



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SILAR YÖNTEMİ KULLANILARAK PbO
İNCE FİLMİNİN ÜRETİMİ VE Pb/PbO/p-Si MIS KONTAKLARININ
ELEKTRONİK VE ARAYÜZEY ÖZELLİKLERİ

Emine ERDEM
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Fizik Anabilim Dalı

Şubat 2021
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Emine ERDEM

04/02/2021

ÖZET

SILAR YÖNTEMİ KULLANILARAK PbO İNCE FİLMİNİN ÜRETİMİ VE Pb/PbO/p-Si MIS KONTAKLARININ ELEKTRONİK VE ARAYÜZEY ÖZELLİKLERİ

Emine ERDEM

**Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

2021, 78 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

Prof. Dr. Sezai ASUBAY

Doç. Dr. Osman PAKMA

Son yıllarda, metal oksit ince filmler yoğun bir şekilde piezoelektrik, elektronik, optronik cihazlar ve fotovoltik hücrelerde kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında düşük maliyetli ve kontrolü oldukça kolay olan, SILAR ince film büyütme tekniği kullanılarak kurşun oksit (PbO) ince filmini mikroskop camı (lam) ve inorganik yarıiletken silisyum (Si) altlık üzerine büyütülmüştür. Kullanılan altlıklar uygun kimyasal temizleme işlemlerinden sonra SILAR tekniği ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi çözeltiler 80°C'de tutularak yapılmıştır. Kaplama esnasında hem cam hem silisyum kristali (mat yüzey) 25 adımlık daldırma tur sayısı ile kaplanmıştır. Silisyum yarıiletkeni üzerine ince film oluşturduktan sonra üst yüzeyine (parlak yüzey) Pb iletkeni fiziksel buharlaştırma yöntemi (PVD) ile buharlaştırılarak kontak oluşturulmuştur.

Cam üzerinde oluşturulan PbO ince filmin optik, morfolojik ve yapısal özellikleri, araştırılmıştır. Oluşturulan Pb/PbO/p-Si MIS Schottky diyotun elektriksel ve arayüzey özellikleri karanlık ortamda akım-gerilim (I-V), 10kHz-2MHz frekans aralığında kapasite-gerilim (C-V), kondüktans-gerilim (G-V) ve 1kHz-10MHz frekans aralığında kapasite-frekans (C-F) özellikleri incelenmiştir.

Anahtar kelimeler: Diyot, MIS, PbO, Schottky, SILAR

ABSTRACT

PRODUCTION OF PbO THIN FILM BY USING SILAR TECHNIQUE AND ELECTRONIC AND INTERFACIAL PROPERTIES OF THE Pb/PbO/p-Si MIS CONTACTS

Emine ERDEM

**The Graduate School of Natural and Applied Science of Batman University
The Degree of Master of Science
In Physics**

Advisor: Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ

2021, 78 Pages

Jury

**Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ
Prof. Dr. Sezai ASUBAY
Assoc. Prof. Dr. Osman PAKMA**

In recent years, metal oxide thin films have been used extensively in piezoelectric, electronic, optronic devices and photovoltaic cells. In this thesis, using SILAR thin film magnification technique, which is low cost and easy to control, the lead oxide (PbO) thin film was enlarged on microscope glass (slide) and inorganic semiconductor silicon (Si) pads. The pads used were coated with SILAR technique after appropriate chemical cleaning processes. Coating was done by keeping the solution at 80 °C. Films of different thicknesses were obtained by changing the number of dipping rounds during coating. After forming a thin film on the silicon semiconductor, the coating was performed by evaporating the Pb conductor to its upper surface (bright surface).

Optical, morphological and structural properties of PbO thin film formed on glass were investigated. The electrical and interface characteristics of the Pb /PbO/p-Si MIS Schottky diode created were investigated in the dark by using current-voltage (I-V), capacity-voltage (C-V) and conductance-voltage (G-V) in 10kHz-2MHz frequency range and capacity-frequency (C-f) characteristics in 1kHz-10MHz frequency range.

Keywords: Diode, MIS, PbO, Schottky, SILAR

ÖNSÖZ

Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne Yüksek Lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada SILAR yöntemi ile oluşturulan PbO ince filmin optik, morfolojik ve yapısal özellikleri incelendi. Ayrıca MIS yapıda oluşturulan Pb/PbO/p-Si schottky diyotun elektriksel ve arayüzey yapıları ele alındı.

Bu tez çalışmasının seçilmesi, laboratuvar çalışmaları ve ölçümlerin değerlendirilmesine kadar her aşamada desteklerini esirgemeyen, engin bilgilerinden yararlandığım, beni cesaretlendirerek bana yol gösteren çok kıymetli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ömer GÜLLÜ'ye bütün içtenliğimle teşekkürlerimi sunarım. Kendisine minnettarım. Aynı zamanda yüksek lisans sürecinde bana emek veren ve destek olan değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Cihat ÖZAYDIN'a teşekkür ediyorum.

Ayrıca ince film ölçümlerinde bize üniversite laboratuvarını açarak desteklerini sunan Bingöl Üniversitesi Rektör Yardımcısı Sayın Prof. Dr. İbrahim Yasin ERDOĞAN'a ve ölçümlerin alınması aşamasında görevli laboratuvar personeline teşekkürlerimi iletiyorum.

Her anımda yanımda olan arkadaşlarıma, aileme özellikle de ANNEME ve BABAMA teşekkür ve sevgilerimi sunuyorum.

Emine ERDEM
BATMAN-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
ŞEKİLLER	xi
ÇİZELGELER	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması.....	3
2. KURAMSAL TEMELLER.....	10
2.1 Yarıiletkenler.....	10
2.1.1 Katkısız (asal) yarıiletken.....	12
2.1.2 Katkılı yarıiletken.....	12
2.1.2.1 n-tipi yarıiletken.....	12
2.1.2.2 p-tipi yarıiletken.....	13
2.1.2.3 p-n Ekleme	14
2.1.2.4 İleri/düz/doğru beslem (forward biasing).....	17
2.1.2.5 Ters beslem (reverse biasing)	17
2.2 MIS Kontaktların Yapısı	18
2.3 Schottky Diyot.....	19
2.3.1 Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontak.....	20
2.3.2 Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontak.....	23
2.4 İnce Film Kaplama Yöntemleri	24
2.4.1 SILAR yöntemi	25
2.4.2 Fiziksel buhar biriktirme yöntemi (PVD).....	28
2.5 X-Işını Difraksiyonu	29
2.6 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	30
2.7 UV-VIS Spektrometresi	31
3. DENEYSEL İŞLEMLER.....	32
3.1 Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler Ve Hazırlanış Aşamaları	32
3.2 Deney Çözeltisinin Hazırlanması	32
3.3 Filmlerin Kaplanması	34
3.4 Pb/PbO/p-Si Schottky Diyotunun Hazırlanması	36
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE SONUÇLAR	38
4.1 PbO Filminin X-Işınları (XRD) Ölçümleri	38

4.2	PbO Filminin SEM-EDS Analizi	38
4.3	PbO Filminin Optik Ölçümleri (UV-Vis ve PL)	40
4.4	Pb/PbO/p-Si Schottky Diyotunun Elektriksel Karakterizasyonu	43
4.4.1	Üretilen diyotun akım -gerilim karakteristikleri	43
4.4.2	Üretilen diyotun kapasite-gerilim karakteristikleri	50
4.4.3	Üretilen diyotun kondüktans-gerilim karakteristikleri	54
4.4.4	Üretilen diyotun kapasite-frekans (C-f) karakteristikleri	55
5.	GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER	56
5.1	Sonuçlar ve Tartışma	56
5.2	Öneriler	61
	KAYNAKÇA	62
	ÖZGEÇMİŞ.....	66

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A*: Richardson sabiti
A: Diyotun etkin alanı
C: Kapasite
d: Uzay yükü bölgesinin genişliği
e: Elektron yükü
E_o: Vakum seviyesi
E_c: İletkenlik bandının tabanı
E_f: Fermi Seviyesi
E_g: Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
eV: Elektron volt
E_v: Valans bandı
h: Planc sabiti
I_o: Ters beslem akımı
k: Boltzmann sabiti
m: Kütle
M: Molarite
M_A: Molekül kütlesi
n: Mol
q: Elektron yükü
R_s: Seri direnç
T: Mutlak sıcaklık
V: Uygulanan potansiyel
V_{bi}: İçyapı potansiyeli
V_F: İleri beslem gerilimi
V_R: Geri beslem gerilimi
W: Deplasyon bölgesi
X: Yarıiletkenin elektron ilgisi
λ: X-ışınlarının dalga boyu
Ω: Direnç birimi
Φ_B, Φ_b: Schottky 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
γ: Norde yönteminde bir sabit
δ: Arayüzey kalınlığı
ε_s: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ε_o: Boşluğun dielektrik sabiti

Kısaltmalar

AFM: Atomik kuvvet mikroskobu
C-F: Kapasite-frekans
CTAB: Setil trimetil amonyum bromür
C-V: Kapasite-gerilim
EDS: Dispersif spektroskopi

EDTA: Etilen diamin tetra asetik asit
G-F: Kondüktans-frekans
G-V: Kondüktans-gerilim
HRTM: Yüksek çözünürlüklü geçirimli elektron mikroskobu
I-V: Akım-gerilim
MIS: Metal-yalıtkan-yarıiletken kontak
MS: Metal-yarıiletken kontak
PL: Fotoluminesans
PVA: Polivinil alkol
PVD: Fiziksel buhar biriktirme
SCLC: Uzay yükü sınırlı akım
SEM: Taramalı elektron mikroskobu
XRD: X-ışını difraksiyonu

ŞEKİLLER

Şekil 1.1 Doğada karşılaşılabileceğimiz farklı malzemelerin boyutları (Biber, 2019).....	1
Şekil 1.2. PbO kristal yapısı (a), PbO kristal ağ yapısı (b) (Url-5).....	4
Şekil 2.1. (a) iletken enerji bandı ($E_g < 0,05\text{eV}$), (b) yarıiletken enerji bandı ($0,7\text{ eV} < E_g < 1,4\text{eV}$), (c) yalıtkan enerji bandı ($E_g > 8\text{eV}$)	11
Şekil 2.2. n- tipi yarıiletkenin oluşumu	13
Şekil 2.3. p- tipi yarıiletkenin oluşması.....	14
Şekil 2.4. p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlere ait enerji bant seviyeleri	15
Şekil 2.5. p-n eklemi ve eklemeye ait enerji bant diyagramı	16
Şekil 2.6. Pozitif ve negatif iyonları oluşumu	16
Şekil 2.7. İleri (a) ve ters (b) kutuplamada enerji-bant diyagramı.....	17
Şekil 2.8. MIS bir yapının şematik gösterimi	18
Şekil 2.9. Bir metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapısı ve eşdeğer devresinin gösterimi	19
Şekil 2.10. Schottky diyot sembolü	20
Şekil 2.11. Bir metal ve n- tipi yarıiletkenin kontak öncesi enerji-bant diyagramı	21
Şekil 2.12. Bir metal ve n-tipi yarıiletkenin oluşturduğu Schottky kontağın denge durumundaki enerji bant diyagramı	22
Şekil 2.13. Bir metal ve p- tipi yarıiletkenin kontak öncesi enerji-bant diyagramı	23
Şekil 2.14. Bir metal ve p- tipi yarıiletkenin kontak sonrası enerji-bant diyagramı	23
Şekil 2.15. İnce film üretim teknikleri	25
Şekil 2.16. SILAR yöntemi (Ekinci, 2017).	26
Şekil 2.17. SILAR düzeneği	27
Şekil 2.18. Buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi (Sönmezoğlu ve ark., 2012)..	28
Şekil 2.19. Bragg yasası	29
Şekil 2.20. SEM çalışma prensibi (Biber, 2019).	31
Şekil 2.21. Soğurma ölçümlerinin yapıldığı sistemin blok diyagramı	31
Şekil 3.1. Hazırlanan amonyum hidroksit içeren kurşun asetat trihidrat çözeltisinin fotoğrafı	34
Şekil 3.2. SILAR düzeneği	34
Şekil 3.3. (a) kullanılan maske ve (b) oluşturulan Pb/PbO/p-Si diyot	36
Şekil 3.4. Pb ve Al kaplamasında kullanılan PVD cihazı	37
Şekil 4.1. Cam üzerinde silar yöntemi kullanılarak büyütülen pbo ince filminin X-ışınları difraksiyon deseni	38
Şekil 4.2. PbO filmin görüntüsünün alındığı taramalı elektron mikroskobu	39
Şekil 4.3. PbO (kurşun oksit) filminin SEM görüntüsü	39
Şekil 4.4. Kurşun oksit filminin EDS spektrumu	40
Şekil 4.5. Elde edilen PbO ince filmlerin soğurma-dalga boyu grafiği	41
Şekil 4.6. Elde edilen filmin $(\alpha h\nu)^2$ nin foton enerjisi $(h\nu)$ ye göre değişimi	42
Şekil 4.7. Elde edilen PbO filminin PL spektrumu.....	43
Şekil 4.8. Akım-gerilim ölçümlerinin yapıldığı cihaz	44
Şekil 4.9. Arayüzeyli Pb/p-Si referans ve PbO arayüzeyli Pb/PbO/p-Si diyotunun oda sıcaklığında I-V grafikleri	45
Şekil 4.10. Pb/PbO/p-Si ve Pb/p-Si referans diyotların göre F(V)-V grafikleri.....	47
Şekil 4.11. Pb/PbO/p-Si ve Pb/p-Si referans diyotlarının $dV/d(\ln I)$ -I grafikleri	49
Şekil 4.12. Pb/PbO/p-Si ve Pb/p-Si referans diyotlarının H(I)-I grafikleri	50
Şekil 4.13. Pb/PbO/p-Si Schottky diyotunun, 10kHz- 2MHz frekans aralığındaki C-V ve ters beslem altındaki $1/C^2$ -V grafikleri	53
Şekil 4.14. Pb/PbO/p-Si diyotun kondüktans-gerilim (G-V) grafikleri	55
Şekil 4.15. Farklı gerilim değerlerinde Pb/PbO/p-Si diyotun C-f ölçümleri.....	55

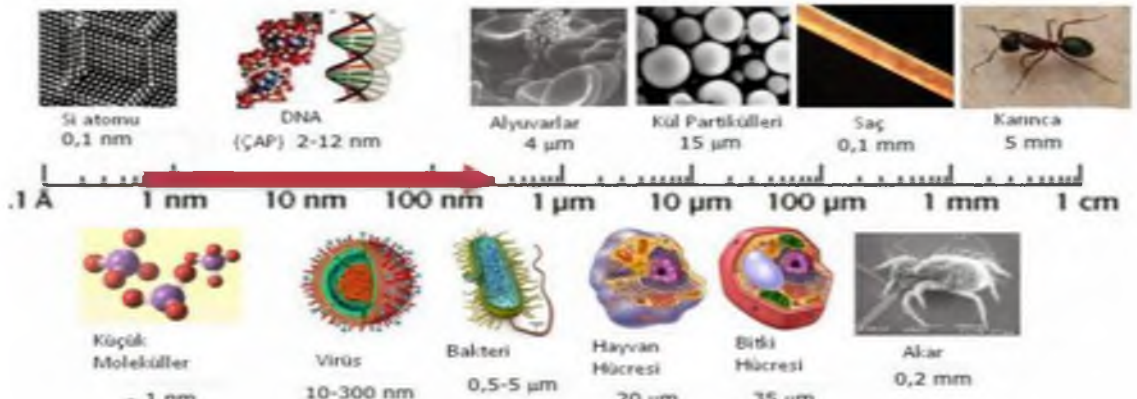
ÇİZELGELER

Çizelge 1.1. Kurşun oksit (PbO) özellikleri	5
Çizelge 3.1. SILAR yöntemi ile PbO ince filmlerinin optimize edilmiş hazırlayıcı parametreleri.....	35
Çizelge 4.1. Pb/p-Si ve Pb/PbO/p-Si diyotlarının I-V, Cheung ve Norde fonksiyonlarından elde edilen diyot parametreleri (diyot alanı $A=0,00785 \text{ cm}^2$ olarak alınmıştır.).....	50
Çizelge 4.2. Pb/PbO/p-Si numunesinden alınan ölçümlerin kapasite-voltaj grafiklerinden elde edilen diyot parametreleri	54

1. GİRİŞ

Teknolojinin ezber bozmayı sürdürdüğü günümüzde, gittikçe değişen ve gelişen elektronik aygıtların birçoğu nanoteknoloji bilimi ile beraber olumlu bir ivme kazanmıştır.

Ölçüm sisteminde nano milyarda biri (10^{-9}) ifade eder. Örneğin metrenin milyarda biri 0,0000000394 inç eşittir. Ya da, bir virüsün ortalama çapı 100 nanometredir yani bu da 0,0000000394 inç eder (Aydoğan, 2014). Aşağıdaki şekil 1.1'de bu boyut biraz daha somutlaştırılmıştır.



Şekil 1.1 Doğada karşılaşılabileceğimiz farklı malzemelerin boyutları (Biber, 2019)

Nanoteknoloji; fizik, kimya, biyoloji, mühendislik ve malzeme bilimi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Nanoteknoloji vizyonunun ortaya çıkışı, "Maddenin Atomlarının Dibinde Derin Bir İlim Vardır" başlıklı konuşmaya dayandırılabilir. Bu konuşma 29 Aralık 1959'da California Teknoloji Enstitüsünde, Caltech Amerikan Fizik Derneği toplantısında fizikçi Richard Feynman tarafından yapılmıştır (Haidar, 2019).

Nano ölçekli yapıların analizindeki amaç, kimyasal ve fiziksel özellikler bakımından incelenip, özellik bakımından üstün ürünlerin üretimi ve üretim aşamalarının geliştirilmesi, böylelikle daha dayanıklı, hafif ürün üretimi ve enerji tasarrufunun sağlanmasıdır. Nano partiküllerin reaktivitesi, boyutuna, şekline, yüzey bileşimine ve yüzey atomik düzenlemesine bağlıdır (Gürmen ve ark.,2006).

Elektronik aygıt teknolojilerinin temelini oluşturan, nano teknolojinin kapsamında olan, ince filmler günümüzde yapılan araştırmalar ve çalışmalar arasında oldukça geniş bir yere sahiptir. Oldukça yüksek kullanım sahasına sahip olan ince filmlerden sağlanan performans, temel parametredir. Ulaşılan performans, kullanılan

malzeme türüne ve çeşitli üretim teknikleriyle doğrudan ilişkilidir. Üretim tekniklerindeki farklılıklar ince film üretimine üstün özellikler kazandırmakla beraber yeni çalışmaların önünü açmaktadır. İnce film üretim teknikleri, teknolojinin gelişmesi ile birbirine alternatif olabilecek yeni üretim teknikleri geliştirilmiştir. Bu üretim teknikleri özellikle vakum sisteminin bulunmasıyla daha da gelişim göstermiştir. İnce filmlerin aygıt teknolojisinde oldukça fazla kullanılması, maliyetinin düşürülmesi ve performansının artırılması yönünde oldukça önemli akademik çalışmalar yapılmaktadır. İnce filmlerin ne denli önemli bir çalışma sahası olduğunu dünya çapında yapılan bilimsel çalışma sayısının her geçen gün çoğalması göstermektedir (Sönmezoğlu ve ark., 2012).

İnce film teknolojisinde yarıiletkenler, teknolojik ve bilimsel yönden ele alınıp incelendiğinde yarıiletkenler arasında metal oksitlerin oldukça önemli bir malzeme sınıfını kapsadığı görülmektedir. Son dönemlerde bu alanda yapılan çalışmalar ve bulgular özellikle metal oksit ince filmler üzerinde yoğunlaşmaktadır (Çavuşoğlu, 2019). Metal oksit yapılar, birçok uygulama alanı bulan teknolojik açıdan önemli malzemelerdir (Kung, 1989).

Mühendislikteki kullanım alanlarında gösterdikleri performans sayesinde metal oksitler fizik, kimya ve malzeme biliminin de oldukça önemli ölçüde kullanım alanı sağlamıştır. Nano yapıdaki metal oksitler; yarıiletken cihazlar, sensör, piezo elektrik, yakıt hücreleri, mikroelektronik devre, batarya, aşınmaya karşı direnç gösterme amaçlı yüzey pasivasyonu ve katalizör uygulamaları, kirlilik giderimi, polimer UV direnci ve dayanıklılık gibi özelliklerinin ilerletilmesi ile kanser tedavisinde manyetik ilaç taşıyıcı gibi oldukça fazla alanda kullanılmaktadır. Oldukça fazla kullanım alanı olan metal oksitlerden biri de kurşun oksittir. Kurşun oksit, kurşun asit bataryalarında elektroaktif eleman olarak otomotiv sektöründe oldukça fazla bir kullanım alanına sahiptir. Son yıllarda geleneksel metotlarla oluşturulan kurşun oksitler nano ölçeğe getirildiğinde daha fazla enerji kapasitesi ve daha fazla çevirim ömrü gibi oldukça fazla avantaj oluşturmaktadır. Bu nedenle ekonomik yönden avantajı sağlanmış ve güvenirliliği yüksek olan kurşun oksit batarya uygulamaları önem kazanmaktadır. Kurşun oksit, enerji uygulamalarında olduğu kadar pigment, kurşun camı, sır, seramik, katot ışın tüp camı üretimi, seramiklerin elektromekanik özelliklerinin geliştirilmesi ve kimyasal reaksiyonlarda aktif katalizör olarak kullanım gibi oldukça fazla ve farklı alanda da faaliyet göstermektedir (Aşık, 2012). Bunların yanı sıra kurşun oksit önemli bir

malzeme olarak gaz sensörleri, pigmentler ve boyalarda uygulanmaktadır (Suganya ve ark., 2014).

Son dönemlerde yarıiletken teknolojisinde ve optoelektronikte çok yoğun bir şekilde metal-yarıiletken (MS), metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) kontaklar ile metal-okсит yarıiletken yapılar (MIS), kullanılmaktadır (Aydın, 2019).

Bu tez çalışmasında, kurşun oksit (PbO), ince film büyütme tekniği olan SILAR yöntemi ile mikroskop camı üzerine büyütülerek, yapısal, morfolojik ve optiksel özellikleri incelenmiştir. Çalışmada ayrıca inorganik yarıiletken olan p-silisyum (p-Si) kristali ile MIS yapıda Pb/PbO/p-Si Schottky tipi devre elemanı üretilerek, üretilen Pb/PbO/p-Si Schottky diyotun akım-gerilim (I-V), kapasite-gerilim (C-V), kondüktans-gerilim (G-V) ve kapasite-frekans (C-f) karakteristiği oda sıcaklığında ve ışıksız ortamda frekansa bağılı olarak incelenmiştir.

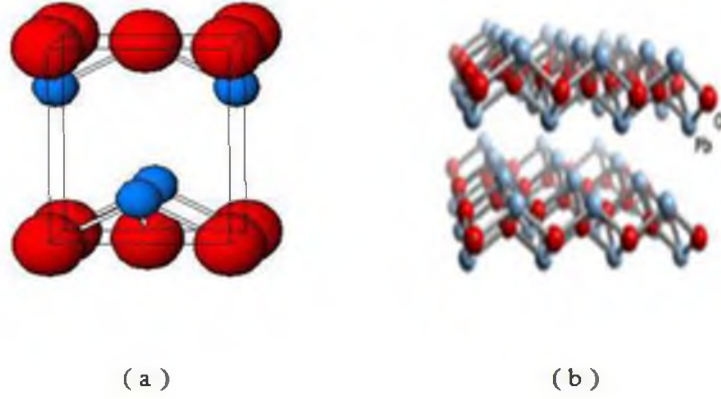
1.1 Literatür Araştırması

Metal oksitler, metallerden yarıiletkenlere ve yalıtkanlara kadar geniş bir yelpazeyi kapsayan çeşitli özelliklere sahip oldukça ilgi çekici bir malzeme sınıfını oluşturmaktadır (Henrich ve Cox, 1994).

Gelecek vaat eden malzemeler olarak metal oksit nano yapılar, optik, katalizörler, biyosensörler alanlarında kullanılmakta ve bunun gibi farklı olağanüstü özellikleri nedeniyle çok ilgi görmektedir (Erdoğan ve Güllü, 2010).

Metal oksitler ince filmlerde de sergiledikleri çeşitli özelliklerinden dolayı oldukça kullanılan bir materyal sınıfını oluşturmaktadırlar. Yüksek gelişmiş elektronik ve optik özelliklerinden dolayı metal oksit temelli ince filmler microelectronic ve optoelectronic manyetik hafıza, dielektrik tabakalar ve benzeri uygulamalarının geniş bir kısmında kullanılmaktadır. Çalışılan oksitli filmlerin çoğu geniş bir band gapa sahiptir. Çeşitli metal oksit ince filmler arasında kurşun oksit cazip özelliklerinden dolayı teknoloji açısında önem arz etmektedir. Farklı fazlara sahip kurşun oksit ince filmler, optik depolama cihazları için uygun hale getiren birden fazla yansıtma seviyesine sahiptir. Kurşun oksidin sahip olduğu farklı fazlar arasında kurşun monoksit (PbO), düşük elektrik iletkenliği, ilginç yarı iletken ve foto iletken özelliklere sahip, lazer teknolojisi ve görüntüleme cihazı uygulamalarında uygun olmasını nedeniyle ilgi çekici bir malzemedir (Suganya ve ark., 2015).

Kurşun oksit, genel anlamda kimyasal formülü PbO olarak bilinen ve kurşun monoksit olarak isimlendirilen bir bileşiktir. Tetragonal yapıda genellikle kırmızı veya turuncu, ortorombik yapıda genellikle sarı veya turuncu renkte olmak üzere iki polimorfada oluşabilir. “ X-ışını kristalografisi ile belirlendiği üzere, hem polimorfların, hem tetragonal hem de ortorombikler, piramidal dört koordinatlı Pb merkezini teşkil etmektedir. Dört köşeli formda dört Pb-O bağının uzunluğu aynıdır, ancak ortorombikte ikisi daha kısa ve iki uzunluktadır. Piramidal doğa, stereo-kimyasal olarak aktif yalnız çift elektron varlığını gösterir. PbO tetragonal kafes yapısında oluştuğunda litarge denir ve PbO ortorombik kafes yapısına sahip olduğunda buna massicot denir. PbO, kontrollü ısıtma ve soğutma ile Massicot'tan litarjiye veya tersine değiştirilebilir” (Cıbrı, 2017).



Şekil 1.2. PbO kristal yapısı (a), PbO kristal ağ yapısı (b) (Url-5)

Çizelge 1.1. Kurşun oksit (PbO) özellikleri

PbO ÖZELLİKLERİ	
Kimyasal formül	PbO
Molar kütle	223,20 g/mol
Görünüm	Sarı toz
Yoğunluk	9,53 g/ cm ³
Erime noktası	888 °C
Kaynama noktası	1477 °C
Suda çözünürlük	0,017 g/L
Çözünürlük	Konsantre alkalilerde çözünür (HCl, amonyum klorür) Seyreltik alkalilerde çözünmez (alkol)

PbO ince filminin hazırlanması genellikle nispeten düşük sıcaklıklarda yüksek uçuculuğu nedeniyle karmaşıktır. PbO, düşük sıcaklıkta, tetragonal fazda (α - PbO) ve yüksek sıcaklıkta ortorombik fazda (β - PbO) bulunduğu bilinmektedir. Atmosfer basıncı altında 490 °C'de, α - PbO, β - PbO' ya bir faz geçişinden geçer. PbO ince filmleri, metal organik kimyasal buhar biriktirme, dc magnetron püskürtme, SILAR, elektro biriktirme ve spre y piroliz gibi çeşitli yöntemlerle büyütülmüştür. Kimyasal yöntemler arasında spre y piroliz ve SILAR'ın basit ve ucuz olduğu kanıtlanmıştır. Her ne kadar bu tekniklerin her ikisi de düşük maliyetli, geniş alan kaplaması, minimum israf ve basit aparat gereklilikleri bakımından birbiriyle çok benzer olsa da, bu tekniklerle biriktirilen PbO filmlerinin mikroyapısal özellikleri dikkate değer ölçüde farklıdır (Suganya ve ark., 2015).

Kurşun oksit temelli yarıiletken teknolojisi ve optoelektronik malzemelerin yapısal, optik ve elektronik özellikleri üzerine çalışmalar gün geçtikçe daha da artarak devam etmektedir. Son yıllarda yapılan yarıiletken teknolojindeki PbO üzerinde gerçekleştirilen çalışmaların bir kısmı aşağıda sunulmuştur.

Droessler ve ark. (2012); çalışmalarında kurşun oksidi, bir Schottky tabanlı fotovoltaik aygıtında aktif katman olarak ilk kez gösterdiler. Kurşun ince filmleri termal olarak biriktirip çok kristalli kurşun oksit filmleri üretmek için oksitlediler. Üretilen

yapıların bant aralıkları ölçüldü ve ölçülen bant aralığı, sırasıyla ortorombik PbO ve tetragonal PbO için 2,8 eV ve 1,9 eV ve olarak hesaplandı.

Güngör ve ark. (2017); kurşun, günlük hayatta faydalı olabilecek birçok çok yönlü uygulamaya sahiptir. Güngör ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, homojen olarak dağıtılmış boyut, şekil ve yapıya sahip kurşun oksit (PbO) nano partikülleri elde etmek için birlikte çökeltme yöntemini kullanarak nano boyutlu kurşun oksit hazırlayıp ve reaksiyon parametrelerinin optimizasyonu için kapsamlı bir çalışma sundular. Sulu kurşun (II) asetat çözeltisi, yüksek sıcaklıklarda sodyum hidroksit ile reaksiyona girdiğinde, küresel şekilli kurşun oksit nanopartiküllerinin alfa formu ürettirir. 100 nm'nin altında kalınlığa sahip iki boyutlu beta PbO nano tabakaları ilk kez sentezlediler.

Hasan ve ark. (2015); çalışmalarında sprey piroliz ince film büyütme tekniği ile PbO ince filmleri hazırladılar. Bu filmlerin yasak enerji aralığı ve kırılma indislerini hesapladılar. Hazırlanan filmlerin yasak enerji bant aralığını 3,1 eV olarak ölçtüler.

Liu ve ark. (2016); kullanılmış kurşun asit bataryaların (SLAB) verimlilik ve ekonomik geri dönüşümünü sağlamak için bir yol buldular. Şöyle ki çalışmaları kullanılmış kurşun pastalardan pozitif ve negatif aktif malzemeleri ayrı ayrı üretip SLAB'ların tam ayrılmasına dayanır. Bu yöntem, safsızlıkların olumsuz etkilerini önleyebilir. Ancak daha ekonomik ve çevre dostu süreçlere hala ihtiyaç duyulduğunu ileri sürmektedirler.

Yousefi ve ark. (2015); PbO nanorodları, bir tüp fırında 330, 400, 450 ve 550 °C'de farklı sıcaklıklarda oksijen ortamında kurşun levhaların oksidasyonu ile sentezlediler. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) sonuçları, nanorodların 330 °C'ye yerleştirilen tabaka üzerinde büyümeye başladığını gözlemlediler. Öte yandan, sıcaklığın 550 °C'ye çıkarılmasıyla kurşun levha üzerine dizilen Pb levhada daha fazla nanorod ortaya çıktı. X-ışını kırınım modeli (XRD), nanorodların α -PbO yapılarına sahip olduğunu gösterdi. Bununla birlikte, nanorodlar için birkaç β -PbO fazı da ortaya çıktı. Raman ölçümleri XRD sonuçlarını doğruladı ve nanorodlar için α -PbO fazına ait olan iki Raman aktif modu gösterdi. Ek olarak, nanorodların Raman spektrumu β -PbO yapısında zayıf bir tepe gösterdi. Ürünlerin optik özellikleri, oda sıcaklığında fotoluminesans (PL) tekniği kullanılarak karakterize edildi. PL sonucu, görünür bölgede PbO nanorodları için bir bant boşluğu gösterdi.

Bhagat ve ark. (2019); fotoaktif α -PbO ince filmleri, 470 ° C-380 ° C aralığında püskürtme piroliz tekniğini kullanarak flor katkılı kalay oksit altlıklar üzerinde hazırladılar. SEM, yüksek sıcaklıktaki filmlerde tane boyutunda artış ile birbirine bağlı

PbO tanelerinin oluşumunu gösterdi. XPS, α -PbO'nun stokiyometrik faz saflığını gösterdi. Foto akım spektrumları, dolaylı bant aralığı 1,9 eV olan bir yarı iletkenin varlığını gösterdi.

Karthikeyan ve ark. (2017); kimyasal banyo çökeltme tekniği kullanılarak oluşturulan kurşun oksit ince filmin bu çalışmada, özellikleri XRD, SEM ve UV-Vis spektroskopisi kullanılarak incelendiler. Hazırlanan ince filmlerin optik bant aralığını 3,8eV olarak ölçtüler.

Mousa ve ark. (2017); yaptıkları çalışmada PbO ince filmler, kimyasal spreylendirilme yöntemi ile cam alt tabakalar üzerinde biriktirilmiştir. Filmleri bir fırında farklı kalınlıklarda depoladılar. XRD sonuçları, biriken ince filmin iyi bir polikristal tetragonal yapıya sahip olduğu göstermiştir. Kalınlık için AFM'den (95 nm) gelen (tanelerin) boyutu yaklaşık 96,12 nm olarak ölçtüler. Esas olarak elektriksel uygulamalarda kullanılabilen yapısal ve elektriksel açıdan iyi özelliklere sahip PbO fotovoltaiik hücreler ürettiler.

Suryawanshi ve ark. (2017); Mn katkılı PbO ince filmi, doğada polikristalindir. PbO ince filminin kristallliği yavaş yavaş Mn konsantrasyonunun artmasıyla bozulmuştur. PbO kafesine Mn katılımının bir sonucu olarak, güçlü morfolojik ve yapısal farklılıklar gözlenir. Katkısız PbO ince film için bant boşluğu 2,59 eV olarak ölçülürken. Katkılı PbO ince filminin bant aralığı 2,72 ile 1,66 eV arasında ölçüldü.

Pasha ve ark. (2012); solvo-termal yöntemle düşük sıcaklıkta kurşun oksit numunesi hazırlandı. X-ışını kırınım çalışmaları, 75 °C'de kararlı kristal fazın oluştuğunu gösterdi. İletim elektron mikroskobu ve seçilen alan elektron kırınım analizi, 15 - 30 nm boyutundaki kurşun oksitin kristalin nanorodlarını doğruladı.

Mythili ve Arulmozhi (2014); Zn katkılı PbO nanopartiküller, öncül olarak Kurşun (II) Asetat ve Çinko Asetat Trihidrat ile kimyasal çökeltme yoluyla sentezlediler. Dispersif Spektroskopi (EDS), Yüksek Çözünürlüklü Geçirimli Elektron Mikroskobu (HRTEM). XRD çalışmaları, ortalama kristalitlerin 23 ile 40 nm aralığında olduğunu gösterdi. Zn katkılı PbO Nanokristaller, absorpsiyon spektrumlarında 250 nm civarında mavi kayma sergilediği ve bant aralığı yaklaşık 3.87 eV olarak ölçtüler. Sonuçlar, Zn katkısının PbO nanokristallerinin yapısal ve optik özelliklerini geliştirdiğini ima ettiler. PL çalışmaları, gelişmiş bant aralığı enerjisi gösterdi ve oksijen boşlukları gibi daha az kusur elde edildi. Modifiye edilmiş yapısal ve optik özelliklere sahip Zn katkılı PbO nanokristaller, sensör cihazlarının imalatında etkin bir şekilde kullanılabilir olduğu saptandı.

Nwodo (2011); bu çalışmada, PVA yöntemi ile biriken kurşun oksit ince filmin kimyasal, optik ve yapısal karakterizasyonunun sonuçları incelendi. Filmlerin genellikle yüksek geçirgenlik gösterdiği gözlemlendi. Filmin bant aralığı 2,6 - 2,8 eV aralığında bulundu.

Taunk ve ark. (2014); ürettikleri nano yapıları kurşun hidroksit toz numuneleri 800 ° C'de tavladılar ve absorpsiyon spektrumlarının analizinden, kurşun (II) hidroksit 4,54 eV'lik bir doğrudan bant aralığına sahip olduğu bulundu. Ortalama parçacık boyutu ise 31nm olarak ölçüldü.

Shakir ve ark. (2018); çalışmalarında kurşun oksit (PbO) ince filmlerini, cam alt tabakalar üzerine, 130 nm kalınlıkta 0,7 nm /s çökeltme hızı ile vakumlu termal biriktirme metodunu kullanılarak oluşturdular. Tavlama sıcaklığı, 2 saat için 523 ile 723 K arasında değiştirdiler. Yaptıkları analizlerde XRD verilerinden tahmin edilen ortalama kristalit boyutlarının 15,11 – 36,80 nm aralığında olduğu bulundu. AFM, PbO filmlerinin iyi homojen yüzeye sahip olduğunu doğruladı. 523 K'de tavlanan PbO filmin daha yüksek optik geçirgenlik değerine sahip olduğunu tespit ettiler. Optik özellikler, PbO ince filmlerin doğrudan geçişlere izin verdiğini ve artan tavlama sıcaklığı ile enerji boşluğu değerlerinin azaldığını ileri sürdüler.

Cıbrı (2017); yaptığı çalışmada ısı buharlaştırma yöntemi kullanarak PbO ince filmini p-Si alttaşı üzerinde büyüterek Al/PbO/p-Si (MIS) yapıları üretti. Bu yöntemle üretilen Al/PbO/p-Si yapıların akım-gerilim (I-V), kapasite-gerilim (C-V) ve kondüktans-gerilim (G-V) ölçümleri alınarak bu ölçümler kullanılarak saturasyon akımı, ideallik faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnç gibi kontak parametreleri termoiyonik emisyon teorisi kullanılarak hesaplandı.

Makhlouf ve ark. (2017); PbO₂ ince filmini termal buharlaştırma yöntemi kullanarak tek kristal p-Si alttaşı üzerinde büyüterek Au/PbO₂/p-Si/Al heteroeklem fotodiyot yapısını elde ettiler. Elde ettikleri yapının akım-gerilim ölçümlerini 303- 373 K aralığında ve -1 ile 1,5 V aralığında aldılar. Doğru beslem I-V ölçümlerinden diyotun iletkenlik mekanizmasının $\leq 0,7$ V bölgesinde termoiyonik emisyon ile $> 0,7$ V bölgesinde ise uzay yükü sınırlı akım (SCLC) mekanizmasıyla kontrol edildiğini rapor ettiler.

Kaymak ve ark. (2018); buharlaştırma yöntemini kullanarak oluşturdıkları PbO bazlı MOS (metal oksit yarıiletken) -tipi farklı yedi tane Schottky bariyer diyotun, Al / PbO / p-Si, yapısını incelediler ve yedi diyot için bariyer yüksekliğini 0,64 eV ile 0,74eV arasında ölçtüler.

Droessler (2014); Tez çalışmasında, kurşun oksitleri fotovoltaiik malzemeler olarak inceledi. Kurşun oksitin farklı stokiyometrilere üretmek için vakum biriktirme yöntemleri ve ex-situ tavlama kullandı. Yapı ve optoelektronik özellikler arasındaki ilişki daha sonra araştırdı. PbO ince filmleri, termal olarak buharlaştırdı ve kurşun filmlerini hava tavlama yoluyla üretti. İki PbO fazının, tetragonal ve ortorombik, birlikte var olduğu ve birbiriyle rekabet ettiği buldu.

Günümüzde PbO yarıiletkeni fotoaktif gaz sensorleri, pigmentler ve boyalarda etkin kullanılması nedeniyle büyük ilgi görmektedir. PbO schottky tipi fotovoltaiik cihazlarda fotoaktif bir katman olarak ve güneş pillerinde ters polimer yüzey modifikasyon katmanı olarak kullanılmaktadır. PbO farklı optik ve yapısal poliformlar sergilemektedir (Suryawanshi ve ark., 2017).

Son yıllarda otomotiv alanında, fosil yakıt kullanan araç üretimi düşüncesinin yerine hibrit ve elektrikli araç üretim düşüncesi geçmiştir, lityum iyon bataryaların da üretimi bu düşünceye paralel olarak artış göstermiştir. Ancak lityum iyon bataryalarında anot malzemesi olarak kullanılan grafitten kaynaklanan olumsuzlukları ortadan kaldırmak için çalışmalar yapılmış ve grafit alternatif, kurşun oksit bu amaç için uygun bir seçenek olarak bulunmuştur (Konstantinov ve ark., 2006). Anot malzemesi olarak nano yapıda litarj (α -PbO) üretilmiştir. Yapılan çalışmaların sonuçlarına göre nano yapıda kullanılan kurşun ve kurşun oksit yapıların verimliliği ve tersinir kapasitede önemli gelişmeler sağladığı görülmüştür (Karami ve ark., Haghdar 2008).

PbO nano partikülleri elektrik depolamanın yanı sıra seramik endüstrisinde de kullanım alanı bulmaktadır. Seramiklere PbO ilavesi fiziksel ve kimyasal değişimlere sebep olmakta bu açıdan araştırılmakta ve geliştirilmeye çalışılmaktadır (Amarande ve ark., 2002).

Endüstriyel seramiklere PbO ilavesi, manyetik ve elektriksel yönden daha az etkisiz malzemelerin oluşmasını sağlamıştır. Fakat bu alanda yaygın bir kullanım alanı bulunmamaktadır. PbO, katot ışınlu tüp camında, X-ışını emisyonunu önlemek için, sadece boyun ve hunide kullanılır, nedeni ön kaplamada kullanıldığında renk değişikliğine sebep teşkil edebilir. Kurşun tüketimi ve buna bağlı PbO'nun işlenmesi, otomobil sayısı ile orantılıdır, çünkü otomotiv kurşun asitli pillerin ana bileşeni olmayı sürdürmektedir (Cıbrır, 2017).

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Yarıiletkenler

Maddenin yapıtaşı olan atomun yapısının anlaşılmasına yönelik yapılan çalışmalar madde ile ilgili konuların daha doğru anlaşılmasını sağlamıştır. Maddelerin tümü elementlerden oluşmakta ve atom yapılarına göre sınıflandırılmaktadır. Doğada maddeler elektriği iletip iletmemeye durumlarına göre üç gruba ayrılmaktadır. İletken maddeler elektriği iyi iletirken, yalıtkan maddeler elektriği iletmez, yarıiletkenler ise elektriği iletip iletmemeye durumları kontrol edilebilen yapılardır (Selek, 2008).

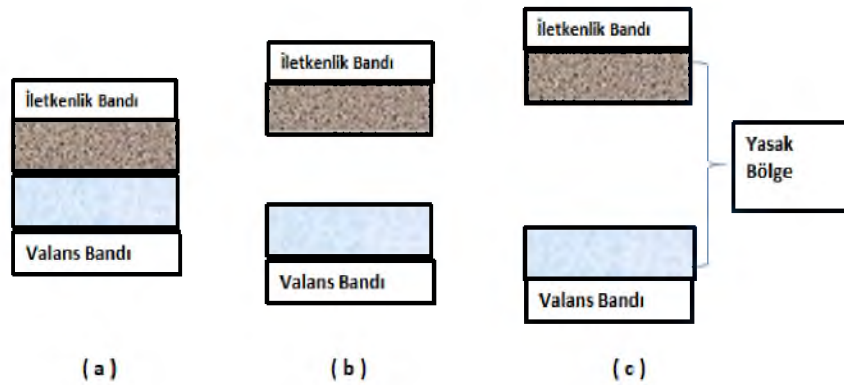
Yasak bant aralığı yalıtkanlara göre daha az olan yarıiletkenler, akım iletme özelliği sıcaklıkla değişim göstermektedir. Belirli bir sıcaklığın altında yarıiletkenler yalıtkan gibi davranmaktadır, bunun nedeni belirli bir sıcaklığın altına indiklerinde elektronlar iletim bandına geçmek için gereken enerjiyi kazanamamasıdır (Türköz, 2009).

Yarıiletkenler mutlak sıfırda mükemmel bir yalıtkan gibi performans sergilerler çünkü bu sıcaklıkta bantları ya tamamen boş ya da tamamen doludur, iletimi sağlayan kısmen dolu bantları bulunmamaktadır (Aydoğan, 2014).

İletkenler: Özdirenci (ρ) $< 10^{-4}\Omega$

Yalıtkanlar: Özdirenci (ρ) $> 10^{12}\Omega$

Yarıiletkenler: yarıiletkenlerin özdirençleri yapılan katkı maddesine göre farklılık gösterir. Özdirençleri yalıtkan ve iletken maddelerin özdirençleri arasında değer alsa da bu değer iletkenlik katsayısına daha yakın bir aralıkta bulunmaktadır (Evcil, 2019).



Şekil 2.1. (a) iletken enerji bandı ($E_g < 0,05\text{eV}$), (b) yarıiletken enerji bandı ($0,7\text{ eV} < E_g < 1,4\text{eV}$), (c) yalıtkan enerji bandı ($E_g > 8\text{eV}$)

Şekil 2. 1’de görüldüğü üzere iletken, yalıtkan ve yarıiletken maddelerin iletkenlik bandı ve valans bandı arasındaki mesafeler aynı değildir. İletkenlerde valans bandı ile iletkenlik bandı arasında yasak bölge aralığı yoktur ve valans bandına bağlı bulunan elektronlar zayıf bağlarla bağlıdır. Yalıtkan maddelerde yasak bölge aralığı yarıiletkenlere göre daha fazladır. Yarıiletkenlerde yasak bölge aralığı 0.7 eV ile 1.4 eV aralığındadır. Bu yasak bölge aralığı ısı ve ışık etkisiyle azaltılabilir böylece valans bandında zayıf bağlarla bağlı olan elektronlar iletkenlik bandına geçip iletkenlik sağlanabilir. Yarıiletkenler katkılanarak da elektron alıp verme durumuna göre iletken hale geçebilmektedirler (Aydın, 2019).

Metallerden yalıtkanlara kadar geniş bir bölgeyi kapsayan ve aynı zamanda geniş bir uygulama yelpazesine sahip yarıiletkenler sınıfı, katıların oldukça önemli ve de ilgi çekici bir sınıfını oluşturmaktadır. Bunlar, fiziksel ve kimyasal yapı bakımından çok farklı, oldukça fazla sayıdaki cisimleri içerir (Dikici, 2012). Yarıiletkenlerin keşfi, teknolojiye entegre devrelerin ve mikro işlemcilerin temelini oluşturmuştur. Bunların yanı sıra yarıiletkenler katkılanarak diyot, transistör, dedektör, sensör gibi elektronik aygıt yapısında kullanılmaktadır. Yarıiletken optoelektronikte cihazların kapsamı genellikle, ışığın üretimi, algılanması, yükseltilmesi, modülasyonu, ışık yayan diyotlar, yarıiletken lazerler, güneş hücreleri, fotodedektörler, optik yükselteçler, optoelektronik tümleşik devreleri, optoelektronik cihazların temel bileşenlerini oluşturmaktadır. Yarıiletkenleri iki başlık altında inceleyebiliriz (Haidar, 2019)

2.1.1 Katkısız (asal) yarıiletken

Yarıiletkenlerde iletim serbest yükler (holler) ve elektronlar sayesinde gerçekleşir. İletimin gerçekleşmesini sağlayan elektronlar ve holler (taşıyıcılar) elementin kendi atomlarından sağlayan yarıiletkenlere katkısız yarıiletken denir. Yarıiletkenlerde valans bandındaki elektronlar yeterli enerji alırsa iletkenlik bandına geçer ve iletkenlik bandına geçen her elektron arkasında bir boşluk (hol) bırakır. Bu nedenle katkısız yarıiletkenlerde elektron ve hol sayısı birbirine eşittir (Aydoğan, 2014)

Katkısız yarıiletkenlerin elektron ve hol sayıları birbirine eşit olduğu için elektriksel özelliklerinden oldukça yararlanılmaktadır. Katkısız yarıiletkenleri iletimde kullanabilmek için yani iletimin sağlanabilmesi için yarıiletkenlere enerji vermek gereklidir. Yarıiletkenlerde serbest taşıyıcıların olması elektron ve hollerin hareketini kolaylaştırdığı için katkılı yarıiletken fikrini ortaya çıkarmıştır (Yacobi, 2003).

2.1.2 Katkılı yarıiletken

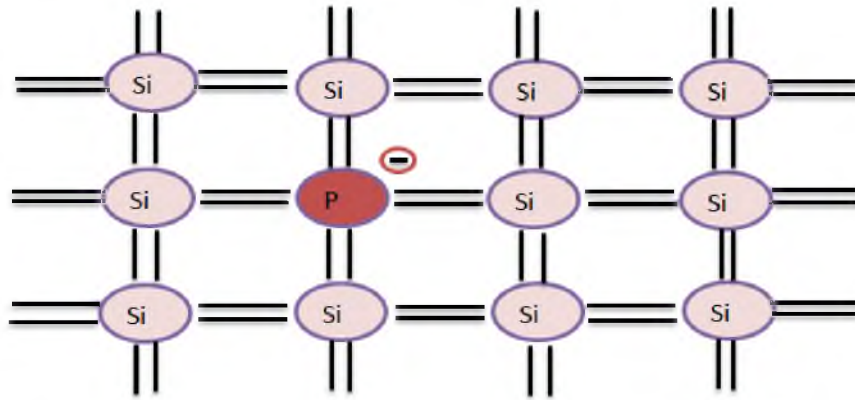
Katkısız bir yarıiletkende elektron ve hol (boşluk) sayıları birbirine eşittir. Uygulamada yapılan yarıiletken katkılamaıyla, elektron ve hol sayıları değiştirilebilir. Bu katkılama yarıiletkende safsızlık oluşturur ve bu safsızlık yarıiletkenin elektrik iletimini önemli ölçüde değiştirecektir. Yarıiletkendeki elektron veya boşlukların yoğunluklarının değiştirilmesi ile yasak bant enerjisinin değeri değişebilecektir. Yarıiletkene katkılama istenilen özelliğe göre yapılarak iletkenlik arttırılmaktadır. Katkılanmış yarıiletkenler iki grupta incelenmektedir (Dikici, 2012).

2.1.2.1 n-tipi yarıiletken

Son yörüngelerinde 4 elektron bulunduran germanyum (Ge) ve silisyum (Si) gibi periyodik cetvelin 4A gurubu yarıiletkenlerine, periyodik cetvelin 3A veya 5A grubu komşu atomlardan belirli oranda katkı yapılabilir.

Çok düşük katkılama dahi (0.0001 'en az ya da $1/10^6$ oranında) yarıiletkenin iletkenliğinde çok büyük farklılıklar yaratmaktadır. Örneğin silisyuma 5A grubundaki fosfor (P) katkısı yapıldığında, beş tane valans elektronuna sahip fosfor karalı hale geçmek için dört tane elektronunu komşu silisyum atomu ile kovalent bağ yapacak şekilde paylaşır ve böylece bir tane fosfor elektronu açıkta kalır. Bu şekilde katkılanmış

yarıiletkende açıkta kalan elektron yapıya zayıf bağlarla bağlı olduğu için yapının n-tipi yarıiletken olmasını sağlar. n-tipi yarıiletkenlerde enerji taşıyıcılar negatif yüklü olan elektronlardır. Fosfora zayıf bağla bağlanan 5. elektron atom çekirdeğine uzak olduğu için, oda sıcaklığı onu atomdan uzaklaştırmak için yeterli olacaktır. Zayıf bağla bağlı olan bu elektron iletkenlik bandına geçerek serbest hale geçer. Silisyum ve fosfor arasında oluşan bu kristalde kristale elektron veren fosfor verici yani donör olarak adlandırılır (Turton, 2007)



Şekil 2.2. n- tipi yarıiletkenin oluşumu

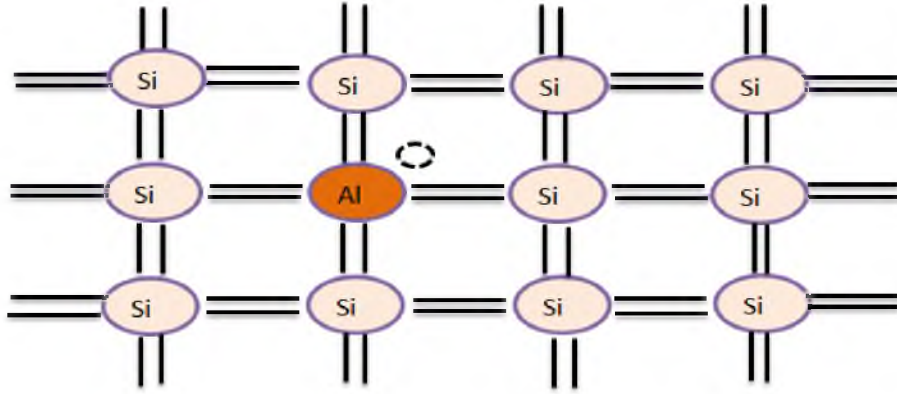
n-tipi bir yarıiletken kristaline bir gerilim uygulandığında üzerindeki serbest elektronlar kaynağın negatif kutbundan itilip pozitif kutbundan çekilirler böylece gerilim kaynağının negatif kutbundan pozitif kutbuna doğru bir elektron akışı başlar (URL-1, 2017).

2.1.2.2 p-tipi yarıiletken

n-tipine benzer şekilde 4A gurubu yarıiletkenleri, 3A gurubu elementlerinden bor, alüminyum gibi elementlerle katkılanırsa elementler kararlı hale geçmek için son yörüngesini sekiz elektrona tamamlamaya çalışırlar.

Eğer 4A gurubu silisyum elementine daha az valans elektronuna sahip 3A gurubu elementlerinden alüminyum (Al) katkılanırsa silisyum ve alüminyum arasında bağ oluşur. Oluşacak bu bağda alüminyum elementi silisyum elektronları ile bağ yapar ve böylece silisyum atomunda Şekil 2.3'teki gibi bir elektron boşluğu hasıl olur. Bu yapıda kristale katılarak asıl kristal atomlarından elektron alan atomlara alıcı atomlar

yani akseptör atomları denir. Hareket edebilen elektron boşluğu kristalde iletimi sağlar. Her ne kadar tam doğru olmasa da donör safsızlıklarında ekstra elektronun donora bağlı olduğu gibi, boşluklarda da akseptörlere bağlıdır (Turton, 2007).

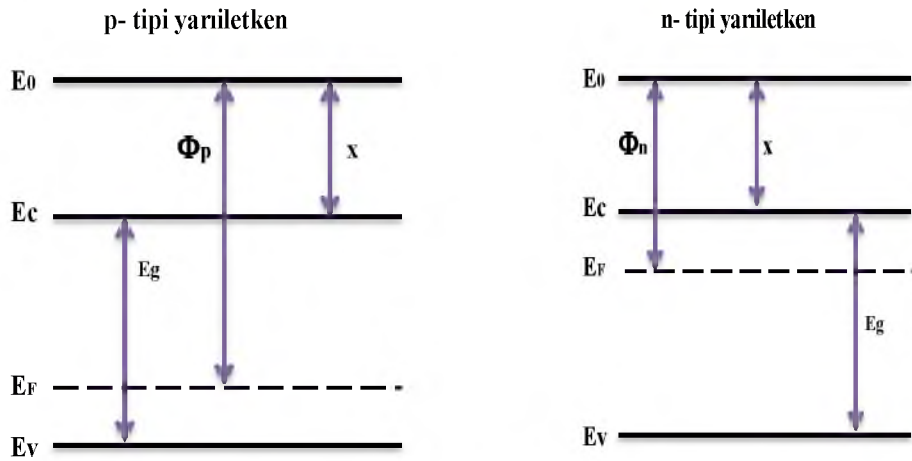


Şekil 2.3. p- tipi yarıiletkenin oluşması

p-tipi bir yarıiletkene gerilim uygulandığında kaynağın negatif kutbundaki elektronlar p-tipi maddedeki elektron boşluklarını doldurarak kaynağın pozitif kutbuna doğru hareket ederler. Elektronlar pozitif kutba doğru ilerlerken elektron boşlukları elektronların ters yönünde hareket etmiş olurlar. Yarıiletkenin pozitif kutbundan negatif kutbuna doğru bir hol hareketi sağlar (URL-1, 2017).

2.1.2.3 p-n Eklemi

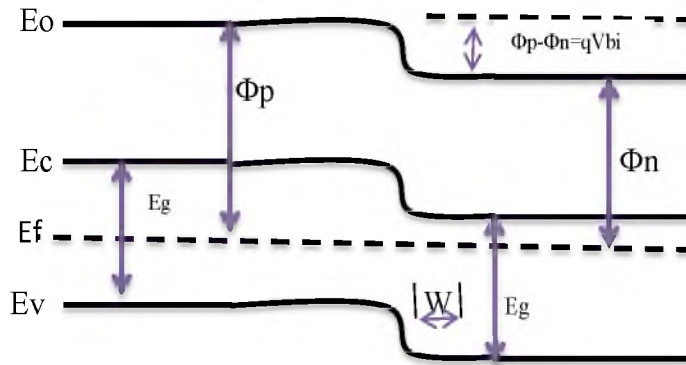
Adından da anlaşılacağı üzere p-tipi ve n-tipi yarıiletken ikilisinin kontak oluşturacak şekilde kaynaşması ile p-n eklem yapısı oluşur.



Şekil 2.4. p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlere ait enerji bant seviyeleri

Kontak oluşturmadan önceki p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerin yapıları yukardaki Şekil 2.4'te verilmiştir. Görüldüğü gibi enerji bant aralıkları birbirinden farklıdır. Bu yapılar ile p-n kontağı oluşturulacaksa bazı durumlara dikkat edilmelidir. Kontaklar arasında oluşabilecek uyumsuzluklara göz önüne alınmalı ve uyumsuzluk en aza indirilmelidir. Φ_p , p-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu ve Φ_n , n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu, E_0 vakum seviyesi, E_c iletkenlik bandı, E_v valans bandı, E_f fermi enerji seviyesi, E_g yasak enerji bant aralığı, χ yarıiletkenin elektron ilgisi ve V_{bi} içyapı potansiyelini göstermektedir (Evcil, 2019).

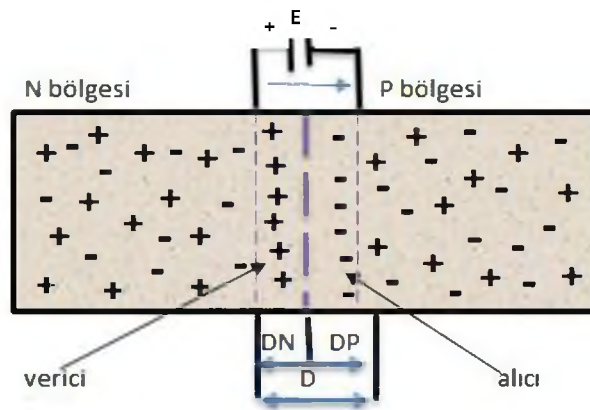
p-tipi yarıiletkende elektron boşluğu (hol) yoğunluğu, n-tipi yarıiletkende de elektron yoğunluğu daha fazladır aynı zamanda fermi enerji seviyeleri de birbirinden farklıdır. Dolayısı ile bu iki yapı birbirine atomik boyutta yaklaştırıldığında aralarında elektron akışı olur. p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerine ait enerji bant yapılarının kontak haline gelmeleri durumunda aşağıdaki Şekil 2.5'te görüldüğü gibi bir bükülme meydana gelir.



Şekil 2.5. p-n eklemi ve eklemeye ait enerji bant diyagramı

Yük taşıyıcıları, kontak esnasında yoğunluk farkından dolayı n-tipi yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronların bir kısmı p-tipine ve bir kısım elektron boşlukları da n-tipine doğru sızar. Bu esnasında elektronlar pozitif yüklü p-tipi yarıiletken bölgesine geçerken arkasında pozitif yüklü safsızlık atomları bırakır. Deplasyon bölgesi (W) olarak isimlendirilen bu bölge pozitif yüklerle yüklüdür. Bu yük geçişleri sonucu yük dengesi bozulur. P-tipi yarıiletken bölgesine geçen elektronlar bu bölgedeki elektron boşlukları ile birleşip nötr atomları oluştururlar. Yük yoğunluk farkından kaynaklanan bu yük dengesi, eklem bölgesinin p-tipi tarafında negatif yüklerin ve n- tipi tarafında ise pozitif yüklü atomların kalmasına neden olur. (Evcil, 2019).

p-tipi ve n-tipi yarıiletken yapılar tek kristalde bir araya geldiğinde iki bölge arasında bir ara yüzey oluşur. Eklemlerin birleşmesiyle yük taşıyıcılarının difüzyonu sonucu Şekil 2.6'da görüldüğü gibi deplasyon bölgesi oluşur. Denge durumunda daha fazla yük taşıyıcılarının geçmesine engel olan bir iç elektrik alan oluşur ve yük taşıyıcılarının geçmesi engellenmiş olur (Fiore, 2018).



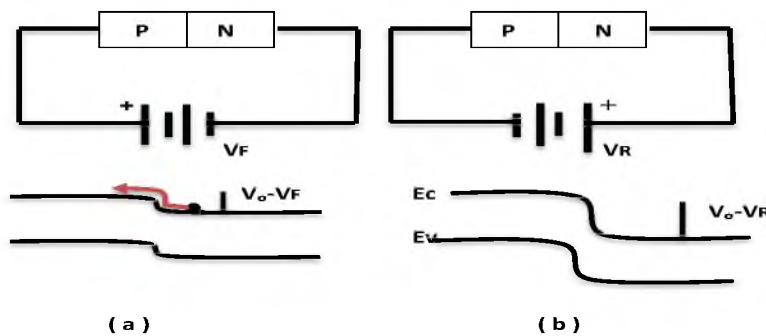
Şekil 2.6. Pozitif ve negatif iyonları oluşumu

2.1.2.4 İleri/düz/doğru beslem (forward biasing)

Bir voltaj kaynağının pozitif kutbunu p-n ekleminin p tarafına bağlayıp, negatif kutbunu n tarafına bağlarsak, diyot ileri kutuplanmış veya polarlanmış olur. Bu şekilde düz besleme tabi kalmış bir diyotta, p tarafındaki elektron boşluklar ve n tarafındaki elektronlar eklem bölgesine doğru itilir, böylece eklem bölgesi (deplasyon bölgesi) daralır ve diyottan akım geçer. Deplasyon bölgesinde diyotun direnci çok yüksek olduğundan akımın oluşturduğu voltajın tamamı bu bölgeye düşer. Bunun sonucunda eklemin potansiyeli azalır ve sonuç olarak azalan potansiyel engeli nedeniyle çoğunluk taşıyıcıları eklemi kolay bir şekilde geçmiş olur ve net bir akım gözlenir (Özek, 2015).

2.1.2.5 Ters beslem (reverse biasing)

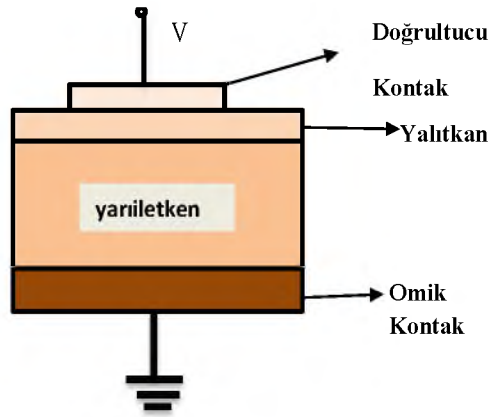
Bir voltaj kaynağının pozitif kutbunu p-n ekleminin n tarafına bağlayıp, negatif kutbunu p tarafına bağlarsak, diyot ters kutuplanmış veya polarlanmış olur. Bu şekilde ters besleme tabi kalmış bir diyotta, p ve n tarafındaki çoğunluk taşıyıcıları diyotun uçlarına doğru çekilir ve böylece eklem bölgesi genişler. Eklem bölgesi genişlediği için eklemin potansiyel engeli artar ve diyottan akım geçmez. Sadece azınlık taşıyıcılarının oluşturduğu çok düşük bir sürüklenme (drift) akım ortaya çıkar (Özek, 2015).



Şekil 2.7. İleri (a) ve ters (b) kutuplamada enerji-bant diyagramı

2.2 MIS Kontakların Yapısı

Bir MIS (metal-yalıtkan-yarıiletken) kontak yapısı Şekil 2. 8’de gösterilmiştir. Bu yapı şekilden de anlaşılacağı üzere yarıiletken üzerine büyütülen SiO_2 , SnO_2 , TiO_2 gibi yalıtkan tabaka ve omik-doğrultucu kontaklardan oluşmaktadır. Oluşan bu yapı MIS tipi schottky diyot olarak da isimlendirilir (Sze ve Kwok, 1981).



Şekil 2.8. MIS bir yapının şematik gösterimi

Aşağıda Şekil 2.9’ de metal-yalıtkan-yarıiletken yanında eş değer devresi de verilmiştir.

C_i : yalıtkanı

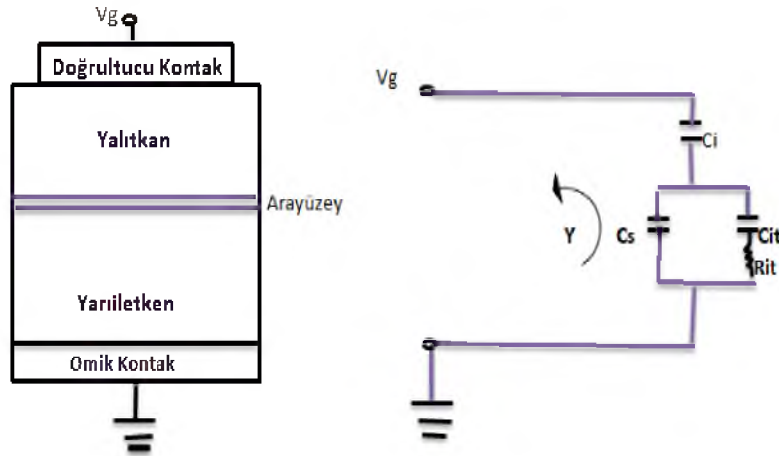
C_s : yarıiletkeni

C_{it} : arayüzey durumlarının kapasitansı

V_g : plakay dışardan uygulanan gerilimi

$Y=1/z$: Eşdeğer devrenin toplam kompleks admittansı ifade eder.

Omik kontak pozitif bir gerilim ile beslenirse pozitif, negatif bir gerilim ile beslenirse negatif olur. Yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzey özelliklerine göre yapının özellikleri belirlenir (Akın, 2015)



Şekil 2.9. Bir metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapısı ve eşdeğer devresinin gösterimi

Hazırlandığı andaki durumlara bağlı olarak arayüzey tabakanın yüzey kalınlığı farklılık gösterir. Bu oluşumlarda yararlanılacak olan yalıtkan tabaka için ideal kalınlık 20 Å'dan daha küçüktür (Aydın, 2019). Metal ile yarıiletken arasındaki yalıtkan tabaka nedeniyle MIS yapılar, elektriksel özellikleri yönünden kapasitörlere benzetilmektedir. Bu yalıtkan ara yüzey tabaka metali ile yarıiletkeni birbirinden ayırır ve metal yarıiletken arasındaki yük geçişini düzenler (Okur, 2016).

2.3 Schottky Diyot

Bir metal ve yarıiletken arasında doğrultucu kontak oluştuğunda bir Schottky diot oluşur. Bu diotların devre elemanı olarak kullanılması 1900'lerin başlarına dayanmaktadır. Nokta kontak diot olarak da adlandırılan bu tür diotlar, bir yarıiletken üzerine bir metal tutturularak oluşturulur. Doğrultucu kontağın özellikleri p-n eklemının özellikleri ile benzerlik gösterse de schottky diyotta akım mekanizması p-n eklem diyotundan farklıdır. Schottky diyotta akım çoğunluk taşıyıcı akışından oluşur bu sebeple azınlık taşıyıcı depolama etkileri bulunmamaktadır. Schottky diyot hızlı anahtarlama ve düşük seviyede ileri gerilim düşümü gibi özellikleri nedeniyle elektrik devrelerinde tercih edilebilir (Sağlam, 2001). Bir Schottky diyot 0,2-0,3V gerilim düşüşüne sahipken, bir silikon diyot 0,6V-0,7V ile gerilim düşüşüne sahiptir. Gerilimde meydana gelen kayıp, diyottan akımın geçmesi için boşa harcanan voltaj miktarıdır.

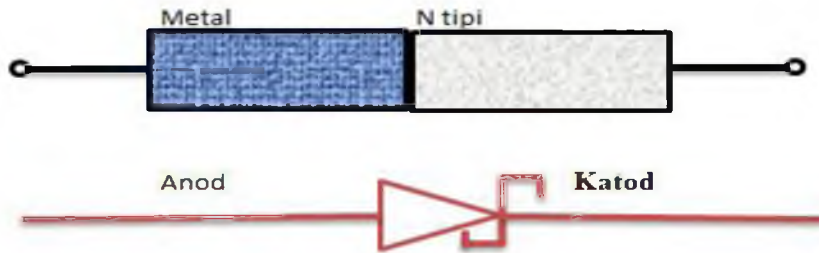
Schottky bariyeri, potansiyel enerji bariyeridir. Elektronlar, diyottan akmak için bu potansiyel enerji bariyerini geçmek zorundadırlar. Schottky diyotun kayda değer bir

özelliği olan Schottky bariyer yüksekliği ve bu bariyer yüksekliğinin değeri yarıiletken ile kullanılan metal birleşimine bağlıdır (URL-2, 2017).

Schottky diyot, yüksek anahtarlama hızına gereksinimi olan bilgisayar ve radyo frekans (RF) devrelerinde kullanılmakta olup, bu devrelerde çoğunlukla doğrultma işlevini göstermektedir. Dedektör ve mikrodalga sistemler gibi yüksek frekanslı sistemlerde de kullanım alanı mevcuttur. Ayrıca bataryalarının hızlı boşalmasını engellemek için güneş pillerinde, kurşun-asitli bataryalarda ve anahtar modlu güç kaynaklarında kullanılmaktadır (URL-3, 2015).

2.3.1 Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontak

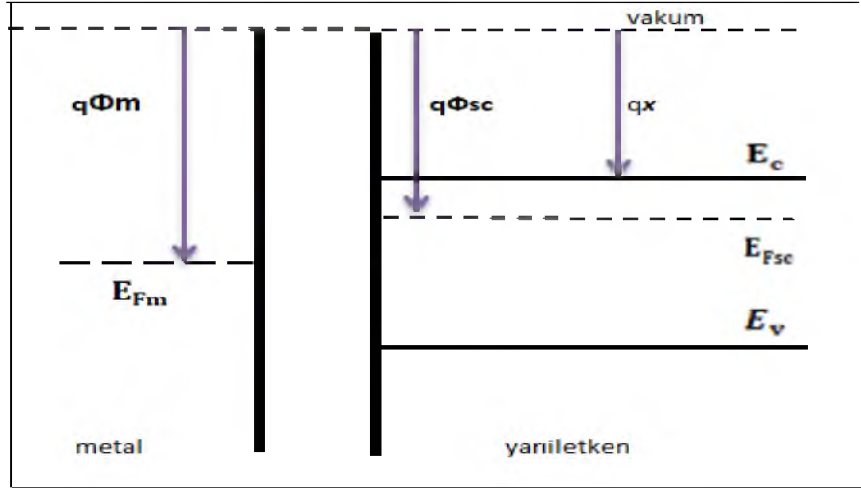
Metal /n-tipi Schottky diyotun yapısında çok az bir miktarda katkılanmış silisyum (Si) ve yarı iletken malzeme yüzeyine temaslı bir metal bulunmaktadır. Bu diyotun semboller Şekil 2.10'da olduğu gibi iki farklı şekilde karşımıza çıkabilir.



Şekil 2.10. Schottky diyot sembolü

Bir metal ve n-tipi bir yarıiletken kristalini incelediğimizde bu iki yapının enerji-bant yapısı Şekil 2.11'deki gibidir. Bu iki yapı kontak oluşturduktan sonra metalin üzerine uygun dalga boyuna sahip foton düşürüldüğünde, metalden koparılan elektronları vakum ortamında iletebilmeleri için yeterli bir enerji seviyesine sahip olmaları gerekir. Bu foton enerjisinin $E = h\nu$, $q\Phi_m$ ile gösterilen metalin iş fonksiyonuna eşit ya da daha büyük olma zorunluluğu vardır. Burada iş fonksiyonu, metalin Fermi enerji seviyesindeki (E_{Fm}) bir elektronu metalden uzaklaştırmak için elektrona verilmesi gereken enerjiye denir. Aynı şekilde bir elektronu bulunduğu E_{Fsc}

Fermi seviyesinden uzaklaştırmak için gerekli olan enerji, yarıiletken iş fonksiyonu olarak tanımlanır.



Şekil 2.11. Bir metal ve n- tipi yarıiletkenin kontak öncesi enerji-bant diyagramı

Metal ile yarıiletken kontak haline getirildikleri vakit Fermi seviyeleri eşitleninceye kadar aralarında yük geçişleri olur. $E_c > E_{Fm}$ olduğu için yarıiletkenin iletkenlik bandından metale doğru elektronların geçişi gözlemlenir ve elektronların geçiş durumu tamamlandığında termodinamik denge hali oluşur. Yarıiletkenden metale geçen bu elektronlar geride, yarıiletkende pozitif yüklü donör safsızlık atomları bırakırlar. Bu etkileşim sonucu yarıiletkenin yüzeyi yakınında, metal ile yarıiletken arayüzeyinde bir uzay yükü bölgesi oluşur. Bu deplasyon (boşaltılmış) bölgenin genişliği W ile gösterilir. Bu bölgenin sonsuz incelikte olduğu kabul edilir. Metal ile yarıiletken kontak oluştuktan sonra Fermi seviyesinin eşitlenmesinden ve bir deplasyon bölgesinin varlığından dolayı yarıiletkendeki bant bükülmesi;

$$qV_i = q(\Phi_m - \Phi_{sc}) \quad (2.1)$$

ifadesine eşit olacaktır. Bu eğrilik daha fazla elektronun metale geçmesini engelleyen bir V_i potansiyel engelini ifade eder. Diğer taraftan metal içerisindeki elektronlar,

p-tipi yarıiletkenine ait enerji-bant seviyeleri $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükseldiği için yarıiletken tarafındaki delikler (holler) için yüzey engeli;

$$eV_d = \Phi_s - \Phi_m \quad (2.5)$$

bu eşitlikte V_d difüzyon potansiyelidir. Kontakın metal bölgesindeki delikler için engel yüksekliği;

$$e\Phi_B = E_s - \Phi_m \quad (2.6)$$

eşitliği ile hesaplanır. E_s ; vakum seviyesinin tepesi ve valans bandının tabanı arasındaki uzaklığı ifade eder. Metaldeki bir kısım delikler termal uyarıma ile potansiyel engeli geçebilecek kadar enerji kazanarak p-tipi yarıiletken içerisine geçebilir. Bu durumun tersi de gerçekleşebilir yani termal uyarılma ile p-yarıiletkeninden bazı delikler metale geçebilir. Bu olay kontak boyunca engelden geçen eşit ve zıt yönlü I_o akımının oluşmasına yol açar. P-tipi yarıiletkenine pozitif bir voltaj uygulandığında metalden yarıiletkenine doğru delik akımı değişmez ancak p-tipi yarıiletkeninden metale doğru akan delik akımı $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar değişir. Sonuç olarak yarıiletken bölgesindeki enerji seviyesi eV kadar düşecek ve yarıiletkeninden metale doğru delikler için engel yüksekliği eV kadar azalmış olacaktır ve metale doğru oluşan akım pozitif kabul edilirse akım-gerilim değeri;

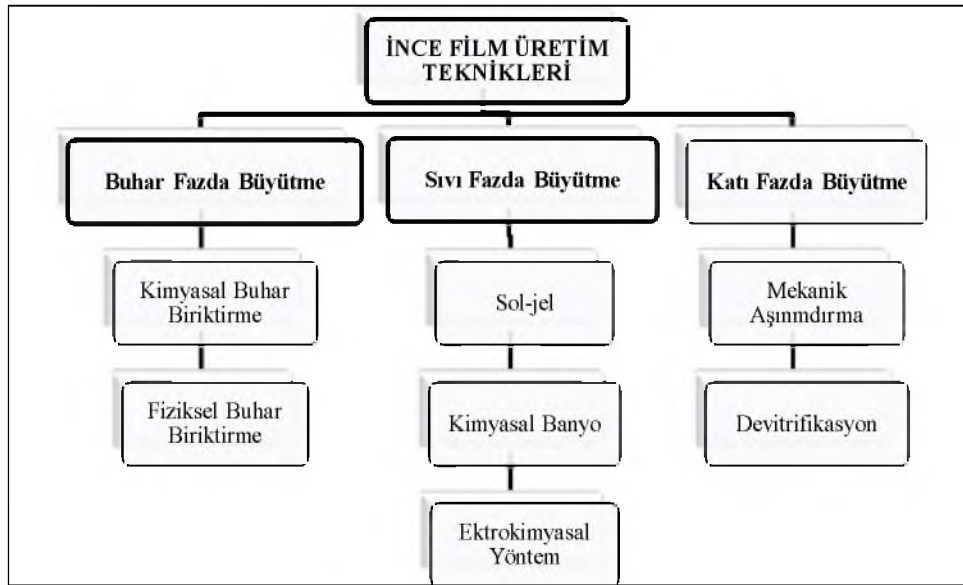
$$I = I_o \exp\left(\frac{eV}{nkT} - 1\right) \quad (2.7)$$

eşitliği gibi olacaktır (Evcil, 2019).

2.4 İnce Film Kaplama Yöntemleri

19. yüzyıldan itibaren bilim ve teknolojiadaki artış, ince film elde etme yöntemlerini de oldukça etkilemiş, hız vermiştir. Bilimsel ve endüstriyel çalışmalar açısından oldukça hayati bir alana sahip olan ince filmlerin ilk çalışmaları, daha çok dekorasyon amaçlı olup, genellikle cam ve seramiklerde karşımıza çıkmaktadır. 19. Yüzyıldan itibaren daha modern ve yeni ince film elde etme yöntemleri ile çalışılmıştır. 1838’de ilk ince film, elektroliz yöntemi kullanılarak elde edildi. Sonrasında 1852’de

Bunsen kimyasal reaksiyon, Faraday asal gaz içerisinde buharlaşma ve Nahrwold ve Kundt joule ısıtması, yöntemleri ile de ince filmler oluşturmuşlardır. Vakum cihazının gelişmesine kadar ki dönemde ince film çalışmaları, laboratuvar çalışmaları olarak kalmışlardır. Vakum cihazının gelişmesiyle beraber modern yöntemlerle oluşturulan ince filmlerin artık kristal yapıları, optiksel ve elektriksel özellikleri de incelenmeye başlanmıştır. İnce film üretim yöntemleri temel olarak, malzeme yüzeylerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değiştirilmesine olanak sunan kaplama yöntemleri, kaplanacak olan malzemesinin bulunduğu mekanik duruma göre çeşitli alt gruplara ayrılmaktadırlar (Sönmezoğlu ve ark., 2012).



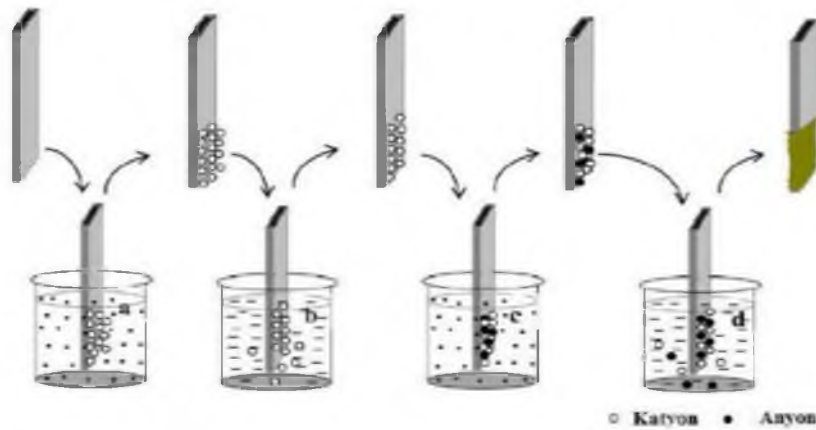
Şekil 2.15. İnce film üretim teknikleri

Bu başlıkların bir alt başlığı olan SILAR bu yöntemlere nazaran basit, güvenli, çevre dostu, düşük sıcaklık uyumlu ve ekonomik olduğu için tercih edilen bir yöntemdir (Albayrak ve ark., 2019).

2.4.1 SILAR yöntemi

SILAR (Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction) yönteminin temeli, ardışık iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyona dayanır. Filmde oluşacak homojen çökelmeden kaçınmak için deiyonize su ile belirli aralıklarla durulama işlemi uygulanır.

Bu yöntemdeki özgünlük, altlık üzerine bir maddenin diğer madde üzerine adsorpsiyonudur (biriktirme). Biriktirme iki farklı fazın birbirine teması ile sağlanır. Filmin oluşması altlık ile çözelti içerisindeki iyonlar arasında oluşan van-der waals kuvvetleri veya kimyasal çekim kuvvetlerinden kaynaklanan bir sürece dayanır. Bu süreçte sıcaklık, taban özelliği ve yüzey alanı, büyüme hızı, basınç ve yoğunluk gibi etmenler verimi doğrudan etkiler. SILAR yönteminin avantajlarından olan oda sıcaklığında gerçekleştirilebiliyor olması, kullanabileceğimiz altlık malzeme sayısını arttırmaktadır, yalıtkan, yarıiletken metal ve polyester gibi sıcaklığa duyarlı malzemelerin kullanımını sağlamaktadır. Bu sayede altlığın korozyon ve oksidasyonu önlenmiş olunur. Bu yöntem ile üretilen ince filmlerin kalitesinin yükseltilmesi; konsantrasyon, çözelti pH'sı, adsorpsiyonu, reaksiyon ve durulama zamanı parametrelerinin optimizasyonu ile gerçekleştirilebilir. Bunun yanı sıra biriktirme tekniğine dayalı ince film büyütme tekniği, altlık yüzeyler üzerindeki çekirdeklenme bölgelerinde meydana gelen iyon bazlı biriktirme temellidir. Koloidal iyonların birikmesi ve çekirdeklenme; bu iyonların koagülasyonu sonucunda büyüme oluşur ve böylelikle altlık üzerine yapışık ve ince bir film oluşur. SILAR yöntemiyle ince film oluşumu, bu sebeple, düşük çözünürlüğe sahip iyon çiftinin oluşturduğu ürünün katı bir yüzeye elektrostatik mekanizmalarla sıkıca yapışması olayına dayanır. Yüzeyde oluşabilecek istenmeyen maddelerin uzaklaştırılması deiyonize su ile durulama işlemi yapılmasıyla gerçekleşir. Biriktirme işlemi tek sıra veya birden fazla ardışık tekrar sırası ile gerçekleştirilebilir (Gençyılmaz ve Taşköprü, 2017).



Şekil 2.16. SILAR yöntemi (Ekinci, 2017).

Vakum ve altlığın yüksek kalite gerektirmemesi SILAR tekniğini pahalı tekniklerden ayıran en önemli avantajlardandır. Ayrıca bu yöntemle büyütülen filme katkı yapmak oldukça kolaydır ve filmin kalınlığı kolayca kontrol edilebilir. Üzerinde büyütme işlemi yapılan altlıkların boyut ve yüzey profilleri ile ilgili neredeyse hiçbir bir kısıtlama yoktur ancak kaliteli bir film elde etmek için altlıkların hazırlanma aşamaları oldukça önemlidir. SILAR'ın teknolojik ve endüstriyel alanlarda kullanılması durumunda büyük avantajlar elde edilir (Özaslan ve ark., 2017).

SILAR yönteminin diğer yöntemlere nazaran diğer bazı üstünlükleri:

- * Büyütülen materyal için zararlı olabilecek derecede ısınmalara yol açmaz.
- * Ucuz, basit ve geniş alanda büyütme yapmak için kullanışlıdır.

SILAR yönteminin diğer yöntemlere nazaran bazı dezavantajları:

- * Özellikle gaz fazı büyütme yöntemlerine göre SILAR ile film büyütme uzun zaman almaktadır.
- * Büyütülen filmler istenirse dahi oksijen kirliliği içerir.
- * Çözeltilerin aşırı derecede asidik ve bazik olduğunda bu çözeltilere dayanıksız olan alttaş malzemeler kullanılamaz (İskenderoğlu ve Güney, 2018).

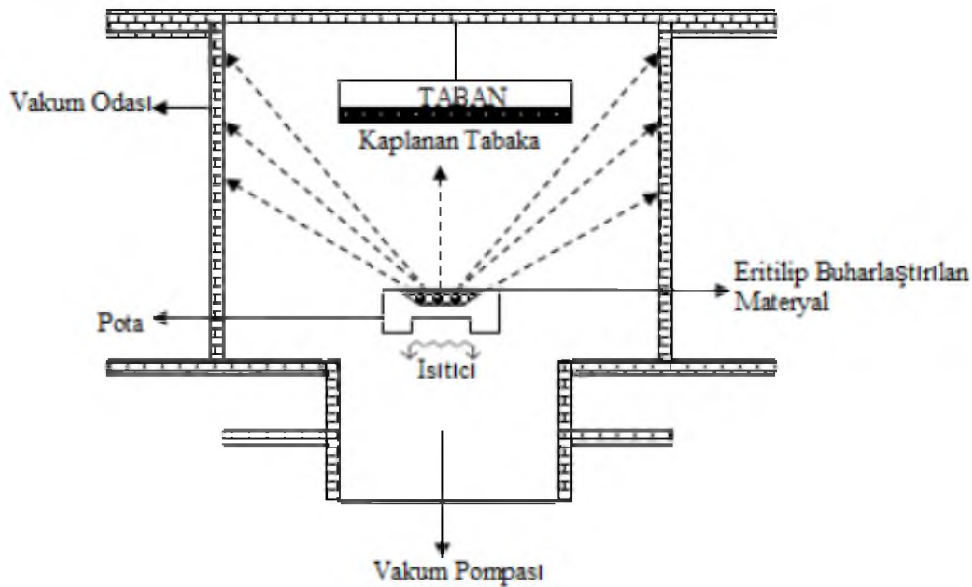


Şekil 2.17. SILAR düzeneği

2.4.2 Fiziksel buhar biriktirme yöntemi (PVD)

Fiziksel buhar biriktirme (PVD), vakum ortamında kaplama için kullanılan maddenin buharlaştırılması vasıtasıyla altlık üzerine kaplanması ile gerçekleşen bir yöntemdir.

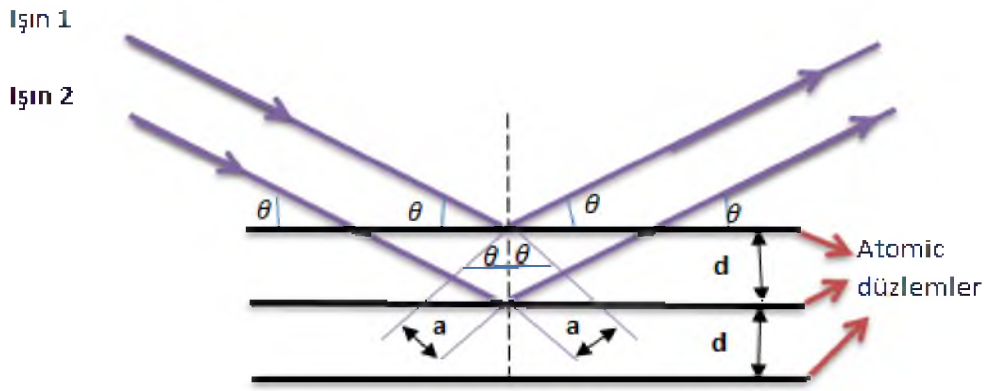
Bilindiği gibi bütün maddelerin kaynama, erime ve buharlaşma sıcaklıkları birbirinden farklıdır. Bu farklılıklar maddeler için ayırt edicidir. PVD yöntemi ile kaplama yapmak istediğimiz malzeme öncelikle buharlaşması için belli bir sıcaklık seviyesine ulaşınca kadar ısıtılır. Isıtılarak buharlaşan kaplama malzemesi daha soğuk olan altık ile karşılaşınca gaz halini almış olan malzeme, altlık yüzeyine yoğunlaşır ve ince film halinde kaplanır. (Sönmezoğlu ve ark., 2012). Vakumlanmış bir ortamda hazırlanan filmlerin büyüme hızı, vakum seviyesi ile oldukça ilişkilidir. Düşük ve orta vakumda, kaynaktan kopan atom ve moleküller, ortamdaki hava molekülleri ile çarpışırlar ve bunun sonucu olarak film büyüme hızı azalır. Ayrıca fanusun içinde kalan hava molekülleri, büyütülen film ile kimyasal tepkimeye girip filmin özelliklerinde istenmeyen değişimler oluşturabilir (Özdemir, 2018).



Şekil 2.18. Buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi (Sönmezoğlu ve ark., 2012).

2.5 X-Işını Difraksiyonu

X-ışınları Wilhelm Conrad Röntgen tarafından 1895'te keşfedilmiştir. X-ışınının keşfinden önce bilim insanları kristal atomlarının düzenli bir şekilde olduğunu ve kristal yüzeyler arasındaki açı ölçümlerinden bir şeylere ulaşmaya çalışmışlardı. Ancak X-ışınları, kristallerin iç yapısını ve birim hücre boyutunu ayrıntılı olarak belirleyen güçlü bir araç olmuştur. X-ışınları bir katot ışın tüpü tarafından üretilir, monokromatik radyasyon üretmek üzere filtrelenir, konsantre hale getirilir ve numuneye doğru yöneltilir. Bragg Yasası ($n\lambda = 2d\sin\theta$) bu koşulları karşılar. Bragg Yasasında, n bir tam sayı, λ X-ışınının dalga boyu, d kristaldeki tabakalar arasındaki mesafe ve θ bir ışın demetinin kristalle yaptığı açıdır (URL-4).



Şekil 2.19. Bragg yasası

Nano parçacıkların kristal boyutlarına Debye -Scherrer eşitliği ile ulaşılabilir.

$$D = \frac{K\lambda}{\cos\theta} \quad (2.8)$$

Bu eşitlikte, D kristalin boyutu, K şekil sabiti, λ X-ışınının dalga boyu, θ kırınımın Bragg açısını gösterir.

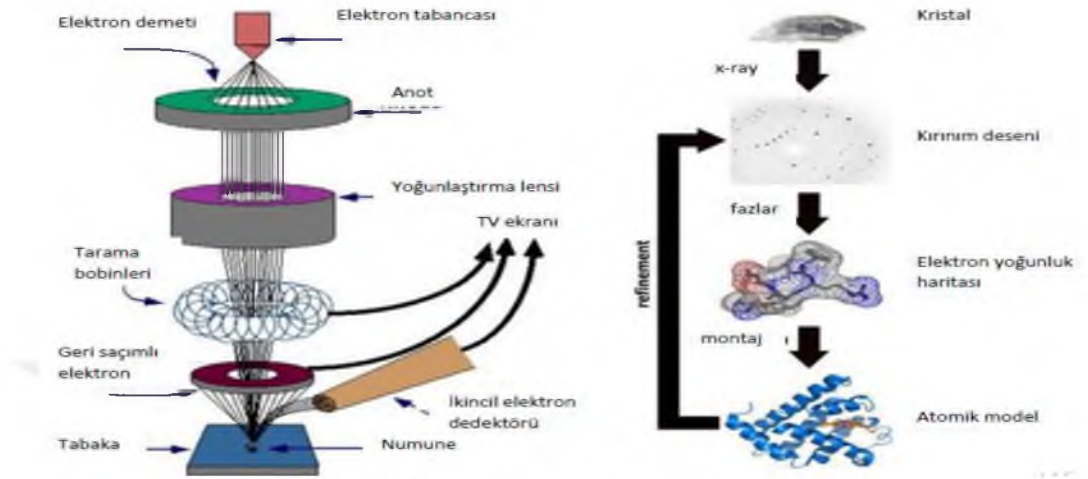
2.6 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) malzemelerin topografisi, kristal yapısı, kimyasal yapısı ve elektriksel davranışları ile ilgili bilgi sunar (Parry, 2000). SEM yüzeylerinde nanometreden mikrometreye kadar görüntüleri net bir şekilde elde etmeyi sağlayan mikroskoptur. Bu cihazda görüntüyü büyütüp net elde etmek için ışık yerine elektron demeti kullanılmaktadır. Elektron demetinin kullanılma nedeni görüntünün çözünürlüğünü arttırmak ve aynı zamanda daha büyük görüntü elde etmektir. Işık mikroskobu ile Taramalı Elektron Mikroskobunu karşılaştırsak SEM in, ışıktan 100.000 kat daha büyük bir büyütme ve ışık mikroskobundan 100 kat daha fazla bir derinlik bilgisini içerdiği bilinmektedir. SEM cihazı ile elde ettiğimiz görüntüde numune yüzeyin haritasına ulaşılabilir (Aydoğan, 2015).

SEM cihazlarının temel yapıları:

- ✓ Elektron Kaynağı ("Tabanca")
- ✓ Elektron Lensleri
- ✓ Örnek Aşama
- ✓ Tüm ilgili sinyaller için dedektörler
- ✓ Görüntü / Veri çıkış cihazları
- ✓ Altyapı Gereksinimleri:
 - Güç kaynağı
 - Vakum sistemi
 - Soğutma sistemi
 - Titreşimsiz zemin
 - Ortam manyetik ve elektrik alanlarından arınmış oda

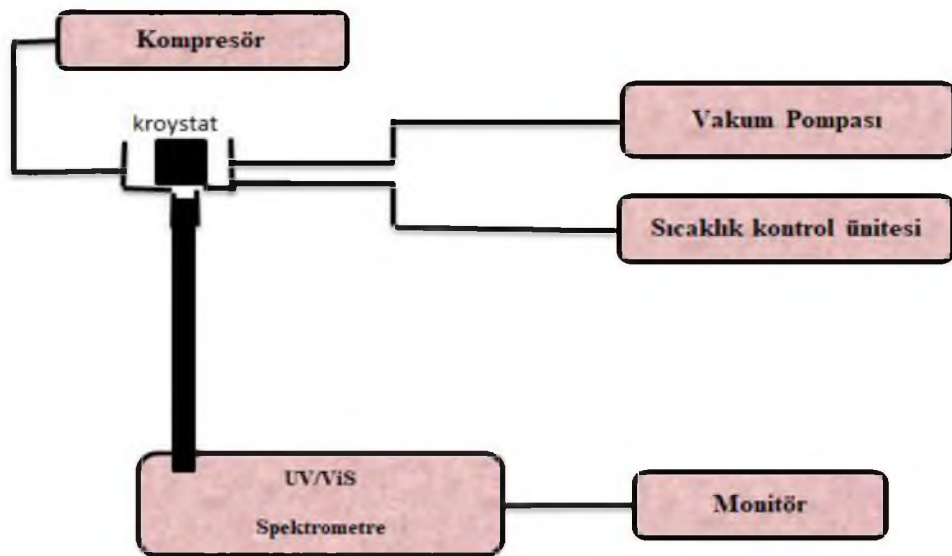
Belirli bir SEM cihazının spesifik yetenekleri, hangi detektörleri barındırdığına kritik olarak bağlıdır (URL-4).



Şekil 2.20. SEM çalışma prensibi (Biber, 2019).

2.7 UV-VİS Spektrometresi

Yarıiletkenlerin ışığı soğurma spektrumları ve optik özelliklerini araştırmak için en basit yöntemdir. UV-Vis spektrometreler çoğu laboratuvarında mevcuttur, örnek analizi ve spektrum kaydı kısa süre gerektirdiği için oldukça kullanışlı bir tekniktir. UV-Vis spektrometre ölçümleri numunenin boyutuna, şekline ve kümelenmesine bağlıdır (Meneghetti, 2009).



Şekil 2.21. Soğurma ölçümlerinin yapıldığı sistemin blok diyagramı

3. DENEYSEL İŞLEMLER

3.1 Çalışmalarda Kullanılan Malzemeler Ve Hazırlanış Aşamaları

Yaptığımız bu çalışma cam ve silisyum kristali üzerine yapılmış iki yönlü bir çalışmadır. Bu çalışmanın birinci aşamasında cam altlık kullanılmıştır. Cam altlık yüzeyindeki organik ve ağır metal kirlerini temizlemek amacıyla, ultasonik banyoda %10'luk hidroflorik asit (HF) ile seyreltilmiş deiyonize su içerisinde 5 dakika bekletildi. Daha sonra deiyonize su içerisine alınarak durulama işlemi yapıldı. Durulama işlemi üç dört defa tekrarlandı, çalışma sıvı ortamda oluşacağı için altlığın kurutulmasına ihtiyaç duyulmadı.

Pb/PbO/p-Si Schottky diyotlarını hazırlamak için (100) yönelime sahip, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ katkı konsantrasyonunu, 400 μm kalınlığında 1-10 $\Omega\cdot\text{cm}$ özdirençli p-tipi Si alttaş kullanıldı. Kristal üzerindeki organik kirleri ve parçacıkları temizlemek için kristalin parlak yüzeyi %10' luk HF ile seyreltilmiş deiyonize su ile pamuk yardımıyla temizlendi ve daha sonra kristal deiyonize suda 5 dakika durulandı ve kaplamaya hazır hale getirildi.

3.2 Deney Çözeltisinin Hazırlanması

Deneysel çalışmalar esnasında Sigma-Aldrich marka yüksek saflıkta kurşun asetat trihidrat ($\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) tuzu kullanılmıştır.

Çözelti hazırlamak için başlangıç malzemesi olarak kurşun asetat trihidrat (molekül ağırlığı 380 g/mol), 50 ml deiyonize su ile çözüldü (çözeltinin rengi beyazdı). Oluşan çözelti manyetik karıştırıcı ile 10 dakika karıştırıldıktan sonra üzerine 5 ml amonyum hidroksit (NH_4OH) eklendi ve karıştırılmaya devam edildi (çözeltinin rengi sarardı). Çözelti hazırlığının ikinci adımında %2'lik hidrojen peroksit (H_2O_2) hazırlamak için 50 ml deiyonize suya 5 ml hidrojen peroksit ekendi. Bunlarla beraber iki ayrı behere de 50 ml'lik deiyonize su konuldu ve böylece kaplama yapım aşamasına geçildi. Oluşturulna başlangıç çözeltilerinin tamamı deiyonize su ile hazırlanmış çözeltileridir. Çözelti stabilitelerinin sağlanması amacıyla deiyonize su kullanılmıştır. Çözeltiler hazırlanırken karıştırma işlemi manyetik karıştırıcı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Çözeltiler için gerekli miktardaki deiyonize su ve kurşun asetat trihidrat tuzu karıştırıldıktan sonra, her çözelti için sabit 10 dakika olacak şekilde

kariştırma yapılmıştır. PbO çözeltili 0,1 M olarak hazırlanmıştır. Solüsyon hesaplamaları aşağıda verilmiştir.

$$n = m/M_A \quad (3.1)$$

n: mol sayısı

m: Madde miktarı (kütle)

M_A : molekül ağırlığı (380 g/mol),

$$M = n / V \quad (3.2)$$

M: Molarite

V:Hacim(lt)

0,1 molar ve 50 ml çözelti hazırlamak için;

$$0,1 = n/0,05$$

$$n = 0,005 \text{ mol}$$

$$0,005 = m/380$$

$$m = 0,005 \times 380$$

$$m = 1,9 \text{ g çözeltiye kurşun asetat trihidrat tuzu eklenmiřtir.}$$

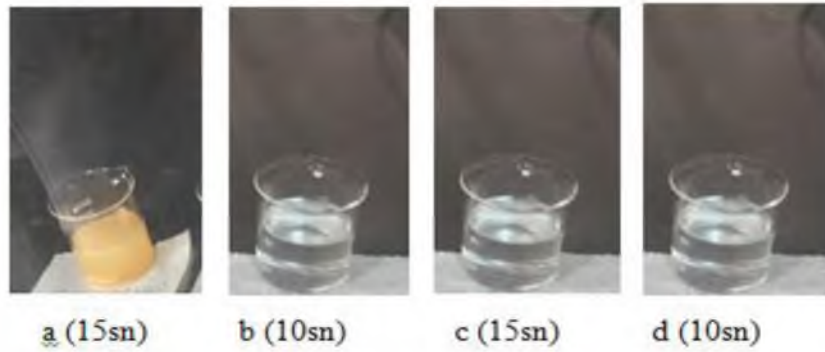
Çözeltiler hazırladıktan sonra çözünmenin tam anlamıyla gerçekteşebilmesi için ve aynı zamanda kaplamada kullanılan malzemelerin tümünün aynı sıcaklıkta olması için bütün malzemeler 80 °C sıcaklıktaki ısıtıcıda 10 dakika beklendikten sonra kaplama aşamasına geçildi, kaplama süresince sıcaklık değiştirilmedi.



Şekil 3.1. Hazırlanan amonyum hidroksit içeren kurşun asetat trihidrat çözeltisinin fotoğrafı

3.3 Filmlerin Kaplanması

PbO ince film tabakasının SILAR yöntemi ile oluşturulması için öncelikle kaplanacak çözelti hazırladıktan sonra kaplama işlemi cam altlık üzerine yapıldı. Ayrı dört behere konulan çözeltiler en solda amonyum hidroksit eklenmiş kurşun asetat trihidrat çözeltisi, yanında deiyonize su, deiyonize suyun yanında hidrojen peroksit çözeltisi ve en sağda da tekrar deiyonize su olacak şekilde yan yana sıralandı.



Şekil 3.2. SILAR düzeneği

Şekil 3. 2'deki düzeneğe göre PbO ince filmlerin oluşması için bir SILAR büyütme yöntemi aşağıdaki adımları içerir:

- 1- Temizlenmiş cam altlık ilk olarak 15 saniye süreyle kurşun iyonları ve sıvı amonyak içeren behere (a) daldırılır, böylece kurşun kompleks iyonları cam altlık üzerine absorbe edilir.
- 2- Altlık daha sonra 10 saniye boyunca deiyonize su içeren behere (b) daldırılır, böylece gevşek bağlı kurşun kompleks iyonları cam altlık yüzeyinden ayrılır.
- 3- Altlık daha sonra 15 saniye boyunca 50 ml su içinde çözölmüş %2 hidrojen peroksit çözeltisi (5ml) içeren behere (c) daldırılır, burada kurşun kompleks iyonları kurşun oksit oluşturmak için H_2O_2 ile reaksiyona girer.
- 4- Son olarak altlık, gevşek bağlı PbO iyonlarını ayırmak için 10 saniye boyunca deiyonize su içeren behere (d) daldırılır.

Çizelge 3.1. SILAR yöntemi ile PbO ince filmlerinin optimize edilmiş hazırlayıcı parametreleri

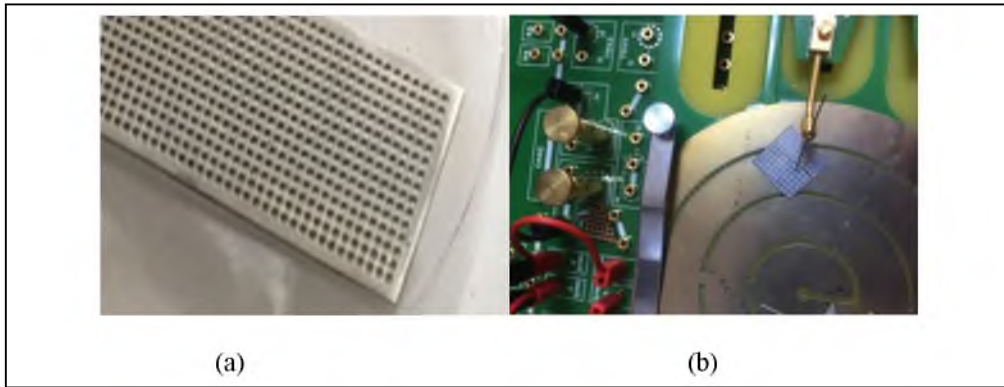
Kaplama parametreleri	Kasyon sağlayıcı	Anyon sağlayıcı
Banyo bileşimi	$Pb(CH_3COO)_2$	H_2O_2
Karmaşık ajan	NH_4OH (5ml)	-
Konsantrasyon (M)	0.1	2% (toplam çözelti hacminde)
pH	~10	~8
Daldırma süresi	15 saniye	15 saniye

Kaplamalar 80 °C derece sıcaklıkta yapılmıştır. Biriktirme 25 turluk döngüden sonra elde edilmiştir. Filmlerde mevcut herhangi bir hidroksit fazını uzaklaştırmak için 300 °C derecede 30 dakika boyunca tavlannmıştır. Bu şekilde elde edilen filmin kalınlığı, SEM ölçömlerinden 5,1 μm olarak hesaplanmıştır.

XRD ve SEM cihazları yardımıyla oluşturulan filmlerin, kristal yapısı ve yüzey morfolojisi detaylı olarak incelenmiştir. Filmlerin optiksel özellikleri UV optik spektrometre ile ölçölmüştür.

3.4 Pb/PbO/p-Si Schottky Diyotunun Hazırlanması

Bu aşamada özellikleri önceki kısımlarda belirtilen p-Si kristali öncelikle klasik kimyasal temizlik işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra omik kontak yapımı için yüksek saflıkta Al metali PVD sistemi içerisinde p-Si kristalinin mat yüzeyine kaplanmıştır. Bu aşamada omik kontak oluşumu için fırında azot gazı ortamında 570 °C de 3 dk ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra p-Si/Al alttaşın parlak yüzeyi, cam üzerine yapılan işlemle aynı olmak kaydıyla 25 turluk SILAR biriktirme yöntemi kullanılarak PbO ile kaplandı. Kristalin Al kaplı mat yüzeyinin kaplanmasını istemediğimizden dolayı her 5 turdan sonra mat yüzeyi pamuk ile temizlenmiştir. Kaplama yapıldıktan sonra 300 °C de fırında normal atmosfer koşullarında 30 dakika süreyle tavlantı yapılmıştır. Son aşamada fiziksel buharlaştırma yöntemiyle, vakum sistemi ile elde edilen $\sim 4.09.10^{-5}$ torr (mbar) basınç altında ve üzerinden ~ 30 A akım geçirilen tungsten flaman yardımı ile alttaşın PbO kaplanan yüzeyine oldukça saf ($\sim 99,99\%$) kurşun (Pb) metali buharlaştırılarak ince bir Pb tabaka oluşturulmuştur. Bu şekilde Pb/PbO/p-Si/Al MIS diyot yapısı elde edilmiştir. Kontakların oluşturulmasında Şekil 3. 3'teki maske kullanılarak, şekildeki diyot oluşturulmuştur. Pb ve Al kaplamasında kullanılan PVD cihazı Şekil 3. 4 te gösterilmektedir.



Şekil 3.3. (a) Kullanılan maske ve (b) Oluşturulan Pb/PbO/p-Si diyot

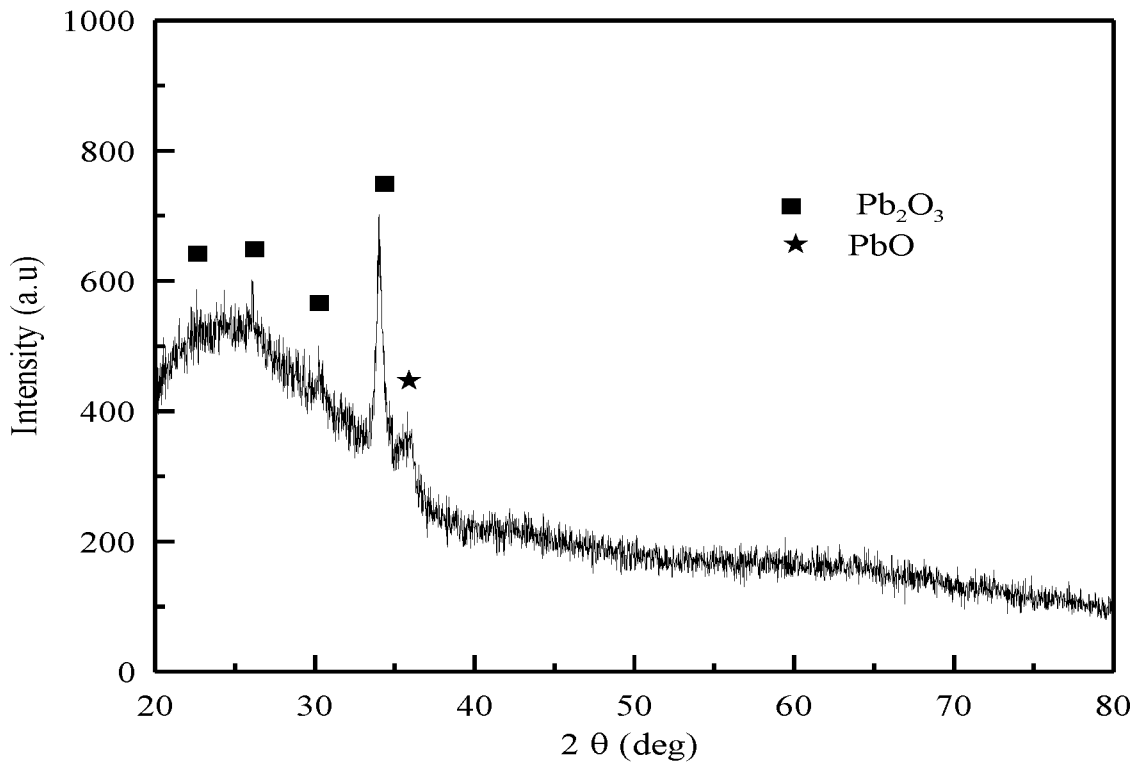


Şekil 3.4. Pb ve Al kaplamasında kullanılan PVD cihazı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE SONUÇLAR

4.1 PbO Filminin X-Işınları (XRD) Ölçümleri

SILAR tekniği kullanılarak cam altlık üzerinde elde edilen PbO ince filminin X-ışını analizi Rigaku Ultima IV X-ray difraktometresi ile yapılmıştır. Cam altlık üzerine büyütülen PbO ince filminin X-ışınları kırınım deseni Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Cam üzerinde SILAR yöntemi kullanılarak büyütülen PbO ince filminin X-ışınları difraksiyon deseni

Kırınım deseni analiz edildiğinde cam üzerinde SILAR yöntemi kullanılarak üretilen PbO ince filminin, şekilde belirtilen piklerde PbO ve Pb₂O₃ formlarında kristal fazlarının oluştuğu ve literatürle (Pasha ve ark., 2012) uyum sergilediği görülmüştür.

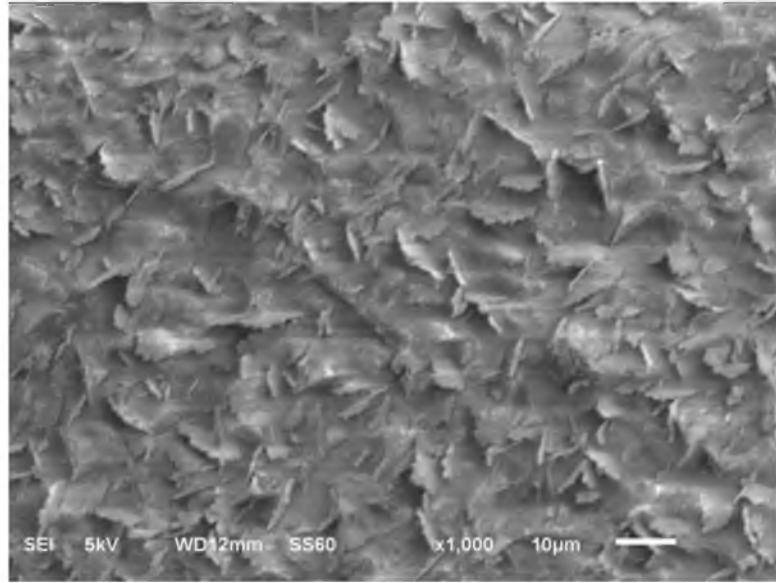
4.2 PbO Filminin SEM-EDS Analizi

SILAR yöntemi kullanılarak elde edilen PbO ince filminin Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) görüntüleri ve EDS spektrumu Şekil 4.2’de verilen JEOL marka SEM cihazı yardımı ile alınmıştır.



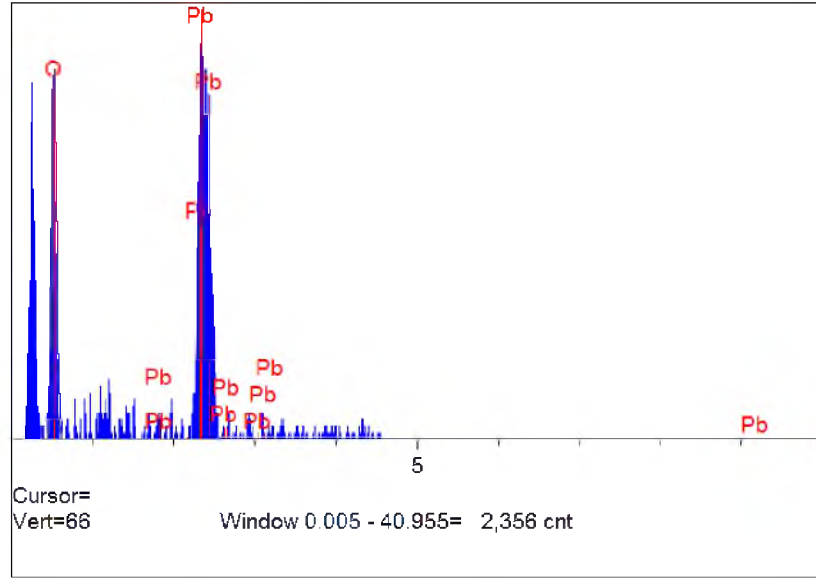
Şekil 4.2. PbO filmin görüntüsünün alındığı Taramalı Elektron Mikroskobu

PbO filminin Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) görüntüsü Şekil 4.3'te verilmiştir. Bu görüntüde PbO yüzeyinde yaprak görünümlü nanoyapıların oluştuğu ve bu şeklin literatürde (Güngör, 2015) benzer sonuçlarla uyduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.3. PbO (Kurşun oksit) filminin SEM görüntüsü

PbO ince filminin EDS spektrumu Şekil 4.4'te verilmiştir. EDS grafiği analiz edildiği zaman, ince film oluşumunda kurşun ve oksijenin varlığı açıkça görülmüştür.



Şekil 4.4. Kurşun oksit filminin EDS spektrumu

4.3 PbO Filminin Optik Ölçümleri (UV-Vis ve PL)

Yarıiletken yapılar üzerlerine düşen ışığa karşı üç farklı tepki verirler bunlar ışığı yansıtma, ışığı soğurma ve ışığı geçirme şeklindedir.

Yansıtma: Malzeme üzerine gönderilen ışın ile malzeme yüzeyinden yansıyan ışın arasındaki orandır.

Geçirgenlik: Malzeme üzerine gönderilen ışın ile malzemeden geçen ışın arasındaki orandır.

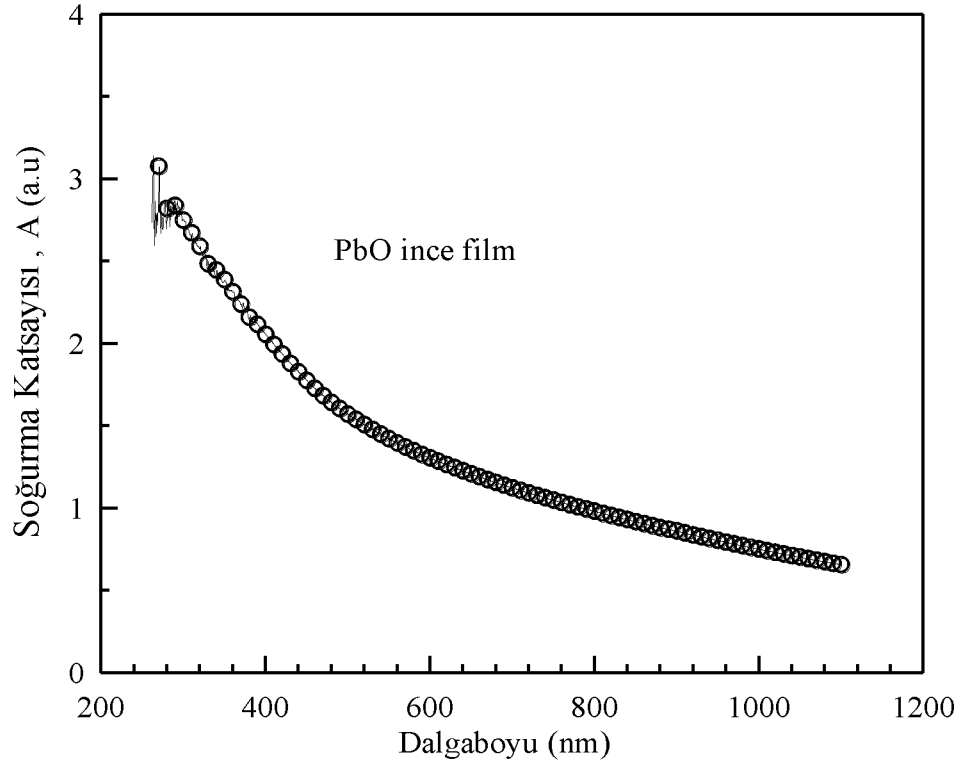
Soğurma: Malzeme üzerine gönderilen ışın ile malzeme tarafından absorbe edilen ışın arasındaki orandır.

Elde edilen PbO ince filmine ait yasak enerji bant aralığı değeri aşağıdaki (4.1) eşitliği ile hesaplanmıştır.

$$Ah\nu = C(h\nu - E_g)^m \quad (4.1)$$

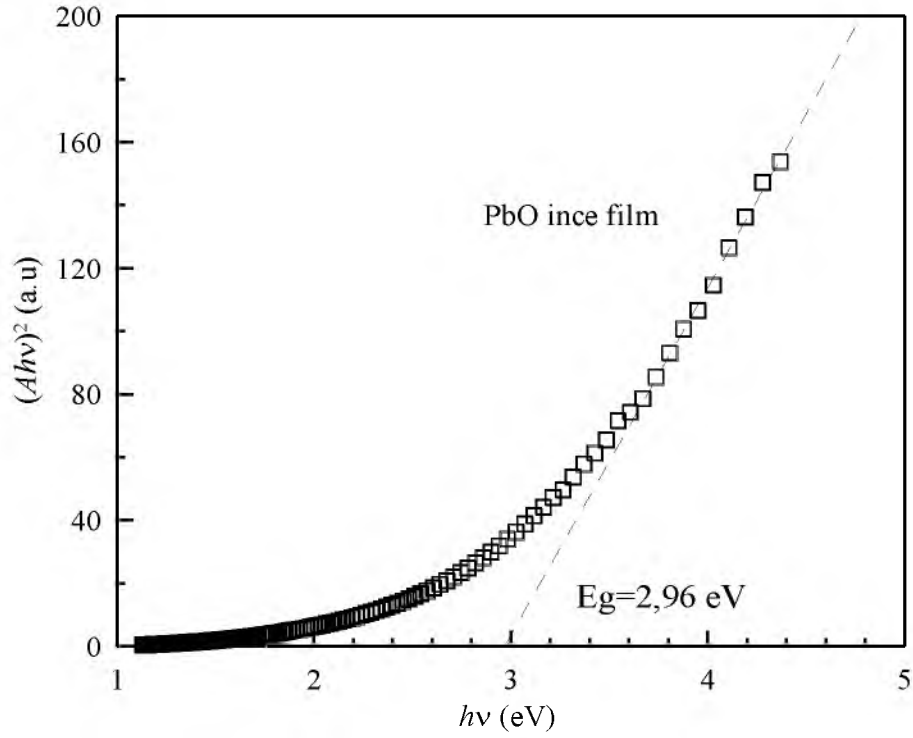
Bu eşitlikte m üstel bir sabit olup izinli doğrudan geçişlerde $\frac{1}{2}$ değerini alır. E_g bant aralığı eğrisi, ν frekans, h Planck sabiti, C orantı sabiti ve A ise soğurma katsayısıdır (Çavuşoğlu, 2019).

PbO filmine ait soğurma spektrumu, Shimadzu 3600 UV-Vis spektrofotometre kullanılarak 200 nm ile 1100 nm dalgaboyu aralığında ölçülmüş olup Şekil 4.5'te gösterildiği gibi bir grafik ortaya çıkmıştır. Bu soğurma spektrumu, PbO için daha önce yapılan çalışmalarla uyum sergilemektedir.



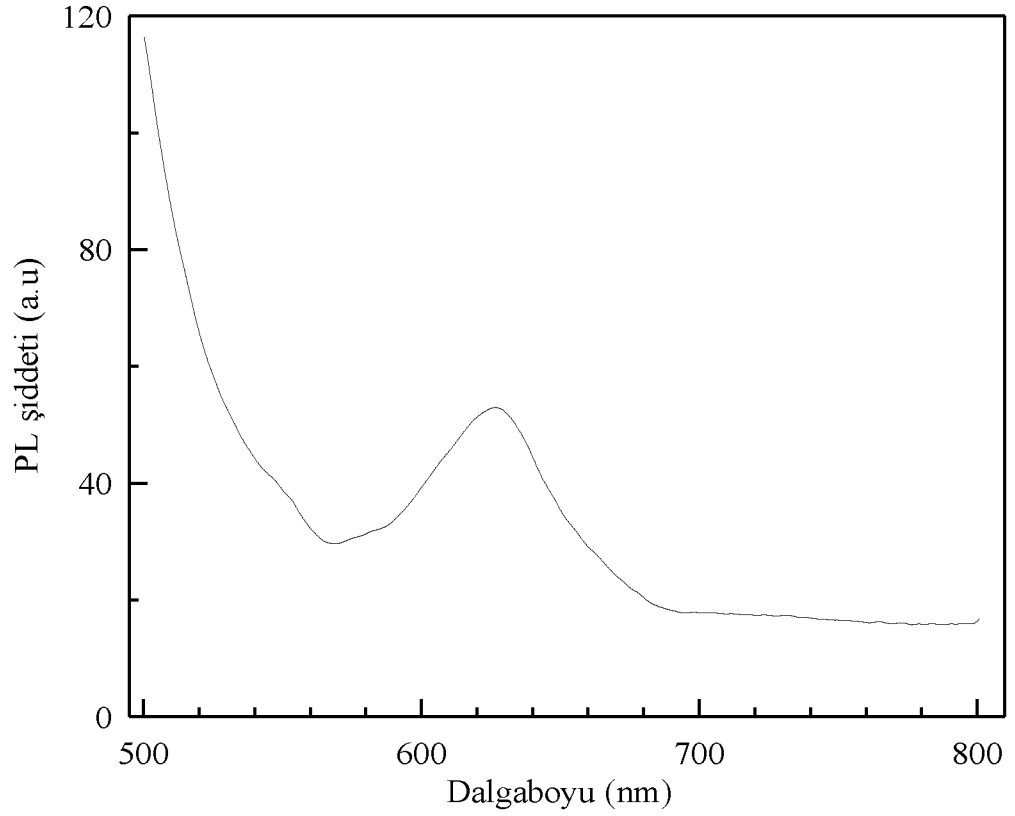
Şekil 4.5. Elde edilen PbO ince filmlerin soğurma-dalga boyu grafiği

(4.1) eşitliğinde m değeri $1/2$ doğrudan izinli geçişleri temsil etmekte olup $m=1/2$ olarak alınıp, $(Ahv)^2-hv$ grafiği elde edilir. Bu grafik Şekil 4.6' da verilmektedir. Verilen şekilde grafiğin lineer kısmının $(Ahv)^2=0$ değeri için uzantısı bulunarak, PbO'nun yasak enerji bant aralığının $E_g=2,96$ eV olduğu tespit edilmiştir. Bu değer literatürde PbO için verilen değerlerle uyum içerisinde.



Şekil 4.6. Elde edilen filmin $(\alpha h\nu)^2$ nin foton enerjisi ($h\nu$) ye göre değişimi

Fotoluminesans (PL) optik uyarımı sayesinde ayırık enerji seviyesi, hat genişliği, malzeme kompozisyonu, kuantum kuyusu kalınlığı ya da nokta monodispersitesi hakkında oldukça önemli bilgileri sunmaktadır. Bu ölçümde iletim bandından uyarılan elektronlar, valans bandına geçip boşluğu doldurur böylece elektron kaybettiği enerji seviyesine denk frekansta foton oluşturur. Fotoluminesans, malzemenin kimyasal yapısından, kristaldeki kusurlardan ve optik uyarım değerlerinden etkilenmektedir (Zhu vd, 1994). PbO filminin PL ölçümü PerkinElmer LS 55 cihazı kullanılarak Şekil 4.7 de verilen PL spektrumu elde edildi. Bu ölçümde PbO için yaklaşık 630 nm civarında ortaya çıkan pik, literatürdeki sonuçlarla uyum sergilemektedir.



Şekil 4.7. Elde edilen PbO filminin PL spektrumu

4.4 Pb/PbO/p-Si Schottky Diyotunun Elektriksel Karakterizasyonu

Schottky diyotlar bilindiği gibi doğrultucu olarak çalışırlar ve yüksek hızda anahtarlama özelliğine sahiptirler bu nedenle hızı yüksek olan uygulamalar için idealdirler.

4.4.1 Üretilen diyotun akım -gerilim karakteristikleri

Üretilen Pb/PbO/p-Si/Al MIS diyotun akım-gerilim ölçümleri oda sıcaklığında ve karanlık ortamda Şekil 4.8’de gösterilen KEITHLEY 4200-SCS cihazı yardımıyla alındı.



Şekil 4.8. Akım-gerilim ölçümlerinin yapıldığı cihaz

Diyotun akım-gerilim özelliği aşağıda verilen denklemler yardımıyla hesaplanmıştır. Diyot akımını hesaplamak için kullanılan denklem,

$$I = I_o \left[\exp \left(\frac{qV_D}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (4.2)$$

şeklindedir. Bu eşitlikte $qV_D \gg nkT$ olması durumunda 1 terimi, üstel terim yanında ihmal edilebilir. Denklemin yeni hali,

$$I = I_o \left[\exp \left(\frac{qV_D}{nkT} \right) \right] \quad (4.3)$$

şeklinde olur (Sze, 1981). (4.3) ifadesinin her iki tarafının doğal logaritması alınıp, sonra da V_D 'ye göre türevi alınırsa idealite faktörü için yeni denklem,

$$n = \left(\frac{q}{kT} \right) \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (4.4)$$

şeklinde elde edilir.

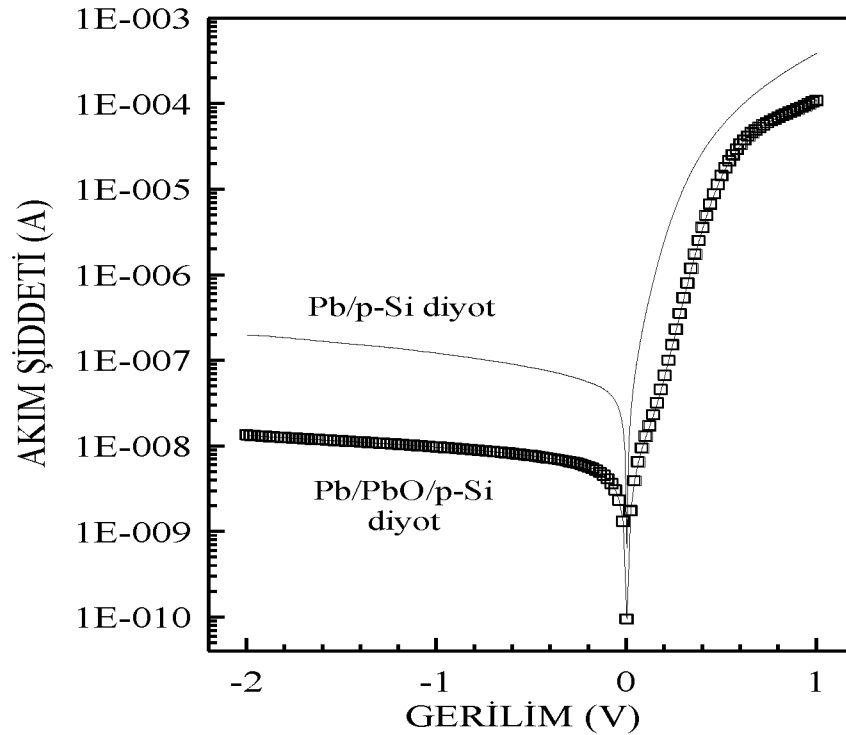
Yukarıdaki denklemlerde; n idealite faktörü, V diyot üzerine düşen gerilim, q elektron yükü, k Boltzmann sabiti ($8,625 \times 10^{-5}$ eV/K), T Kelvin cinsinden sıcaklıktır. I_o ters beslem doyma akımı olup,

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

şeklinde ifade edilebilir. Bu eşitliğin her iki tarafının doğal logaritması alındığında,

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln(AA^*T^2/I_o) \quad (4.6)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadede A diyotun alanı ($A=0,00785$ cm²), A^* Richardson sabiti olup değeri p-Si için $A^*=32$ AK⁻²cm⁻²'dir (Sze, 1981). Doyma akım yoğunluğu ve Schottky engel yüksekliği sırasıyla denklem (4.5) ve (4.6) eşitlikleri ile hesaplanabilir.



Şekil 4.9. Arayüzeyli Pb/p-Si referans ve PbO arayüzeyli Pb/PbO/p-Si diyotunun oda sıcaklığında I-V grafikleri

PbO ince film tabakasının etkisini görmek için Pb/p-Si referans diyot yapısı ile Pb/PbO/p-Si MIS yapısının I-V karakteristikleri oda sıcaklığında ve karanlıkta (-2 V)-(+1 V) aralığında (doğru ve ters beslem) ve 0,02V adımlarla ölçülmüş ve grafikleri Şekil 4.9’da gösterilmiştir. I-V grafikleri incelendiğinde referans diyota göre, ters ve düz beslem karakteristiklerinde akımın yaklaşık 10 kattan fazla azaldığı gözlenmiştir. Bu azalma durumu PbO ince film tabakasının, metal ile p-Si arasında ilave bir direnç etkisi göstermesinden, arayüzeydeki doğal oksit tabakası ve arayüzey tabakasının oluşumundan kaynaklanır.

Şekil 4.9’da referans alınan Pb/p-Si diyotunun hesaplanan engel yüksekliği $\Phi_B=0,701$ eV ve idealite faktörü $n=1,68$ olarak bulunmuştur. Pb/PbO/p-Si diyotunun engel yüksekliği ise $\Phi_B=0,780$ eV ve idealite faktörü $n=2,06$ olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.1). Üretilen diyotlardaki idealite faktörünün 1 den büyük çıkması, genelde üretim sırasında olabilecek arayüzey oksit tabakasına, yüzey/ara yüzey hallerine ve seri direnç (R_s) etkisinden ortaya çıkar (Güllü, 2018). Pb/PbO/p-Si MIS diyotun engel yüksekliğinin, Pb/p-Si referans diyotunkinden yaklaşık 0.78 eV kadar daha büyük çıkması PbO arayüzey oksit tabakasının varlığına bağlı olarak diyotun uzay yükü bölgesindeki yük dağılımındaki değişimle izah edilebilir.

Yukarıdaki kısımlarda, diyotların ideal durumdan sapma nedenlerinden birisinin de seri direnç etkisi olduğu belirtilmişti. Seri direnç (R_s) etkisi altında diyottan geçen akım,

$$I = I_o \exp \left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT} \right) \quad (4.7)$$

eşitliği ile ifade edilir.

Diyotun engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi değerlerin hesaplanması için kullanılan yöntemlerden biri Norde (1979) tarafından üretilen Norde fonksiyonlarıdır.

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \left(\frac{I(V)}{A A^* T^2} \right) \quad (4.8)$$

Burada γ ifadesinin değeri idealite faktöründen büyük olan ilk tam sayıdır. $I(V)$ değeri, I-V grafiğinden elde edilen akım değeridir.

İdealite faktörü;

$$n = \left(\frac{q}{kT} \right) \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (4.9)$$

Norde metoduyla hesaplanan engel yüksekliği ifadesi;

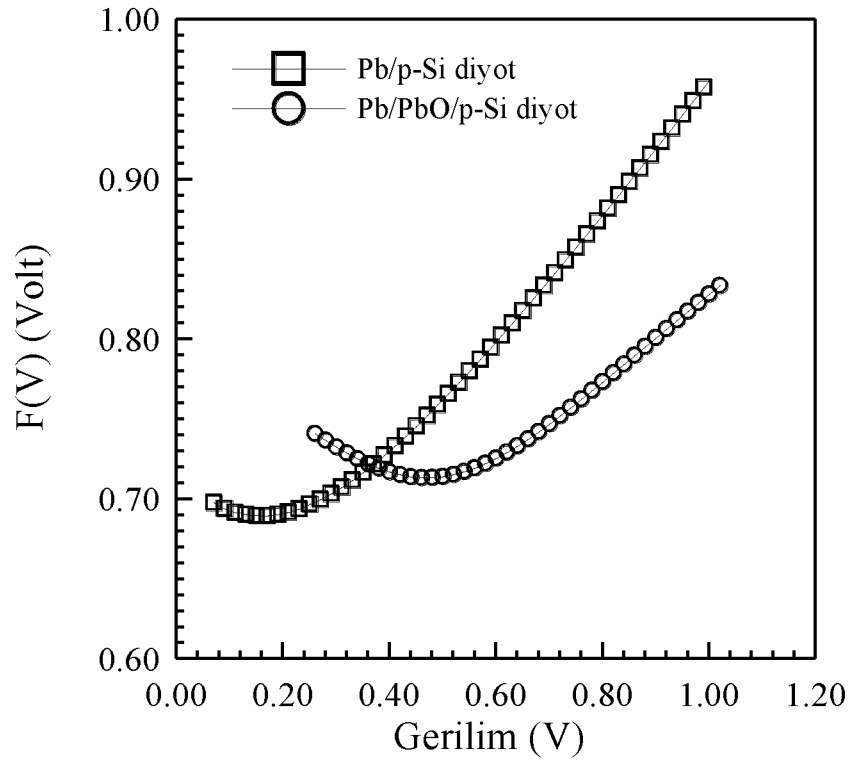
$$\Phi_B = F(V_o) + \frac{V_o}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (4.10)$$

Bu denklemde $F(V_o)$ ifadesi F-V grafiğinin minimum $F(V)$ değeridir.

Seri direnç ifadesi;

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{qI} \quad (4.11)$$

şeklinde elde edilir.



Şekil 4.10. Pb/PbO/p-Si ve Pb/p-Si referans diyotların göre F(V)-V grafikleri

Norde fonksiyonlarından elde edilen $F(V)$ - V grafiklerinden, referans Pb/p-Si diyotun engel yükseklik değeri $\Phi_B=0,744$ eV, seri direnç değeri ise $R_s= 6,282$ k Ω olarak, Pb/PbO/p-Si diyotun engel yükseklik değeri $\Phi_B=0,841$ eV, seri direnç değeri ise $R_s= 2,726$ k Ω olarak hesaplanmıştır ve bu değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

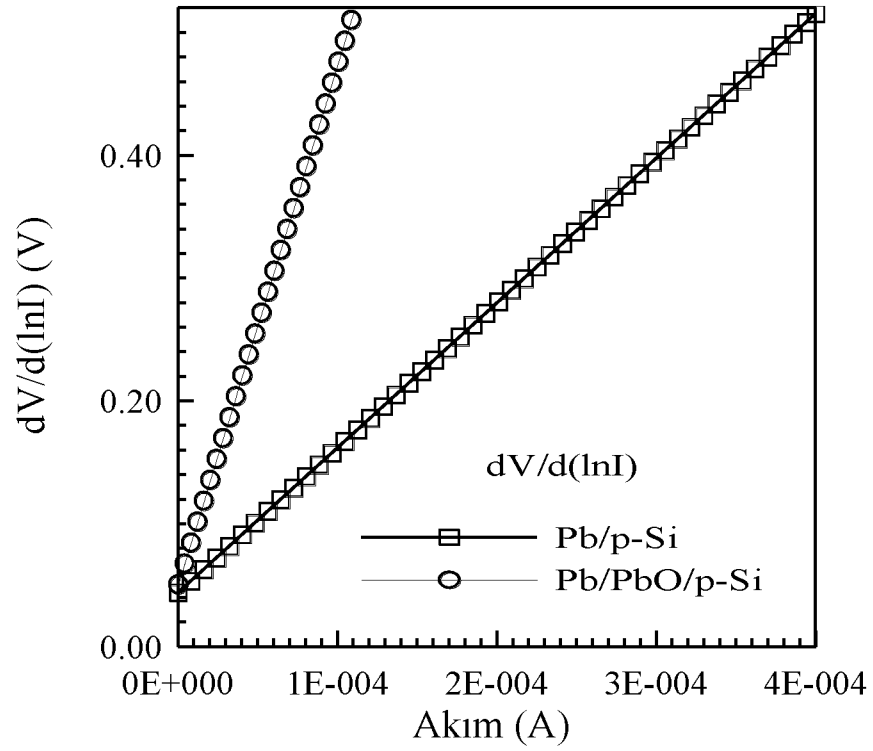
Seri direnç durumunda diyotun, engel yüksekliği, seri direnç ve idealite faktörü gibi değerlerin bulunabilmesi için ikinci yöntem ise Cheung yöntemidir. S.K. Cheung ve N.W. Cheung(1986) tarafından geliştirilen bu metotta,

$$\frac{dv}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + I. R_s \quad (4.12)$$

$$H(I) = n\phi_B + I. R_s \quad (4.13)$$

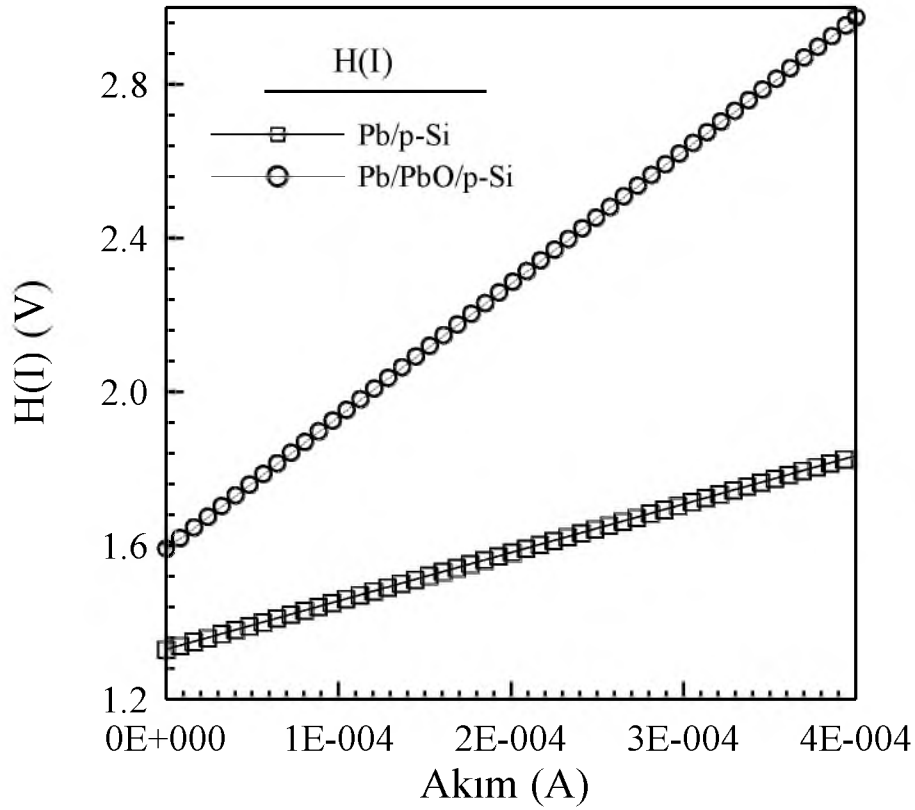
şeklinde Cheung eşitlikleri üretilmiştir.

Şekil 4.11’de Pb/PbO/p-Si ve Pb/p-Si referans diyotlarının $dV/d(\ln I)$ - I grafikleri gösterilmektedir. Bu grafiklerdeki lineer doğruların eğiminden Pb/Si diyotunun seri direnci $R_s=1,178$ k Ω olarak hesaplanmıştır. Cheung yöntemine göre, lineer doğrunun düşey eksenini kestiği nokta kullanılarak idealite faktörü $n= 1,70$ olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde Pb/PbO/p-Si Schotky diyotunun Cheung fonksiyonuna göre seri direnci $R_s=4,233$ k Ω olarak ve idealite faktörü $n=1,97$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.11. Pb/PbO/p-Si ve Pb/p-Si referans diyotlarının $dV/d(\ln I)$ -I grafikleri

Cheung yöntemi kullanılarak elde edilen $H(I)$ -(I) grafikleri Şekil 4.12’de gösterilmektedir. Bu grafiklerden Pb/p-Si diyotun seri direnç değeri $R_s=1,259 \text{ k}\Omega$, engel yüksekliği $\Phi_B=0,782 \text{ eV}$ olarak, Pb/PbO/p-Si diyotun seri direnç değeri $R_s=3,456 \text{ k}\Omega$, engel yüksekliği $\Phi_B=0,809 \text{ eV}$ olarak hesaplanmış olup bu parametreler Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.12. Pb/PbO/p-Si ve Pb/p-Si referans diyotlarının H(I)-I grafikleri

Çizelge 4.1. Pb/p-Si ve Pb/PbO/p-Si diyotlarının I-V, Cheung ve Norde fonksiyonlarından elde edilen diyot parametreleri (Diyot alanı $A=0,00785 \text{ cm}^2$ olarak alınmıştır.)

Numune Adı	Cheung Fonksiyonu				I-V Grafiği			Norde Fonksiyonu	
	dV/d(lnI)-I		H(I)-I Grafiği					F(V ₀)-V ₀ Grafiği	
	R _s (kΩ)	N	R _s (kΩ)	Φ _B (eV)	N	Φ _B (eV)	I ₀ (A)	R _s (kΩ)	Φ _B (eV)
Pb/p-Si	1,178	1,70	1,259	0,782	1,68	0,701	3.28x10 ⁻⁸	6,282	0,744
Pb/PbO/p-Si	4,233	1,97	3,456	0,809	2,06	0,780	1.91x10 ⁻⁹	2,726	0,841

4.4.2 Üretilen diyotun kapasite-gerilim karakteristikleri

Schottky diyotların deplasyon tabakasının kapasitif davranışı sebebiyle diyot karakteristiklerini sadece I-V ölçümleri ile yorumlamak yeterli olmamaktadır. Bu nedenle diyot karakterizasyonunda en fazla kullanılan tekniklerden biri olan kapasite-gerilim ölçümlerinin de yapılması gerekmektedir. Kapasitenin ters beslem gerilimine

bağlı olarak ölçülmesi durumunda, doğrultucu kontağa ait engel yüksekliği ve yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonu hesaplanabilir (Özaydın, 2012).

Literatürde metal-yarıiletken doğrultucu kontağın kapasitesi,

$$C = A \left(\frac{\epsilon_s \epsilon_o N_a}{2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(V_d - \frac{kT}{q} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.14)$$

bağıntısı ile verilmiştir. Bu ifadede $k=8,625 \times 10^{-5}$ eV/K (Boltzmann sabiti), ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti (p-Si için $\epsilon_s=11,8$), ϵ_o boşluğun dielektrik sabiti ($\epsilon_o=8,85 \times 10^{-12}$ F/cm), q elektron yükü, V_d difüzyon potansiyeli, N_a iyonize olmuş akseptör yoğunluğu ve T Kelvin cinsinden sıcaklıktır (Güllü, 2008). Pb/PbO/p-Si diyotunun C-V ölçümleri, oda sıcaklığında (-2V)-(+2V) gerilim aralığında 0,02V adımlarla ve sırasıyla; 10 kHz, 20 kHz, 30 kHz, 40 kHz, 50 kHz, 60 kHz, 70 kHz, 80 kHz, 90 kHz, 100 kHz, 200 kHz, 300 kHz, 400 kHz, 500 kHz, 600 kHz, 700 kHz, 800 kHz, 900 kHz, 1 Mhz ve 2 MHz frekans değerleri için alınmış olup Şekil 4.13'te görülmektedir. Frekans arttıkça Kapasitenin azaldığı görülmektedir. Bu durum arayüzey tuzaklarının uygulanan sinyali takip edememesi ve buna bağlı olarak C değerlerinin düşmesi ile izah edilir.

4.14 eşitliğinin düzenlenmesi ile,

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\epsilon_s \epsilon_o q A^2 N_a} \quad (4.15)$$

elde edilir. Burada V uygulanan gerilimidir. Eşitlik 4.15'te göre ters beslem bölgesinde C^{-2} -V grafiği lineer olmalıdır ve aynı zamanda $C^{-2} = 0$ için $V_d = V$ olmalıdır. Bu nedenle difüzyon potansiyeli C^{-2} -V grafiğinden elde edilebilmektedir. Pb/PbO/p-Si diyotunun C^{-2} -V grafikleri Şekil 4.13'de gösterilmektedir. Bu grafikten yararlanılarak oda sıcaklığında farklı frekanslarda hesaplanan difüzyon potansiyelleri Çizelge 4.2'de mevcuttur.

Bununla beraber 4.15 ifadesinin V 'ye göre türevi alınırsa,

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_o q A^2 N_a} \quad (4.16)$$

elde edilir. Bu ifade N_a için yeniden düzenlenirse,

$$N_a = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_o q A^2 \frac{d(C^{-2})}{dV}} \quad (4.17)$$

bağıntısı elde edilir. Dolayısı ile C^{-2} -V grafiğinin eğiminden taşıyıcı yoğunluğu hesaplanabilir. Pb/PbO/p-Si diyotunun C^{-2} -V grafiğinin eğiminden hesaplanan taşıyıcı yoğunluğu değerleri frekansa bağlı olarak Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Termal denge durumundaki bir p-tipi yarıiletkenin valans bandındaki hol yoğunluğu,

$$p_o = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (4.18)$$

bağıntısı ile elde edilmektedir. Burada N_c termal dengede valans bandındaki hol yoğunluğu olup, p-Si için $N_c = 1,04 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ’tür. p-tipi yarıiletken için $N_a \gg n_i$ olacağı için $p_o = N_a$ olur. Burada n_i asal elektron yoğunluğunu ifade etmektedir (Şenarslan, 2017).

Bu durumda,

$$N_a = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \quad (4.19)$$

eşitlik 4.19 elde edilebilir. Bu ifadenin doğal logaritması alınıp, valans bandının tavanı referans seviye olarak ($E_c = 0$) kabul edilirse,

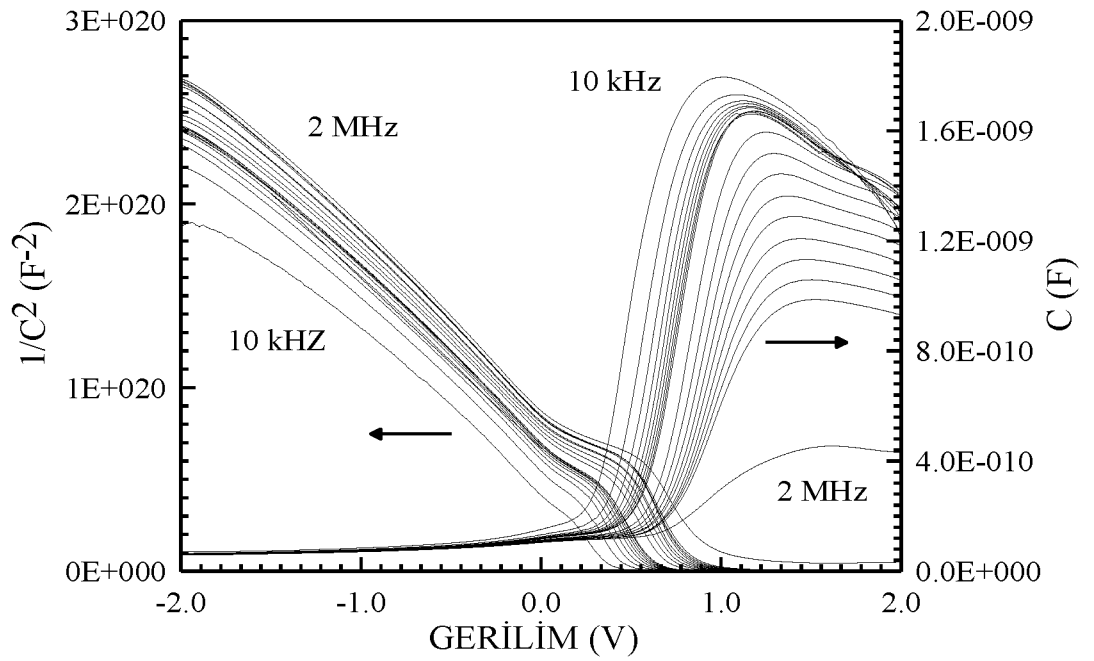
$$E_f = kT \ln\left(\frac{N_c}{N_a}\right) \quad (4.20)$$

eşitlik 4.20 şeklinde Fermi enerji seviyesi elde edilir. E_f değeri, C^{-2} -V grafiğinin eğimi ile ulaşılan N_a değerinin yerine yazılmasıyla hesaplanabilir. Bunun yanı sıra diyota ait farklı frekanslarda elde edilen C^{-2} -V grafiklerinin V eksenini kestiği noktanın tespit edilmesi ile V_d değeri ve eğimden elde edilen akseptör yoğunluğu kullanılarak valans bandı ile Fermi seviyesi arasındaki fark hesaplanarak engel yüksekliği hesaplanabilir

zira metal/yarıiletken kontağın enerji-bant diyagramı dikkate alındığında engel yüksekliği,

$$\Phi_B = E_f + V_d \quad (4.21)$$

eşitliği ile verilmektedir. Bu şekilde C^{-2} -V değişimlerinden Pb/PbO/p-Si diyotunun Φ_B (engel yüksekliği), N_a (taşıyıcı yoğunluğu), V_d (difüzyon potansiyeli) ve E_f (Fermi enerji seviyesi) değerleri hesaplanmış olup bu değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir.



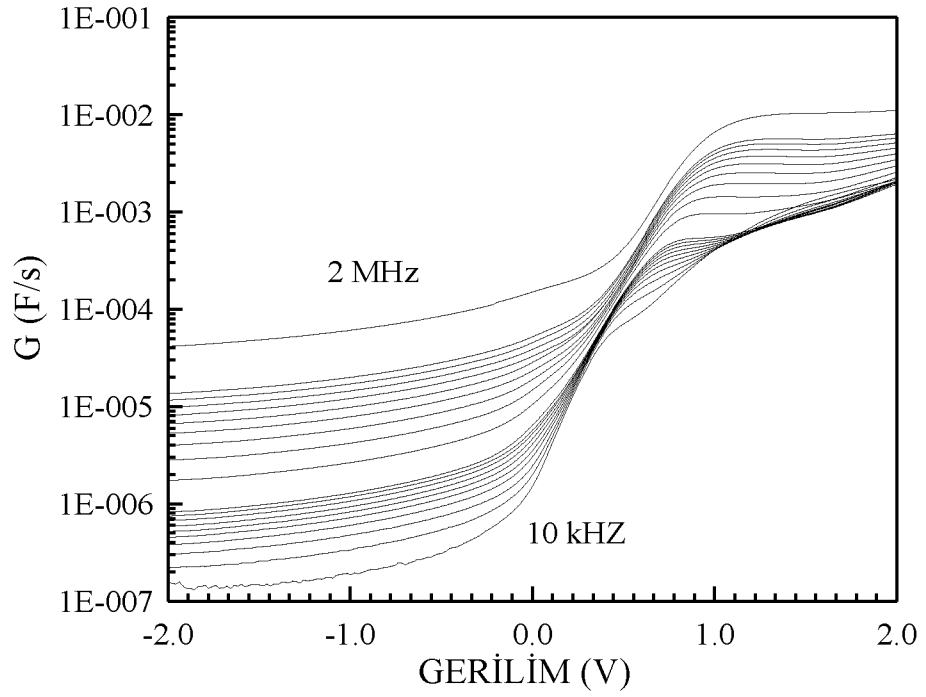
Şekil 4.13. Pb/PbO/p-Si Schottky diyotunun, 10kHz- 2MHz frekans aralığındaki C-V ve ters beslem altındaki $1/C^2$ -V grafikleri

Çizelge 4.2. Pb/PbO/p-Si numunesinden alınan ölçümlerin Kapasite-Voltaj grafiklerinden elde edilen diyot parametreleri

Frekans (kHz)	C-V			
	Φ_B (eV)	$N_a (\times 10^{15} \text{ cm}^{-3})$	V_d (V)	E_f (eV)
10	0,766	2,268	0,548	0,218
20	0,870	2,144	0,651	0,22
30	0,920	2,097	0,700	0,22
40	0,946	2,078	0,725	0,22
50	0,963	2,057	0,742	0,221
60	0,973	2,048	0,752	0,221
70	0,978	2,033	0,757	0,221
80	0,994	2,06	0,773	0,221
90	1,001	2,057	0,78	0,221
100	1,008	2,074	0,788	0,22
200	1,042	2,055	0,821	0,221
300	1,061	2,048	0,84	0,221
400	1,073	2,024	0,852	0,221
500	1,082	1,999	0,861	0,221
600	1,09	2,002	0,869	0,221
700	1,097	1,954	0,875	0,222
800	1,103	1,959	0,881	0,222
900	1,108	1,973	0,886	0,222
1000	1,110	1,966	0,888	0,222
2000	1,130	1,958	0,908	0,222

4.4.3 Üretilen diyotun kondüktans-gerilim karakteristikleri

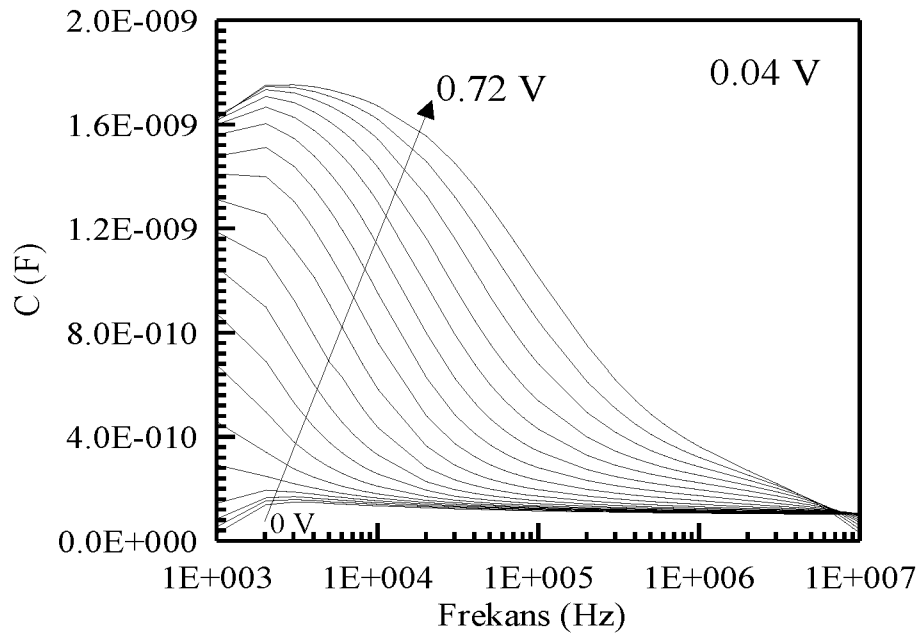
C-V hesaplamalarında ulaşılan parametreleri etkileyen durumlardan biri de kullanılan arayüzeyin fiziksel durumudur. Frekans artıkça gerilim ile doğru orantılı olarak kondüktans değerinin de arttığı Şekil 4. 14'te görülmektedir.



Şekil 4.14. Pb/PbO/p-Si diyotun Kondüktans-Gerilim (G-V) grafikleri

4.4.4 Üretilen diyotun kapasite-frekans (C-f) karakteristikleri

Pb/PbO/p-Si diyotun C-f ölçümleri 1kHz-10MHz aralığında 0 V ile 0,72 V aralığında 0,04 V'luk adımlardaki sabit gerilim değerinde alındı. Şekil 4,15'te görüldüğü gibi frekans arttıkça kapasite değeri azalmaktadır.



Şekil 4.15. Farklı gerilim değerlerinde Pb/PbO/p-Si diyotun C-f ölçümleri

5. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada ilk aşamada SILAR yöntemi kullanılarak cam üzerinde oluşturulan PbO ince filminin optik, yapısal ve morfolojik özellikleri incelendi.

SILAR tekniği kullanılarak cam altlık üzerinde elde edilen PbO ince filminin X-ışını analizi Rigaku Ultima IV X-ray difraktometresi ile yapılmıştır. Cam altlık üzerine büyütülen PbO ince filminin X-ışınları kırınım deseni analiz edildiğinde yapıda PbO ve Pb₂O₃ formlarında kristal fazlarının oluştuğu ve literatürle (Pasha ve ark., 2012) uyum sergilediği görülmüştür.

SILAR yöntemi kullanılarak elde edilen PbO ince filminin Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) görüntüleri ve EDS spektrumu Şekil 4.2’de verilen JEOL marka SEM cihazı yardımı ile alınmıştır. PbO filminin SEM görüntüsü analiz edildiğinde Bu görüntüde PbO yüzeyinde yaprak görünümlü nanoyapıların oluştuğu ve bu şeklin literatürde (Güngör, 2015) benzer sonuçlarla uyduğu belirlenmiştir. PbO ince filminin EDS spektrumu analiz edildiği zaman, ince film oluşumunda kurşun ve oksijenin varlığı açıkça görülmüştür.

PbO filmine ait optik soğurma spektrumu, Shimadzu 3600 UV-vis UV-Vis spektrofotometre kullanılarak 200 nm ile 1100 nm dalgaboyu aralığında ölçülmüş olup, soğurma spektrumu, PbO için daha önce yapılan çalışmalarla uyum sergilemektedir. m değeri 1/2 doğrudan izinli geçişleri temsil etmekte olup $m=1/2$ olarak alınıp, $(Ahv)^2-hv$ grafiği elde edilmiştir. Bu grafiğin lineer kısmının $(Ahv)^2=0$ değeri için uzantısı bulunarak, PbO’nun yasak enerji bant aralığının $E_g=2,96$ eV olduğu tespit edilmiştir. Bu değer literatürde PbO için verilen değerlerle uyum içerisindedir.

PbO filminin PL ölçümü Perkin Elmer LS 55 cihazı kullanılarak PL spektrumu elde edildi. Bu spektrumda PbO için yaklaşık 630 nm civarında ortaya çıkan pik, literatürdeki sonuçlarla uyum sergilemektedir.

Bu çalışmada ikinci aşamada Pb/PbO/p-Si (MIS) diyotu üretilmiş olup bu MIS yapının elektriksel ve arayüzey özellikleri incelendi. Diyotun akım-gerilim (I-V), kapasite voltaj (C-V) ve kapasite-frekans (C-f) ölçümleri oda sıcaklığında ve karanlıkta diyot üzerinde belirlenen bir noktadan KEITHLEY 4200-SCS cihazı ile alındı. Ölçüm değerlerinin grafikleri aynı cihaz ile elde edildikten sonra diyotun karakteristikleri

hesaplandı (Çizelge 4.1, Çizelge 4.2). Ölçümlerde Cheung ve Norde fonksiyonlarından yararlanıldı.

PbO ince film tabakasının etkisini görmek için Pb/p-Si referans diyot yapısı ile Pb/PbO/p-Si MIS yapısının I-V karakteristikleri oda sıcaklığında ve karanlıkta (-2 V)-(+1 V) aralığında (doğru ve ters beslem) ve 0,02 V adımlarla ölçülmüş olup I-V grafikleri incelendiğinde referans diyota göre, ters ve düz beslem karakteristiklerinde akımın yaklaşık 10 kattan fazla azaldığı gözlenmiştir. Bu azalma durumu PbO ince film tabakasının, metal ile p-Si arasında ilave bir direnç etkisi göstermesinden, arayüzeydeki doğal oksit tabakası ve arayüzey tabakasının oluşumundan kaynaklanır.

Referans Pb/p-Si diyotunun hesaplanan engel yüksekliği $\Phi_B=0,701$ eV ve idealite faktörü $n=1,68$ olarak bulunmuştur. Pb/PbO/p-Si diyotunun engel yüksekliği ise $\Phi_B=0,780$ eV ve idealite faktörü $n=2,06$ olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.1). Üretilen diyotlardaki idealite faktörünün 1 den büyük çıkması, genelde üretim sırasında olabilecek arayüzey oksit tabakasına, yüzey/ara yüzey hallerine ve seri direnç (R_s) etkisinden ortaya çıkar (Güllü, 2018). Pb/PbO/p-Si MIS diyotun engel yüksekliğinin, Pb/p-Si referans diyotunkinden yaklaşık 0.78 eV kadar daha büyük çıkması PbO arayüzey oksit tabakasının varlığına bağlı olarak diyotun uzay yükü bölgesindeki yük dağılımındaki değişimle izah edilebilir.

Yukarıdaki kısımlarda, diyotların ideal durumdan sapma nedenlerinden birisinin de seri direnç etkisi olduğu belirtilmişti. Diyotun engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi değerlerin hesaplanması için kullanılan yöntemlerden biri Norde (1979) tarafından üretilen Norde fonksiyonlarıdır.

Norde fonksiyonlarından elde edilen $F(V)$ -V grafiklerinden, referans Pb/p-Si diyotun engel yükseklik değeri $\Phi_B=0,744$ eV, seri direnç değeri ise $R_s= 6,282$ k Ω olarak, Pb/PbO/p-Si diyotun engel yükseklik değeri $\Phi_B=0,841$ eV, seri direnç değeri ise $R_s= 2,726$ k Ω olarak hesaplanmıştır ve bu değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Seri direnç durumunda diyotun, engel yüksekliği, seri direnç ve idealite faktörü gibi değerlerin bulunabilmesi için ikinci yöntem ise Cheung yöntemidir. S.K. Cheung ve N.W. Cheung(1986) tarafından geliştirilen bu metot kullanılarak, Pb/PbO/p-Si ve Pb/p-Si referans diyotlarının $dV/d(\ln I)$ -I grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerden, Pb/Si referans diyotunun seri direnci $R_s=1,178$ k Ω , idealite faktörü $n= 1,70$ olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde Pb/PbO/p-Si Schotky diyotunun Cheung fonksiyonuna göre seri direnci $R_s=4,233$ k Ω olarak ve idealite faktörü $n=1,97$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Ayrıca, Cheung yöntemi kullanılarak elde edilen

H(I)-(I) grafikleri elde edilmiştir. Bu grafiklerden Pb/p-Si diyotun seri direnç değeri $R_s=1,259 \text{ k}\Omega$, engel yüksekliği $\Phi_B=0,782 \text{ eV}$ olarak, Pb/PbO/p-Si diyotun seri direnç değeri $R_s=3,456 \text{ k}\Omega$, engel yüksekliği $\Phi_B=0,809 \text{ eV}$ olarak hesaplanmış olup bu parametreler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Norde ve Cheung metotları ile hesaplanan engel yüksekliği ve seri direnç değerlerinin farklı çıktığı görülmüştür. Bu farkın Norde ve Cheung yöntemleri ile hesaplama yapılırken farklı gerilim bölgelerinde çalışılmasından ortaya çıktığı izah edilir. Cheung yönteminde büyük gerilim değerlerinde hesaplama yapılırken, Norde yönteminde daha küçük gerilim değerlerinde hesaplama yapılmaktadır.

Schottky diyotların depolama tabakasının kapasitif davranışı sebebiyle diyot karakteristiklerini sadece I-V ölçümleri ile yorumlamak yeterli olmamaktadır. Bu nedenle diyot karakterizasyonunda en fazla kullanılan tekniklerden biri olan kapasite-gerilim ölçümlerinin de yapılması gerekmektedir. Kapasitenin ters beslem gerilimine bağlı olarak ölçülmesi durumunda, doğrultucu kontağa ait engel yüksekliği ve yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonu hesaplanabilir (Özaydın, 2012).

Pb/PbO/p-Si diyotunun C-V ölçümleri, oda sıcaklığında (-2 V)-(+2 V) gerilim aralığında 0,02 V adımlarla ve sırasıyla; 10kHz-2MHz frekans aralığında alınmış olup frekans arttıkça kapasitenin azaldığı görülmektedir. Bu durum arayüzey tuzaklarının uygulanan sinyali takip edememesi ve buna bağlı olarak C değerlerinin düşmesi ile izah edilmiştir.

C-V grafikleri kullanılarak Pb/PbO/p-Si diyotunun C^{-2} -V grafikleri elde edilmiştir. Bu C^{-2} -V değişimlerinin analizlerinden Φ_B (engel yüksekliği), N_a (taşıyıcı yoğunluğu), V_d (difüzyon potansiyeli) ve E_f (Fermi enerji seviyesi) değerleri hesaplanmış olup bu değerler Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Pb/PbO/p-Si diyotunun 10 kHz frekanstaki Φ_B engel yüksekliğinin 0,766 eV değerinden, 2 MHz frekanstaki engel yüksekliği olan 1,130 eV değerine arttığı, N_a (taşıyıcı yoğunluğu) parametresinin $2,268 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ değerinden $1,958 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ değerine azaldığı, V_d (difüzyon potansiyeli) parametresinin 0,548 V değerinden 0,908 V değerine arttığı ve E_f (Fermi enerji seviyesi) parametresinin de 0,218 eV değerinden 0,222 eV değerine hafifçe arttığı görülmüştür.

C-V hesaplamalarında ulaşılan parametreleri etkileyen durumlardan biri de kullanılan arayüzeyin fiziksel durumudur. Frekans arttıkça gerilim ile doğru orantılı olarak G (kondüktans) değerinin de arttığı görülmüştür.

Pb/PbO/p-Si diyotun C-f ölçümleri 1kHz-10MHz aralığında 0 V ile 0,72 V aralığında 0,04 V'luk adımlardaki sabit gerilim değerinde alındı. Frekans arttıkça kapasite değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bu durum deplasyon bölgesindeki arayüzey tuzaklarının uygulanan sinyali takip edememesi ve buna bağlı olarak C sığa değerlerinin azalmasına atfedilmiştir.

Sonuç olarak; Bu çalışmanın ilk aşamasında SILAR yöntemi kullanılarak cam üzerinde oluşturulan PbO ince filminin optik, yapısal ve morfolojik özellikleri incelendi.

SILAR tekniği kullanılarak cam altlık üzerine büyütülen PbO ince filminin yapısal analizi X-ışınları kırınım deseni analiz edildiğinde yapıda PbO ve Pb₂O₃ formlarında kristal fazlarının olduğu ve literatürle (Pasha ve ark., 2012) uyum sergilediği görülmüştür.

SILAR yöntemi kullanılarak elde edilen PbO ince filminin Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) görüntüleri ve EDS analizi yapılmıştır. PbO filminin SEM görüntüsü analiz edildiğinde Bu görüntüde PbO yüzeyinde yaprak görümlü nanoyapıların olduğu ve bu şeklin literatürde (Güngör, 2015) benzer sonuçlarla uyduğu belirlenmiştir. Ayrıca PbO ince filminin EDS spektrumu analiz edildiği zaman, ince film oluşumunda kurşun ve oksijenin varlığı açıkça görülmüştür.

PbO filmine ait optik soğurma spektrumu 200 nm ile 1100 nm dalgaboyu aralığında ölçülmüş olup, soğurma spektrumu, PbO için daha önce yapılan çalışmalarla uyum sergilemiştir. Doğrudan izinli geçişlere ait PbO'nun yasak enerji bant aralığının $E_g=2,96$ eV olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca PbO filminin PL ölçümü alınıp elde edilen spektrumda PbO için yaklaşık 630 nm civarında ortaya çıkan pik, literatürdeki sonuçlarla uyum sergilediği görülmüştür.

Bu çalışmanın ikinci aşamasında Pb/PbO/p-Si (MIS) diyotu üretilmiş olup bu MIS yapının elektriksel ve arayüzey özellikleri incelenmiştir. PbO arayüzey tabakasının etkisini görmek için Pb/p-Si referans diyot yapısı ile Pb/PbO/p-Si MIS yapısının I-V karakteristikleri ölçülmüş olup I-V grafiklerinin analizi neticesinde referans diyota göre, ters ve düz beslem karakteristiklerinde akımın yaklaşık 10 kattan fazla azaldığı gözlenmiştir. Bu akım azalması olayı PbO ince film tabakasının, Pb metali ile p-Si yarı iletkeni arasında ilave bir direnç etkisi göstermesine, arayüzeydeki doğal oksit tabakasına ve arayüzey tabakasının oluşumuna atfedilmiştir.

Bununla beraber, referans alınan Pb/p-Si diyotunun hesaplanan engel yüksekliği $\Phi_B=0,701$ eV ve idealite faktörü $n=1,68$ olarak bulunmuştur. Pb/PbO/p-Si diyotunun

engel yüksekliği ise $\Phi_B=0,780$ eV ve idealite faktörü $n=2,06$ olarak hesaplanmıştır. Üretilen diyotlardaki idealite faktörünün 1 den büyük çıkması, genelde üretim sırasında olabilecek arayüzey oksit tabakasına, yüzey/ara yüzey hallerine ve seri direnç (R_s) etkisinden ortaya çıkar (Güllü, 2018). Pb/PbO/p-Si MIS diyotun engel yüksekliğinin, Pb/p-Si referans diyotunkinden yaklaşık 0.78 eV kadar daha büyük çıkması PbO arayüzey oksit tabakasının varlığına bağlı olarak diyotun uzay yükü bölgesindeki yük dağılımındaki değişime atfedilmiştir.

Diyotların ideal durumdan sapma nedenlerinden birisinin de seri direnç etkisi olduğu belirtilerek Norde ve Cheung yöntemleri kullanılarak akım-gerilim karakteristikleri analiz edilmiştir. Norde fonksiyonlarından elde edilen $F(V)$ - V grafiklerinden, referans Pb/p-Si diyotun engel yükseklik değeri $\Phi_B=0,744$ eV, seri direnç değeri ise $R_s= 6,282$ k Ω olarak, Pb/PbO/p-Si diyotun engel yükseklik değeri $\Phi_B=0,841$ eV, seri direnç değeri ise $R_s= 2,726$ k Ω olarak hesaplanmıştır. Cheung metoduna göre, Pb/PbO/p-Si ve Pb/p-Si referans diyotlarının $dV/d(\ln I)$ - I ve $H(I)$ -(I) grafikleri çizilmiştir. $dV/d(\ln I)$ - I grafiklerinden, Pb/Si referans diyotunun seri direnci $R_s=1,178$ k Ω , idealite faktörü $n= 1,70$ olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde Pb/PbO/p-Si Schottky diyotunun Cheung fonksiyonuna göre seri direnci $R_s=4,233$ k Ω olarak ve idealite faktörü $n=1,97$ olarak hesaplanmıştır. $H(I)$ -(I) grafiklerinden, Pb/p-Si diyotun seri direnç değeri $R_s=1,259$ k Ω , engel yüksekliği $\Phi_B=0,782$ eV olarak, Pb/PbO/p-Si diyotun seri direnç değeri $R_s=3,456$ k Ω , engel yüksekliği $\Phi_B=0,809$ eV olarak hesaplanmıştır.

Norde ve Cheung metotları ile hesaplanan engel yüksekliği ve seri direnç değerlerinin farklı çıktığı görülmüştür. Bu farkın Norde ve Cheung yöntemleri ile hesaplama yapılırken farklı gerilim bölgelerinde çalışılmasına atfedilmiştir.

Schottky diyotların deplasyon tabakasının kapasitif davranışı sebebiyle diyot karakteristiklerini sadece I - V ölçümleri ile yorumlamak yeterli olmamaktadır. Bu nedenle diyot karakterizasyonunda en fazla kullanılan tekniklerden biri olan kapasite-gerilim ölçümlerinin de yapılması gerekmektedir.

Pb/PbO/p-Si diyotunun C - V ölçümleri, 10kHz-2MHz frekans aralığında alınmış olup frekans arttıkça kapasitenin azaldığı görülmektedir. Bu durum arayüzey tuzaklarının uygulanan sinyali takip edememesi ve buna bağlı olarak C değerlerinin düşmesi ile izah edilmiştir. C - V grafikleri kullanılarak Pb/PbO/p-Si diyotunun C^{-2} - V grafikleri elde edilmiştir. Bu C^{-2} - V değişimlerini analizlerinden Φ_B (engel

yüksekliği), N_a (taşıyıcı yoğunluğu), V_d (difüzyon potansiyeli) ve E_f (Fermi enerji seviyesi) değerleri hesaplanmıştır.

Pb/PbO/p-Si diyotunun C-V ölçümlerinin yanısıra G-V ölçümlerinin analiz edilmesi ile frekans artıkça gerilim ile doğru orantılı olarak G (kondüktans) değerinin de arttığı görülmüştür.

Yine Pb/PbO/p-Si diyotun C-f ölçümleri analiz edildiğinde frekans arttıkça kapasite değerlerinin azaldığı gözlenmiştir. Bu durum deplasyon bölgesindeki arayüzey tuzaklarının uygulanan sinyali takip edememesi ve buna bağlı olarak C sığa değerlerinin azalmasına atfedilmiştir.

Çalışmamızda Schottky diyot yapımında kullanılan PbO ince filmi, SILAR yöntemiyle oluşturulmuştur, bu nedenle çalışmamız literatürde bir ilk olma özelliği taşımaktadır.

PbO metal oksit ince film malzemesinin yarıiletken teknolojisinde kullanılabileceği görülmüştür.

5.2 Öneriler

Bu çalışmada SILAR tekniği kullanılarak ince filmler elde edildi. Yapılacak çalışmalarda kaplama tur sayısı değiştirilip farklı kalınlıktaki filmlerin parametreleri karşılaştırılabilir.

Bu çalışmada filmler 300 °C' de, 30 dakika tavlandı, tavlama sıcaklığı ve süresi değiştirilerek kristal yapıları optimize edilebilir.

Bu çalışmada diyot ölçümleri karanlık ortamda alındı. Aydınlık ortamda da diyotun değerleri ölçülerek kontağın parametrelerine ışığın etkisi de eklenebilir.

Bu çalışmada diyot ölçümleri (-2V)-(+2V) ileri ve ters gerilim aralığında 0,02 V adımlarla alındı. Farklı gerilim aralıkları ve adımları uygulanarak, uygulama geriliminin diyot değişkenlere etkisi incelenebilir.

Yapılacak MIS kontaklarda arayüzey tabakaların kalınlıklarını değiştirerek arayüzey kalınlığının diyot yapısına etkisi incelenebilir.

Oluşturulacak Pb/PbO/p-Si diyotun ters beslemde akım değerini arttırarak elektronik devre elemanı olarak kullanılabilir.

Diyot ölçümünde homojensizlik göz önüne alınarak diyotun farklı noktalarından ölçümler yapılabilir

KAYNAKÇA

- Akın, B.,2015, Au/ZnO/n-GaAs (MIS) Schottky Engel Diyotların (SBDs) Elektriksel karakteristiklerinin Frekans ve Voltaja Bağlı İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 7-25.
- Albayrak, M.,2019, M., Güney, H. ve Kıyak, O., 2019, SILAR Yöntemi İle Oda Sıcaklığında Üretilen CdO Filmlerinin Yapısal Morfolojik ve Optik Özelliklerine pH Değişimin Etkisi, *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(4), 2079-2087.
- Amarande, L., Midea, C., and Tanasoiu, C., 2002, Effect of excess PbO on the structure and piezoelectric properties of Bi-modified PbTiO₃ ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*,1269–1275.
- Aşık, B., 2012, Ultrasonik Sprey Piroliz (USP) Yöntemi İle Nano Yapılı Kurşun Oksit Üretimi ve Karakterizasyonu,Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı*, İstanbul, 1-7.
- Aydın, H., 2019. Organik Boya Ara Tabakalı Al/Safranin T/n-Tipi InP MIS Eklemlerin Elektriksel ve Arayüzey Özellikleri,Yüksek Lisans Tezi, *Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*,Batman, 11-20.
- Aydoğan, Ş., 2014, Katıhal Fiziği, *Nobel Yayınları*, Ankara, 221-503.
- Aydoğan, Ş., 2015, Katıhal Elektronığı, *Nobel Yayınları*, Ankara, 45-48.
- Bhagat, D., Waldiya, M., Mukhopadhyay, I. and Neumann-Spallart, M., 2019, Photoelectrochemical Properties of α -PbO Films Prepared by Spray Pyrolysis, *Journal of The Electrochemical Society*, 698-703.
- Biber, Z. S., 2019, NiO İçerikli Süperkapasitör Elektrotların Hidrotermal Yöntemle Oluşturulması, Yüksek Lisans Tezi, *İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Malatya, 1-55.
- Cıbrır, İ., 2017, Kurşunoksit Katkılı Metal-Oksit-Yarıiletken Yapıların Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara, 19-39.
- Çavuşoğlu, H., 2019, Gümüş Katkılı Bakır (II) Oksit İnce Filmlerin Yüzey Aktif Madde Yardımıyla SILAR Metoduyla Büyütülmesi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 412-419.
- Dikici, M., 2012, Katıhal Fiziği, *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, 305-322.
- Droessler, L. M., 2014, Lead Oxides for Photovoltaics, PhD Thesis, *University of Oxford, Department of Materials*, 147-148.
- Droessler, L. M., Assender, H. and Watt, A., 2012, Thermally deposited lead oxides for thin film photovoltaics, *Materials Letters*, (71), 51–53.
- Erdoğan, İ. Y. and Güllü, Ö., 2010, Optical and structural properties of CuO nanofilm: Its diode application. *Journal of Alloys and Compounds*, 378–383.
- Evcil, M. A., 2019, SnO₂/P-Si Heteroeklem Yapıların Termal Buharlaştırmayla Üretilmesi, Diyot ve Fotovoltaik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Van, 32-37.
- Fiore, J. M., 2018, This Semiconductor Devices:Theory and Application, *Mohawk Valley Community College 1101 Sherman Drive Utica*, (13501), 23-31.
- Gençyılmaz, O ve Taşköprü, T., 2017, Fotovoltaik Güneş Pillerinde Kullanılan ZnO ve CuO Filmlerinin SILAR Yöntemi ile Üretilmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 468-483.

- Güllü, Ö., 2008, H₂ Öntavlamalı Au/n-GaAs Diyotlarda Elektriksel Karakteristiklerin Schottky Metal Kalınlığı Ve Sıcaklığa Bağlı Değişiminin İncelenmesi, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 91-95.
- Güllü, Ö., 2018, Al/Nigrosin/p-Si Yapıların Fabrikasyonu ve Temel Diyot Parametrelerinin Hesaplanması, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 689-700.
- Güngör, A., 2015, Nano Boyutlu Kurşun Oksit Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Mersin, 24-25.
- Güngör, A., Genç, R. and Özdemir, T., 2017, Facile Synthesis of Semiconducting Nanosized 0D and 2D Lead Oxides Using a Modified Co-Precipitation Method, *Journal of the Turkish Chemical Society Chemistry*, 4(3), 1017-1030.
- Gürmen, S., Stopic, S. and Friedrich, B., 2006, Synthesis of nanosized spherical cobalt powder by ultrasonic spray pyrolysis, *Materials Research Bulletin*, 1882-1890.
- Haidar, M., 2019, Sol-Gel İle Büyütülen ZnO İnce Filmlerine Soğuk Altık Yöntemiyle Ag Buharlaştırılarak Diyot Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı*, Rize, 2-10.
- Hasan, N. B. and Mohammed, M., 2015, Constructing Spray Pyrolysis System For The Preparation of Thin Films and Study The Optical Properties of PbO Films, *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy*, 146-153.
- Henrich, V. and Cox, P., 1994, The Surface Science of Metal Oxides, *Cambridge University Press*, Cambridge.
- İskenderoğlu, D. ve Güney, H., 2018, CdO:Ag İnce Filmlerinin SILAR Tekniği İle Büyütülmesi ve Karakterizasyonu, *Dergipark*, 128-135.
- Karami, H., Karimi, M. and Haghdar, S., 2008, Synthesis of uniform nano-structured lead oxide by sonochemical method and its application as cathode and anode of lead-acid batteries, *Materials Research Bulletin*, 3054-3065.
- Karthikeyan, M., Anandhan, N., Amali Roselin, A., Shanmugapriya, V., Gopu, G. and Dharuman, V., 2017, Preparation And Characterization Of Lead Oxide Thin Films By Chemical Bath Deposition Technique *Journal of Physical Sciences*, 88-92.
- Kaymak, N., Öz Orhan, E., Ocak, B. and Selçuk, B., 2018, An Investigation of the Electrical Properties of PbO Based MOS-Type Different Schottky Barrier Diodes on A Structure
- Konstantinov, K., Nga, S., Wang, J., Wang, G., Wexler, D. and Liu, H., 2006, Nanostructured PbO materials obtained in situ by spray solution technique for Li-ion batteries, *Journal of Power Sources*, 241-244.
- Kung, H., 1989, Transition Metal Oxides: Surface Chemistry and Catalysis. *Elsevier*, Amsterdam.
- Liu, W., Ma, B., Li, F., Fu, Y., Tai, J., Zhoua, Y., Lixu, L., 2016, Reduction of lead dioxide with oxalic acid to prepare lead oxide as the positive electrode material for lead acid batteries, *The Royal Society of Chemistry*, 108513-108522.
- Makhlouf, M. M., EL-Nahass, M. M. and Zeyada, M., 2017, Fabrication, temperature dependent current-voltage characteristics and photoresponse properties of Au/ α -PbO₂/p-Si/Al heterojunction photodiode, *Materials Science in Semiconductor Processin*, (58), 68-75.
- Meneghetti, V. A., 2009, Size Evaluation of Gold Nanoparticles by UV-vis Spectroscopy, *Via Marzolo*, 4277-4285.
- Mousa, A. O. and Marmoss, A., 2017, Study the Structural and Electrical Properties of PbO Thin Films Deposited by Chemical Spray Pyrolysis Technique, *International Journal of ChemTech Research*, 625-632.

- Mythili, N. and Arulmozhia, K., 2014, Influence of Zinc doping on the structural and optical properties of chemically synthesized PbO nanocrystals, *Optoelectronics And Advanced Materials – Rapid Communications*, 221 - 224.
- 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.
- Okur, R., 2016, MIS Yapılarda Ara Yüzey Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 14-17.
- Özaslan, D., Güneş, M. ve Gümüş, C., 2017, SILAR Metodu ile Hazırlanan Cu₂O İnce Filmlerin Fiziksel Özellikleri, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilim Dergisi*, 854-857.
- Özaydın, C., 2012, Makrosiklik Ligandları nGeçiş Metal Kompleksleri ile Oluşturulan Heteroeklemlerin Elektriksel ve Optiksel Özelliklerin İncelenmesi, Doktora Tezi, *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Diyarbakır, 72-81.
- Özdemir, C., 2018, Kimyasal Banyo Depolama Yöntemiyle Hazırlanmış ZrO₂ İnce Filmlerin Yapısal ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Batman, 13-15.
- Özek, F., 2015, Katıhal Elektronığı, Ankara, 17-24.
- Parry, K. D., 2000, Scanning Electron Microscopy:an introduction, *III-Vs Review*, (13) 4, 40-44.
- 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.
- Sağlam, M. 2001, Metal-oksit-yarıiletken (MOS) yapıların teorisi-I,II ders notları, Erzurum, 58-59.
- Selek, H. S., 2008, Elektronik-1, *Seçkin Yayıncılık*, Ankara.
- Shakir, F. and Alwan, A., 2018, Structural, Morphological, and Some Optical Properties of Amorphous and Polycrystalline Lead Oxide Thin Films, *AL-Qadisiyah Journal of pure Science*, 175-185.
- Sönmezoğlu, S., Koç, M. ve Akın, Ş., 2012, İnce Film Üretim Teknikleri, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 389-401.
- Suganya, M., Narasimman, v., Srivind, J., Nagarethinam, V., Usharani, K. and Balu, A., 2015, Studies On The Physical Properties Of Spray And SILAR Deposited Lead Oxide Thin Films, *Journal of Electron Devices*, 1842-1848.
- Suganya, M., Balu, A. and Usharani, K., 2014, Role of substrate temperature on the growth mechanism and physical properties of spray deposited lead oxide thin films, *Materials Science-Poland*, 448-456.
- Suryawanshi, V. N., Varpe, A. and Deshpande, M., 2017, Band gap engineering in PbO nanostructured thin films by Mn doping, *Thin Solid Films*.
- Sze, s. M., 1981, Physics of Semiconductor Devices, *2nd Edition, John Wiley and Sons*, New York.
- Şenarslan, E., 2017, Al/P-Si/Al Ve Al/V₂O₅/P-Si/Al Yapılarının Elektriksel Karakteristikleri Üzerine Yüzey Pasivasyonunun Etkileri, Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 152-155.
- Taunk, P., Das, R. and Bisen, D., 2014, Synthesis, morphology and structural characterization of lead hydroxide nano particles, *International Journal For Research In Applied Science And Engineering Technology (I Jras Et)*, 284-288.
- Turton, R., 2007, Katıların Fiziği, Çeviren: Yahya Kemal Yoğurtçu, Aktif Yayıncılık, Erzurum, 118-140.
- Türköz, M. S., 2009, Elektronik, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 2-10.

- URL-1.,2017, Yarı İletkenler Tarihinde Megep Modülleri, <https://megepdersnotu.com/yari-iletkenler/> [Ziyaret Tarihi: 3 Eylül 2020].
- URL-2., 2017, Physics-And-Radio-Electronics, <http://www.physics-and-radio-electronics.com> [Ziyaret Tarihi: 13 Eylül 2020].
- URL-3., 2015, Elektrik Port, <https://www.elektrikport.com> [Ziyaret Tarihi: 10 Kasım 2020].
- URL-4., 2020, Geochemical Instrumentation and Analysis, https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/XRD.html [Ziyaret Tarihi: 27 Kasım].
- Url-5., Lead Compounds, Lead Oxide. (t.y.): http://www.webelements.com/compounds/lead/lead_oxide.html [Ziyaret Tarihi: 31 Aralık].
- Yacobi, B. G., 2003, Applications of Semiconductor, Materials An Introduction to Basic Principles, *Kluwer Academic Publishers*, New York, 116-117.
- Yousefi, R., Sheini, J., Sa'aedi, A. and Cherazghizade, M., 2015, Growth and Characterization of PbO Nanorods Grown using Facile Oxidation of Lead Sheet, *Sains Malaysiana* 44(2), 291–294.
- Zhu, Z., Yoshihara, H., Takebayashi, K., Yao, T., 1994, Characterization of alloy formation at the ZnSe/CdSe quantum-well interface by photoluminescence spectroscopy, *Journal of Crystal Growth*, 619-624.