik diyot üzerine biriktirilerek kaplama işlemi gerçekleştirildi.

- PbO çözeltisinden 3 mL alarak yerine $[Cu(NO_3)_2] \cdot 3H_2O$ çözeltisinden 3 mL ekleyerek %6'lık Cu katkılama çözeltisi hazırlandı ve SILAR tekniğindeki aşamaların sırası takip edilerek metal katkılı PbO çözeltimizi tek tarafı diyot üzerine biriktirilerek kaplama işlemi gerçekleştirildi.
- PbO çözeltimizden 4 mL alarak yerine $[Cu(NO_3)_2] \cdot 3H_2O$ çözeltimizden 4 mL ekleyerek %8'lik Cu katkılama çözeltisi hazırlandı ve SILAR tekniğindeki aşamaların sırası takip edilerek metal katkılı PbO çözeltisi tek tarafı omik diyot üzerine biriktirilerek kaplama işlemi gerçekleştirildi.

İnce film kaplamaları 80 °C derece sıcaklıkta yapıldı. Kaplama 25 tur döngüden sonra elde edildi. Ancak elde edilen kalınlık değeri fazla olduğu için tur döngüsünü azaltarak tekrar kaplama işlemi gerçekleştirildi. İkinci kaplama 10 tur olarak belirlendi ve uygulandı. İnce filmlerde bulunan herhangi bir hidroksit fazını uzaklaştırmak amacıyla 300 °C derecede 60 dakika tavlandı. Kaplanan ince filmlerin, kristal yapısı ve yüzey morfolojisi XRD ve SEM-EDS cihazları aracılığıyla detaylı olarak analiz edildi. Filmlerin optiksel özellikleri UV-Vis spektrometresi ile analiz edildi.

4.2.2. Metal-yarıiletken yapıların hazırlanması

Metal-yarıiletken yapıların hazırlanması, özellikleri önceki bölümlerde belirtildiği üzere p-Si kristali klasik kimyasal temizlik işlemi uygulandı. Daha sonra omik kontak yapımı için yüksek saflıktaki Al metali PVD sistemi içerisinde p-Si kristalinin mat (arka) yüzeyi üzerine kaplama işlemi gerçekleştirildi. Bu aşamada omik kontak oluşması için fırında azot gazı ortamında 570 °C de 3 dk boyunca tavlama işlemi uygulandı. p-Si/Al alttaşın parlak (ön) yüzeyi, daha önce cam yüzeyine yapıldığı gibi 10 turluk SILAR tekniği kullanılarak PbO ile kaplama işlemi gerçekleştirildi. Kristalin Al ile kaplı olan mat yüzeyinin kaplanması istenilen bir şey olmadığından dolayı her 5 turdan sonra mat yüzey bir pamuk yardımıyla temizlendi. Kaplama işlemi gerçekleştirildikten sonra 300 °C fırında normal atmosfer koşulları altında 60 dakika tavlandı.

Son olarak fiziksel buharlaştırma yöntemiyle, vakum sistemi ile elde edilen yaklaşık olarak 1.62×10^{-5} Torr basınç değeri altında ve üzerinden ~50A akım geçirilen tungsten flaman yardımıyla alttaşın PbO kaplanan yüzeyine oldukça saf (~99.99%) Alüminyum

(Al) metali buharlaştırıldı ve ince bir Al tabaka oluşturuldu. Bu şekilde katkısız Al/p-Si ve farklı oranlarda Cu katkılı Al/PbO/p-Si/Al MIS diyot yapısı elde edildi.

4.2.3. Üretilen MIS diyotların elektriksel parametrelerinin hesaplanması

Hazırlanan diyotun akım-gerilim özelliği termoiyonik emisyon (TE) yöntemi yardımıyla hesaplanır ve bu teoriden sapmalar araştırılır (Sze, 2006). TE yöntemi $V - IR_s \geq 3kT/q$ için, diyottan ileri polarizasyondaki akım denklemi,

$$I = I_o \left[\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.3)$$

şeklindedir. Bu eşitlikte,

$$I_o = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (4.4)$$

denklemi ile verilen I_o , $\ln(I)$ eğrisindeki $V=0$ 'da bulunan düz çizgi kesişim noktasından elde edilir. Bu denklemin her iki tarafının doğal logaritması alındığında,

$$\phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_o}\right) \quad (4.5)$$

denklemi elde edilir. Bu denklemde A diyotun alanı ($A=0.00785 \text{ cm}^2$), A^* etkin Richardson sabitidir ve p-Si için $A^* = 32 \text{ AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$ değerindedir (Sze, 1981). Doyma akım yoğunluğu ve sıfır ön gerilimli bariyer yüksekliği sırasıyla (4.4) ve (4.5) denklemleri ile hesaplanabilir.

İdealite faktörü (n),

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (4.6)$$

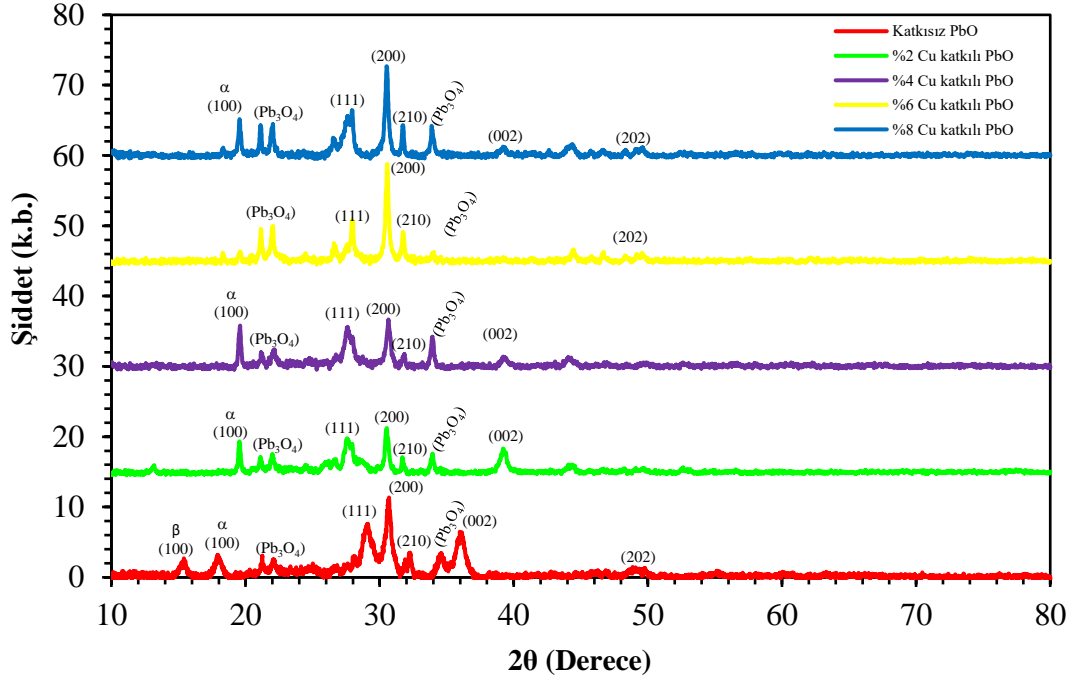
denklemi ile verilir. n , $\ln(I)$ - V eğrisinin eğiminden elde edilir.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

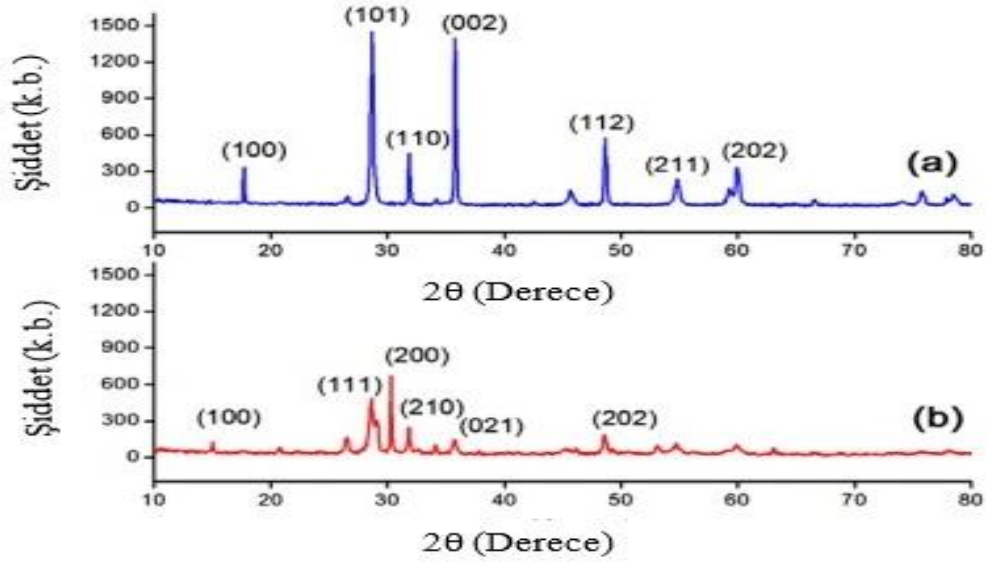
5.1. Yapıların Karakterizasyonları

5.1.1. X-ışını kırınım analizleri

SILAR tekniği kullanılarak elde edilen katkısız ve Cu katkılı PbO ince filmlerin X-ışını analizleri Rigaku Ultima IV X-ray difraktometresi ile yapıldı. Cam alttaş üzerine kaplanan katkısız ve Cu katkılı PbO ince filmlerin X-ışınları kırınım desenleri Şekil 5.1'de verildi. Şekil 5.2'de α -PbO ve β -PbO nanopartiküllerinin XRD desenleri verildi.



Şekil 5.1. Cam alttaş üzerine kaplanan PbO ince filmlerin X-ışını kırınım desenleri



Şekil 5.2. (a) α -PbO ve (b) β -PbO X-ışını kırınım desenleri

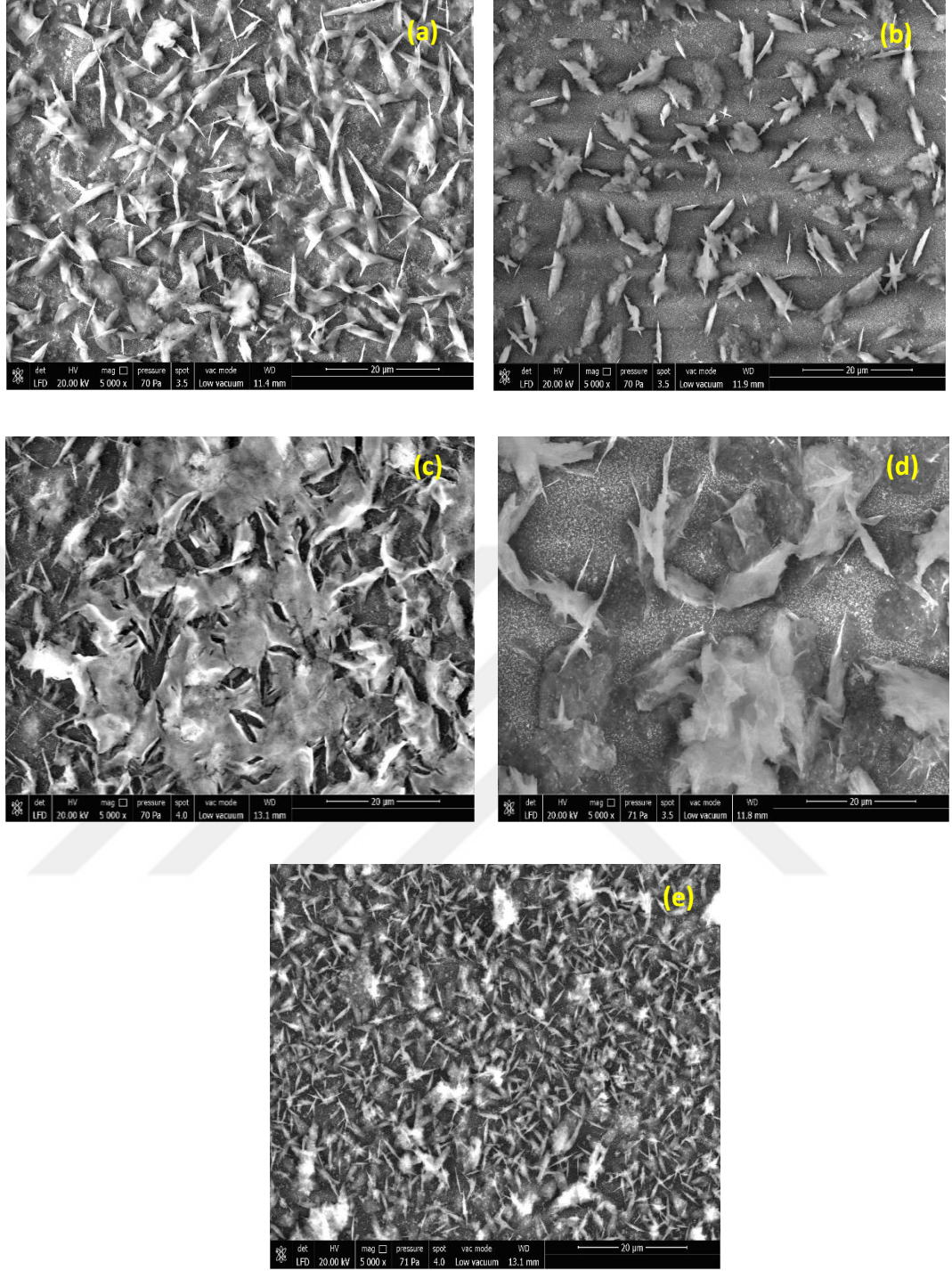
PbO ince filmlerin yapısal özellikleri üzerine Cu katkılama oranlarının filmlere etkisini detaylı inceleyebilmek için XRD verileri kullanılarak tanecik boyutu, FWHM gibi kristal yapı özellikleri hesaplandı. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1’de verildi.

Çizelge 5.1. β -PbO kristal özellikleri

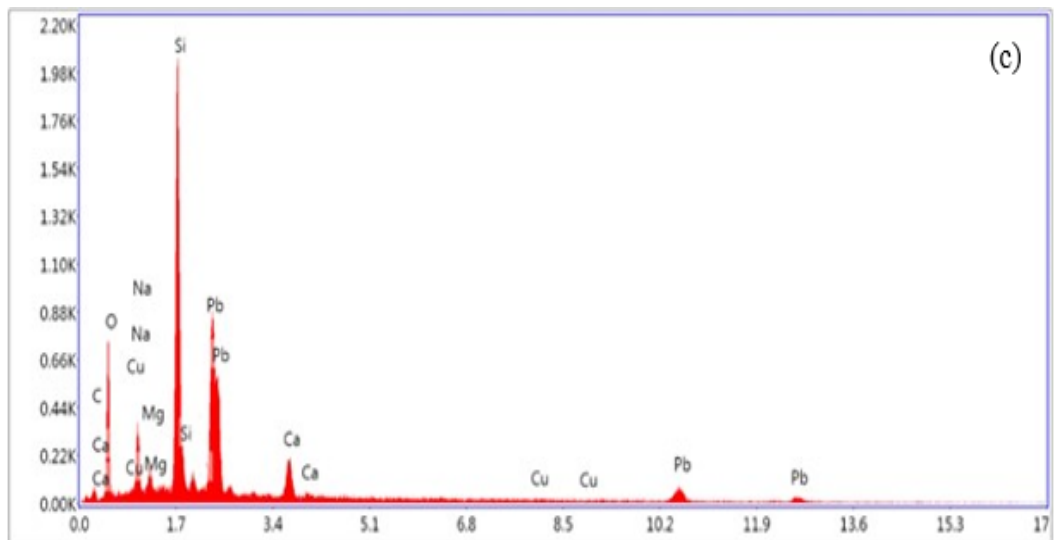
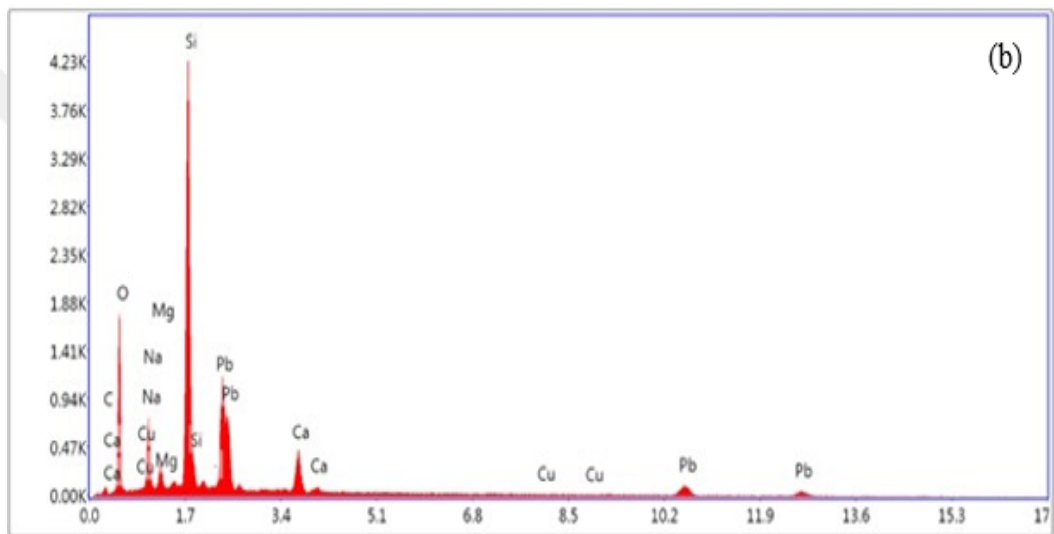
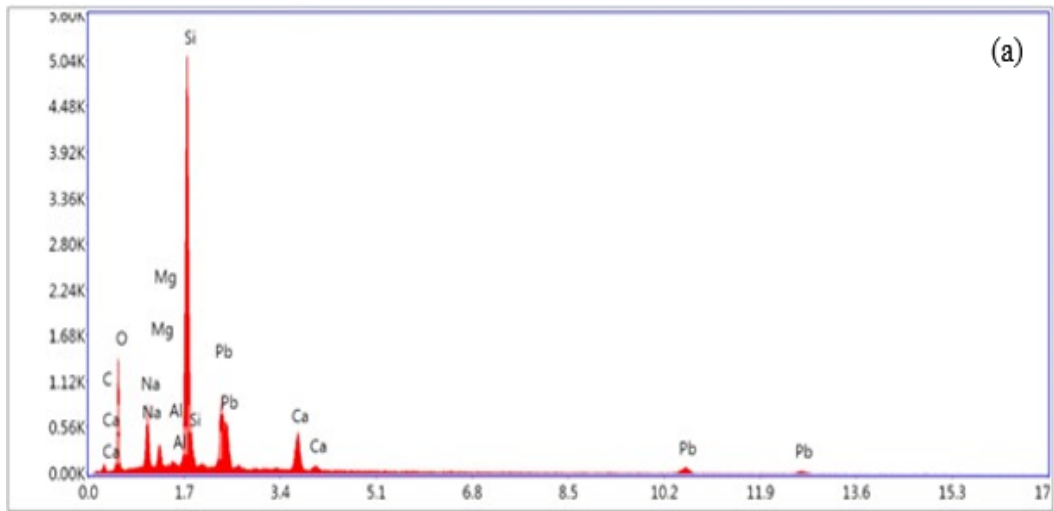
Numune	hkl	2 θ (°)	FWHM	Tanecik boyutu (nm)
Katkısız	(200)	30.635	0.511	16.83
%2 Cu katkılı	(200)	30.502	0.243	35.39
%4 Cu katkılı	(200)	30.628	0.285	30.18
%6 Cu katkılı	(200)	30.530	0.278	30.94
%8 Cu katkılı	(200)	30.504	0.207	41.54

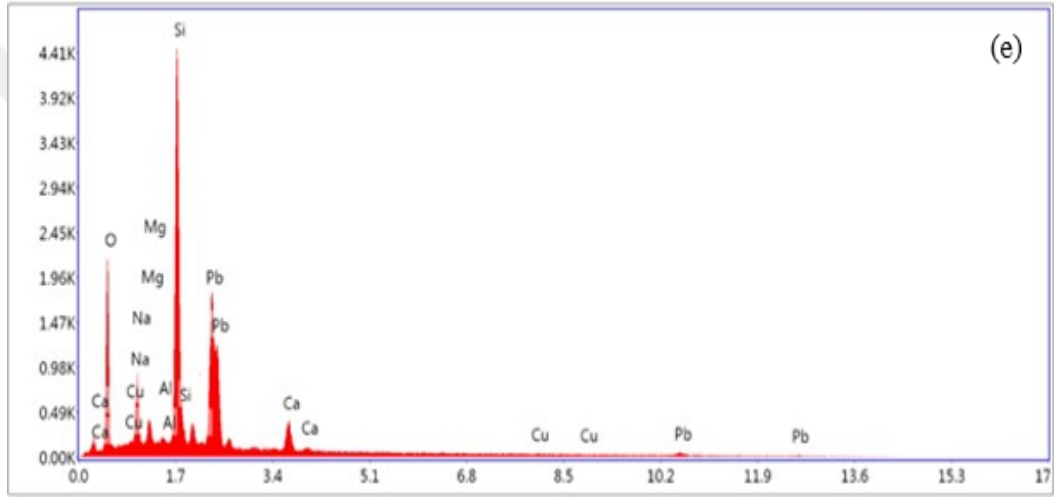
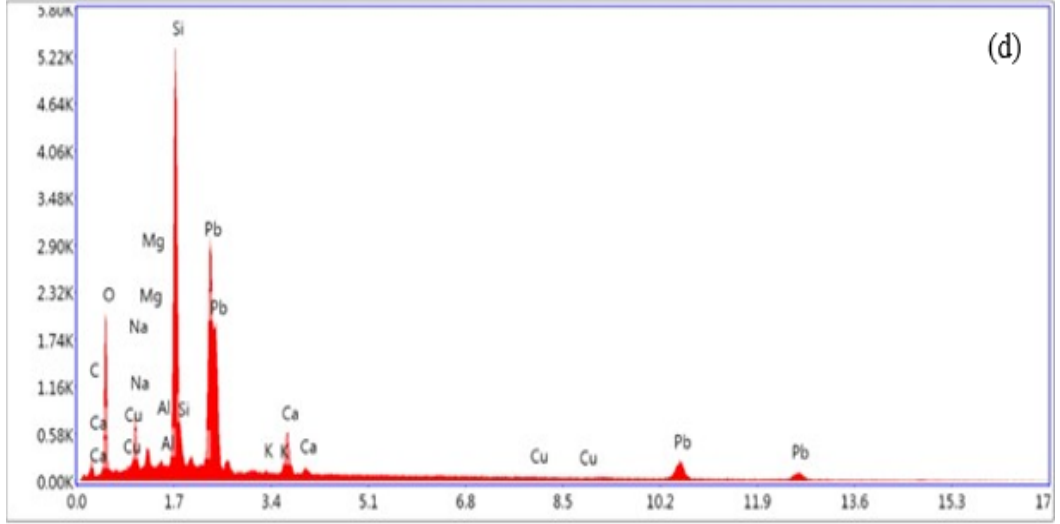
5.1.2. SEM-EDS

SILAR yöntemi ile cam üzerine üretilen katkısız ve Cu katkılı PbO ince filmlerin yüzey morfolojileri SEM kullanılarak, EDS spektrumu ile ince filmlerin elementel analizi incelendi. Şekil 5.3’te SEM görüntüleri ve Şekil 5.4’te EDS elementel analizleri verildi.



Şekil 5.3. PbO ince filmler için SEM görüntüleri a) katkısız b) %2 Cu katkılı c) %4 Cu katkılı d) %6 Cu katkılı e) %8 Cu katkılı



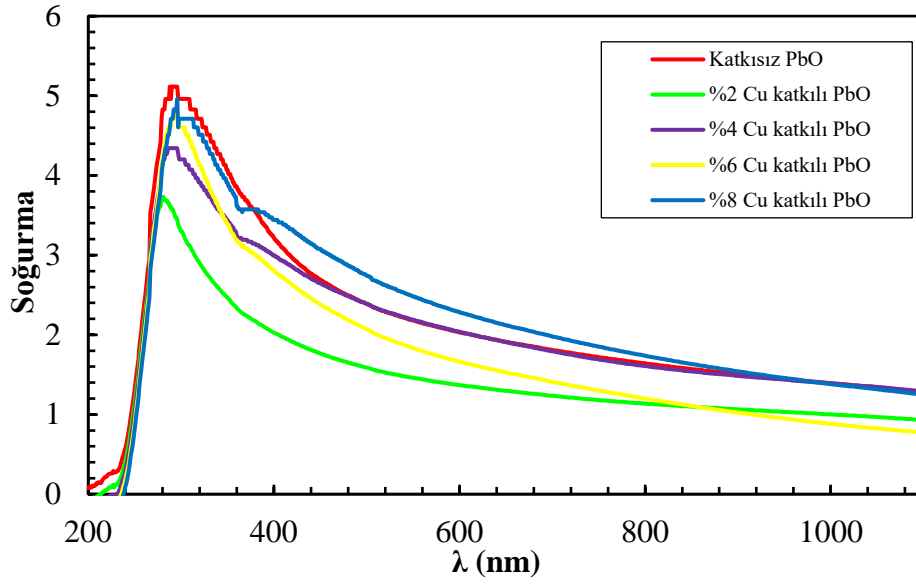


Şekil 5.4. PbO ince filmler için EDS görüntüleri a) katkısız b) %2 Cu katkılı c) %4 Cu katkılı d) %6 Cu katkılı e) %8 Cu katkılı

Şekil 5.4'te EDS spektrumu incelendiğinde ince filmlerde; Pb, O, Cu varlığı açıkça görüldü. Spektrumda ayrıca Ca, Mg, Na, Si varlığı da görüldü.

5.1.3. UV-Vis analizleri

Cam alttaş üzerine kaplanan katkısız ve Cu katkılı PbO ince filmlerin optik özellikleri 200 nm ile 1100 nm dalga boyu aralığında UV-Vis spektrometresi kullanılarak analiz edildi. Şekil 5.5'te katkısız ve Cu katkılı PbO ince filmlerin 200-1100 nm dalga boyu aralığındaki soğurma sonuçları verildi.



Şekil 5.5. PbO ince filmlerin optik soğurma grafiği

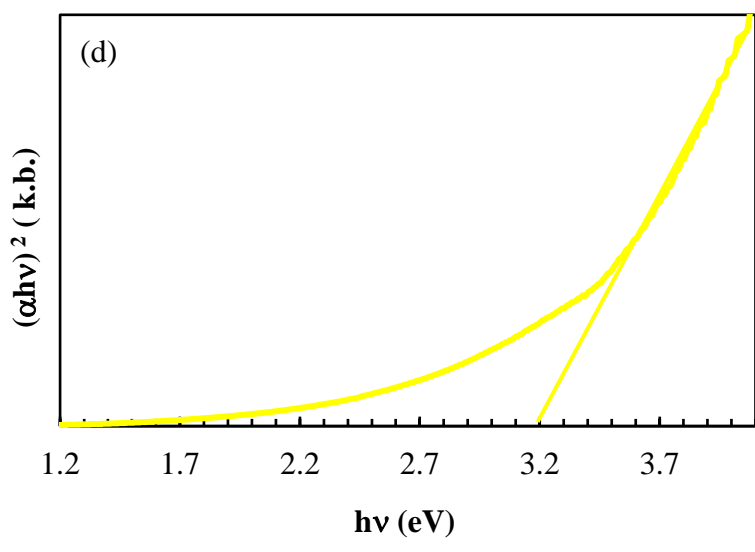
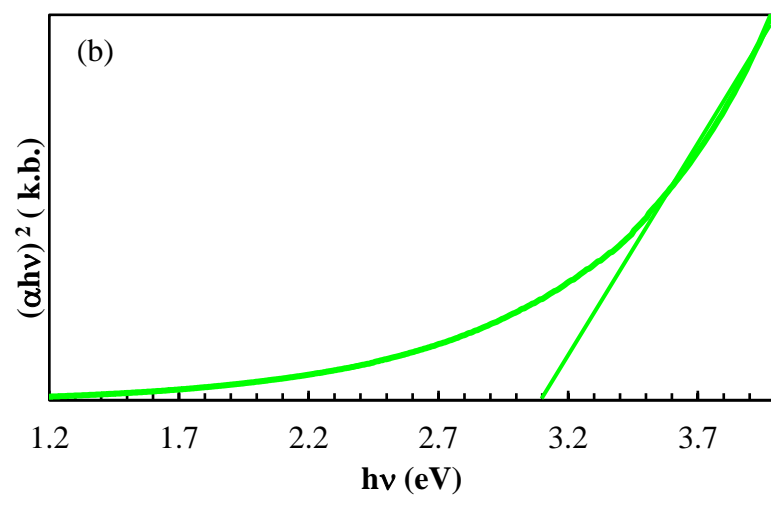
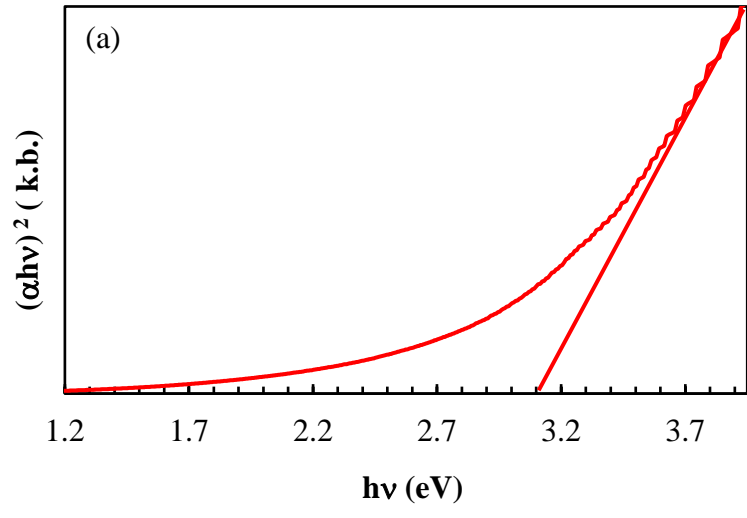
Üretilen katkısız ve Cu katkılı PbO ince filmlerin enerji bant aralığına (E_g) etkisi optik geçirgenlik spektrumu kullanılarak belirlendi. Optik soğurma katsayısı α olan Beer-Lambert bağıntısı ile hesaplanabilir (Gümüş vd., 2006).

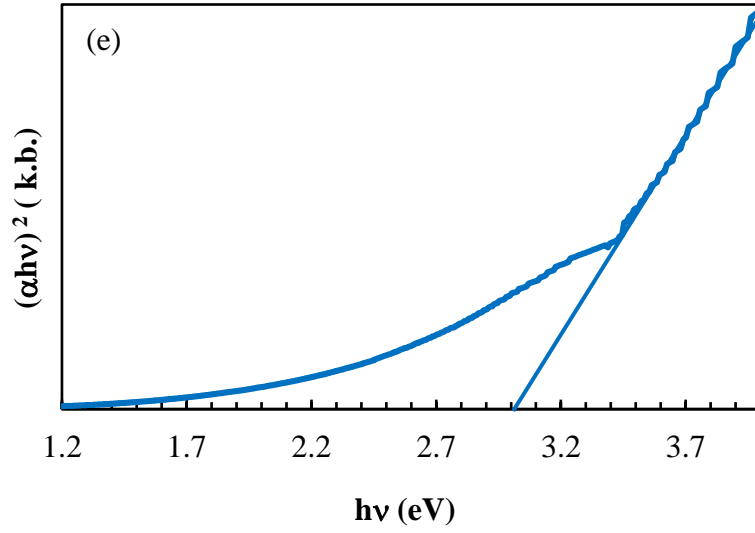
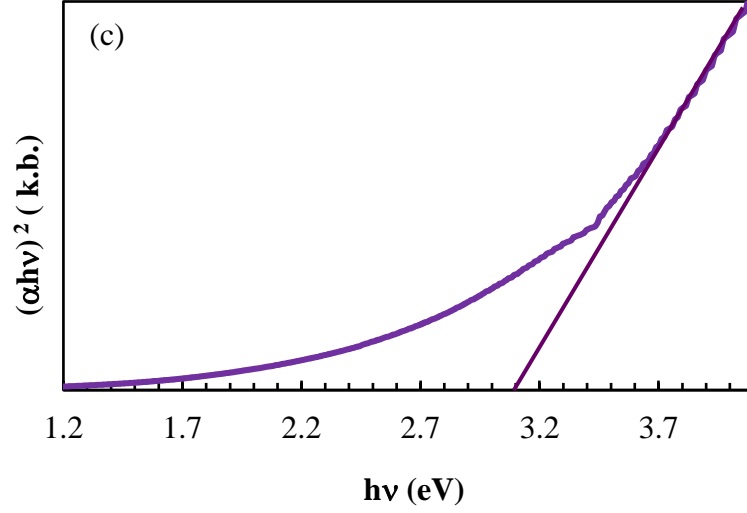
$$\alpha = \frac{1}{t} \ln \frac{1}{T} \quad (5.1)$$

Burada t , film kalınlığını, T ise optik geçirgenliği ifade eder. Yüksek soğurma bölgesinde enerji bant aralığı E_g Tauc denklemi kullanılarak belirlendi.

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^m \quad (5.2)$$

Tauc denkleminde; a soğurma katsayısı, $h\nu$ foton enerjisi, A bir sabit ve m valans ile iletkenlik bandı arasındaki geçişe bağlı olan bir sayıdır. Direkt enerji bant aralığı için $m = 1/2$ olarak alındı. Direkt enerji bant aralığına sahip olan bir yarıiletken malzemenin $(\alpha h\nu)^{1/2}$ 'nin foton enerjisi $h\nu$ 'ye göre olan grafiği çizildiği zaman, eğriye alınan teğetin enerji eksenini kestiği nokta E_g yasak enerji bant aralığını verir.





Şekil 5.6. PbO ince filmlerin Tauc eğrileri a) katkısız b) %2 Cu katkılı c) %4 Cu katkılı d) %6 Cu katkılı e) %8 Cu katkılı

Filmlerin yasak enerji bant aralık değerleri incelendiğinde üretim sırasında katkısız ve farklı oranlarda Cu katkılama yapılmasına rağmen yasak enerji bant aralık değerlerinin birbirine yakın olduğu görüldü. Ayrıca çözeltideki bileşiklerin yoğunluğu, kaplama yöntemleri ve diğer nedenler yasak enerji bant aralık değerlerini etkiler. Hesaplanan E_g değerleri Çizelge 5.2’de verildi.

Çizelge 5.2. Katkısız ve Cu katkılı PbO numuneleri için hesaplanan E_g değerleri

Numune	E_g (eV)
Katkısız	3.1 eV
%2 Cu katkılı	3.1 eV
%4 Cu katkılı	3.0 eV
%6 Cu katkılı	3.2 eV
%8 Cu katkılı	3.0 eV

Numunelerin yasak enerji bant aralık değerleri sırasıyla 3.1 eV, 3.1 eV, 3.0 eV, 3.2 ve 3.0 eV olarak bulundu.

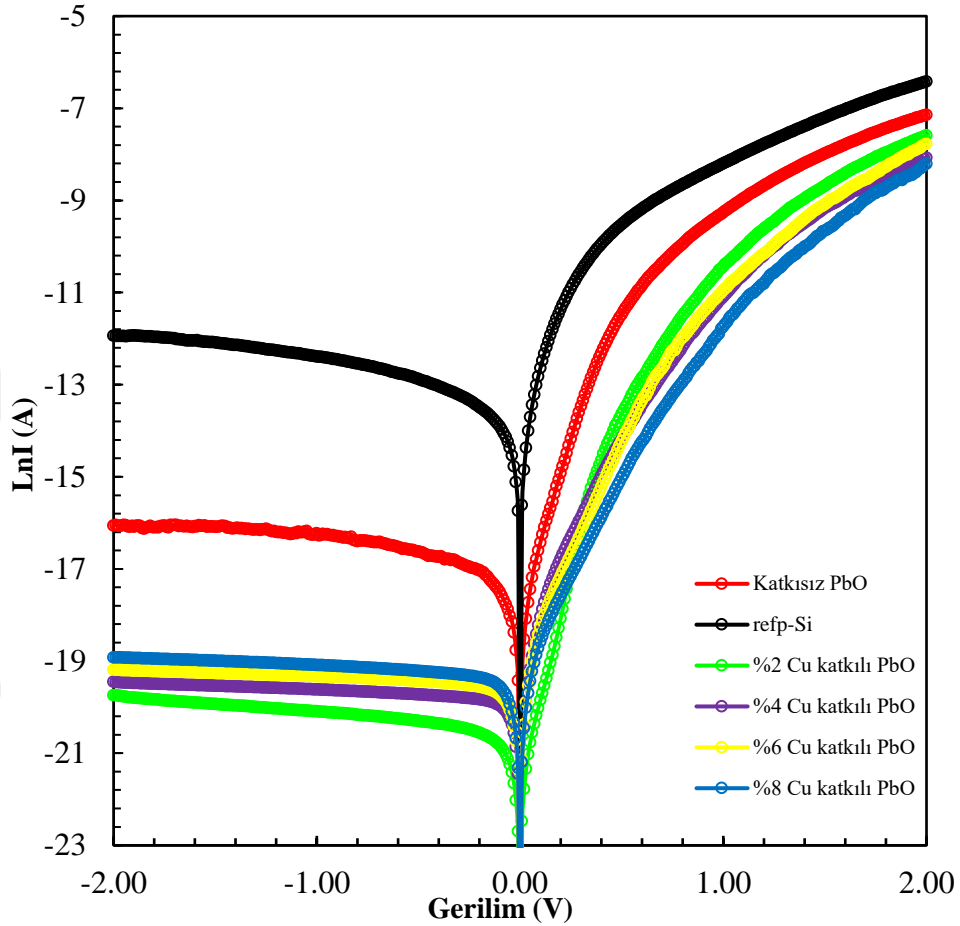
5.1.4. Elektriksel karakterizasyon analizleri

Numune yüzeyinde kaplı olan ince film üzerindeki elektrotlar, vakum sistemi ile elde edilen yaklaşık olarak 1.62×10^{-5} Torr basınç değeri altında ve üzerinden ~ 50 A akım geçirilen tungsten flaman yardımıyla alttaşın PbO kaplanan yüzeyine %99.99 saflıktaki Alüminyum (Al) metali buharlaştırıldı ve ince bir Al tabaka oluşturuldu. Bu şekilde Al/PbO/p-Si/Al MIS diyot yapısı elde edildi. Bu çalışmada kaplanmak istenen malzemenin yapısı da dikkate alınarak SILAR metodu yardımıyla üretilen, katkısız ve %2, %4, %6, %8 atomik oranlarında Cu katkılı Al/PbO/p-Si/Al MIS diyotun akım-gerilim ölçümleri oda sıcaklığında ve karanlık ortamda Şekil 5.7’de gösterilen KEITHLEY 4200-SCS cihazı kullanılarak analiz edildi.



Şekil 5.7. KEITHLEY 4200-SCS cihazı

Elde edilen Cu katkılı Al/PbO/p-Si/Al MIS diyotun ters beslem doyum akımı (I_0), idealite faktörü (n), doğrultma oranı (RR), seri direnci (R_s), sıfır beslem bariyer yüksekliği (Φ_b) ve arayüzey durumu yoğunluğu (N_{ss}) gibi diyot parametreleri belirlendi.



Şekil 5.8. Al/PbO/p-Si/Al MIS tipi diyotlarda LnI -V değişimi

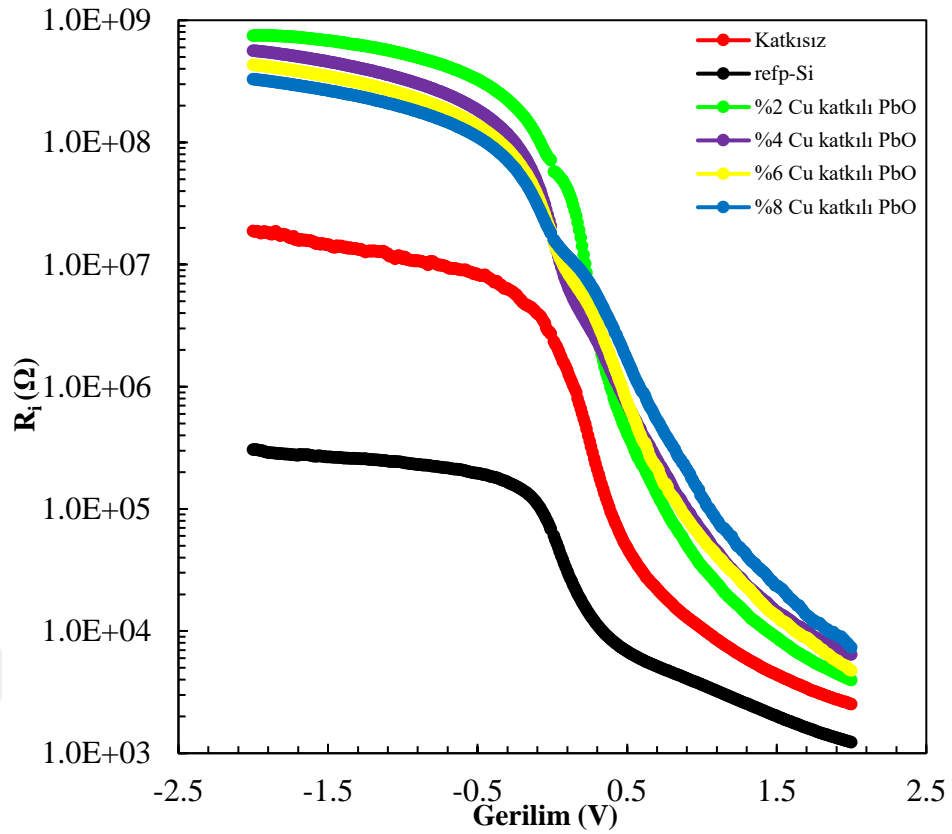
PbO ince film tabakasının etkisini görmek için Pb/p-Si referans diyot yapısı ile Al/PbO/p-Si/Al MIS yapısının I-V karakteristikleri oda sıcaklığında ve karanlık ortamda (-2V ile +2 V) voltaj aralığında ve 0.02V adım uygulanarak ölçüldü ve Ln(I)-V grafiği Şekil 5.8'de verildi. İdealite faktörü n , akım-gerilim grafiğinin doğru beslem bölgesinin lineer kısmının eğiminden bulundu. Lineer kısma fit yapılarak eğim değeri bulundu ve eşitlik (3.36)'da eğim değeri yerine yazılarak idealite faktörü (n); ref-Si, katkısız, %2, %4, %6, %8 katkılama oranlarında sırasıyla; 2.52, 2.42, 2.30, 2.49, 2.89, 3.26 olarak hesaplandı. Doyma akımı (I_0); Şekil 5.8'den doğru beslem akım ve gerilim grafiğinin lineer kısmında $V=0$ 'da akım eksenini kestiği noktadan ref-Si, katkısız, %2,

%4, %6, %8 katkılama oranlarında sırasıyla; 6.60×10^{-7} A, 1.44×10^{-8} A, 4.41×10^{-10} A, 3.20×10^{-9} A, 3.11×10^{-9} A, 2.47×10^{-9} A bulundu. 3.35 eşitliği kullanılarak engel yüksekliği (Φ_b); ref-Si, katkısız, %2, %4, %6, %8 katkılama oranlarında sırasıyla; 0.62 eV, 0.72 eV, 0.81 eV, 0.76 eV, 0.76 eV, 0.77 eV olarak bulundu. Seri direnç (R_s); ref-Si, katkısız, %2, %4, %6, %8 katkılama oranlarında sırasıyla; $2.52 \times 10^3 \Omega$, $1.23 \times 10^3 \Omega$, $3.95 \times 10^3 \Omega$, $6.42 \times 10^3 \Omega$, $4.75 \times 10^3 \Omega$, $7.33 \times 10^3 \Omega$ olarak bulundu. Şönt direnç (R_{sh}); ref-Si, katkısız, %2, %4, %6, %8 katkılama oranlarında sırasıyla; $1.88 \times 10^7 \Omega$, $3.5 \times 10^5 \Omega$, $7.46 \times 10^8 \Omega$, $5.60 \times 10^8 \Omega$, $4.30 \times 10^8 \Omega$, $3.28 \times 10^8 \Omega$ olarak bulundu. Doğrultma oranları (RR); ref-Si, katkısız, %2, %4, %6, %8 katkılama oranlarında sırasıyla; 248, 7461, 188878, 87285, 90530, 44790 olarak bulundu. Bulunan değerler Çizelge 5.3'te verildi.

Çizelge 5.3. Al/PbO/p-Si/Al MIS tipi diyotların I-V karakteristiklerinden elde edilen parametreler

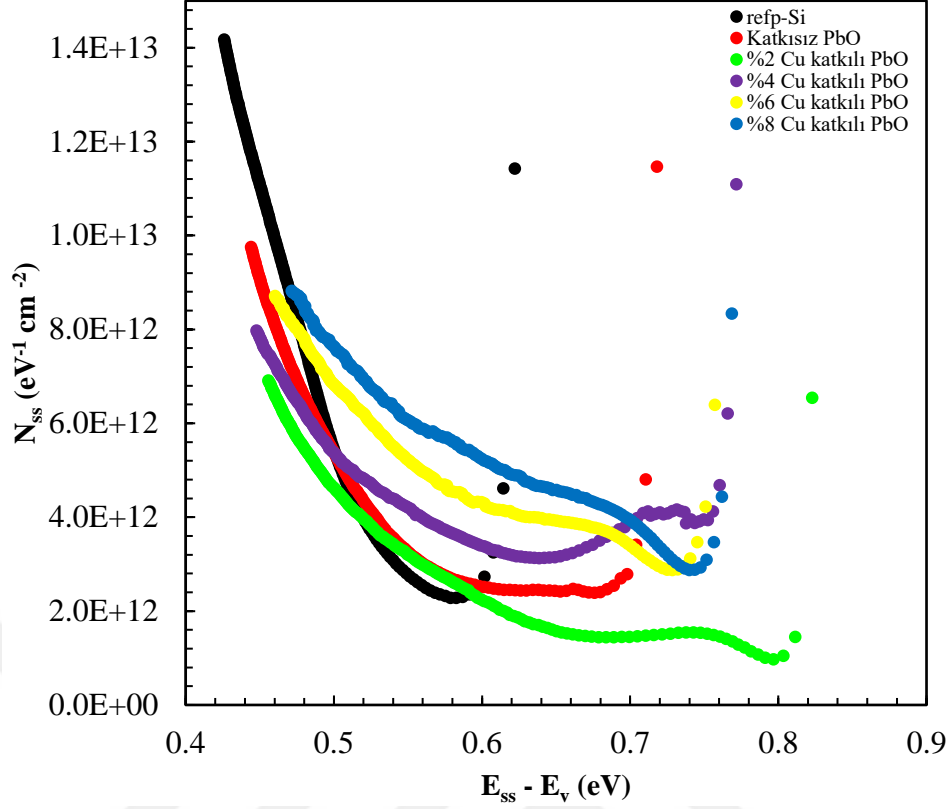
Numune	I_0 (A)	n	Φ_b (eV)	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)	RR
Ref-Si	6.60×10^{-7}	2.52	0.62	2.52×10^3	1.88×10^7	248
Katkısız	1.44×10^{-8}	2.42	0.72	1.23×10^3	3.05×10^5	7461
%2 Cu	4.41×10^{-10}	2.30	0.81	3.95×10^3	7.46×10^8	188878
%4 Cu	3.20×10^{-9}	2.49	0.76	6.42×10^3	5.60×10^8	87285
%6 Cu	3.11×10^{-9}	2.89	0.76	4.75×10^3	4.30×10^8	90530
%8 Cu	2.47×10^{-9}	3.26	0.77	7.33×10^3	3.28×10^8	44790

Schottky diyotların performansını etkileyen en önemli etmenlerden biri de seri dirençleridir. Diyotlara uygulanan voltaj, seri direnç ve ara yüzey tabaka üzerinde paylaşılacaktır. Bundan dolayı MIS tip Schottky diyot yapıları için direnç değerlerinin (R_i) voltaja göre değişimleri Ohm yasasından ($R_i = V_i / I_i$) faydalanarak hesaplandı ve $R_i - V_i$ grafiği Şekil 5.9'da verildi. Seri direnç (R_s) ve şönt direnci (R_{sh}), $\ln(I) - V$ grafiğinden ohm yasası kullanılarak elde edilen bu $R_i - V_i$ grafiğinin yüksek ve düşük voltaj bölgelerinden belirlendi.



Şekil 5.9. Al/PbO/p-Si/Al MIS tipi diyotlarda R_i -V değişimi

Arayüzey tuzakları/durumları yarıiletkenlerdeki cihaz performansını önemli ölçüde düşüren bir parametredir. Arayüzey durumlarının dağılım profil analizi cihazlar için elektrik karakteristiklerinde güvenilirlik açısından oldukça önemlidir. Doğru beslem I-V datalarından türetilen arayüzey durumların yoğunluğun (N_{ss}) enerjiye bağlı dağılımları (E_{ss}), Card ve Rhoderick tarafından geliştirilen denklemlere dayalı olarak hem idealite faktörünün hem de potansiyel bariyer yüksekliğinin voltaja bağlı olarak değiştiği dikkate alınarak elde edildi (Card ve Rhoderick, 1971). Yarıiletkenler ile dengede olan arayüzey durumları Eş. 3.37’de etkin engel yüksekliği değerleri ise Eş. 3.35’te verilen denklemler yardımı ile hesaplandı. p-tipi yarıiletken yüzeyindeki arayüzey hallerinin enerjisi Eş. 3.36’da verilen denklem ile elde edildi. Şekil 5.10’da arayüz/yüzey durum yoğunluklarının enerji dağılım profilleri verildi.



Şekil 5.10. Al/PbO/p-Si/Al MIS tipi diyotlarda N_{ss} ve E_{ss} değişimi

Şekil 5.10'da görüleceği gibi arayüzey hal yoğunluğu, diyotun katkısız halinde (E_{ss} -0.69 eV) enerjisinde $2.78 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ değerinden (E_{ss} -0.44 eV) enerjisindeki $9.62 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ değerine, üstel bir şekilde arttığı görüldü. %2, %4, %6 ve %8 katkılama değerlerine bakıldığında sırasıyla, (E_{ss} -0.8 eV) enerjisinde $1.041 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ değerinden (E_{ss} -0.46 eV) enerjisindeki $7.10 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ değerine, (E_{ss} -0.76 eV) enerjisinde $4.43 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ değerinden (E_{ss} -0.44 eV) enerjisindeki $7.93 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ değerine, (E_{ss} - 0.74 eV) enerjisinde $2.92 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ değerinden (E_{ss} -0.46 eV) enerjisindeki $8.70 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ değerine, (E_{ss} -0.75 eV) enerjisinde $3.08 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ değerinden (E_{ss} -0.47 eV) enerjisindeki $8.81 \times 10^{12} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ değerine üstel olarak arttığı görüldü.

6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında ilk olarak katkısız ve %2, %4, %6, %8 Cu katkılı PbO ince film tabakasının SILAR tekniği ile oluşturulması için çözelti hazırlandı ve daha sonra kaplama işlemi cam alttaş üzerine 80 °C derece sıcaklıkta yapıldı. Kaplama 10 tur döngüden sonra elde edildi. İnce filmlerde bulunan herhangi bir hidroksit fazını uzaklaştırmak amacıyla 300 °C derecede 60 dakika tavlandı. XRD, SEM-EDS ve UV-VIS spektrometresi cihazları aracılığıyla, kaplanan ince filmlerin, kristal yapısı, yüzey morfolojisi ve optiksel özellikleri detaylı olarak analiz edildi. Son olarak fiziksel buharlaştırma yöntemiyle, vakum sistemi ile elde edilen yaklaşık olarak 1.62×10^{-5} Torr basınç değeri altında ve ~50A'lık akım geçirilen tungsten flaman yardımıyla arka yüzüne omik kontak yapılmış p-Si alttaşın farklı kalınlıklarda PbO kaplanan ön yüzeyine oldukça saf (~99.99%) Alüminyum (Al) metali buharlaştırılarak ince bir tabaka oluşturuldu. Bu şekilde Al/katkısız PbO ve (%2-4-6-8)Cu:PbO/p-Si/Al MIS diyot yapıları elde edildi.

Katkısız ve Cu katkılı PbO ince filmlerin X-ışını analizleri Rigaku Ultima IV X-ray difraktometresi ile yapıldı. Şekil 5.1 analiz edildiğinde çok sayıda pikin varlığı ince filmlerin polikristal yapıda olduğunu gösterir. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 incelendiğinde, elde ettiğimiz ve Şekil 5.1'de gösterilen X-ışını kırınım desenleri, Şekil 5.2 (a)'da verilen (100), (101), (110), (002) düzlemlerinde tetragonal α -PbO tercihli yönelime, Şekil 5.2 (b)'de verilen (100), (111), (200), (210), (021), (202) düzlemlerinde ortorombik β -PbO tercihli yönelime sahip olduğu görüldü. En yüksek pik şiddeti β -PbO (200) düzlemine ait olduğu için bu düzlemin tercihli yöneliminin daha baskın olduğu değerlendirildi. Sonuçlar α -PbO'nun kırınım modeli tetragonal faz yapısını doğrulayan 05-0561 numaralı JCPDS kartı ve β -PbO'nun kırınım modeli ortorombik faz yapısını doğrulayan 88-1589 numaralı JCPDS kartı ile iyi bir şekilde eşleşir. (Mythili ve Arulmozhi, 2014). Şekil 5.1 incelendiğinde Cu^{+2} atomlarının Pb^{+2} örgü bölgelerine doğru yer değiştirdiği ve X-ışını kırınım pikinin katkılama ile $2\theta=19.581^\circ$ değerine kaydığı görüldü. Şekil 5.1 ve Çizelge 5.1 birlikte incelendiğinde katkılama ile Cu^{+2} atomlarının Pb^{+2} örgü bölgelerine doğru yerleştiği, pik şiddetinin arttığı ve $2\theta=30.530^\circ$ değerine kaydığı görüldü. Çünkü Cu'nun en yüksek şiddete sahip olan pik değeri $2\theta=35.550^\circ$ civarındadır (Mobarak vd., 2022). Cu'nun katkılama konsantrasyonlarının artmasıyla birlikte pikteki kaymalar, artan yoğunluk ve pik

şiddeti Şekil 5.1'de açıkça görüldü. %2Cu: PbO'da pikler çok az değişiklik gösterirken, %4Cu: PbO'daki piklerin Cu katkılması nedeniyle baskılanmaya başladığı görüldü. %6Cu: PbO katkılama ile kristal özelliklerin artmaya başladığı ve %8Cu: PbO katkılama ile kristal özelliklerinin bozulmadığı görüldü. Piklerin genişlikleri, genlikleri ve konumları dikkate alındığında, kristalizasyon özelliklerinin %6Cu: PbO oranında arttığı görüldü. %6Cu: PbO'nun katkılama oranı ile Şekil 5.1'de α -PbO fazlarının baskılanıp kaybolduğu, sadece β -PbO fazlarının ve Pb_3O_4 fazlarının olduğu görüldü. Ayrıca tetragonal α -PbO için (002) yönelimine sahip $2\theta=35.984$ değerine denk gelen pikin, Cu katkılmasının etkisiyle sağa doğru kayarak katkılama oranının artmasıyla genişleyip sönümlendiği gözlemlendi. Giderek yayvanlaşan bu pikin Cu katkılama konsantrasyonu ile yapısının bozulduğu ve özelliğini kaybettiği söylenebilir. Şekil 5.1'de gösterilen Pb_3O_4 tercihli yönelimlerinin de katkılama ile şiddetinin arttığı görüldü. PbO ince filmlerin hem tetragonal hem de ortorombik fazlarda tercihli yönelime sahip olması düşük-yüksek sıcaklık aralığında kalan $300^\circ C$ sıcaklıkta tavlama işlemi yapılmasından kaynaklandığı ve bu durumun diğer bir nedenin de SILAR tekniğinin uygulanma yönteminin olduğu söylenebilir. X-ışınları kırınım desenleri analiz edildiğinde yapıda çok sayıda pikin varlığı ince filmlerin polikristal yapıda olduğunu gösterir ve literatürle uyum içerisindedir (Pasha vd., 2012).

SILAR yöntemi ile üretilen katkısız ve Cu katkılı PbO ince filmlerin yüzey morfolojileri SEM görüntüleri kullanılarak, elementel analizi de EDS spektrumu kullanılarak incelendi. SEM görüntüleri incelendiğinde tüm numunelerin yüzey yapısının genel olarak farklı boyut ve morfolojilere sahip nano boyutlu dikey ve yatay pullardan oluşan yapıda olduğu gözlemlendi. Görülen dikey ve yatay pulların bir araya gelmesiyle sürekli katkısız PbO filmi oluştu. PbO ince filmlere Cu katkılması ile numunelerin yüzey morfolojisinin değiştiği görüldü. %2 ve %4 Cu katkılama sonucu PbO filmleri oluşturan pullar azaldı. Artan katkılama ile %6Cu:PbO'da tane boyutu artış gösterdi ve kümelenmeyle birlikte kristalleşmenin arttığı görüldü. %8Cu: PbO'da ise yüzey neredeyse homojen bir görünüme sahip oldu. Bu Cu atomlarının PbO yüzeyine düzgün bir şekilde dağıldığını gösterdi. Ayrıca katkısız PbO filmin pürüzlü bir yüzeye sahip olduğu ve boşlukların olduğu gözlemlendi. Cu katkılması sonucu pulların azalmasıyla küme boyutunun artmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün azaldığı söylenebilir. SEM görüntülerinden elde edilen sonuçlar XRD pikleri ile

tutarlıdır. EDS spektrumu incelendiğinde ise ince filmlerde, Pb, O ve Cu varlığı açıkça görüldü. Spektrumda görülen Ca, Mg, Na ve Si varlığı alttaş olarak kullanılan cam malzemenin içeriğinden kaynaklandığı değerlendirildi.

Cam alttaş üzerine kaplanan katkısız ve Cu katkılı PbO ince filmlerin optik özellikleri 200 nm ile 1100 nm dalga boyu aralığında UV-Vis spektrometresi kullanılarak analiz edildi. Katkısız ve Cu katkılı PbO ince filmlerin soğurma spektrumunda 300 nm dalga boyuna yakın dalga boylarında, soğurma spektrumunda bir artış görüldü. 300 nm dalga boyundan sonra ise soğurma grafiğinde denge değerine ulaştığı görüldü. Bundan dolayı yarıiletken malzeme, 300 nm dalga boyundan daha büyük dalga boylarında soğurma yapmamaktadır ve neredeyse geçirgenlik özelliği gösterdiği görüldü. 300 nm dalga boyundan daha küçük dalga boylarında ise kuvvetli bir soğurma özelliği gösterdiği görüldü. Bu soğurma spektrumu, PbO ince filmler için literatür ile uyum içerisindedir. Filmlerin yasak enerji bant aralık değerleri incelendiğinde üretim sırasında katkısız ve farklı oranlarda Cu katkılama yapılmasına rağmen yasak enerji bant aralık değerlerinin birbirine yakın olduğu görüldü. Numunelerin yasak enerji bant aralık değerleri sırasıyla 3.1 eV, 3.1 eV, 3.0 eV, 3.2 ve 3.0 eV olarak bulundu. Bu değerler literatürde PbO ince filmler için verilen yasak enerji bant aralık değerleri ile uyum içerisindedir (Mythili ve Arulmozhi, 2014).

Üretilen Al/katkısız-PbO ve (%2-4-6-8)Cu katkılı PbO/p-Si/Al MIS Schottky diyotların elektronik özelliklerini incelemek amacıyla akım-gerilim (I-V) ölçümleri yapıldı ve Şekil 5.8’de verildi. I-V ölçüm sonuçlarından kontakların MIS Schottky özelliği gösterdiği gözlemlendi. Elektriksel parametreler için I-V ölçüm analizlerinde Termiyonik Emisyon Teorisi kullanıldı. Böylece doyma akımı (I_0), idealite faktörü (n), sıfır beslem bariyer yüksekliği (Φ_b), doğrultma oranı (RR), arayüz durumlarının yoğunluğu (N_{ss}) ve seri/şönt dirençler (R_s , R_{sh}) hesaplandı ve Çizelge 5.3’te verildi. Çizelgeden görüleceği üzere, n ve I_0 değerleri; p-Si referans numuneye göre katkısız PbO’ da azalmaya başlamış %2Cu: PbO arayüzey tabakalı numunede en düşük değerde, daha sonra %4, %6 ve %8Cu: PbO arayüzey tabakalı numuneler için artmaya devam ettiği görüldü. Φ_b değeri ise referans ve katkısız PbO arayüzey tabakalı numuneler için arttığı, %2Cu: PbO arayüzey tabakalı numunede en yüksek değerine ulaştığı, daha sonra %4, %6 ve %8Cu: PbO arayüzey tabakalı numuneler için azalmaya başladığı görüldü. İdealite faktörü (n), 1’den küçük ise diyot ideal diyot olarak kabul

görür. İdeal diyotta akım, termoiyonik emisyon akım teorisine uyar, uygulanan gerilim de tüketim bölgesinde düşer (Norde, 1979). Çizelge 5.3'te görüldüğü üzere idealite faktörü (n) değeri 1'den büyüktür. Üretilen diyotlardaki bu büyüklüğün sebebi, genel olarak imalat sırasında meydana gelen yüzey/arayüzey oksit tabakasına, dielektrik ya da permitivitenin büyüklüğüne, seri direnç etkisinden (R_s), engel yüksekliklerinin homojensizlikleri, ara katmanların varlığı ve yüzey/arayüzey halleri, homojen olmayan engele uygulanan voltaja bağlı olması ile ilişkilendirilir. Engel yüksekliklerindeki bu değişimin ara yüzeyde oluşturulan tabaka ile diyotun uzay yükü alanındaki dağılımında oluşan değişimden kaynaklandığı söylenebilir (Altındal vd., 2020). %2Cu: PbO arayüzey tabakalı numunenin I_o , n ve Φ_B değerleri diğerleriyle karşılaştırıldığında ara katmanlar tarafından iyileştirilen genel elektriksel özellikleri bakımından en iyi Cu katkı oranının olduğu görüldü.

Elektriksel özelliklerin iyileştiğini gösteren bir diğer ölçü de doğrultma oranıdır ($RR=IF/IR$). Bu bağlantıya dayanarak, tüm numunelerin doğrultma oranları ± 2 V için belirlendi. Çizelge 5.3'ten görüleceği üzere %2Cu: PbO arayüzey tabakalı numunenin RR oranı referans numuneye göre 761 kat, katkısız PbO arayüzey tabakalı numuneye göre 25 kat artmış ve en yüksek doğrultma oranına ulaşmıştır. Diğer numuneler için en yüksek değer yarısına düştüğü görüldü.

Bütün bu değerlendirmeler sonucunda %2Cu: PbO arayüzeyli diyot n , I_o ve R_s için en düşük değerlere sahip iken, Φ_b , RR ve R_{sh} için en yüksek değerlerdedir. Daha fazla artan katkılama oranı bu parametrelerde olumsuz değişikliklere yol açtığı görüldü. Katkılama arttıkça, bu seviyelerde yeni arayüzeyler oluşmaya başladığı ve diyot parametreleri n , I_o ve R_s değerlerini artırırken Φ_b , RR ve R_{sh} değerlerini düşürdüğü gözlemlendi.

Şekil 5.8'de $\ln I-V$ grafiğinde doğru beslem bölgesinde yaklaşık 1 V'dan sonra doğrusallıktan sapmanın görülmesi seri direnç (R_s) ve arayüzey Cu katkılı oksitli tabakanın varlığı nedeniyledir. Çünkü uygulanan voltaj seri direnç (R_s), ara tabaka ve Schottky diyotların tükenme bölgesi tarafından paylaşılacaktır. MS ve MIS tipi Schottky diyotlardaki seri direncin (R_s) ana kaynakları genellikle prob telleri, doğrultucu ve yarı iletkenin ters omik kontakları tarafından yapılan temas, yarı iletkenin yüzeyindeki bazı safsızlıklar, yarı iletken gövdenin direnci ve yarı iletkene

homojen olmayan katkılama atomlarıdır. Şönt direnç (R_{sh}) kaynakları genellikle yüksek iletkenlik yolları veya daha düşük bariyerler, tane sınırları, sızıntı akımı yolları ve toprağa giden prob telleridir. MS ve MIS tipi Schottky diyotların direnci (R_i), voltajın (V_i) bir fonksiyonudur ancak diyotların R_s ve R_{sh} 'nin gerçek değerleri yüksek ileri ve geri voltajlara (yeterince yüksek ileri beslem voltajında $R_i \approx R_s$ ve aynı ters beslem voltajında $R_i \approx R_{sh}$) karşılık gelir. Bu nedenle, tüm numuneler için voltaja bağlı profil Ohm yasasından hesaplandı (Güçlü, 2024). R_i -V grafiği Şekil 5.9'da verildi. Şekilden açıkça görüldüğü gibi, R_i değerleri V arttıkça azalır ve yeterince yüksek negatif ve pozitif voltajlarda doyumluğa ulaşır. Numuneler için R_{sh} ve R_s değerleri ± 2 V'ta tanımlanmış ve Çizelge 5.3'te listelendi. Yukarıda açıklandığı gibi, $\ln I-V$ eğrileri, özellikle R_s ve ara tabakanın etkisi nedeniyle, yüksek doğru beslem voltajlarında doğrusallıktan saptığı görüldü. Çizelge 5.3'te görülebileceği üzere Cu katkılı PbO arayüzey tabakalı numunelere bakıldığında %2Cu: PbO arayüzey tabakalı numunenin R_{sh} değeri en büyük iken, R_s değeri için en düşük olduğu görüldü.

R_s ile birlikte, yarı iletkenle dengede N_{ss} 'nin varlığı da I-V karakteristiklerinde önemli bir role sahiptir. Ancak, N_{ss} orta-doğru beslem bölgesinde etkili iken, R_s yalnızca yüksek doğru beslem voltajlarında etkilidir. Genel olarak, N_{ss} 'nin temel kaynakları, yarı iletkenin yüzeyinin periyodik örgünün kesintiye uğraması, yarı iletkenin yüzeyinin temizleme işlemleri, üretim işlemleri, yarı iletkendeki dislokasyon veya kirlilikler ve laboratuvar ortamındaki bazı organik kirliliklerdir. Ek olarak, ara katmanların farklı doping konsantrasyonları, N_{ss} 'nin büyüklüğünde ve enerji dağılımlarında bir farka neden olabilir (Card ve Rhoderick, 1971). Bu nedenle, ara katmanların çeşitli doping konsantrasyonlarının etkisini belirlemek için, bu cihazlardaki N_{ss} 'nin enerjiye bağlı dağılımı, doğru beslem I-V verileri aracılığıyla voltaja bağlı n ($n(V)$) ve etkili engel yüksekliği (Φ_b) denklemleri ile hesaplandı. Numuneler için hesaplanan N_{ss} değerlerini N_{ss} 'nin E_c-E_{ss} grafiği Şekil 5.10'da verildi. Hesaplanan N_{ss} değerleri ve enerjileri valans bandının kenarından yasak bant aralığına (E_g) yayıldıkça üstel düşüşlerini gösterir. Şekilden görüldüğü üzere %2Cu: PbO arayüzey tabakalı numunenin N_{ss} değeri referans, katkısız PbO ve Cu katkılı PbO arayüzey tabakalı diğer tüm diyotlar içerisinde en düşük değerdedir. N_{ss} 'nin yaklaşık 10^{12} - $10^{13}/(eV.cm^2)$ büyüklüğünde olması bu tür Schottky diyotlar için uygundur ve N_{ss} 'nin U şeklindeki davranışı grafikte görüldüğü gibi belirgindir. Genellikle orta aralık enerjisinden ($E_g/2$) iletkenlik bandının tabanına (E_c) doğru artarlar. Yarı iletken

bant aralığındaki özel yoğunluk dağılımları nedeniyle, ara katman ve yarı iletken arasındaki bölgeye bağlı olarak bir değişiklik gösterirler. İlâveten, harici bir elektrik alanı veya uygulanan beslem voltajı altında kolayca yeniden yapılandırılabilir ve yeniden düzenlenebilirler.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında Cu metal katkılı PbO ince filmlerin üretilmesi, karakterizasyonu ve kontak uygulaması durumunda elektronik özelliklerinin incelendi. Yapılan bu karakterizasyonlar ile düşük maliyetli, Cu katkılı PbO ince filmler, SILAR tekniğiyle oluşturuldu ve daha sonra Pb/p-Si arayüzeyinde kullanılarak farklı Cu katkılı arayüzey tabakalı Pb/(%2-4-6-8)Cu: PbO/p-Si Schottky diyotlar imal edildi. Bu numuneler arasında %2Cu: PbO arayüzeyin Pb/p-Si arayüzeyinde pasivasyon etkisi ile en iyi diyot parametrelerini verdiği ve PbO'ya Cu katkısının en makul oran olduğu belirlendi. Çeşitli endüstriyel uygulamalar, yarıiletken teknolojisi, fotodedektörler, alan etkili transistörler ve güneş hücreleri, servo motorlar, optoelektronik cihazlar açısından uygulanabilir Cu katkılı PbO ince film yapısının kullanılabilceği önerilir.

Sonraki çalışmalarda,

- Cu katkılı PbO ince filmlerin kaplanmasında tur sayısı değiştirilip farklı katkılama oranları ile filmlerin parametreleri karşılaştırma yapılabilir.
- Tavlama sıcaklıkları ve tavlama süresi değiştirilerek PbO ince filmlerin kristal yapıları elde edilebilir.
- Schottky diyot ölçümleri karanlık ortamda analiz edildi. Aydınlık ortamda da diyotun değerleri analiz edilerek kontak parametrelerine ışığın etkisi karşılaştırma yapılabilir.
- Farklı metal katkılı PbO ince filmlerin üretilip, karakterizasyonu ve kontak uygulaması durumunda elektronik özelliklerinin analizi yapıp karşılaştırma yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Alialy, S., Altındal, Ş., Tanrıku, E.E., Yıldız, D.E., 2014. Analysis of Temperature Dependent Current-Conduction Mechanisms in Au/TiO₂/N-4H-SiC (Metal/İnsulator/ Semiconductor) Type Schottky Barrier Diodes. *Journal of Applied Physics*, 116, 083709- 9.
- Altındal, S., Farazin, J., Pirgholi-Givi, G., Maril, E., Azizian-Kalandaragh, Y., 2020. the effects of (Bi₂Te₃-Bi₂O₃-TeO₂-PVP) Interfacial Film on the Dielectric and Electrical Features of Al/p-Si (MS) Schottky Barrier Diodes (SBDs). *Physica B: Condensed Matter*, 582, 411958.
- Altındal Yerişkin, S., 2017. Arayüzey Tabakalı Metal/Yarıiletken (MS) Yapıların Hazırlanması ve Elektriksel ile Dielektrik Özelliklerinin Geniş Frekans ve Voltaj Aralığında İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 101s, Ankara.
- Arulmozhi, K.T., Mythili, N., 2013. Studies on the Chemical Synthesis and Characterization of Lead Oxide Nanoparticles with Different Organic Capping Agents. *American Institute of Physics Advances*, 3(12), 122122.
- Ataşer, T., 2017. İki Eklemlı Ga_xIn_{1-x} P/GaAs Güneş Hücrelerinin Tasarımı, Epitaksiyel Büyütölmeleri ve Hücre Fabrikasyonu. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 147s, Balıkesir.
- Boylestad, R., Nashelsky, L., 1998. *Electronic Devices and Circuit Theory (Seventh Edition)*, New Jersey: Prentice-Holl, 3-42. 48.
- Card, H. C., Rhoderick, E. H., 1971. Studies of Tunnel MOS Diodes I. Interface Effects in Silicon Schottky Diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4(10), 1589.
- Chao, S., Huang, Y. F., Chen, Y. C., Yan, L. 1990. Multiple Phase Change of Lead Oxide Film for Optical Storage. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 23(7), 955.
- Cheung, S.K., Cheung, N.W., 1986. Extraction of Schottky Diode Parameters from Forward Current-Voltage Characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85-87.
- Cıbrır, İ., 2017, Kurşun Oksit Katkılı Metal-Oksit-Yarıiletken Yapıların Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 60s, Ankara.
- Colinge, J.-P., Colinge, C.A., 2005. *Physics of Semiconductor Devices*. Springer Science and Business Media, 436p, New York.
- Cowley, A.M., Sze, S.M., 1965. Surface State and Barrier Height of Metal Semiconductor Systems. *Journal of Applied Physics*, 36(10), 3212-3221.

- Cullity, B. D., Stock, S.R., 2015. Elements of X-ray Diffraction. Pearson India Education Services, 42-50.
- Droessler, L.M., Assender, H.E., Watt, A.A., 2012. Thermally Deposited Lead Oxides for Thin Film Photovoltaics. Materials Letters, 71, 51-5.
- Echlin, P., 2011. Handbook of Sample Preparation for Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. Springer Science and Business Media, 332p, New York.
- El-Damrawi, G., Mansour, E., 2005. Electrical Properties of Lead Borosilicate Glasses. Physica B: Condensed Matter, 364(1-4), 190-198.
- Erol, A., Balkan, N., 2013. Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları. Seçkin Yayıncılık, 347s, Ankara.
- Güçlü, Ç. Ş., 2018. Arayüzeyleri Farklı Kalınlıklarda İmal Edilmiş Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs/In Schottky Diyotların Dielektriksel Özelliklerinin ve AC Elektriksel İletkenliklerinin Frekansa ve Sıcaklığa Bağlılıkları. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 242s, Isparta.
- Güçlü, Ç. Ş., Ulusoy, M., Altındal, Ş., 2024. A Comparison Electrical Characteristics of the Au/(Pure-PVA) /N-Si and Au/ (Cdte Doped-PVA) /N-Si (MPS) Type Schottky Structures Using I–V and C–V Measurements. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 35(12), 881.
- Gümüş, C., Özkendir, O., Kavak, H., Ufuktepe, Y., 2006. Structural and Optical Properties of Zinc Oxide Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis Method. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. 8(1), 299–303.
- Hashim, F. S., Mohaimeed, A. A. 2018. Structural, Morphological, and Some Optical Properties of Amorphous and Polycrystalline Lead Oxide Thin Films. AL-Qadisiyah Journal of pure Science, 23(1), 175-185.
- Henry, C.H., 1980. Limiting Efficiencies of Ideal Single and Multiple Energy Gap Terrestrial Solar Cells. Journal of Applied Physics, 51(8), 4494-4500.
- Kaymak, N., Oz Orhan, E., Ocak, S. B., Selçuk, B. 2018. An Investigation of the Electrical Properties of Pbo Based MOS-Type Different Schottky Barrier Diodes on a Structure. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1935, No. 1). AIP Publishing.
- Kittel, C., 1996. Katılmal Fiziğine Giriş, Çev. Karaoğlu, B. Güven Yayınları, 434s, İstanbul.
- Makula, P., Pacia, M., Macyk, W., 2018. How to Correctly Determine the Band Gap Energy of Modified Semiconductor Photocatalysts Based on UV- Vis Spectra. the Journal of Physical Chemistry Letters, 9(23), 6814–6817.

- Mani, P., Manikandan, K., Ramya, A. J., Seelan, A. I., Zahirullah, S. S., Hameed, M. S., Prince, J. J. 2014. Influence of Molar Concentrations on Optical Properties of Copper Sulphide Thin Films by SILAR Method. *Int. J. ChemTech Res*, 6(7), 3573-3578.
- Mobarak, M. B., Hossain, M. S., Chowdhury, F., Ahmed, S. (2022). Synthesis and Characterization of CuO Nanoparticles Utilizing Waste Fish Scale and Exploitation of Xrd Peak Profile Analysis for Approximating the Structural Parameters. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(10), 104117.
- Mythili, N., Arulmozhi, K. T., 2014. A Comparative Study on the Structural and Optical Properties of Pbo and Zn Doped Pbo Nanocrystals. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 25, 3984-3989.
- Mythili, N., Arulmozhi, K. T. 2014. Characterization Studies on the Chemically Synthesized A and B Phase Pbo Nanoparticles. *Int. J. Sci. Eng. Res.*, 5(1), 412-416.
- Neamen, D.A., 2012. *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles*, McGraw-Hill Companies, 660p, New York.
- Norde, H. 1979. A Modified Forward I-V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance. *Journal of Applied Physics*, 50(7), 5052–5053.
- Nwodo, M. O., 2011, Effect of Thermal Annealing on the Optical and Structural, Properties of PbO Thin Film. *Journal of Optoelectronics and Biomedical Materials*, (3), 95-100.
- Pasha, S., Chidambarama, K., Vijayan, N., Madhurai, W., 2012. Structural and Electrical Properties of Nano Structure Lead Oxide, *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 110-116.
- Pathan, H. M., Lokhande, C. D., 2004. Deposition of Metal Chalconide Thin Films by Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) Method. *Bulletin of Material Science*, 27(2), 85-111.
- Pech-Canul, M. I., Ravindra, N. M., 2019. *Semiconductors: Synthesis, Properties and Applications*. Springer International Publishing, 1-36.
- Rhoderick, E. H., 1982. Metal-Semiconductor Contacts. *IEE Proceedings I Solid State and Electron Devices*, 129(1), 10–84.
- Rocha, F. S., Gomes, A. J., Lunardi, C. N., Kaliaguine, S., Patience, G. S., 2018. Experimental Methods in Chemical Engineering: Ultraviolet Visible Spectroscopy—UV-Vis. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 96(12), 2512-2517.
- Seeger, K., 2004. *Semiconductor Physics: An Introduction (Ninth Edition)*, Berlin: Springer-Verlag, 10- 32.

- Semeniuk, O., 2017. Lead Oxide (PbO) for Direct Conversion Detectors. Lakehead University, Chemistry and Materials Science Program, Doctoral Thesis, 183s, Canada.
- Sharma, B.L., 1984. Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their Applications. Plenum Press, 1-50, New York. 23.
- Sharon, M., 2016. An Introduction to the Physics and Electrochemistry of Semiconductors: Fundamentals and Applications. Tokyo: Scrivener.
- Singh, J., 2003. Electronic and Optoelectronic Properties of Semiconductor Structures. U.K.: Cambridge University Press, 46-62.
- Suganya, M., Balu, A. R., Usharani, K., 2014. Role of Substrate Temperature on the Growth Mechanism and Physical Properties of Spray Deposited Lead Oxide Thin Films. *Materials Science-Poland*, 32, 448-456.
- Suganya, M., Narasimman, V., Srivind, J., Nagarethinam, V. S., Usharani, K., Balu, A. R., 2015. Studies on the Physical Properties of Spray and SILAR Deposited Lead Oxide Thin Films. *Journal of Electron Devices*, 21, 1842-1848.
- Suryanarayana, C., Norton, M. G., 1998. X-ray Diffraction: A Practical Approach. Springer Science and Business Media, 43-52.
- Suryawanshi, V. N., Varpe, A. S., Deshpande, M. D. 2018. Band Gap Engineering in Pbo Nanostructured Thin Films by Mn Doping. *Thin Solid Films*, 645, 87-92.
- Sze, S. M. 1981. "Physics of Semiconductor Devices 2nd ed.", John Wiley and Sons, New York, 362-390.
- Sze, S. M., 2002. *Semiconductor Devices Physics and Technology*, John Willey and Sons.
- Sze, S., Ng, K. K., 2006. *Physics of Semiconductor Devices*. New York: John Wiley and Sons, 46-63.
- Trinquier, G., Hoffmann, R. 1984. Lead Monoxide. Electronic Structure and Bonding. *The Journal of Physical Chemistry*, 88(26), 6696-6711.
- Trupke, T., Würfel, M.A., 2002. Improving Solar Cell Efficiencies by Up-Conversion of Sub-Band-Gap Light. *Journal of Applied Physics*, 92(7), 4117-4122.
- Yahia, I. S., Farag A. A., Yakuphanoglu F., Farooq, W. A., 2011. Temperature Dependence of Electronic Parameters of Organic Schottky Diode Based on Fluorescein Sodium Salt. *Synthetic Metals*, 161, 9-10, 881-887.
- Zhang, L., Guo, F., Liu, X., Cui, J., Qian, Y. 2005. Metastable Pbo Crystal Grown Through Alcohol-Thermal Process. *Journal of Crystal Growth*, 280(3-4), 575-580.

Zhu, F. Y., Wang, Q. Q., Zhang, X. S., Hu, W., Zhao, X., Zhang, H. X. 2014. 3d Nanostructure Reconstruction Based on the SEM Imaging Principle and Applications. *Nanotechnology*, 25(18), 185705.

