



**T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Si-ZnO TABANLI HETEROEKLEM FOTODİYOT ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

(Yüksek Lisans Tezi)

Mohammed Jaber Ahmed Ali ALRAWBAH

**Danışman
Prof. Dr. Eyüp Fahri KESKENLER**

**RİZE
2022**

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalında, Prof. Dr. Eyüp Fahri KESKENLER danışmanlığında, Mohammed Jaber Ahmed Ali ALRAWBAH tarafından hazırlanan *Si-ZnO Tabanlı HeteroEklem Fotodiyot Üretimi ve Karakterizasyonu* adlı bu tez çalışması, 22/09/2022 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği/oy çokluğuyla başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvanı, Adı Soyadı

İmza

Başkan :

Prof. Dr. Eyüp Fahri KESKENLER

Üye :

Doç. Dr. Ercüment YÜZÜAK

Üye :

Prof. Dr. Şükrü ÇELİK

ETİK BEYAN

Enerji Sistemleri Mühendisliği Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Si-ZnO Heteroeklem Fotodiyot Üretimi ve Karakterizasyonu” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılabilecek bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

22/09/2022

Mohammed Jaber Ahmed Ali ALRAWBAH

ÖN SÖZ

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği bölümünde yapılan bu çalışmada Sol-gel yöntemi ile Si- ZnO heteroeklem yapı tabanlı fotodiyot üretildi ve elektriksel özellikleri analiz edildi.

Deneysel çalışmalara ve tezin hazırlamasının tüm aşamalarında bilgi ve tecrübesiyle bana her türlü maddi ve manevi destek veren danışmanım sayın Prof. Dr. Eyüp Fahri KESKENLER'e çok teşekkür ediyorum. Aynı zamanda bana her konuda yardımcı olan, maddi ve manevi destekleyen aileme, hocalarıma ve arkadaşlarıma da çok teşekkür ediyorum.

Mohammed Jaber Ahmed Ali ALRAWBAH

2022/ RİZE

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN	II
ÖN SÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	VI
ABSTRACT	VII
KISALTMALAR.....	VIII
TABLolar LİSTESİ.....	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	X
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	3
1.1. Literatür Özeti	3
1. 2. Kuramsal Temelleri.....	11
1.2.1. Yarıiletkenler.....	11
1.3 Zno Özellikleri	19
1.3.1 Kristal Yapı, Kimyasal Bağlanma ve Kafes Özellikleri.....	19
1.3.2 Optik Özellikler	21
1.3.3 Elektriksel Özellikleri.....	21
1.3.4 Ohmik ve Schottky İletişim.....	22
1.3.5 Enerji Bandı Aralığı	23
1.3.6 Enerji Bandı Aralığının Mühendisliği	24
1.4 P-N Eklem.....	24
1.4.1 P-N Eklemler Türleri	26
1.5 Fotodiyot	28
1.5.1 Fotodiyot Çalışması.....	29
1.5.2. Zno P-N Fotodiyot.....	30
1.6 İnce Film Hazırlama Yöntemleri	32

1.7 Sol-Jel Yöntemi İle İnce Filim Üretimi	34
2. MATERYAL VE METOD.....	39
2.1. Numune Hazırlanması.....	39
3. BULGULAR.....	41
4. TARTIŞMA	47
4. 1. Öneriler	48
KAYNAKÇA	49



Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Ana Bilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği
Tez Türü : Yüksek Lisans Tezi
Danışman : Prof. Dr. Eyüp Fahri KESKENLER
Hazırlayan : Mohammed Jaber Ahmed Ali ALRAWBAH
Yıl : 2022
Sayfa Sayısı : 50

ÖZET

Si-ZnO TABANLI HETEROEKLEM FOTODİYOT ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Fotodiyot teknolojisi, elektronik endüstrisinde birçok uygulamaya sahiptir. Fotodiyotlar, CD / DVD sürücülerden optik haberleşmeye ve hırsız alarmlarından genel ışık algılamaya kadar birçok uygulamada ışık algılamalı fotoğraf dedektörleri olarak kullanılır. Bu çalışmada Si altlık üzerinde Sol-jel döndürerek kaplama yöntemiyle kaplamadan önce ZnO ince filmi üretildi, kullanılan başlangıç malzemesi olarak Çinko asetat dihidrat, bir çözücü olarak ve stabilizatör olarak işlev görmesi için methaoxyethanol ve monoetanolamin sırasıyla ilave edildi.

Bu çalışmada, sol-jel yöntemi ile p-Si substrat üzerine ZnO ince film kaplanarak Si-ZnO heteroeklem tabanlı fotodiyot üretimi ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Özellikle karanlıkta ve ışık altında yapılan ölçümlerin grafikleri incelenerek elektriksel parametreleri hesaplanmış, idealite faktörü, seri direnç, ters doyma akım değeri ve bariyer yüksekliği sırasıyla 6.6, 8.09 Ω , 1.6×10^{-6} A, 0.084 eV bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: n-Zno, Sol-Jel, Döndürme Kaplama, Fotodiyot, P-N Eklem, Yarı İletken.

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department : Energy systems Engineering

Thesis Type : Master

Supervisor : Prof.Dr. Eyüp Fahri KESKENLER

Author : Mohammed Jaber Ahmed Ali ALRAWBAH

Year : 2022

Pages : 50

ABSTRACT

Si-ZnO BASED HETEROJUNCTION PHOTODIODE FABRICATION AND CHARACTERIZATION

Photodiode technology has many applications in the electronics industry. Photodiodes are used as light sensing photo detectors in many applications, from CD/DVD drives to optical communications and from burglar alarms to general light detection. In this study, ZnO thin film was produced before coating by Sol-gel spin coating method on Si substrate, Zinc acetate dihydrate used as starting material, methoxyethanol and monoethanolamine were added respectively to act as a solvent and stabilizer.

In this study Si-ZnO heterojunction based photodiode production and characterization were performed by coating ZnO thin film on p-Si substrate by sol-gel method. Especially the electrical properties were calculated by analyzing the graphs of the measurements taken in the dark and under the light, the ideality factor, series resistance, reverse saturation current value and barrier height were respectively. 6.6, 8.09 Ω , 1.6×10^{-6} A, 0.084 eV.

Keywords: n-Zno, Sol-Gel, Spin Coating, Photodiode, P-N Junction, Semiconductor.

KISALTMALAR

AFM	:	Atomik kuvvet mikroskobu (Atomic force microscopy)
CVD	:	Kimyasal buhar birikimi (Chemical vapor deposition)
d	:	Kalınlık
D	:	Tanecik boyut
E	:	Elektrik alanı
E _g	:	Enerji band aralığı
FWHM	:	Yarı maksimumdaki pik genişliği (Full width at half-maximum)
IR	:	Kızılötesi (Infrared)
J	:	Akım yoğunluğu
MEA	:	Monoetanolamin
PVD	:	Fiziksel buhar birikimi (Physical vapor deposition)
Rpm	:	Dakikadaki devir sayısı (Revolutions per minute)
R	:	Direnç
RF	:	Radio frekans (Radio-frequency)
R _s	:	Seri direnç
Si	:	Silisyum
SEM	:	Tarama elektrom mikroskobu
UV	:	Morötesi (Ultraviole)
XRD	:	X-Isını kırınımı (X-Ray diffraction)
ZnO	:	Çinko oksit
σ	:	Elektriksel iletkenlik
λ	:	Dalgaboyu
ρ	:	Özdirenç
ω	:	Açısal frekans

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. ZnO çözeltisi hazırlarken ve döndürerek kaplarken kullanılan parametreler	9
Tablo 2. ZnO\Si heteroeklem fotodiyotun elde edilen parametrelerin değerleri	46



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. İletken, yalıtkan ve yarıiletken malzemedeki değerlik ve iletim bandı.....	12
Şekil 2. Az sayılı Si atomları bir araya gelerek kristal oluşması.	13
Şekil 3. Çok sayılı Si atomları bir araya gelerek kristal oluşması.	13
Şekil 4. Saf (içsel) yarı iletken sıcaklığa bağlı elektriksel davranışı.	16
Şekil 5. p-Si yarı iletken gösterimi.	17
Şekil 6. n-Si yarı iletken gösterimi.	18
Şekil 7. ZnO wurtzite ve çinko blende kristal yapı.	20
Şekil 8. Baskın atomik öz-etkileşim düzeltmeli psödopotansiyeller (SIC-PP) kullanılarak hesaplanan yığın wurtzite ZnO'nun LDA bant yapısı.	24
Şekil 9. Pozitif ve Negatif iyonları oluşumu.	25
Şekil 10. P-N eklemi enerji bant diyagramının gösterimi.	26
Şekil 11. Homo-eklem p-n eklem gösterimi.....	26
Şekil 12. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin birleşmeden önce bant diyagramları.	27
Şekil 13. p-n homo-eklem yarı iletken bant diyagramı.	27
Şekil 14. n-tipi silikon ve p-tipi germanyum farklı tür yarı iletken.....	28
Şekil 15. Fotodiyot sembolü.	29
Şekil 16. Fotodiyot resmi.....	29
Şekil 17. (a) denge ve (b) aydınlatma altında bir p-n bağlantısının diyagramı.	32
Şekil 18. İnce film üretim teknikleri.	33
Şekil 19. Sol-gel yöntem ile Si altlık üzerine ZnO ince filmi biriktirmesi.....	36
Şekil 20. daldırarak kaplama tekniğinin şematiği.....	37
Şekil. 21. Döndürerek kaplama tekniğinin şematiği.....	37
Şekil 22. ZnO kaplamadan önce Si altlığı I-V grafiği ile elektriksel özellikleri gösterilmesi.	41
Şekil 23. Ters ve düz beslemede ZnO-Si hetero eklem fotodiyot I-V karakterizasyonu	42
Şekil 24. n-ZnO/Si hetero-eklem fotodiyotun karanlıkta ve aydınlık altında I-V grafiği	43
Şekil 25. 240 C° sıcaklığında hazırlanan n-ZnO/p-Si heteroekleminin I-V grafiği..	44

Şekil 26. n-ZnO/p-Si heteroeklem tabanlı fotodiyotun yarı logaritmik akım yoğunluğu-Voltaj karakteristiği.....	44
---	----



GİRİŞ

Geçtiğimiz senelerde yarı iletken tabanlı ultraviyole fotodiyotlar çok sayıda araştırmacının ilgisini çekmiştir. Kısa dalga boylu UV bölgesinde çalışan fotodiyotlar, çeşitli ticari ve askeri uygulamalarda kullanılabilecek önemli cihazlardır. Örneğin, görünür kör UV fotodiyotları uzay iletişimde, ozon tabakası izlemede ve alev tespitinde kullanılabilir. Şu anda, UV spektral aralığında ışık algılama hala Si tabanlı optik fotodiyotları kullanılmaktadır. Çinko oksit (ZnO) filmler, dökme akustik rezonatörler, güneş pilleri, elektrolüminesans cihazları vb. Gibi çeşitli elektronik cihazlar için şeffaf iletken elektrot malzemeleri dâhil olmak üzere pratik uygulamalar için kapsamlı bir şekilde çalışılmıştır. ZnO filmleri elde etmek için çeşitli teknikler kullanılmıştır. Bunlara metal organik kimyasal buhar biriktirme, moleküler ışın epitaksisi, darbeli lazer biriktirme, spreyl piroliz ve sol-jel spin kaplama dâhildir. ZnO tabanlı UV fotodetektörler, ZnO'nun doğrudan ve geniş bant aralığı, güçlü UV tepkisi, basit ve düşük maliyetli işlemenin fizibilitesi ve zorlu ortamlarda çalışma kabiliyeti nedeniyle araştırma ve geliştirmede umut verici avantajlar sunmaktadır (Yakuphanoglu, 2010).

Saydam iletken oksitler çinko oksit indiyum, kalay oksit ve kadmiyum oksit gibi ince filmler, görünür bölgedeki yüksek optik geçirgenliklerinden dolayı büyük önem sahiplerdir. Bu filmler, fotovoltaiik güneş pilleri ve optoelektronik cihazlar gibi uygulama alanlarında gaz sensör cihazlarında, şeffaf elektrotlarda ve yarı iletken optoelektronik cihazlarda kullanılmıştır. Genel olarak katkısız ZnO, 3.3 eV'lik bir bant genişliğine, altıgen bir wurtzite yapısına ve düşük taşıyıcı konsantrasyonuna bağlı olarak yüksek direnç sahip n tipi bir yarı iletgendir, ancak iletkenliği, yüksek dirençten yüksek iletkenliğe kadar değişebilen malzemelerle uygun biriktirme işlemi ile uyarlanabilir. ZnO'nun çeşitli nanoyapılarla morfolojisi, benzersiz özellikleri nedeniyle geniş çapta araştırılmıştır. ZnO nanopartikülleri UV ışığını bloke edebilir ve kozmetiklerde, boyalarda ve elyaflarda yaygın olarak kullanılır, ancak oksitlenme ve fotokimyasal reaksiyonlardaki yüksek katalitik aktiviteleri UV bloke edici malzemeler olarak uygulamalarını kısıtlar (Soylu, 2013).

Son zamanlarda, heteroeklem konseptini özümseyen ince film teknolojisi kullanılarak düşük maliyetli fotoelektrik cihazlar üretmek için önemli çalışmalar ortaya konmuştur. Farklı heteroeklem güneş panelleri tipleri arasında p-Si altlık üstünde şeffaf iletken oksit, kolay işlem aşamaları, sade aygıt yapısı, düşük işlem sıcaklığı, az imal maliyeti gibi, bir kaç avantajı bulunmaktadır. Ayrıca, şeffaf iletken katmanlar, ohmik kontaklar, doğrultucu bağlantılar, yansıma önleyiciler ve pasifleştirme katmanı olarak yetkin bir şekilde çalışabilir. Bundan dolayı, bu malzemeleri kullanarak fotoelektrik cihazların imal etmesi, ZnO malzemesi kullanılarak son zamanlarda %10'u aşan verimliliği artırmak ve maliyeti azaltmak için umut verici bir yaklaşımdır. p-si altlık üstündeki yaycılar ve pencereler olarak çok sayıda uygulamalarda kullanılan şeffaf iletken oksitler CdO, SnO, İTO iyi elektriksel iletkenliği ve iyi optik şeffaflığın avantajına sahiptir. Ayrıca nadirlik, pahalılığı, zehirlilik ve zayıf stabilite gibi dezavantajları, çalışmalar daha iyi bir alternatif bulmayı yöneltmiştir. ZnO, oda sıcaklığında göre geniş ve direk bant aralığına (3.3 eV), 60 meV'lik büyük bir bağlanma enerjisine, düşük direnç özelliklerine sahiptir (Chala, 2018).

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Literatür Özeti

Mukhamedshina vd (2017) heteroeklem ZnO / Si güneş hücrelerinde sol-jel yolu ile hazırlanan çinko oksit ince filmlerin n-tipi bir tabaka olarak kullanılmasını ele almışlar. ZnO filmleri, çinko öncüsü olarak çinko asetat dihidrat, çözücü olarak izopropanol ve stabilize edici madde olarak monoetanolamin kullanılarak basit bir spin-kaplama tekniği ile hazırlamışlar. ZnO'nun optik, yapısal ve morfolojik özellikleri, hem cam hem de silikon substratlar üzerinde farklı konsantrasyonlarda sol-jel çözeltilerinden yetiştirilen ince filmler için araştırmışlar. Bu nedenle, optimum film biriktirme koşullarını aydınlatmak için çeşitli çinko asetat dihidrat konsantrasyonlarına karşılık gelen kristalit boyutlarının ve yüzey topolojisi parametrelerinin bir dağılımı elde etmişler. İnce film morfolojisi ile ZnO ince filmlerin yapısal özellikleri arasındaki korelasyon atomik kuvvet mikroskobu çalışmaları esas alınarak yapmışlar. Son olarak, fotovoltaiik cihazlar olarak kullanılmak üzere ZnO / Si heteroekleminin üretimi, karakterizasyonu ve simülasyonu ile ilgili sonuçları sunmuşlar.

Yakuphanoglu vd.(2010) Nano yapılı ZnO/p-Si diiyotun elektriksel ve fotovoltaiik özellikleri araştırmışlar. Nano yapılı ZnO/p-Si diiyot, sol-jel spin kaplama yöntemi kullanılarak imal etmişler. Diiyotun idealite faktörü ve ters doyma akım değerleri akım voltaj grafiği analiz ederek belirlediler. Diiyotun idealite faktörü 3.18 ve bariyer yüksekliği 0.78 eV olarak bulmuşlar. Elde ettikleri n idealite faktörü 2'den yüksektir, bu da diiyotun oksit tabakası ve yüzey durumlarının varlığı nedeniyle ideal olmayan bir davranış sergilediğini gösterir. ZnO'nun nano yapısı, ZnO/p-Si arayüzünün kalitesini artırır. Diiyot, 100 mW/cm² altında maksimum açık devre gerilimi V_{oc} 0,26 V ve kısa devre akımı I_{sc} 1,87×10⁻⁸A ile fotovoltaiik bir davranış göstermiş. Elde edilen elektronik parametreler ile nano yapılı ZnO/p-Si diiyotun bir fotodiyot olduğu değerlendirilmişler.

Al-hardan vd.(2014) p-tipi silikon (p-Si) fotodiyotlar üzerinde çinko oksit (ZnO) nanorodlarını üretip ve hakkında rapor yazmışlardır. Nanorodlar düşük sıcaklıkta hidrotermal süreç ile hazırladılar. İmal edilen fotodiyotlar, 10 V'da 370'lik mükemmel bir doğrultma oranı sergilediğini tespit ettiler. Ultraviyole (UV) fotonlara duyarlılık,

0.29A / W'de 300nm'ye kadar stabildir ve 360nm'de 0.38A / W tepe değerinde bulmuşlar. Ayrıca, hazırladıkları fotodiyotlar, p-Si substratları üzerinde yetiştirilen ZnO nanorodlarının, görünür kör tepkilere sahip UV fotodiyotları olarak kullanılabileceğini gösteren görünür kör davranışı gösterdiğini bulmuşlar.

Xiangping Li vd (2009) ZnO/Si yapılı heteroeklem ışık yayan diyotlar, metal-organik kimyasal buhar biriktirme teknolojisi ile hem yüksek özdirençli (p) hem de düşük özdirençli (p+) Si substratlar üzerinde üretmişler. Her iki heteroekleminin akım-voltaj eğrilerinden oldukça iyi düzeltmeler tespit ettiler. ZnO katmanından ultraviyole (UV) ve mavi-beyaz elektrolüminesans (EL), oda sıcaklığında (RT) ileri önyargı altında sadece ZnO/p+ -Si heteroekleminde gözlenirken, Si substratlarından güçlü kızılötesi (IR) EL emisyonları her ikisinden de tespit etmişler. ZnO/p-Si ve ZnO/p+ -Si heteroeklemler. UV ve IR EL mekanizmaları, enerji bandı yapıları ile açıkladılar. RT EL'nin UV-görünür ve IR bölgesinde Si substrat üzerinde gerçekteştirilmesi, Si tabanlı optoelektronik bütünleşmiş devreler için büyük uygulanabilir potansiyele sahip olduğunu sonuca vardılar.

F. Z. Bedia vd (2014) ZnO ince filmleri 550C°'de spreylendirilmiş ZnO / p-Si heteroekleminin oluşturmak için Si substratları üzerine biriktirmişlerdir. Filmlerin morfolojisi ve elektriksel özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve I-V ölçümleri ile gerçekteştirmişler. Karanlıkta ve aydınlatma altında oda sıcaklığında ölçüştükleri n-ZnO / p-Si heterojunction cihazının akım-voltaj karakteriştiği (lambda / 160 W). P-N hetero-yapısının akım-gerilim (I-V) karakteriştikleri doğrusal olmayan diyot benzeri davranış gözlemlediler. İdealite faktörünü 5.12 ve doyma akımını 8.01×10^{-8} mA olarak hesapladılar. İdealite faktörü 2'den yüksektir, bu da diyotun oksit tabakası ve yüzey durumlarının varlığı sebebiyle ideal olmayan bir davranış sergilediğini tespit ettiler. Heteroeklem, güç (160W) lamba aydınlatması altında büyük fotoelektrik etki gösterdiğini fark ettiler. Güneş pili için fotoakım tepkileri tespit etmişler. Güneş pili, 6mV açık devre voltajı olan 4×10^{-3} mA kısa devre akım yoğunluğu sergiledi. ZnO / Si heteroeklem güneş pillerinin performansını iyileştirmek için doping çalışmaları ve birleşme morfolojisinin ince ayarlanması gerekli olacağını sonuca varmışlar.

Romero vd (2004) Tek kristalli n-tipi ve p-tipi mono kristal silikon(1 0 0) substratlar üzerinde kimyasal spreylendirme yöntemi ile n-ZnO/c-Si heteroeklemleri elde etmişler ve elektriksel, yapısal ve bileşimsel özellikleri C-V yöntemi ve giriş spektroskopisi ile incelemişler. 223 K ve 373 K arasındaki sıcaklık aralıklarında. n-ZnO/c-Si heteroeklemleri, Si ve ZnO'nun iş fonksiyonlarının enerjisindeki farkla tutarlı bir yükseklik bariyeri gösterdiğini gözlemlediler; bununla birlikte, n-ZnO: Al/c-Si heteroeklemleri, n-ZnO:Al/c-Si ara yüzündeki veya yakınındaki kusurlar nedeniyle daha karmaşık bir davranış sergiler ve Fermi enerji pinlenmesine neden olduğunu tespit etmişler. Durum ölçümlerinin yoğunluğu, kullanılan enerji aralığı boyunca olağan durum kuyruğu eğrisini gözlemlemişler. $(G - GD)/\omega$ tepelerinin doğasından, bunların dar kusurlu enerji seviyeleri ile ilişkili olabileceği sonucuna vardılar; ayrıca, yüksek arayüz yoğunluğu nedeniyle, durumlar arasında önemli bir iletişim olduğu varsayarak rapor etmişler.

Slimane Chala vd (2018) ZnO ince film sol-jel spin-kaplama tekniği ile elde etmişler. Bu film kullanılarak bir ZnO/p-Si heteroyapı güneş pili gerçekleştirmişler ve performansının (verimliliğinin) oldukça düşük olduğu bulmuşlardır. Film optik ölçümler kullanılarak karakterize etmişlerdir. Simülasyonda kullanılacak ZnO filminin optik sabitleri, geçirgenlik ve yansıtma spektrumlarından analiz edilerek araştırmışlar. Silvaco ATLAS yazılımını kullanarak sayısal bir simülasyon, ZnO / p-Si heteroeklem güneş pilini modellemek ve zayıf fotovoltaiik verimliliğini aydınlatmak için kullanmışlar. Birkaç olası neden göz önünde bulundurmışlardı. Bu araştırmada yarı iletkenin kusurların olması ve heteroeklem bağlantı noktalarındaki re-kombinasyon sürati tesiri. Tahmin ettikleri gibi, incelenen parametrelerin esas olarak fotovoltaiik performansı etkilediği bulmuşlardır. Deneysel elde edilen değerlere nazaren simülasyondan alınan verileri bakarak olumlu karşılaştırma hakkında rapor ettiler. Bu değerler, güneş pilinin simüle edilmiş ve ölçülen JV özellikleri arasında iyi bir anlaşma sağladığını sonuca vardılar.

Jeong vd (2003) n-ZnO/Si ultraviyole görünür fotodiyot üretmişlerdir. Tükenmiş n-ZnO'daki UV fotonlarını algılayan ve aynı zamanda tükenmiş p-Si'deki görünür fotonları algılayan n-ZnO/p-Si fotodiyotların fotoelektrik özelliklerini rapor ettiler. Biriktirme sıcaklığı 480 °C idi ve biriktirilen filmlerin kalınlıkları, $4\text{He}^{12} \text{ 2 MeV}$ Rutherford geri saçılma spektrometrisi ile ölçüldüğü üzere tipik olarak 180 nm idi. n-

ZnO filmlerine omik temaslar için, 100 nm kalınlığında bir Au-Al alaşımı atomik oranı 3:1! elektrot, oda sıcaklığında termal buharlaştırma ve ardından N₂ ortamında 300 °C'de 2 dakika boyunca hızlı termal tavlama ile bir gölge maskesi ile ~ n-ZnO yüzeyinde desenlediler. p-Si'nin arka tarafına geniş alanlı ohmik kontaklar için indiyum pasta uyguladılar. Fotoakım ve karanlık akım, yarı iletken bir parametre analizörü ~Model HP4145B, Hewlett-Packard! Kullanarak üretilmiş diyotlar için ölçülmüştür. Spektral ~ foto-duyarlılık ölçümleri, bir ışık kaynağı ~Oriental Optical System! Kullanarak yapmışlardır! bir 500 W ~ Hg~Xe!-ark lambası ve 310 ila 670 nm aralığını kapsayan bir monokromatör kullanan. Cihaz penceresi ~2 mm çapında fiber optik ile aydınlatıldı! Seçilmiş ve ayarlanmış monokromatik ışığı taşıma Gelen ışığın optik gücü, UV ile güçlendirilmiş bir Si dedektörü ile ölçüldü. 310 ila 650 nm foton aralığında I-V ölçümleri ile karakterize ettikleri gibi, UV fotonlarına maruz kalan fotodiyotları ters önyargı ile fotoakımda doğrusal bir artış gözlemlediler. Görünür aralıkta, fotoakım yanlılıkla hızla yükselir ancak kritik bir voltajın ötesinde doygun hale gelir. Diyotları UV ~310-nm için 0,5 ve 0,3 A/W'lik güçlü tepkiler sergiler! Ve kırmızı ~650-nm! Fotonlar, sırasıyla, 380 nm'ye yakın zayıf bir minimum ile 30 V'luk bir önyargı altında, dalga boyu ZnO'nun bant aralığına karşılık gelir. N-ZnO/p-Si diyotun, paralel olarak iki ilgili fotoelektrik mekanizma kullanarak UV ve görünür fotonları aynı anda algılayan UV ile geliştirilmiş bir fotodiyot olabileceği sonucuna varmışlardır.

J.Y.Lee vd (2002) n-ZnO/p-Si heteroeklemli fotodiyotlar, n-ZnO filmlerinin p-Si altlıklar üzerine püskürtülerek biriktirilmesiyle üretmişlerdir. 6:1'lik bir Ar/O₂ oranı kullanılarak n-ZnO film biriktirme için 300°C, 400 °C, 480 °C ve 550°C lik altlık sıcaklıkları aldılar. p-tipi (10 Vcm) Si (100) gofretler, heteroeklem ZnO/Si diyotları için substrat olarak kullandılar. Si (100) gofretler 1.5 cm'ye 1.5 cm'lik parçalar halinde kesmişlerdir. Biriktirmeden önce, gofretler, doğal oksidi çıkarmak için 1 dakika boyunca tamponlu oksit aşındırıcıya (HF/H₂O₂ s1:7) daldırıldı. Daha sonra örnekler kaynayan aseton, etanol ve deiyonize su ile 10 dakika ultrasonik olarak temizlediler. Son olarak gofretler deiyonize su ile duruladılar ve ardından nitrojen tabancası ile üflenerek kurutmuşlar. ZnO filmleri, 5 cm çapında (%99.9 saflık, Kurt J. Lesker Co.) 0,6 cm kalınlığında preslenmiş çinko oksit hedefi kullanılarak bir RF magnetron püskürtme sistemi ile biriktirdiler. Altlık tutucu hedeften 80 mm uzağa yerleştirdiler.

Oda, altlık ısıtılmadan önce 1=106 torr'luk bir taban basıncına boşaltmışlardır. ZnO filmleri, 300, 400, 480 ve 550 C° 'lik farklı altlık sıcaklıklarında, 10 mtor'luk bir çalışma basıncında Si alt tabakalar üzerinde biriktirildi. 6:1 Ar/O₂ oranında biriktirilen ZnO filmlerinden elde ettikleri X-ışını kırınım (XRD) spektrumları. Substrat sıcaklığı arttıkça, polikristal ZnO'daki (002) kırınımı giderek keskinleştiğini tespit ettiler. XRD spektrumlarına göre, (002) tepe noktasının FWHM (Yarı Maksimumun Tam Genişliği) çökelme sıcaklığıyla azalır, yani c eksenine yönelimli doku tanesi sıcaklıkla birlikte boyut olarak arttığını gözlemlediler. PL spektrumlarına göre UV emisyonu sadece 550 C° 'de biriktirilen ZnO filminden gözlemlenmişler ve 400 ve 480 C° 'de hazırlanan numuneler, ZnO'nun tane sınırı ile ilgili kusurların neden olduğu 430 nm'ye yakın geniş bir tepe gösterir. UV emisyonunun görünümü, 550C° de hazırlanan numunenin tüm numuneler arasında en iyi stokiometrik kaliteye sahip olduğunu rapor ettiler. Hall ölçümlerinin sonuçları, PL deneylerinin sonuçlarını bir dereceye kadar desteklediğini tespit etmişlerdir. Biriktirme sıcaklığı arttıkça, ZnO'nun elektrik direnci 0,43 Vcm'ye kadar çıkarken elektron konsantrasyonu sıcaklıkla azalır. Yüksek öz direnç, ZnO numunesinin n-tipi iletme neden olan az miktarda oksijen boşluğu içerdiği anlamına geldiğinden, 550C° de hazırlanan filmin stokiometride en kaliteli numune olması sonuca vardılar. 480 C° nin altındaki sıcaklıklarda elde edilen n-ZnO'lu diyotların çok daha az miktarda fotoakım ürettiği de belirtmişlerdir. Genel olarak, fotoelektrik etkilerin, n-p kavşağında ve özellikle p-Si'nin tükenme alanında ışığa bağlı elektron deliği oluşumundan kaynaklandığı anlamışlardır. Işığın p-Si'ye sınırlı penetrasyon derinliği nedeniyle, fotoakımlar normalde iyi n-ZnO\p-Si fotodiyodunun I-V eğrisinde gösterildiği gibi birkaç volt ters önyargı ile doyulduğunu tespit ettiler. Yukarıda bahsettikleri genel anlayışa dayanarak, 300 ve 400 C° 'de elde edilen n-ZnO'lu diyotların, kırmızı ışık altında üretilen elektron deliği çiftlerine sahip olmaları etkili olmadığını belirtmişlerdir. Özellikle 300 C° 'de hazırlanmış bir n-ZnO'ya sahip diyot, fotoelektrik etkilerden neredeyse hiç iz göstermez. Bunun nedeni muhtemelen kalitesiz filmlerin o kadar kusurlu olduğunu düşünüyorlar ki, büyük miktarda gelen ışık, p-Si'nin tükenmiş bölgesine ulaşmak için film boyunca iletilemeyebilir olmasını rapor ettiler. 550 C° 'de biriktirilen ZnO filmleri, daha düşük sıcaklıklarda biriktirilen diğer filmler arasında en iyi stokiometrik ve kristal kaliteyi gösterse de, diyotun birleşme kaçığı veya karanlık akımı, diğer diyotlardan çok daha yüksektir. Bu nedenle,

bir fotodiyot için diyet bağlantısının kalitesinin, p-Si üzerinde biriken n-ZnO filminin kalitesi kadar önemli olduğu sonucuna varmışlardır.

Kumar Singha vd (2019) İlk olarak, p-Si/n-ZnO ince film hetero-bağlantısını üretmek için n-ZnO Sol hazırladılar ve spin kaplama tekniği ile p-Si substratı üzerine çöktürdüler. Daha sonra Al/Ti ve Al'nin geniş alanlı metal kontakları, Al/Si/ZnO/Ti/Al heteroeklem diyotu hazırlamak için sırasıyla n-ZnO ve p-Si yüzeyinde biriktirmişlerdir. Diyetun ters doyma akımı, idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnç gibi elektriksel parametreleri, karanlık durumda 298 K–573 K sıcaklık aralığında ölçülen akım-gerilim özelliklerinden çıkarmışlar. Beklendiği gibi, heteroeklem diyotun I-V karakteristiğinden elde edilen elektriksel parametreler sıcaklığa çok duyarlı olduğunu tespit etmişlerdir; bu nedenle Si/ZnO heteroekleminin gerçek elektriksel davranışını göstermek için değiştirilmiş Richardson sabiti, tünelleme faktörü, sıfır yanlılık bariyer yüksekliği ve ortalama bariyer yüksekliğini hesaplamak için heteroeklem bariyer arayüzünde tuzak destekli tünelleme ve özel bariyer homojensizlikleri kavramını dahil etmişlerdir.

ZnO ince filmi büyütmek için önce ZnO sol hazırladılar ve daha sonra spin kaplama tekniği kullanılarak p-Si (100) altlık üzerine biriktirmişler. Şeffaf ve homojen bir ZnO solunu hazırlamak için öncü malzeme çinko asetat dihidrat ($ZnCH_3(COO)_2 \cdot 2H_2O$), etilen glikol monometileter çözücü içinde çözündürüldü ve 323 K sıcaklıkta 3 – 4 saat manyetik karıştırıcıda karıştırmışlardır. Karıştırma sırasında, çözeltiye stabilizatör olarak monoetanolamin ilave ettiler. Daha sonra sol, yaşlandırma için en az 24 saat oda sıcaklığında bir kenara bırakmışlardır. Bir sonraki adımda, hazırlandığı gibi ZnO sol, döndürmeli kaplama tekniği kullanılarak RCA ile temizlenmiş p-tipi Si substratı üzerinde biriktirmişler. Döndürerek kaplama sırasında kullanılan optimize edilmiş parametreler Tablo 1'de gösterdiler.

Tablo 1. ZnO çözeltisi hazırlarken ve döndürerek kaplarken kullanılan parametreler

Optimize İşlem Parametreleri	
Kaynak malzeme	Çinko asetat dihidrat
Çözücü	Etilen glikol monometileter
Sabitleyici	monoetanolamin
Film kalınlığı	300 nm
Spin kaplayıcı hızı ve süresi	25saniye için 2500 devir\dk
Alt tabaka için ön ısıtma sıcaklığı	373 K
Isıtma sonrası sıcaklık ve süre	Her döngüden sonra 20 dakika 373 K
İşlem tekrar numarası	İstenilen kalınlığı elde etmek için 8-10 kez
Isıl işlem sonrası sıcaklık ve süre	773 K açık hava ortamında 1 saat

İnce filmlerin hazırlanmasından sonra, organik bileşenleri ayrıştırmak ve daha iyi kristalizasyon ile stabil film elde etmek için ısıl işlem sonrası gerçekleştirmişler. Sentezlenmiş ZnO filmlerinin yüzey morfolojisi ve kristal yapısı hakkında detaylı bilgi almak için alan emisyon taramalı elektron mikroskobu (FESEM: CARL ZEISS), enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX: OXFORD INSTRUMENTS) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM: Agilent 5500 SPM) ve X-ışını kırınım spektroskopisi (XRD: Rigaku SmartLab) ölçümü yaptılar.

Al/Si/ZnO/Ti/Al hetero-eklem diyotu imal etmek için 13.56 MHz'de RF magnetron püskürtme ve 6.051×10^{-6} mBar basınç kullanılarak ZnO / p-Si ince film heteroyapı üzerine ohmik kontaklar biriktirdiler. Aluminyum/Titanyum'un (Al/Ti) sırasıyla 1 mm çapında ve 80 nm ve 20 nm kalınlığında geniş alanlı dairesel ohmik kontakları, gölge-maske tekniği ve bir katman yardımıyla numunenin ZnO yüzeyinde biriktirmişlerdir. 100 nm kalınlığında Al, arka temas olarak çalıştırmak üzere Si yüzeyinde biriktirmişlerdir. Burada, üst temas için, Al'nin ZnO film ile oksidasyonunu önleyerek, geliştirilmiş temas stabilitesi için bariyer malzemesi olarak Ti kullandılar. İmal edilen cihazı, metal yüzeyinin pasivasyonu için metalizasyon sonrası tavlamaya tabi tutmuşlardır. Diyotun akım-voltaj özellikleri, temel elektrik parametrelerini çıkarmak ve bariyer homojensizliklerinin varlığında akım taşıma mekanizmasını ayrıntılı olarak

incelemek için 298 K– 573 K sıcaklık aralığında yarı iletken parametre analizörü kullanılarak ölçümleri almışlardır.

W. Chebil vd (2015) ZnO ince filmler, [100] yönelimli, kazınmış silikon ve gözenekli Silikon ile p-tipi kristal silikon (Si) üzerinde sol-jel tekniği ile biriktirmişlerdir. Yapısal analizler, elde ettikleri ince filmlerin altıgen bir wurtzite yapısına sahip polikristal olduğunu ve tercihen c eksen yönü boyunca yönlendirildiğini göstermiştir. Morfolojik araştırma, bütün numunelerin üst düzeyine rastgele bulunmuş daire şekilli ve yönlü taneler olduğunu açıklar. Oda koşullarındaki fotoluminesans spektrumları gözenekli silikon üstünde biriktirilen ZnO ince filmi plat silikon ve kazınmış silikon üstünde biriktirilen ZnO ince filmler göre görünür alanda az kusurlarla iyi güçle ultraviyole emisyonları tespit ettiler. Heteroeklem parametreleri oda sıcaklığında karanlık ve aydınlık altında (I-V) 'den değerlendirmişler. Farklı p-Si substratlarında yetiştirilen hetero-eklemin idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnci farklı yöntemler kullanılarak belirlendiler. Gözenekli silikon üzerinde biriken ZnO tabakası için en iyi elektriksel özellikler elde edilir sonuca vardılar.

Bor katkılı Si (100) substratların ($1^{-10} \Omega \text{ cm}$) öz dirençle elektrokimyasal anodasyon işlemi ile gözenekli bir silikon (p-Si) tabakası hazırladılar. Anotlama, oda sıcaklığında 3 mA/cm^2 sabit akım yoğunluğu altında 1:1 oranında hidroflorik asit HF ($[\text{HF}] = \%36$) ve etanol (HF: $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) karışımı içinde gerçekleştirmişlerdi. Dağlama çözeltisi için düşük konsantrasyonda hidroflorik asit homojen bir gözenekli tabaka elde edilmesine sağlar. Kazınmış silikon yüzeyinin hazırlanması için, gözenekli silikon substrat, gözenekli silikon tabakasını parçalamak ve sağlam bir yüzey üretmek için NaOH çözeltisi içinde dağlanmıştı. İşlemden sonra, tüm substrat yüzeyleri 5 dakika deiyonize su ile durulanmışlardır ve nitrojen gazı akışı (N_2) altında kurutmuşlardır.

Keskenler vd (2019) Sol-jel yöntemi ile çok katmanlı sandviç cihaz biriktirme için p-Si altlıkları üzerinde n- ZnO ince filmler elde etmişlerdi. Au ve Al, fiziksel buhar biriktirme tekniği ile hetero-eklemi iki tarafında gerçekleştirdiler. X-ışını kırınım paterninden, güçlü (002) bir yön gözlemlendiler, bu da filmin altıgen doku olduğu anlamına gelir. Taramalı elektron mikroskopundan elde ettikleri kesit görüntüsü, kaplanmış ZnO filmlerinin $\sim 427 \text{ nm}$ kalınlığa sahip olduğunu gösterdi. İdealite faktörü 1.4 olarak hesaplamışlardır. Arayüz yapısının homojenliğinden dolayı idealite

faktörünün bire yakın olması diyotun ideale yakın bir karakterizasyon sergilediğini tespit ettiler. Bariyer yüksekliği 0,54 eV olarak buldular.

1. 2. Kuramsal Temelleri

1.2.1. Yarıiletkenler

Elektriksel iletkenlik (σ) veya özdirenç ($\rho = 1/\sigma$) göreceli değerleri temelinde, katılar genel olarak şu şekilde sınıflandırılır:

(i) Metaller: Çok düşük dirençliliğe (veya yüksek iletkenliğe) sahiptirler.
 $\rho \sim 10^{-2} - 10^{-8} \Omega \text{ m}$ $\sigma \sim 10^2 - 10^8 \text{ S m}^{-1}$.

(ii) Yarıiletkenler: Metallere ve yalıtkanlara karşı direnç veya iletkenliğe sahiptirler. $\rho \sim 10^{-5} - 10^6 \Omega \text{ m}$ $\sigma \sim 10^5 - 10^{-6} \text{ S m}^{-1}$.

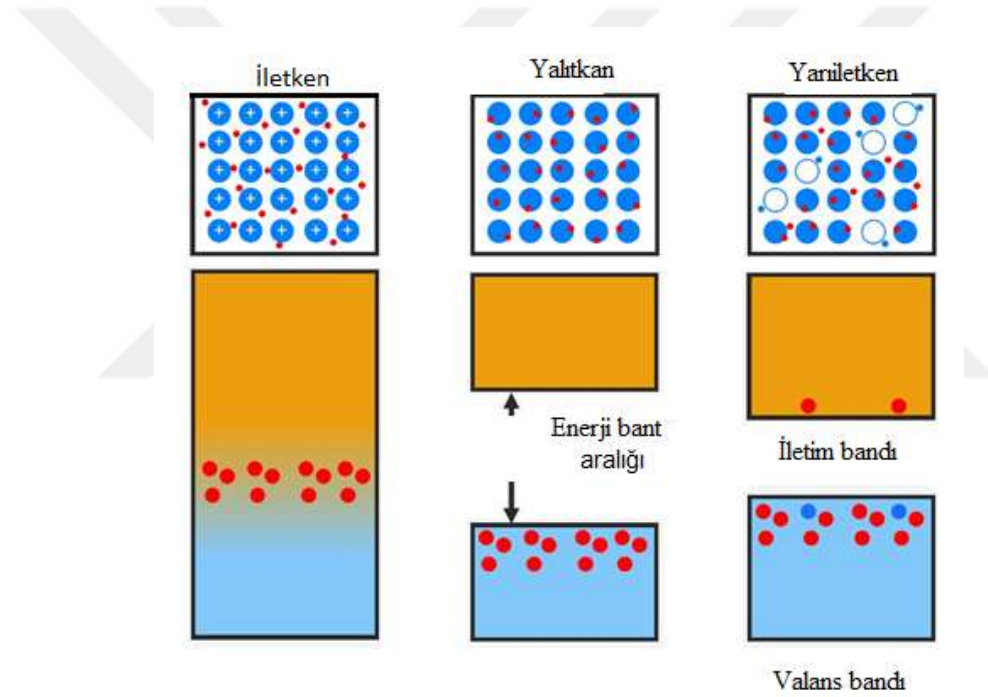
(ii) Yalıtkanlar: Dirençleri yüksektir (veya iletkenlikleri düşüktür).
 $\rho \sim 10^{11} - 10^{19} \Omega \text{ m}$ $\sigma \sim 10^{-11} - 10^{-19} \text{ S m}^{-1}$.

Yukarıda verilen ρ ve σ değerleri büyüklük göstergesidir ve aralıkların dışına da çıkabilir. Metalleri, yalıtkanları ve yarı iletkenleri birbirinden ayırt etmek için nispi direnç değerleri tek kriter değildir (URL1, 2021).

Yarı iletkenler, iletkenler (genellikle metaller) ile iletken olmayanlar veya yalıtkanlar (çoğu seramik gibi) arasında iletkenliğe sahip malzemelerdir. Yarı iletkenler, silikon veya germanyum gibi saf elementler veya galyum arsenit veya kadmiyum selenit gibi bileşikler olabilir. Doping adı verilen bir işlemde, saf yarı iletkenlere küçük miktarlarda safsızlıklar eklenir ve bu da malzemenin iletkenliğinde büyük değişikliklere neden olur. Elektronik cihazların üretimindeki rolleri nedeniyle yarı iletkenler hayatımızın önemli bir parçasıdır. Elektronik cihazlar olmadan bir hayat hayal edilmesi bile çok zor. Radyolar, TV'ler, bilgisayarlar, video oyunları olmayacaktı. Vakum tüp teknolojisi kullanılarak birçok elektronik cihaz yapılabilse de, son 50 yılda yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler elektronik cihazları daha küçük, daha hızlı ve daha güvenilir hale getirdi (URL 2, 2022).

Metallar gibi iyi iletken olmayan aynı zamanda cam gibi yalıtkanlar olmayan katı malzemelerdir. Fakat kristal yapıları var, oda koşullarında düşük miktarda bağımsız elektron ihtiva ederler. İletkenler ve yalıtkanlar arasında uzanan dirençleri ve enerji

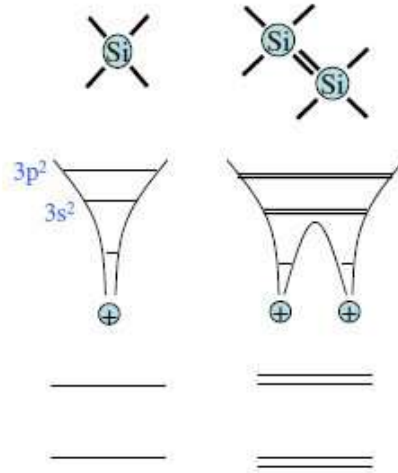
bant aralıkları vardır. İletkenlikleri yalıtkanların daha fazla, iletkenlerinden azdır (Rahman, 2014). Şekil 1 yalıtkanların, yarı iletkenlerin ve iletkenlerin (metallerin) enerji bant aralığını açıklar (Özcan, 2014). Yarıiletkenler oda sıcaklığında bir yalıtkan gibi davranırlar ancak metalin davranışının aksine sıcaklık arttıkça elektriksel iletkenlikleri artar. Yeni elektronik sanayisinde hayati görev alan yarı iletkenler transistör, güneş panelleri, farklı diyotların tipleri lojik devreler gibi hassas ve küçük hacimli aygıtlar temelidir. Kuantum fiziği prensibine göre yarı iletken malzemelerin özellikleri açıklayan yeni anlayışı, kristal içindeki yük taşıyıcıların(elektron, delik) hareketidir. Yarı iletken malzemeler ve üretim süreçleri hakkında artan bilgi, mikroişlemcilerin karmaşıklığı ve hızında sürekli ilerlemeyi mümkün kılmıştır.



Şekil 1. İletken, yalıtkan ve yarıiletken malzemedeki değerlik ve iletim bantı

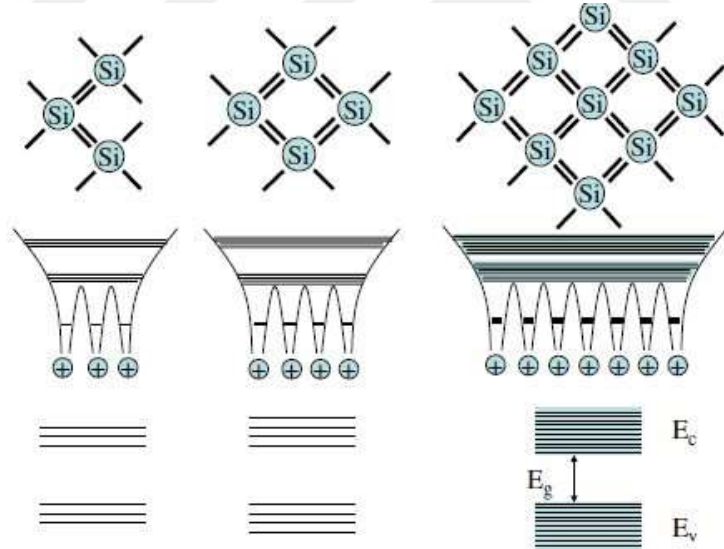
1.2.1.1 Yarıiletkenlerde Enerji Bantlarının Oluşumu

Yarıiletkenlerde bant yapısının oluşumunu silikon atomlarının kristali oluşturmak için bir araya getirerek açıklanabilir



Şekil 2. Az sayılı Si atomları bir araya gelerek kristal oluşması.

Tek Si atomunun 3s ve 2p yörüngeleri yarım doludur. Bir Si atomunun yanına başka bir Si geldiğinde 3s ve 3p yörünge enerjileri ikiye bölünür ve diğer, alt alt yörüngeler (2s ve 2p) tersine bu yörüngeler her iki atoma aittir. (Sarı, 2008)



Şekil 3. Çok sayılı Si atomları bir araya gelerek kristal oluşması.

Si atomlarının sayısı artınca 3S ve 3P yörünge enerjileri atom sayısı kadar bölünmeye uğrar ve bu yörünge enerjileri bütün atomlara aittir. Bir araya gelen atom sayısı arttıkça (kristal) S ve P yörüngeleri Avagadro sayısı kadar yarılmaya uğrar ve artık kesikli enerjilerden oluşan sürekli bir enerji aralığı (bant) oluşur. S ve P yörüngelerini yarılmaları ile oluşan enerji bantları arasında kalan bölge ise yasak enerji aralığıdır. (Sarı, 2008)

E_c : İletim Bandı

E_v : Değerlik Bandı

E_g : Yasak Bant

İletim bandındaki en düşük enerji seviyesi E_C , değerlik bandındaki en yüksek enerji seviyesi ise E_V olarak gösterilmiştir. E_C 'nin üstünde ve E_V 'nin altında çok sayıda yakın aralıklı enerji seviyesi vardır. Değerlik bandının üstü ile iletim bandının altı arasındaki boşluğa enerji bandı aralığı (Enerji boşluğu E_g) denir. Malzemeye bağlı olarak büyük, küçük veya sıfır olabilir (Sarı, 2008). Yarı iletken aygıtlar elektrik akımının yönüne doğrultma yapıyor (yani bir yönde geçmesine karşısında diğer yönüne göre daha çok direnç göstermesi), ısı ve ışık karşı hassasiyet ve sabit olmayan direnç gibi avantajları sunabilir. Yarı iletken maddelerin iletkenlikleri ve diğer elektriksel özellikleri katkılama yaparak veya ışık ya da elektrik alanı uygulanarak değiştirme imkânından dolayı, yarı iletkenlerden üretilen aygıtlar büyütme ve anahtarlama gibi işlevler için kullanılabilir. Bir yarı iletkendeki akım iletimi, toplu halinde yük taşıyıcıları olarak bilinen serbest elektronların ve "deliklerin" hareketi yoluyla gerçekleşir. Yarı iletken maddelere safsızlık atomları ecekte etmek işlemine "doping" denir. Bu işlem yarı iletken içindeki elektron ve deliklerin sayısının büyük miktarda artırır. Eğer serbest elektronların sayısı deliklerinden daha çok ise katkılı madde "n-tipi" yarı iletken denir, aynı şekilde eğer serbest deliklerin sayısı daha çok ise bu sefer "p-tipi" yarı iletken denir. Elektronik cihazlarda kullanılan yarı iletken malzemeler, p ve n tipi katkı maddelerinin yerini ve konsantrasyonunu kontrol etmek için kesin koşullar altında katkılama yapılır (Rahman, 2014).

Bir tane yarı iletken kristal birden fazla p ve n bölgeler bulunabilir ve arasındaki p-n ara yüzleri yararlı elektronik özelliklerinden sorumludur. Bazı saf elementler ve birçok bileşik yarı iletken özellikler gösterse de; silisyum, germanyum ve galyum bileşikleri elektronik cihazlarda en yaygın olarak kullanılanlardır. Yarı iletken özelliklere sahip çok sayıda element ve bileşik, grup IV veya 1-4'ün belirli saf elementlerini içerir. En son orbitallerinde aynı zamanda eşit bir şekilde elektron kapma yâda kaybetme kabiliyeti veren 4 değerlik elektron bulunmaktadır. Başkaları ikili bileşiklerden ibarettir. Özellikle üçüncü ve beşinci grup elementleri (indiyum ve fosfor gibi) ,ikinci ve altıncı grup, dördüncü ve altıncı grup ve farklı dördüncü grup elementleri (silisyum karbür gibi). Organik bileşiklerden yüksek oranda karbon malzemelerden imal edilmiş organik yarı iletkenler de bulunmaktadır. En yaygın yarı iletken malzemeler kristal katılardır ancak amorf ve sıvı yarı iletkenler de bilinmektedir. Hidrojene amorf silikon ve çeşitli oranlarda arsenik, selenyum ve tellür karışımları bilinen amorf yarı iletkenler

arasındadır. Bu bileşikler, daha iyi bilinen yarı iletkenlerle, ara iletkenliğin özelliklerini ve sıcaklıkla hızlı bir iletkenlik değişiminin yanı sıra ara sıra negatif direnci paylaşır. Bu tür düzensiz malzemeler, geleneksel yarı iletkenlerin gibi katı kristal yapısına sahip değildir. Sıklıkla, çok kaliteli elektronik maddelere ihtiyaç duymayan kirliliklere ve radyasyon zararına karşı bir dereceye kadar hassasiyeti olmayan ince film bünyesinde kullanılır. Günümüzde yarı iletken malzemeler modern teknolojinin her sektöründe kullanılmaktadır.

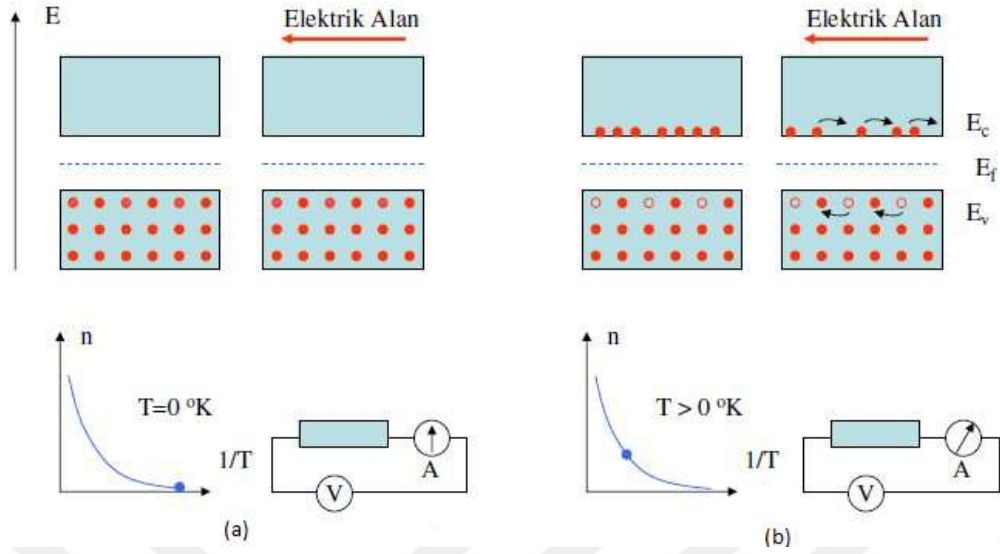
1.2.1.2 Yarı İletkenlerin Sınıflandırılması

Yarı iletkenler genel olarak içsel yarı iletken ve dışsal yarı iletken olarak sınıflandırılabilir. İç yarı iletkenler ayrıca saf veya katkısız elementler (Si, Ge) olarak ifade edilebilirken, dış yarı iletkenler, aksi halde safsızlıklar olarak adlandırılan diğer malzemelerle katkılanır ve n-tipi veya p-tipi olabilirler.

1.2.1.2.1 İçsel (Özgün)Yarı İletken

Gerçek bir yarı iletken, çok saf bir yarı iletken malzeme veya Şekil 2'de gösterildiği gibi iletkenlik bandındaki delik sayısının elektron sayısına eşit olduğu bir malzeme olarak görülebilir. Bu tür yarı iletkenlerdeki yasak enerji aralığı çok küçük ve çok küçüktür (Terna, 2021).

Kristal yapısında, her Si veya Ge atomu, dört değerlik elektronundan birini en yakın dört komşu atomun her biriyle paylaşma ve ayrıca bu tür her bir komşudan bir elektron payını alma eğilimindedir. Bu paylaşılan elektron çiftleri, bir kovalent bağ veya basitçe bir değerlik bağı oluşturma olarak adlandırılır. Paylaşılan iki elektronun, onları güçlü bir şekilde bir arada tutan ilişkili atomlar arasında gidip geldiği varsayılabilir. Özgün yarı iletkenlerde bağımsız elektronların sayısı boşlukların sayısına eşittir (URL1, 2021).

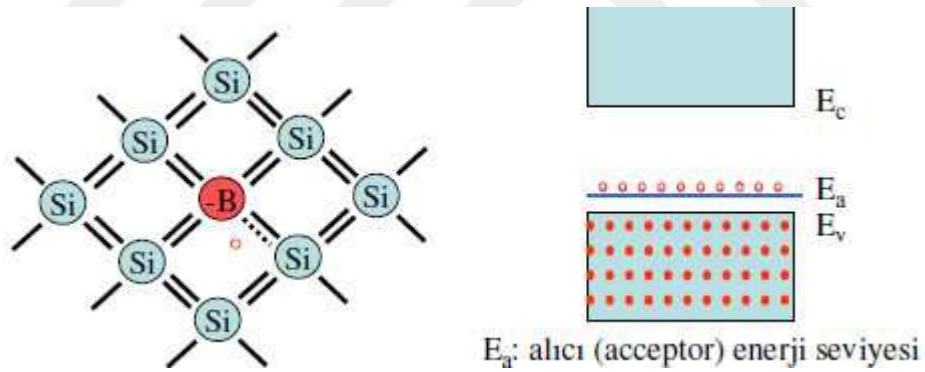


Şekil 4. Saf (içsel) yarı iletkende sıcaklığa bağlı elektriksel davranışı.

Oda sıcaklığında mevcut olan enerji bile değerlik elektronlarının iletim bandına sıçraması için yeterlidir. İçsel bir yarı iletkenin bir başka karakteristik özelliği, bu tür malzemelerin Fermi seviyesinin, değerlik bandı ile iletim bandı arasında bir yerde bulunmasıdır. Gerçek bir yarı iletkene potansiyel bir fark uygulanırsa, elektronlar pozitif terminale doğru hareket ederken delikler negatif terminale doğru sürüklenecektir. Yarı iletken içerisindeki elektriksel akımın toplamı, bağımsız yük taşıyıcının hareketlerinden kaynaklanan akımın toplamıdır. Yarı iletkenin yük taşıyıcının sayısı sıcaklığı ile doğru orantılıdır yani sıcaklığı artarsa, delik elektron çiftlerinin sayısı artar ve yarı iletkenden geçen akım artar. Sıcaklık düşerse, tersi olur Başka bir tabir ile iletkenliği sıcaklığa bağlıdır (Terna, 2021). Şekil(4,a) açıkladığı gibi bir saf (içsel) yarı iletken sıfır Kelvin sıcaklığında iletkenliği yalıtkan kadar düşük olur ama Sıcaklığı sıfır kelvinin üzerine çıktığı zaman, bir miktar değerlik bandı elektronu, kovalent bağı kırmak ve iletim bandına atlamak için yeterli termal enerji kazanabilir ve yerlerine eşit miktarda delik bırakıyor değerlik bandında şekil(4,b) gösterdiği gibi (URL1, 2021) (Sarı, 2008).

1.2.1.2.2 Dışsal (Katkılı) Yarı İletken

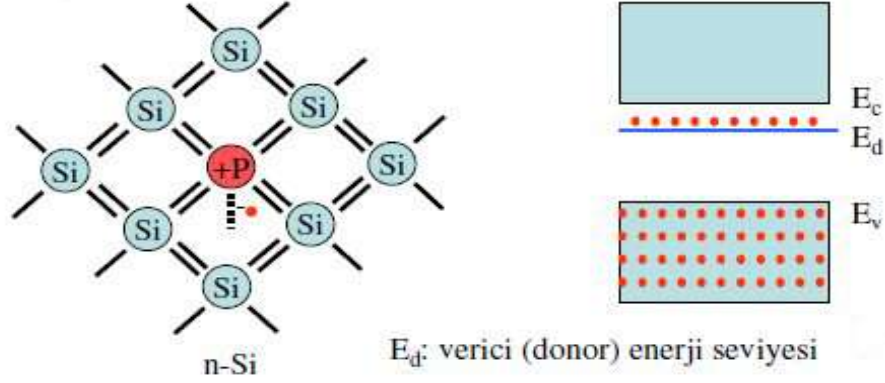
Yukarıda bahsedildiği gibi içsel yarı iletkenlerin iletkenliği sıcaklığına bağlıdır, ancak oda sıcaklığında yalıtkanlar gibi davranış göstermektedir. Bundan dolayı çok önemli elektronik cihazların geliştirmesinde kullanılmazlar. Bu yüzden iletkenliklerini iyileştirme mecburiyeti vardır. Bu da Safsızlıklar kullanılarak yapılabilir, Saf yarı iletkene küçük bir miktar safsızlık eklendiğinde, yarı iletkenin iletkenliği artar. Bu tür malzemeler, dışsal yarı iletkenler veya katkılanmış yarı iletkenleri olarak bilinir. Değerlik bandında 3 elektronlu element silisyum gibi 4 elektronlu temel malzemenin kristal kafes içine safsızlık olarak eklendiğinde p-tipi yarı iletken meydana gelir. Aynı mantıkla 5 değerlik elektronlu element safsızlık olarak eklendiğinde n-tipi yarı iletken oluşur. Şekil 5te (Sarı, 2008) B gibi üç değerlikli atom, dört değerlikli atoma sadece üç elektron bağışlayarak bir elektronla doldurulacak bir deliği dışarıda bırakır. Bu, elektronlardan daha fazla deliğe neden olur ve buna p-tipi yarı iletken olarak bilinir. Bu nedenle delikler p-tipi yarı iletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları iken elektronlar azınlık taşıyıcılarıdır (Rahman, 2014).



Şekil 5. p-Si yarı iletken gösterimi.

Diğer yandan Şekil 6'teki (Sarı, 2008) fosfor gibi beş değerli katkı maddelerinin kristal yapıda kovalent bağ için gerekli olmayan fazladan bir elektron vermesi durumunda elektron iletim bandına kaydırılır. Bu elektron, zaten fazla olduğu için değerlik bandında karşılık gelen bir deliğe yol açmaz, bu nedenle böyle bir malzeme ile katkı yapıldığında, temel malzeme deliklerden daha fazla elektron içerir, dolayısıyla isimlendirme, n-tipi katkılı yarı iletkenler. Elektronlar, n-tipinde (akımın) çoğunluk taşıyıcılarıdır, delikler ise azınlık taşıyıcılarıdır. Toplamda, Fermi seviyesi değerlik

bandı ile iletim bandı arasında ortada bir yerdeyken, n-tipi durumunda yukarı kayar ve p-tipi durumunda aşağı doğru kayar (Rahman, 2014).



Şekil 6. n-Si yarı iletken gösterimi.

1.2.1.2.3 Metal Oksit Yarı İletkenler

Metal oksit yarı iletkenler, silikon (Si) gibi geleneksel kovalent yarı iletkenlerle karşılaştırıldığında elektronik yük taşıma özellikleri nedeniyle benzersiz bir malzeme sınıfını temsil eder. Metal oksit yarı iletkenleri, yüksek derecede iyonik bağa sahip değerlik bileşikleridir. İletim bandı minimum (CBM) ve değerlik bandı maksimum (VBM) sırasıyla metal (M) ns ve oksijen (O) 2p orbitalinden oluşur. Metal ve oksit orbitalleri arasındaki etkileşim, yük taşıyıcı taşınmasında önemli bir eşitsizlik ile sonuçlanır. Genel olarak, M ns orbitalleri yüksek oranda dağılırken O 2p lokalizedir, bu da elektronlar için deliklere kıyasla daha küçük etkin kütle ile sonuçlanır. Metal oksit yarı iletkenler, optik, elektriksel ve termal özelliklerinden dolayı patlamaların ve zararlı gazların izlenmesinde ve çıkarılmasında dikkat çekmiştir. Nano ölçekte üretildiğinde oldukça hassastırlar ve kısa bir tepki süresine sahiptirler. Sensör olarak uygulama bulan en yaygın metal oksit yarı iletken malzemeler SnO_2 , ZnO , Fe_2O_3 , TiO_2 , In_2O_3 , Co_3O_4 ve CuO 'dur (Sharma, 2022).

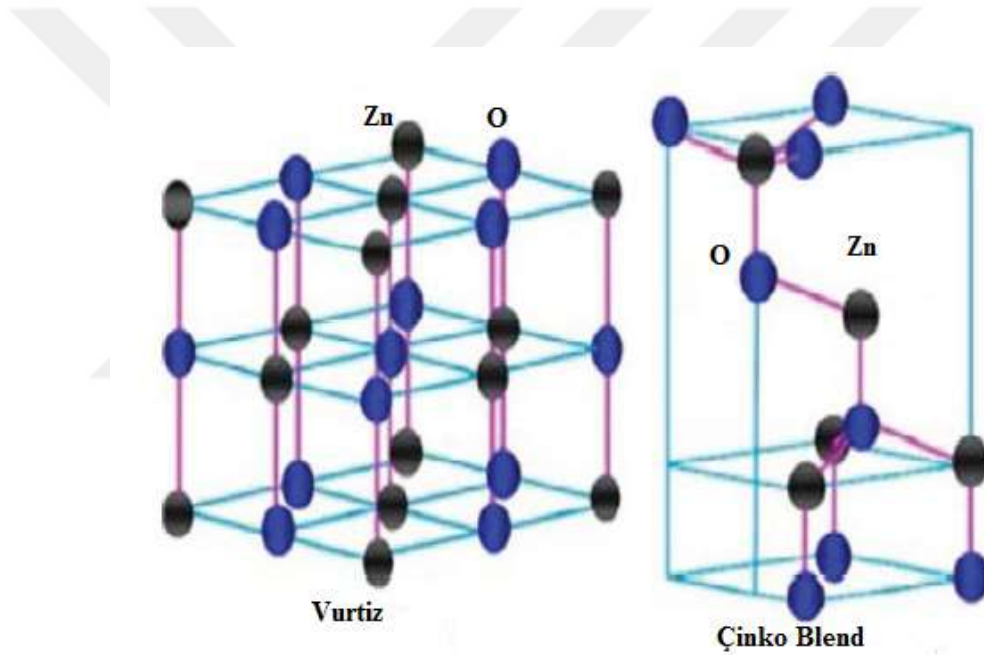
1.3 ZnO Özellikleri

ZnO, büyütüldüğü gibi negatif (n-tipi) yarı iletken malzeme olarak sınıflandırılır. ZnO, grup 2-4 yarı iletken malzemelerden biridir. ZnO, 3.37 eV'lik bir bant aralığına sahiptir. ZnO ayrıca yüksek bir bağlanma enerjisine sahiptir. ZnO bağlanma enerjisi yaklaşık 60 meV'dir. ZnO malzemesi yüksek eksiton bağlama enerjisine ve yüksek termal kararlılığa sahiptir. Aynı zamanda yüksek bir optik kazanca sahiptir. Bu özellikler, ZnO'yu elektronik ve optoelektronik tabanlı cihazlar için en ilginç malzemelerden biri haline getirdi. Öte yandan, ZnO'nun yüksek bağlanma enerjisi, yüksek optik verimliliğe sahip birkaç fotonik cihazın üretilmesine izin verir. Ayrıca, kısa dalga boylu optoelektronik cihazlar, ZnO'nun geniş bant aralığına dayalı olarak yapılmaktadır. ZnO, görünür dalga boyu bölgesine uygun şeffaf bir optik malzemedir. ZnO ayrıca optoelektronik uygulamalar için potansiyel malzemelerden biridir (Nahhas, 2019). Çinko oksit, yüksek elektriksel iletkenlik ve elektron transfer oranları, görünür alanda yüksek şeffaflık ve kimyasal olarak kararlıdır, bu da onu fotovoltaiik, optoelektronik, gaz sensörleri, elektronik ve piezoelektrik cihazlar alanlarında uygun bir aday haline getirir. Ayrıca ZnO, hem pratik hem de temel amaçlar için kataliz ve seyreltilmiş manyetik yarı iletkenler alanlarında yer almaktadır. Bu geniş uygulama yelpazesi, kimyasal buhar biriktirme, moleküler ışın epitaksi, darbeli lazer biriktirme, metal-organik kimyasal buhar biriktirme, sol-jel yöntemleri ve elektrodpozisyon dahil olmak üzere ZnO malzemelerinin çok çeşitli büyüme ve sentez teknikleri üzerine birçok araştırma çalışmasını teşvik etmiştir (Nabil ROCHDI, 2020).

1.3.1 Kristal Yapı, Kimyasal Bağlanma ve Kafes Özellikleri

Dörtüzlü olarak koordine edilmiş bağlanma geometrisi, ZnO kristal yapısını belirler. Her çinko iyonunun tetrahedral konfigürasyonda dört oksijen komşu iyonu vardır ve bunun tersi de geçerlidir. Örneğin, grup-IV elementleri C (elmas), Si ve Ge'den iyi bilinen bu geometrik düzenleme, II-VI ve III-V bileşikleri için de yaygındır. Buna kovalent bağ denir, ancak farklı elektronegatifliğe sahip ortaklar söz konusu olduğunda bağlar önemli derecede polariteye sahip olabilir. Tetrahedral geometri, oldukça düşük bir boşluk doldurmaya sahiptir ve esasen, bağlanan sp^3 hibrit orbitallerinin açıl sertliği ile stabilize edilir. Bir kristal matriste, komşu tetrahedronlar ZnO durumunda her biri bir çinko ve bir oksijen tabakasından oluşan

iki tabaka oluşturur. Genel olarak, tetrahedronların bu düzenlemesi, çift tabakaların istifleme sırasına bağlı olarak ya bir kübik çinko-blend-tipi yapı ya da bir altıgen wurtzite-tipi yapı ile sonuçlanabilir (Klingshirn, 2010). ZnO normalde altıgen bir yapıya sahiptir. Çinko atomları dört oksijen atomuna dörtlü olarak koordine edilmiştir. Ayrıca ZnO'nun iki kristal yapısı vardır. Bu yapılar wurtzit ve çinko-blendedir. ZnO'nun bu iki yapısı, ZnO'nun kristal yapısının altıgen eksenini boyunca mükemmelen bir kutupsal simetriye yol açar. ZnO bazlı piezoelektriklik ve kendiliğinden polarizasyon bu kristal yapılardan kaynaklanmaktadır. İki ZnO'nun kristal yapısı şekil 7'de gösterilmektedir (Nahhas, 2019).



şekil 7. ZnO wurtzite ve çinko blende kristal yapı.

ZnO,    kristal yapıda bulunur, yani wurtzit, çinko blende ve kaya tuzu. Ortam koşullarında ZnO, wurtzit formunda bulunur. İstikrarlı  inko blende fazı, kübik altlık üstünde ZnO biriktirerek elde edilebilir. wurtzite fazındaki çinko oksit yüksek basınç altında bırakarak kaya tuzu fazında ZnO sağlanır. wurtzit yapısı için kafes parametreleri a ve b eşittir ve 3.2475–3.5201   aralığında ve c 5.2042–5.2075   aralığındadır. Kristal kafesteki Zn ve O arasındaki bağ çok güçlü iyonik karaktere

sahiptir. Bu nedenle ZnO, iyonik ve kovalent bileşik arasında sınıflandırılır (özgür. Alivov, 2005) .

1.3.2 Optik özellikler

Optik yayıcı cihazlarda kullanılacak malzemeler için doğrudan bant aralığı ve yüksek eksiton enerjisine sahip olmaları gerekir. ZnO, yüksek kırılma indisine (2.008) sahip doğrudan ve geniş bant aralıklı bir yarı iletkenidir (vyas, 2020). Bant aralığı, oda sıcaklığında yaklaşık 3,37 eV'dir. 25 meV GaN ile karşılaştırıldığında 60 meV civarında eksiton bağlanma enerjisine sahiptir. Bu nedenle eksiton yeniden birleştirmesini oda sıcaklığında ve üstünde olabilir. Bu yüzden ZnO,GaN göre stabil bir ışık yayıcıdır. Eksitonik süreç nedeniyle UV bölgesinde (380 nm) emisyon ZnO'dan gözlenir. Ancak, daha düşük enerji durumlarının içsel kusurları nedeniyle, mor, mavi ve yeşil ışık emisyonu da gözlenmiştir. Bu nedenle ZnO, fosfor uygulamaları için verimli bir malzemedir. Optik pompalama altında uyarılmış emisyon da ZnO'dan gözlemlenmiştir. Bu fenomen eksitonik-eksitonik saçılma veya emisyonu bağlı olabilir. ZnO nanotellerinden elektrikle pompalanan lazerleme de bazı araştırma grupları tarafından sağlanmıştır (Klingshirn, 2010).

1.3.3 Elektriksel Özellikleri

Şeffaf iletken oksitler (TCO) elektronik ve elektro-optik uygulamalarda büyük ilgi görmektedir. Büyük düz ekranlar, ince film fotovoltaiik hücreler, geleneksel silikon güneş pillerinde yansıma önleyici kaplamalar, ışık yayan diyotlar (LED'ler) vb. Gibi çeşitli cihazlarda kaplama olarak kullanılırlar. ZnO, altıgen bir wurtzite yapısına sahip n tipi geniş bant aralıklı bir yarı iletkenidir (3.37 eV). İçsel çinko oksit filmler oldukça dirençlidir, ancak genellikle Grup III elementlerle (Ga, Oral Olarak) katkı olduklarında iletken hale gelirler (R. Romero, 2004).

İnce filmin iletkenliği temel olarak yük taşıyıcıların yoğunluğu ve hareketliliğine bağlıdır. Bu ilişki denklem (2) ile ifade edilir.

$$\sigma_{n,p} = nq\mu \quad (1)$$

Burada n, iletim bandındaki (değerlik bandı) elektron (delik) konsantrasyonunun yoğunluğu, q elektron üzerindeki yük (1.6×10^{-19}) ve μ , yük taşıyıcıların

hareketliliğidir. ZnO, kendine özgü kusurlardan (V_O ve Zn_i) dolayı n-tipi özellikler sergiler. Taşıyıcı konsantrasyonu ve hareketliliği büyük ölçüde kusurların seviyesine bağlıdır. 2011 yılında Torricelli ve ark. düzensiz ZnO'da yük taşıma fenomeni için çoklu yakalama ve bırakma taşıma mekanizması önermiştir (vyas, 2020). Bu modele göre, iletkenlik Denklemler (2) ve (3) olarak açıklanabilir:

$$\sigma = \sigma_0 \left[\frac{\frac{T^0}{T} \sin\left(\frac{T}{T^0} \pi\right)}{N_t \pi} \right]^{\frac{T^0}{T}} n_t \frac{T^0}{T} \quad (2)$$

$$\sigma_0 = q N_b \mu_b \quad (3)$$

μ_b , sonsuz sıcaklıkta bant hareketliliğidir, N_b , taşıma bandındaki birim hacim başına toplam durumdur, T^0 , enerji bozukluğu açıklayan karakteristik sıcaklıktır, N_t , tuzak durumlarının toplam sayısıdır ve n_t , içindeki yük taşıyıcı konsantrasyonudur. Tuzak düzensiz ZnO'da durumları. Yazarlar, tuzak durumunda n_t yük taşıyıcılarının, n taşıma bandındaki taşıyıcılarınkinden çok daha büyük olduğunu varsaydılar. Bu nedenle, toplam taşıyıcı konsantrasyonu n_T , $n_T = n + n_t \sim n_t$ şeklinde yaklaşık olarak hesaplanmıştır. ZnO'daki kusurlar ve dolayısıyla taşıyıcı konsantrasyonu ve hareketliliği, biriktirme yöntemine ve büyüme koşullarına büyük ölçüde bağlıdır. ZnO'daki elektronların konsantrasyonu ve hareketliliği sırasıyla $10^{16} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ve $20 \sim 400 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ aralığında bulunmuştur (vyas, 2020).

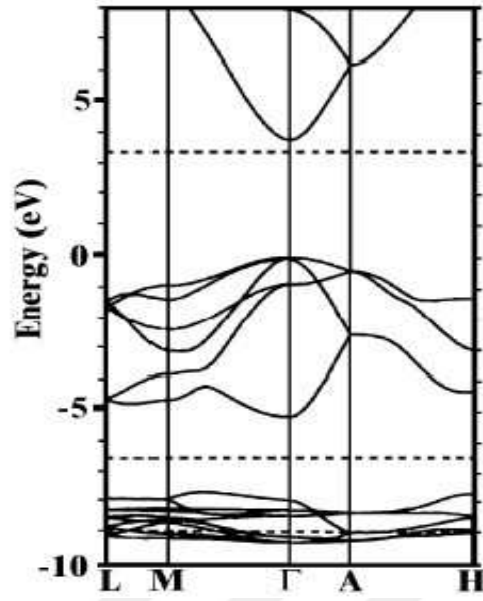
1.3.4 Ohmik Ve Schottky İletişim

Yüksek performanslı elektronik ve optoelektronik cihazlar için, ZnO ince film üzerinde yüksek kaliteli metalik temas çok önemlidir. Yarı iletken cihazların elektriksel özellikleri, kullanılan kontakta büyük ölçüde etkilenir. ZnO üzerindeki metalik temas, metalin iş fonksiyonu ile ZnO'nun elektron afinitesi arasındaki farka bağlı olarak Schottky bariyerleri veya omik olabilir. ZnO ince film üzerinde bir Schottky teması için, yüksek iş fonksiyonlu metaller gereklidir. Platin, paladyum, tantal ve altın, genellikle Schottky'nin ZnO film ile temasını sağlamak için kullanılan yüksek iş fonksiyonlu metallerdir. Pd ($\phi_m = 5.12 \text{ eV}$) ve Au ($\phi_m = 5.1 \text{ eV}$) 'nin ZnO ince filmler üzerinde en stabil Schottky bariyer temasını oluşturduğu bildirilmiştir. Bir omik kontak, güneş pilleri, TFT, varistörler ve LED gibi cihazların performansında

önemli bir rol oynar. Bir yarı iletken film üzerindeki iyi bir omik temas, doğrusal bir akım-voltaj (I-V) ilişkisi ve ihmal edilebilir temas direnci ile karakterize edilir. ZnO üzerinde bir omik temas oluşturmak için, metalin iş fonksiyonu ZnO'nun elektron afinitesine yakın olmalıdır ($\chi = 4.35$ eV) . Al, In ve titanyum 4,28 eV'ye yakın çalışma fonksiyon değerlerine sahiptir, dirençleri çok düşüktür ve bu metaller ile ZnO arasında oluşan temas direnci de ihmal edilebilir düzeydedir. Bu nedenle, bu metaller ZnO filmlerle omik temas kurmak için iyi bir seçim olabilir (Vyas, 2020).

1.3.5 Enerji Bandı Aralığı

ZnO'nun elektronik bant yapısı birkaç grup tarafından hesaplanmıştır. “Yerel Yoğunluk Yaklaşımını (LDA) kullanan ve Zn 3d elektronlarını doğru bir şekilde hesaba katmak için atomik öz-etkileşim düzeltmeli psödopotansiyelleri (SIC-PP) birleştiren bir bant yapısı hesaplamasının sonuçları, şekil 8'de gösterilmiştir. Bant yapısı, altıgen Brillouin bölgesinde yüksek simetri çizgileri boyunca gösterilmektedir. Hem değerlik bandı maksimumu hem de en düşük iletim bandı minimumu, $k=0$ noktasında meydana gelir ve bu, ZnO'nun doğrudan bant aralıklı bir yarı iletken olduğunu gösterir. En alttaki 10 bant (-9 eV civarında meydana gelir) Zn 3d seviyelerine karşılık gelir. -5 eV ila 0 eV arasındaki sonraki 6 bant, O 2p bağlanma durumlarına karşılık gelir. İlk iki iletim bandı durumu, güçlü bir şekilde Zn lokalizedir ve boş Zn 3s seviyelerine karşılık gelir. Daha yüksek iletim bantları (burada gösterilmemiştir) serbest elektron benzeridir. Çekirdek benzeri enerji durumları ile ilişkili O2s bantları (burada gösterilmemiştir), -20 eV civarında meydana gelir. Bu hesaplamadan belirlenen bant aralığı 3.77 eV'dir (Jagadish, 2006).



Şekil 8. Baskın atomik öz-etkileşim düzeltmeli psödopotansiyeller (SIC-PP) kullanılarak hesaplanan yığın wurtzite ZnO'nun LDA bant yapısı.

Bu yöntem, d-bantlarının analizinde standart LDA yönteminden çok daha etkilidir (Jagadish, 2006)

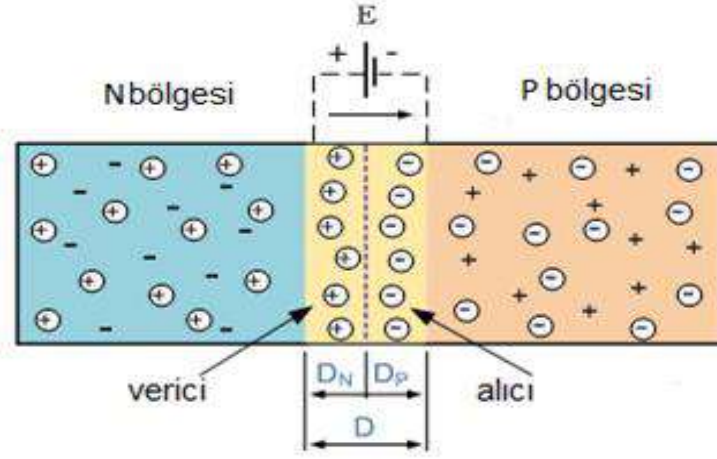
1.3.6 Enerji Bandı Aralığının Mühendisliği

Bir yarı iletkenin, özellikle optoelektronik cihazlarla ilgili olarak yararlı olması için; bant aralığının mühendisliği, cihaz geliştirmede çok önemli bir adımdır. Başlangıç yarı iletkeninin farklı bant aralığına sahip başka bir malzeme ile çalışmasına izin vererek, ortaya çıkan alaşımlı malzemenin bant aralığı ince ayarlanabilir, böylece eksiton emisyonlarının dalga boyunu etkiler. ZnO durumunda, MgO ve CdO ile alaşım, sırasıyla enerji bandı boşluğunu arttırmak veya azaltmak için etkili bir araçtır (Jagadish, 2006).

1.4 P-N Eklem

P-N eklemi olarak bilinen bir birleşim, iki yarı iletken malzeme türü arasında bulunan bir arayüz veya sınırdır. Bu malzeme türleri, yarı iletken içindeki p tipi ve n tipidir. Şekil9' gösterdiği gibi yarıiletkenin p tarafı veya pozitif tarafı olarak bilinen taraf, fazla sayıda deliğe sahiptir ve n tarafı veya negatif tarafı, fazla elektrona sahiptir (Singha,

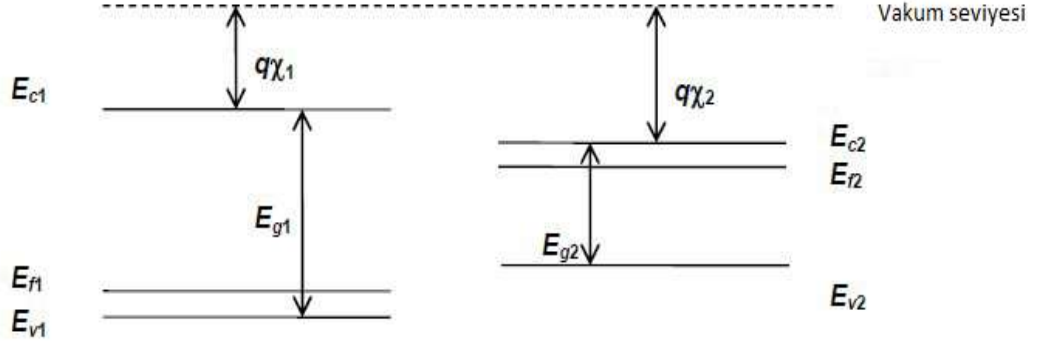
2019). Bir yarı iletkende p-n eklemının katkılam (doping) yöntemiyle oluşturulduğunu söyleyebiliriz.



Şekil 9. Pozitif ve Negatif iyonları oluşumu.

Bir p-n birleşimin oluşumu sırasında iki önemli süreç meydana gelir: difüzyon ve sürüklenme. Bir n-tipi yarı iletkeninde elektron konsantrasyonunun (birim hacimdeki elektron sayısı) deliklerin konsantrasyonuna kıyasla daha fazla olduğunu olur. Benzer şekilde, p-tipi bir yarı iletkeninde, deliklerin konsantrasyonu elektronların konsantrasyonundan daha fazladır. p-n bağlantısının oluşumu sırasında p ve n taraflarındaki konsantrasyon gradyanından dolayı delikler p tarafından n tarafına yayılır ($p \rightarrow n$) ve elektronlar n tarafından p tarafına yayılır ($n \rightarrow p$). Bu yük taşıma hareketi, bağlantı boyunca difüzyon akımına yol açar. Bir elektron $n \rightarrow p$ 'den difüze olduğunda, n-tarafında iyonize bir verici bırakır. Bu iyonize verici (pozitif yük), çevresindeki atomlara bağlı olduğu için hareketsizdir. Elektronlar $n \rightarrow p$ 'den yayılmaya devam ederken, bağlantının n tarafında bir pozitif yük tabakası (veya pozitif uzay yükü bölgesi) geliştirilir. Aynı şekilde, konsantrasyon gradyanından dolayı bir boşluk $p \rightarrow n$ 'e yayıldığında, geride sabit iyonize bir alıcı (negatif yük) bırakır. boşluklar yayılmaya sürdürdükçe, eklemın p tarafında bir negatif yük katmanı (yada negatif uzay yükü bölgesi) oluşur. Eklemın her iki tarafındaki bu uzay yükü bölgesi, birleşme boyunca ilk harekette yer alan elektronlar ve boşluklar serbest yüklerinin bölgesini tükettiği için tükenme bölgesi olarak bilinir (URL1, 2021).

Bir p katkılı yarı iletken (yarı iletken 1) ile n katkılı bir yarı iletken (yarı iletken 2) birleşim olduğunda 1'in bant aralığı 2'nin ki daha geniş olduğunu varsayarsak. 1 ve 2'nin bant diyagramları aşağıda Şekil 10 de gösterilmiştir (Rana, 2022).

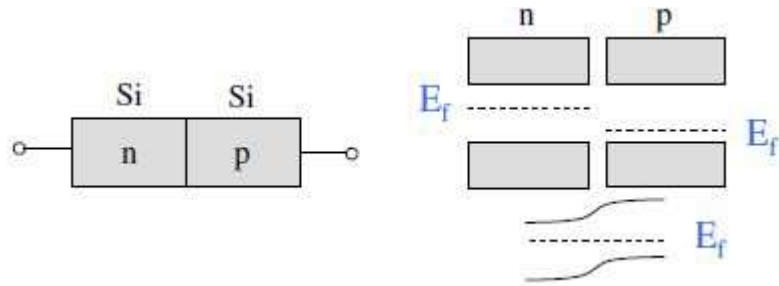


Şekil 10. P-N eklemi enerji bant diyagramının gösterimi.

1.4.1 P-N Eklemler Türleri

1.4.1.1 Aynı Tür Eklemler:

Aynı tür yarıiletkenlerden oluşturulmuş n- ve p-tipi yarıiletkeni birleştirerek oluşturulan eklemler (örneğin Si:Si, Ge:Ge) (Sarı, 2008)

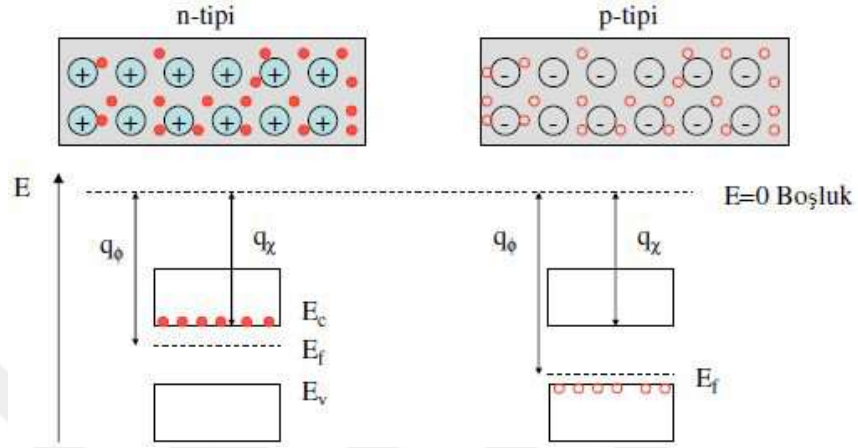


Şekil 11. Homo-eklem p-n eklemi gösterimi

Fermi enerji seviyesi (E_F) bir katıda 0 K sıcaklığında elektronların bulunabileceği en yüksek enerji düzeyini göstermektedir. Şekil 12 (Sarı, 2008).

Silikondan yapılmış n-tipi ve p-tipi katkılanmış yarıiletken malzemeyi düşünelim

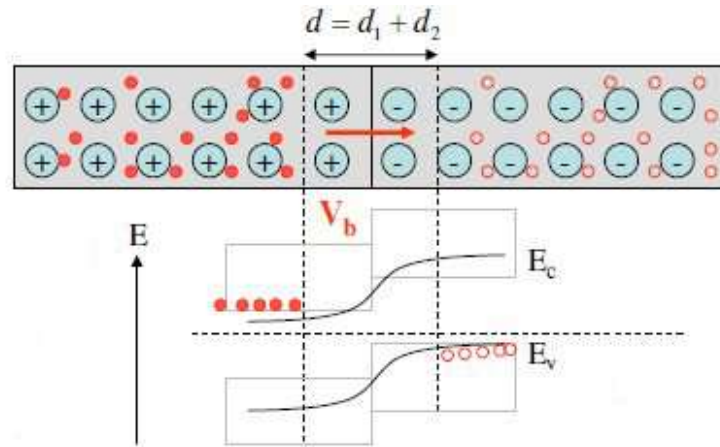
Malzemeler aynı olduğu için n- ve p- tarafının yasak bant aralığı aynıdır. n tarafta, iletim bandında serbest hareket eden elektronlar, p tarafta da değerlik bandında serbest hareket eden (boşluklar) bulunur. Her iki tarafta da net yük yoğunluğu sıfırdır (URL 3, 2022).



Şekil 12. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin birleşmeden önce bant diyagramları.

Φ (İş fonksiyonu): elektronu metal yüzeyden ayırmak için yapılması gereken iş miktarı

$q\chi$ (Elektron ilgisi): minimum iletim bandı ile vakum enerji seviyesi arasındaki enerji farkıdır.

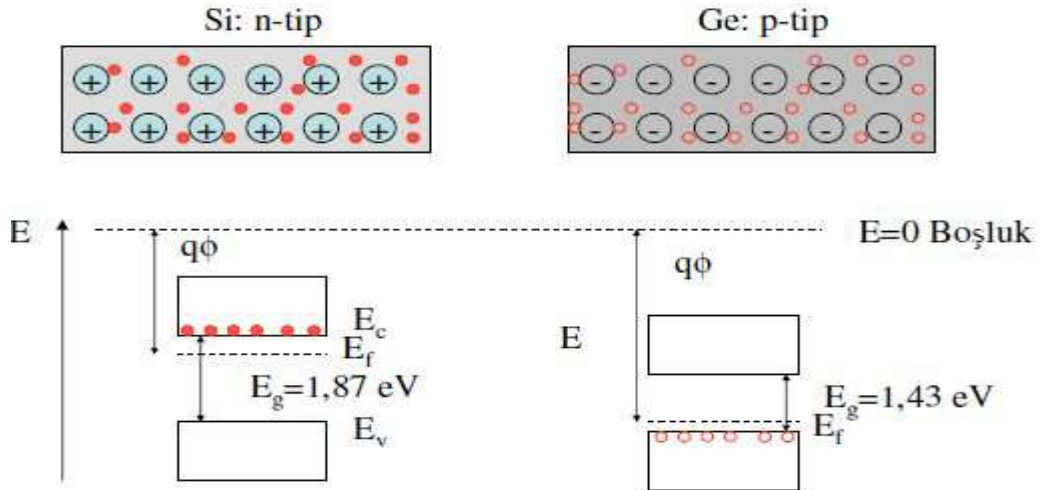


Şekil 13. p-n homo-eklem yarı iletken bant diyagramı.

1.4.1.2 Farkı Tür Eklemler:

Farklı tür yarıiletkenleri birleştirerek oluşturulan eklemler (örneğin Si:Ge, GaAs:GaAlAs Şekil 14 (Sarı, 2008)). Hetero-eklem: Farklı enerji bant aralıklarına sahip iki yarı iletken arasında oluşan birleşime hetero-eklem denir. Genel olarak heteroyapılar, yeni yarı iletken cihazlar (örneğin diyotlar, transistörler ve optoelektronik cihazlar) için çok çeşitli tasarım seçenekleri sunar.

Başlıca avantajlar, enerji bariyerlerini ve potansiyel varyasyonları (kuantum seviyesinde) kontrol ederek yük taşıyıcı taşınımının kontrolü ve heteroyapıların optik radyasyonu sınırlama kabiliyeti (özellikle optoelektronik cihazlarda gerekli olan) ile ilgilidir. Birçok uygulamada, cihazlar birden fazla hetero-eklem içerir ve bu gibi durumlarda bunlara heteroyapı denir.

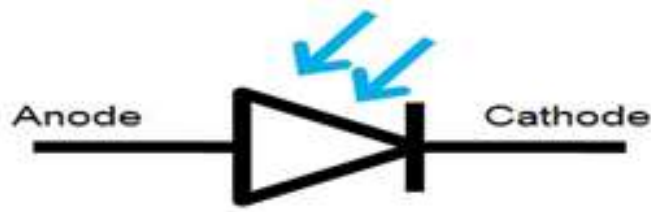


Şekil 14. n-tipi silikon ve p-tipi germanyum farklı tür yarı iletken.

1.5 Fotodiyot

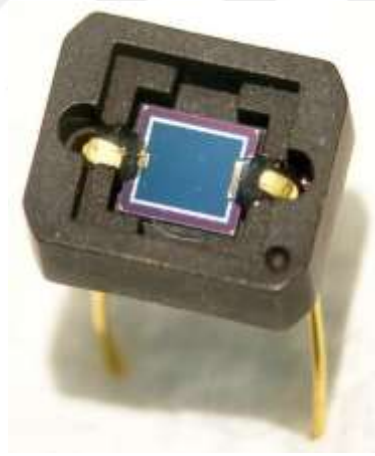
O/E dönüştürücü olarak bilinen gelen optik sinyali bir elektrik sinyaline dönüştüren cihazdır. Yaygın olarak fotodiyotlar olarak adlandırılan yarı iletken fotodetektörler, küçük boyutları, hızlı algılama hızları ve yüksek algılama verimliliği nedeniyle optik iletişim sistemlerinde kullanılan baskın fotodetektör türleridir. Lazer diyotların yapılarına benzer şekilde, fotodiyotlar da PN bağlantılarına dayanmaktadır. Işık enerjisini elektrik enerjisine (voltaj veya akım) dönüştüren bir ışık sensörü şeklindedir. Fotodiyot, PN bağlantılı bir tür yarı iletken cihazdır. p (pozitif) ve n (negatif) katmanlar arasında içsel bir katman bulunur. Foto diyot, elektrik akımı üretmek için

ışık enerjisini girdi olarak kabul eder. Fotodiyotun sembolü bir LED'inkine benzer, ancak oklar LED'de gibi dışa doğru değil içe dönüktür. Aşağıdaki resim bir fotodiyotun sembolünü göstermektedir (Teja, 2021).



Şekil 15. Fotodiyot sembolü.

Bir fotodiyot, bir elektrik akımı üretmek için ışık enerjisi tüketen bir PN-bağlantı diyotudur. Bunlara aynı zamanda bir foto-detektör, bir ışık detektörü ve bir foto-sensör denir. Fotodiyotlar, ters önyargı durumunda çalışmak üzere tasarlanmıştır. Şekil 1. Fotodiyot resmi göstermektedir (URL4, 2022).



Şekil 16. Fotodiyot resmi.

1.5.1 Fotodiyot Çalışması

Bir fotodiyot, elektron deliği çiftlerinin oluşumunu etkileyen ışık biçimindeki fotonlara maruz bırakılır. Düşen fotonların enerjisi ($h\nu$) yarı iletken malzemenin enerji aralığından (E_g) daha büyükse, diyotun tükenme bölgesinin yakınında elektron-delik çiftleri oluşturulur. Oluşturulan elektron-boşluk çiftleri, birleşme yerinin elektrik alanı

nedeniyle yeniden birleşmeden önce birbirinden ayrılır. Diyottaki elektrik alanının yönü, elektronları n tarafına doğru hareket etmeye zorlar ve sonuç olarak delikler p tarafına doğru hareket eder. n tarafındaki elektronların ve p tarafındaki deliklerin sayısının artması sonucunda elektromotor kuvvetinde bir artış gözlenir. Artık sisteme harici bir yük bağlandığında, içinden bir akım akışı gözlemlenir. Elektromotor kuvveti ne kadar fazla olursa, akım o kadar büyük olur. Yaratılan elektromotor kuvvetin büyüklüğü doğrudan gelen ışığın yoğunluğuna bağlıdır. Işık yoğunluğundaki değişim ile fotoakımdaki orantılı değişimin bu etkisi, ters bir önyargı uygulanarak kolayca gözlemlenebilir (URL4, 2022). Fotodiyot türleri, yapılarına ve işlevlerine göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

PİN Fotodiyot: Şu anda en yaygın kullanılan fotodiyot bir PIN tipidir. Bu diyot, standart PN fotodiyota kıyasla ışık fotonlarını daha güçlü bir şekilde toplar çünkü P ve N bölgeleri arasındaki geniş içsel alan daha fazla ışığın toplanmasına izin verir ve buna ek olarak daha düşük bir kapasitans sunar (URL5, 2022).

Schottky FotoDiyot: Schottky fotodiyodu Schottky diyotu kullanır ve küçük bir diyot bağlantısı içerir, yani küçük bağlantı kapasitansı vardır, bu nedenle yüksek hızlarda çalışır. Bu nedenle, bu tür bir fotodiyot, fiber optik bağlantılar gibi yüksek bant genişliğine sahip (BW) optik iletişim sistemlerinde sıklıkla kullanılır (URL5, 2022).

Çığ Fotodiyot: Bu tür diyot, yüksek kazanç seviyeleri nedeniyle düşük ışıklı alanlarda kullanılır. Yüksek düzeyde gürültü üretir. Dolayısıyla bu teknoloji tüm uygulamalar için uygun değildir (URL5, 2022).

PN Fotodiyot: İlk geliştirilen fotodiyot tipi PN tipidir. Diğer türlerle karşılaştırıldığında performansı ileri düzeyde değildir, ancak şu anda çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Fotoalgılama esas olarak diyotun tükenme bölgesinde gerçekleşir. Bu diyot oldukça küçüktür, ancak duyarlılığı diğerlerine kıyasla çok iyi değildir. PN diyot hakkında daha fazla bilgi için lütfen bu bağlantıya bakın (URL5, 2022).

1.5.2. ZnO P-N Fotodiyot

P-n eklemli fotodiyot, temel taşıyıcı taşıma teorisi üzerine inşa edildiğinden, en önemli yarı iletken PD'dir. Bir p-tipi katkılı ve bitişik n tipi katkılı yarı iletken arasındaki elektron-boşluk difüzyonu ve rekombinasyonu nedeniyle oluşur. Taşıyıcıların

tükenmesi sebebiyle, uzay yüklü bölgede n-tipinden p-tipi yarı iletkene yönlendirilen yerleşik bir elektrik alanı oluşturulacaktır. Yerleşik elektrik alanının dağılımı ve enerji bandı diyagramı şekil17 (a)'da şematik olarak gösterilmiştir. Fotodiyot aydınlatma altındayken, uzay yükü bölgesinde üretilen elektron-boşluk çiftleri elektrotlar tarafından ayrılacak ve toplanacak ve foto-tepki akımı üretilecektir (Şekil17 (b)) (Yaonan Hou, 2014). Difüzyon teorisine dayanarak, Shockley ünlü taşıyıcı taşıma denklemini önerdi,

$$J_0 = J_{0pn}[\exp(qV/nkT)] \quad (4)$$

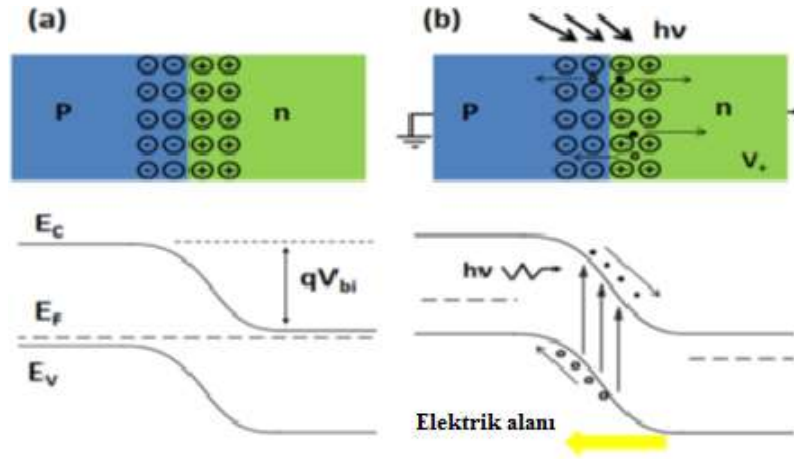
Burada q, V, n, k ve T sırasıyla birim elektron yükü, uygulanan önyargı, idealite faktörü, Boltzmann sabiti ve mutlak sıcaklıktır. J_{0pn} , ters doymuş akımdır.

$$J_{0pn} = qD_p p_{n0}/L_p + qD_n p_{p0}/L_n \quad (5)$$

D_p ve D_n doping yoğunluklarıdır, p_{n0} ve n_{p0} azınlık taşıyıcı yoğunluklarıdır

L_p ($L_p = \sqrt{(D_p \tau_p)}$) ve L_n ($L_n = \sqrt{(D_n \tau_n)}$) taşıyıcı difüzyon uzunluklarıdır ve τ_n ve τ_p azınlık taşıyıcı ömürleridir. Denklem (.5) ile Schottky denklemi

$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right]$ Karşılaştırıldığında, temel taşıma denklemlerinin hem Schottky hem de p-n eklem diyotları için tamamen aynı formatta olduğu görülebilir. Bununla birlikte, Schottky diyotunun tersine, p-n diyotunun iletken özellikleri azınlık taşıyıcıları tarafından yönetilir. Azınlık taşıyıcı yoğunluğunda küçük bir değişiklik olsa bile akım ciddi şekilde değişecektir. Bu bakış açısından, p-n eklemi gelen ışığa Schottky fotodiyotlarından daha duyarlıdır, ancak sınırlı taşıyıcı difüzyon hızı nedeniyle tepki hızı daha yavaştır (Yaonan Hou, 2014).



Şekil 17. (a) denge ve (b) aydınlatma altında bir p-n bağlantısının diyagramı.

1.6 İnce Film Hazırlama Yöntemleri

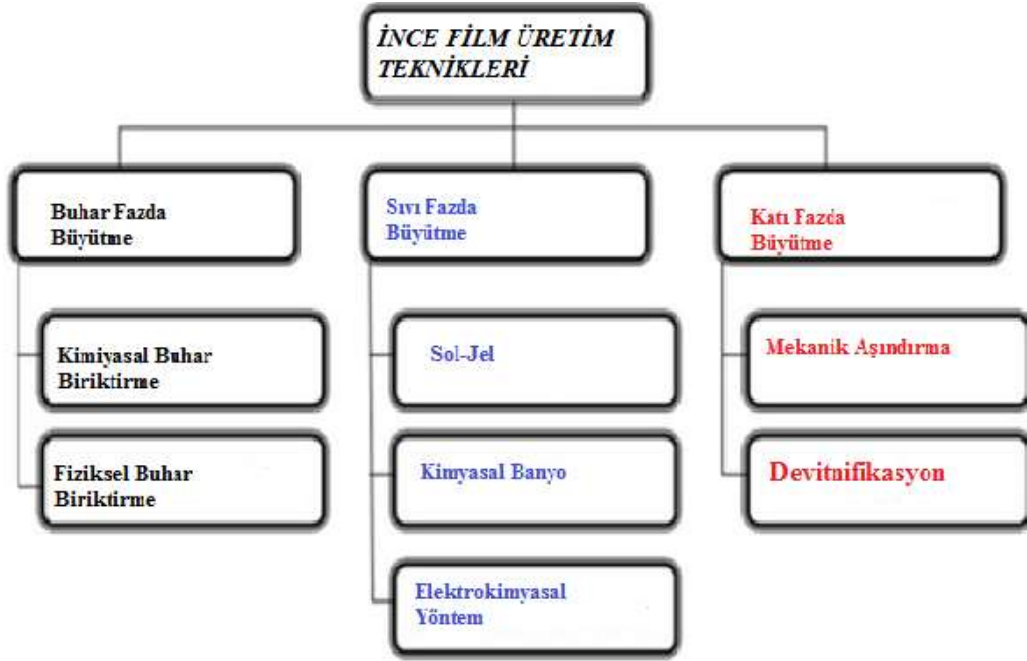
Bir film (tabaka veya kaplama olarak da adlandırılır), özellikleri malzemenin kütlesinden farklı olan yüzeye yakın bir bölge olarak tanımlanabilir. İnce bir film, maksimum kalınlığı 1 μm veya daha az olan bir filmidir. Bununla birlikte, birkaç yüz Angstromdan birkaç mikrona kadar değişen kalınlıklara sahip pratik uygulamalarda karşılaşılan birçok film genellikle ince filmler olarak kabul edilir (Morosanu, 1990). İnce filmler, tek tek atomların bir substrat üzerinde biriktirilmesiyle üretilir. İnce film, atomik/moleküler/iyonik madde türlerinin tek tek yoğunlaştırılmasıyla oluşturulan düşük boyutlu bir malzeme olarak tanımlanır. Kalınlık tipik olarak birkaç mikrondan daha azdır. İnce filmler kalın filmlerden farklıdır. Kalın bir film, üç boyutlu bir malzemenin inceltmesi veya büyük kümelerin/ atomik/moleküler/iyonik türlerin taneciklerinin bir araya getirilmesiyle oluşturulan düşük boyutlu bir malzeme olarak tanımlanır (Kiyotaka Wasa, 2004).

İnce bir film, kalınlığı nanometreden (tek tabaka) birkaç mikrometreye kadar değişen bir malzeme tabakası veya katmanlarıdır. İnce film, farklı amaçlar için alt tabaka üzerinde biriktirilir, yani alt tabakayı korumak, görünüşünü değiştirmek (dekoratif amaçlar), alt tabakaların optik veya elektriksel özelliklerini değiştirmek, vb. İnce film biriktirme işlemi, birçok uygulamada temel bir adımdır. ister bir alt tabaka ister önceden birikmiş katmanlar olsun, bir yüzeye herhangi bir maddenin ince bir tabakasının uygulanması anlamına gelir. Sürecin öncelikle fiziksel mi yoksa kimyasal

mı olduğuna bağlı olarak, biriktirme teknikleri iki geniş kategoriye ayrılır (Naghdi, 2021).İki yaygın biriktirme tekniği:

Kimyasal biriktirme: Bir sıvı öncüsü katı bir yüzeyde kimyasal bir değişime uğrar ve katı bir tabaka bırakır.

Fiziksel biriktirme: İnce bir katı film üretmek için mekanik, elektromekanik veya termodinamik araçlar kullanır.



Şekil 18. İnce film üretim teknikleri şematifi.

Elektronik cihazların, ekranların, sensörlerin, optik ekipmanların ve diğer birçok teknolojinin tümü ince filmlerin birikmesine bağlıdır. Yüksek kaliteli filmler üretmek için köklü yöntemler mevcut olsa bile, daha ucuz, daha güvenilir veya yeni veya geliştirilmiş özelliklere sahip filmler üretebilecek alternatif yöntemlere hala büyük ilgi vardır (Naghdi, 2021). İnce film büyümesi aşağıdaki özellikleri sergiler:

1. Herhangi bir biriktirme tekniği ile oluşturulan tüm materyallerin ince filmlerinin doğuşu, çekirdeklenme ve büyüme aşamalarını takip eden rastgele bir çekirdeklenme süreci ile başlar.

2. Çekirdeklenme ve büyüme aşamaları, büyüme sıcaklığı, büyüme hızı ve substrat kimyası gibi çeşitli biriktirme koşullarına bağlıdır.

3. Çekirdeklenme aşaması, elektron veya iyon bombardımanı gibi dış ajanslar tarafından önemli ölçüde değiştirilebilir.

4. Film mikro yapısı, ilişkili kusur yapısı ve film stresi, çekirdeklenme aşamasındaki biriktirme koşullarına bağlıdır.

5. Filmlerin kristal fazı ve yönelmesi, biriktirme koşulları tarafından yönetilir. Film bileşimi, kristal faz ve yönelme, film kalınlığı ve mikro yapı gibi filmin temel özellikleri, biriktirme koşulları tarafından kontrol edilir.

İnce filmler, dökme malzemelerde gözlemlenemeyen benzersiz özellikler sergiler:

1. Atomik büyüme sürecinden kaynaklanan benzersiz malzeme özellikleri.
2. Kuantum boyut etkileri dahil, kalınlık, kristal yönelmesi ve çok katmanlı yönlerle karakterize edilen boyut etkileri (Kiyotaka Wasa, 2004).

Herhangi bir ince film biriktirme işlemi üç ana adımı içerir:

1. Uygun atomik, moleküler veya iyonik türlerin üretimi.
2. Bu türlerin bir ortam aracılığıyla substrata taşınması.

3. Katı bir tortu oluşturmak için doğrudan veya kimyasal ve/veya elektrokimyasal reaksiyon yoluyla substrat üzerinde yoğunlaşma.

İnce film üretme teknikler, film oluşturma ortamına göre sınıflandırılabilir: elektroliz (galvanik kaplama, akımsız kaplama ve elektrolitik anotlama). Vakum (vakumla buharlaştırma, iyon demeti biriktirme, moleküler demet epitaksi, sıcak duvar epitaksi ve iyon implantasyonu). Plazma (püskürtme biriktirme ve iyon kaplama) sıvı faz (sıvı faz epitaksi) katı faz (katı faz epitaksi); ve kimyasal buhar (substrat kimyasal buhar dönüşümü ve kimyasal buhar biriktirme) (Morosanu, 1990).

1.7 Sol-Jel Yöntemi İle İnce Film Üretimi

Yumuşak kimya “chimie douce” olarak da isimlendirilen sol- jel süreci, bir sol ya da jeli orta aşama olarak kullanıp geleneksel hazırlama metotlarından daha düşük sıcaklıklarda, çözeltiden katı bir materyalin hazırlanması esasına dayanır (Toygon, 2012). Sol-jel teknolojisinin, cam ve seramik dahil olmak üzere oksit malzemelerin işlenmesiyle başlayan bir geçmişi vardır. Bununla birlikte, o zamandan beri, teknoloji

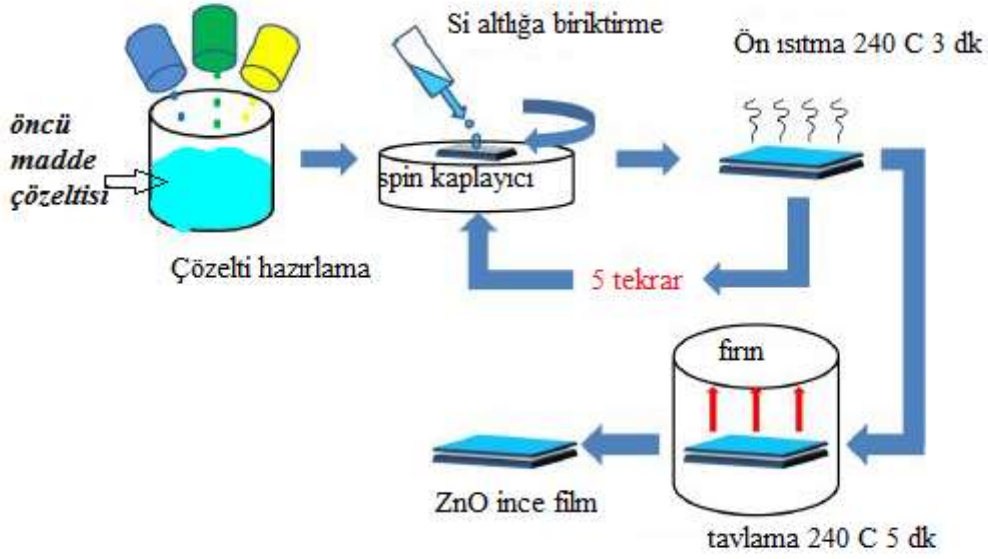
sadece oksitin değil, aynı zamanda nitrürler, karbürler, florürler ve sülfürler dâhil olmak üzere oksit olmayan malzemelerin hazırlanmasında da kullanılmıştır. Sol-jel prosesi temel olarak, genellikle M'nin metal ve R'nin alkil radikali [CH₃, C₂H₅] vb. olduğu metal alkoksit bileşikleri M(OR)_x'i veya kararlı homojen bir çözelti elde etmek için uygun çözücü içinde çözülmüş metal karboksilatlar M (COOR) _x. Daha sonra bir alt tabakaya döndürmeli kaplama veya daldırma vb. yöntemlerle uygulanır. Havadan nemin emilmesiyle oluşan faz geçişinden sonra karmaşık bir yapıya sahip bir jel haline gelir (Anand, 2010).

Filmler fiziksel, özellikle optik özelliklerin incelenmesi için çok uygun olduğundan ve sayısız bilimsel, teknolojik ve ticari uygulamaya sahip olduğundan, ince film kaplamaları çok araştırılan bir alandır.

Sol- jel yöntemi genel olarak şu temel basamaklardan oluşur:

- 1- Ön başlatıcının hidrolizi
- 2- Sol- jel aktif türlerinin alkol ya da su kondenzasyonu.
- 3- Jelleşme
- 4- Yaşlanma
- 5- Kurutma
- 6- Yüksek sıcaklık işlemi (Toygon, 2012)

Şekil 2 Sol-gel yöntem ile Si altlık üzerine ZnO ince filmi biriktirme aşamaların özeti göstermektedir (Yahia, 2019).



Şekil 19. Sol-gel yöntem ile Si altlık üzerine ZnO ince filmi biriktirmesi.

İlk aşamada, hidroliz reaksiyonu alkoksit gruplarının (OR) hidroksil grupları (OH) ile değiştirilmesine izin verir. İkinci aşamada, yoğunlaşma reaksiyonu, su ve alkolün ortadan kaldırılmasıyla amorf ağ M–O–M'nin oluşturulmasına neden olur. Nötr bir ortamda hidroliz kinetiğinin çok yavaş olması nedeniyle, reaksiyonun asit veya bazik katalizde gerçekleşmesi genellikle tercih edilir.



Burada

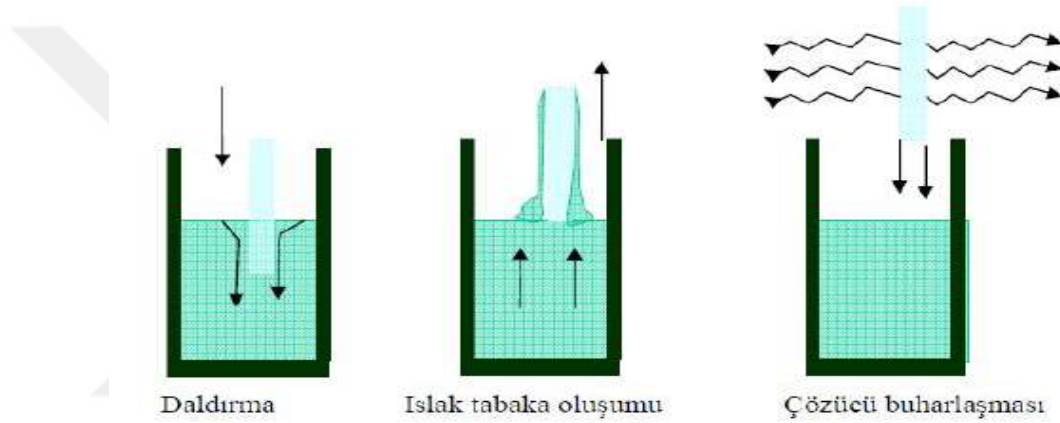
MOR: Metal alkoksit

MOH: Metal hidroksit

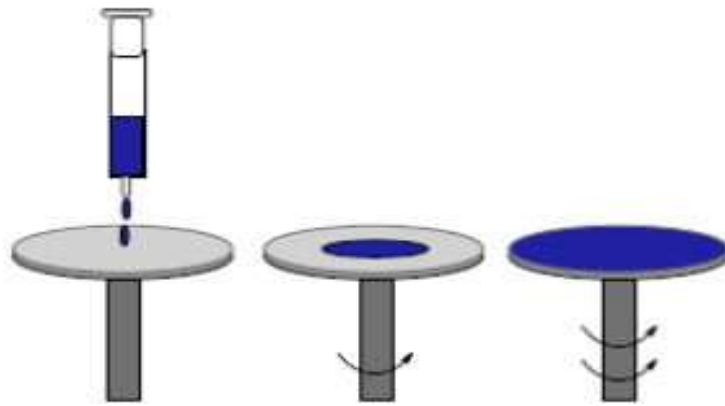
ROH: alkol

Reaksiyonları etkileyen ana parametreler su-alkoksit oranı, katalizörün tipi ve miktarı, M (metalik) atomuna bağlı organik grupların tipi ve çözücüdür. Verimli optik cihazların gerçekleştirilmesi için gerekli kararlı bir süspansiyon oluşturmak için tüm bu koşullar göz önünde bulundurulmalıdır (Righinia, 2014). Nihai malzemenin şekliyle ilgilidir: öncül sol, aslında, bir film oluşturmak için düzlemsel bir substrat üzerine, örneğin daldırılmalı kaplama veya döndürmeli kaplama ile biriktirilebilir veya bir tabakaya dökülebilir. İstenilen şekle (xerogel) sahip uygun bir kap veya düzlemsel olmayan bir şekle sahip alt tabakaları kaplamak için kullanılabilir.

Film biriktirme işlemine etkileyen faktörleri: işlemin zaman uzunluğudur: stres çatlaması riski nedeniyle, yani kurutma işlemi sırasında biriktirilen tabakanın hacminin azalmasının bir sonucu olarak, genellikle >200 nm kalınlıkta tek adımda film biriktirmek imkânsızdır. Bu nedenle farklı amaçlara uygun bir kalınlığa sahip filmler elde etmek için birkaç biriktirme/ısıtma döngüsü gereklidir. Çözeltilerin viskozitesi, biriktirme parametreleri (daldırma Şekil 20 kaplama işlemi için daldırma hızı ve döndürmeli Şekil21 kaplama için dönme hızı) ve biriktirme sonrası ısıtma işlem (HT) koşulları, her malzeme için dikkat edilmesi gereken çok önemli hususlardır (Merih, 2014) (Righinia, 2014).



Şekil 20. Daldırarak kaplama tekniğinin şematığı.



Şekil. 21. Döndürerek kaplama tekniğinin şematığı.

Bu yöntemde, kaplama çözeltisi ile kaplanacak yüzey püskürtme tabancaları veya püskürtme malzemeleri ile kaplanır. Bu yöntemde, çözelti ısıtılmış tabaka üzerine püskürtülür. Sprey damlacıkları tabakaya çarptığında, çözünen tabaka üzerinde

yoğunlaşırken, çözelti buharlaşır ve bir süre sonra yüzeyde ince bir film oluşur. Döndürme ile daldırma biriktirme yöntemleriyle kaplanamayacak düzgün olmayan yüzeylerin kaplanması için bu teknik seçilmektedir (Merih, 2014). Sprey piroliz, saf ve katkılı ZnO'nun ince filmlerini elde etmek için geleneksel yöntemlere faydalı bir alternatiftir. Sadeliği, düşük maliyeti ve minimum atık üretimi nedeniyle özellikle ilgi çekicidir. Püskürtme piroliz işlemi, geniş yüzeylerin kaplanmasını sağlar ve bir endüstriyel üretim hattına dahil edilmesi kolaydır. Sprey piroliz ile çözelti doğrudan substrat üzerine püskürtülür. Çözeltinin nozülde atomizasyonuna yardımcı olmak için basınçlı hava gibi bir gaz akışı kullanılabilir. Bazen, öncü atıkların ortadan kaldırılmasını sağlamak ve sinterleme veya kristalografik faz dönüşümüne izin vermek için posterior ısıtma işlemi gereklidir (R. Romero, 2004).

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Numune Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılacak malzemeleri alkol kullanarak temizlemekle başlatıldı ardından deiyonize suda durulanmış. ZnO Çözeltisi hazırlamak için başlangıç malzemesi olarak Çinko asetat dihidrat $[Zn (CH_3COO)_2 \cdot H_2O]$ molekül ağırlığı (219,49g/mol), kullanılmıştır. Uygun miktarda çinko asetat, bir çözücü olarak methaoxyethanol içinde çözündürüldü ve stabilizatör olarak işlev görmesi için monoetanolamin ilave edildi. Monoetanolamin molar oranı 1:1'de tutuldu ve çinko asetat molaritesi 0.5 M idi. Karışımın iyice karıştırmak için manyetik karıştırıcı içine konuldu ve 60 °C de 40 dakika bekletildi. Karışımın rengi ilk başta sarıydı ve iyi çözüldüğünde kahverengine doğru yönelmiş bir renk aldı. ZnO çözeltisi 0,5M olarak hazırlanmıştır. Solüsyon hesaplamaları aşağıdaki gibidir.

$$m = n \times m_A \quad (7)$$

m , ön çözeltisi hazırlanacak maddeden alınması gereken miktar miktarı, m_A Molü hazırlanacak olan maddenin 1 molünün ağırlığı (219,49g/mol), n ise mol sayısıdır.

$$n = M \times V \quad (8)$$

V hazırlanacak ön çözelti hacmi (0,5ml olarak alınmıştır), M ise molaritedir. Ön çözelti molaritesi 0,4M olarak hazırlanmıştır.

$$n = 0,5 \times 5 \times 10^{-3} = 2.5 \times 10^{-3} \text{ mol/l}$$

$m = 219,49 \times 2.5 \times 10^{-3} = 0,549 \text{ g}$ olarak ön çözeltiye Çinko Asetat tuzu eklenmiştir.

$Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$ ise 0,549g olarak ve benzer bir şekilde Monoetanolamin ise 0,153g hesaplanmıştır. Kullanılan sıvı Monoetanolamin hacim miktarı ise aşağıdaki ifadeden tespit edilmiştir.

$$d = m/V \quad (9)$$

Burada, d Monoetanolamin yoğunluğu (1,012 g/ml) m kütlesi V ise hacmidir.

Dolayısıyla $V = m/d \Rightarrow V = 0,151 \text{ ml}$ olarak hesaplanmıştır.

Çözelti hazırladıktan sonra manyetik karıştırıcıda koloidal parçacıkların oluşumunun sağlanması ve çözeltinin jelleşmesi için 60C° sıcaklık altında 40 dakika boyunca karıştırılmıştır. Şeffaf olan çözelti rengi işlem sonunda kahverengiye dönüşmüştür.

ZnO hazırladıktan sonra p-Si (111) silikon substrat üzerinde döndürmeli kaplama sistemiyle 15 saniye boyunca 2000 rpm'de silikon substrat üzerinde döndürülerek kaplanmışlardır. p-Si substrat üzerinde bir ZnO tabakası oluşturmadan önce, substratın ön yüzeyindeki lokal oksit HF:H₂O (1:10) solüsyonunda uzaklaştırıldı ve son olarak substrat deiyonize suda durulmuştur. Çözücüyü buharlaştırmak ve organik artıkları uzaklaştırmak için kaplamalar daha sonra fırında 240 °C'de 3 dakika kurutmuşlardır. Bu prosedür, bir mikrometreye yakın kalın bir tabaka elde etmek için 4kez tekrarlandı. Biriktirdikleri filmler daha sonra 5 dakika boyunca 24°C'de tavlandı.

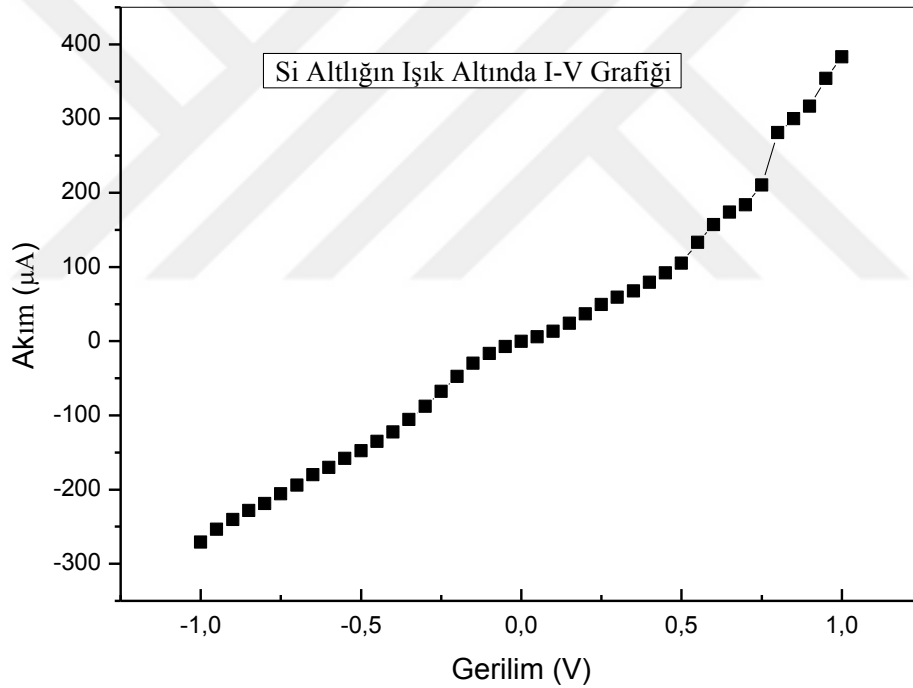


3. BULGULAR

Bu çalışmada nikel krom kontakları temas yöntemiyle çinko oksidi Si altlık üzerine sol-jel ile büyütülmüş ZnO üzerine alt ve üst temas ettirmek süratiyle kontaklar yapılarak elde edilmiş fotodiyotun yapısı sunulmuştur.

Çalışmanın diğer çalışmalardan ana farklarından birisi temas yüzeye yapılan sadece değdirmek süratiyle elde edilen kontaklardan dolayı bir farklılık ihtiva etmektedir. Yani yapılan kontaklar buharlaştırma ve ya lehim değil, direk tema ile basit şekilde yapılmıştır.

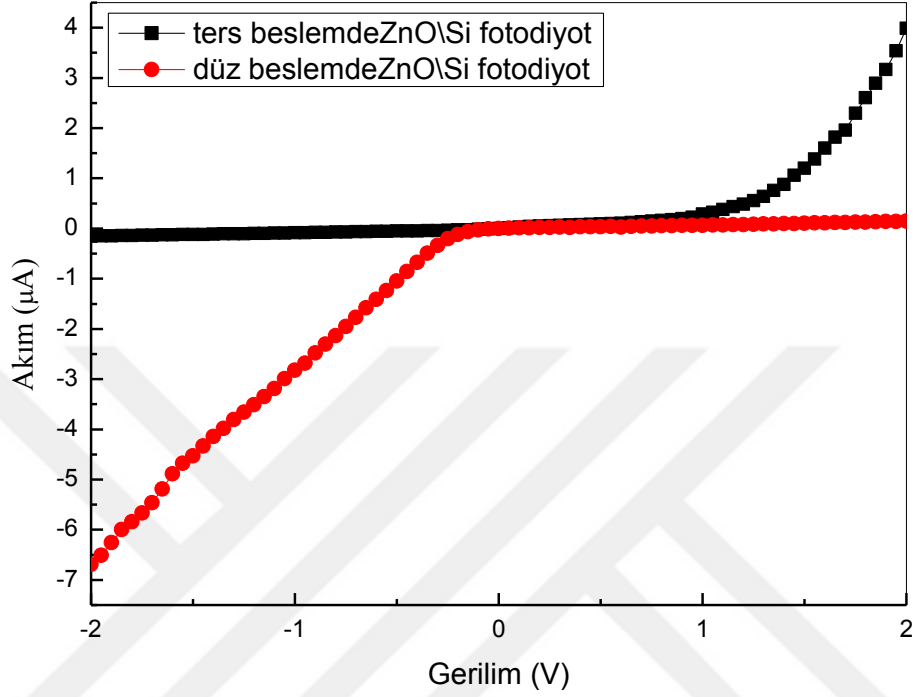
Kontakları her hangi bir film buharlaştırma şekli ile yapılmaması ve direk temas ile basit bir şekilde alınması filmin üretimini ve bundan sonra süreçlerde kullanımını kolaylaştırmak açısından önemlidir.



Şekil 22. ZnO kaplamadan önce Si altlığı I-V grafiği ile elektriksel özellikleri gösterilmesi.

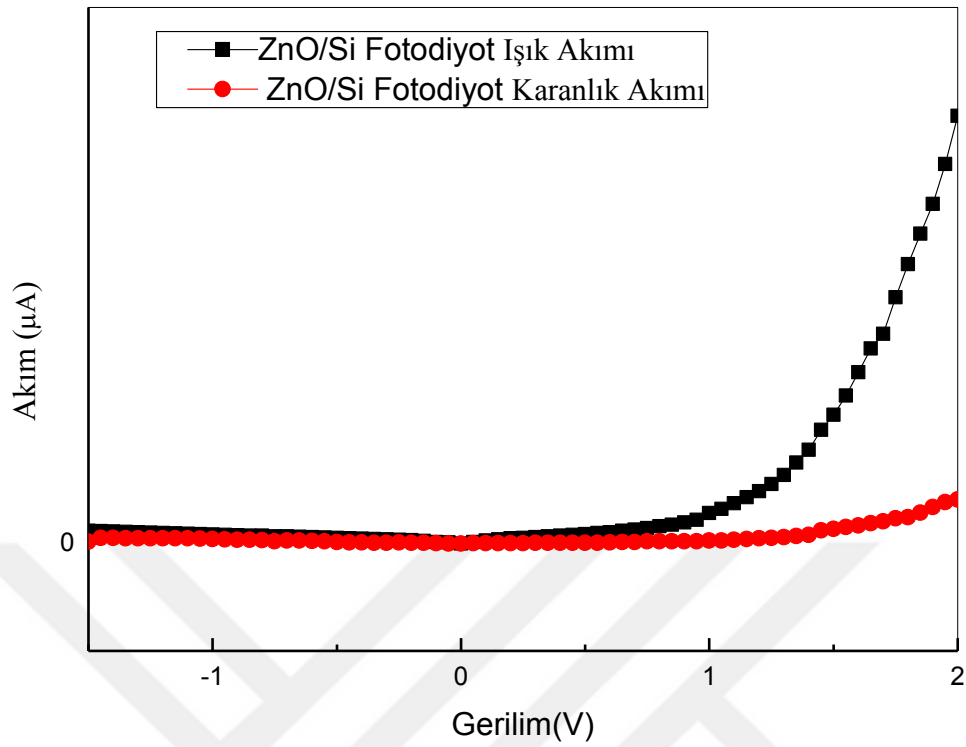
ZnO ile Si arasındaki tabaka yapının çalıştığını kanıtlanması için referans numune olarak ZnO üstünde olmayan Si tabakasına nikel krom kontaklar aynı şartlar altında temas ettirerek yapılmak suretiyle ve orada sadece doğrultucu olmayan omik kontaklar olduğu görülmüştür. Bu referans numune ile birlikte ZnO v Si tabakalar arasına yapılan aynı şartlar altında nikel kromdan yapılan kontaklar ile birlikte, bu sefer ZnO-

Si heteroeklem yapısının doğrultucu olarak çalıştığı gzlemlenifitir. Bu da aynı şartlar altındaki kontakları çinko oksidin devreye girmesi ile birlikte diyot etkisi gösterdiğini kanıtlamaktadır.



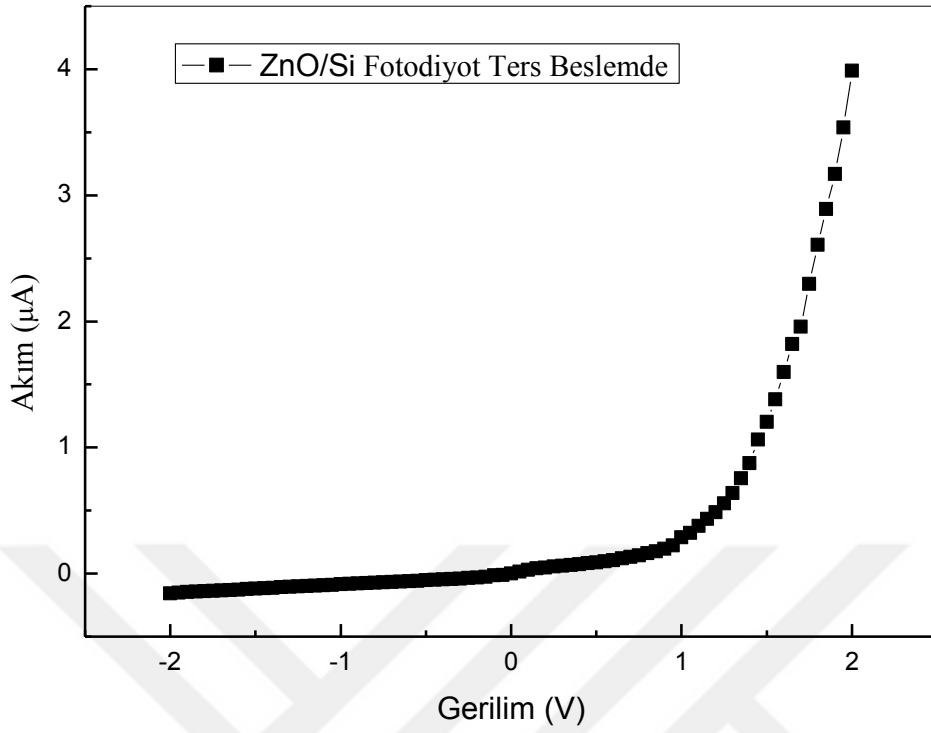
şekil 23. Ters ve düz beslemede ZnO-Si hetero-eklem fotodiyot I-V karakterizasyonu

şekil(23)te görüldüğu gibi ZnO-Si hetero-eklem numune ışık altında hem düz beslemede hem de ters beslemede ölçümleri alındığında karanlığa göre daha yüksek akım vardır ayrıca beklendiği gibi ters akım daha büyük değere sahip olduğunu gösteriyor buda numunenin fotodiyot özelliğine sahip olduğunu açıklar.

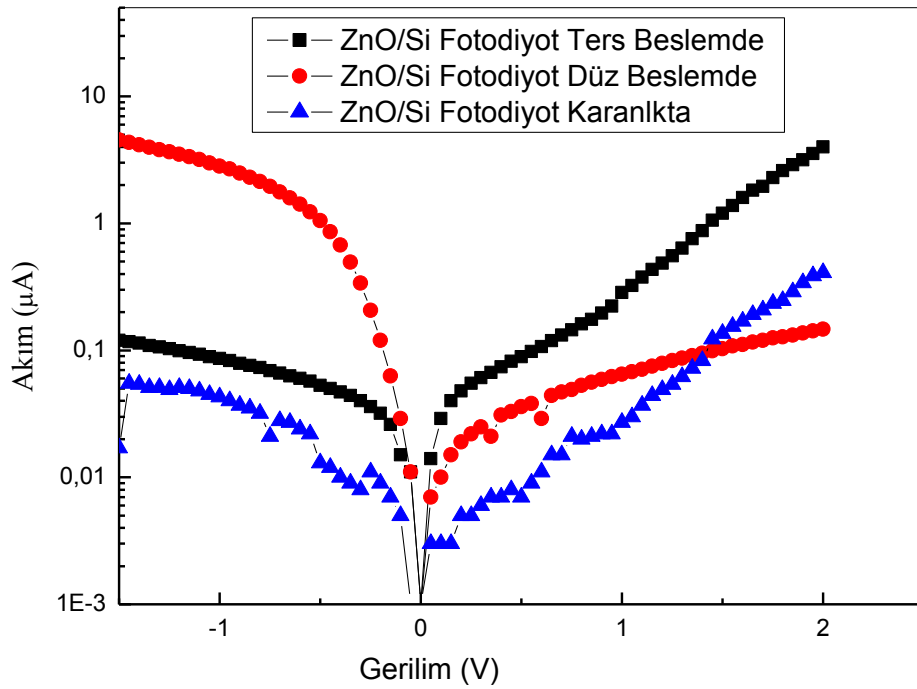


Şekil 24. n-ZnO\Si hetero-eklem fotodiyotun karanlıkta ve aydınlık altında I-V grafiği

Şekil (24)'de ZnO\Si hetero-ekleminin aydınlıkta ve karanlıkta I-V özelliklerini göstermektedir. Akım voltaj grafiğe baktığımızda numune üzerinde -1.5 \+1.5 volt ters gerilim altında numunenin karanlıkta yaklaşık 0.136 μ A akım geçmesine izin verirken aydınlatmada yaklaşık 1,203 μ A geçiyor. Bu durumda ışık vurduğu zaman numunenin direnç değerini azaldığını anlama geliyor ve ışığa duyarlı bir fotodiyot malzeme elde edildiğini göstermektedir.



Şekil 25. 240 C° sıcaklığında hazırlanan n-ZnO/p-Si heteroekleminin I–V grafiği.



Şekil 26. n-ZnO/p-Si heteroeklem tabanlı fotodiyotun yarı logaritmik akım yoğunluğu-Voltaj karakteristiği

Bir hetero-eklemin akım-voltaj özellikleri aşağıdaki ilişki ile analiz edilebilir.

$$I = I_0(e^{qV/nkT} - 1) \quad (10)$$

Burada I_0 ters doyma akımıdır, q elektronik yüküdür, k Boltzmann sabitidir, n idealite faktörüdür ve T sıcaklıktır

Ters doyma akımı I_0 :

$$I_0 = AA^*T^2 e^{q\phi_{b0}/kT} \quad (11)$$

Burada, A ve A^* sırasıyla doğrultucu temas alanı ve etkin Richardson sabitidir. ZnO için; $32\text{A/cm}^2\text{K}^2$

İdealite faktörü n :

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (12)$$

İdealite faktörü n 1 ile 2 arasında değişiyorsa tünelleme akımı mekanizması baskındır. $n = 2$ ise, nesil rekombinasyon akımı mekanizması baskındır. $n > 2$ ise kaçak akım mekanizmasının baskın olduğu anlamına gelir (Keskenler, 2013)

I_0 , $\ln(I)$ - V eğrisinin ileri beslem bölgesinin $V=0$ da ekstrapolasyonundan tespit edilebilir. Φ_{b0} verilen formülden elde edilir;

$$\phi_{b0} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^3T^2}{I_0} \right) \quad (13)$$

Cheung and Cheung's fonksiyonundan seri direnç aşağıdaki denklem yardımıyla tespit edilebilir:

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = IR_s + \frac{nkT}{q} \quad (14)$$

n , I_0 ve Φ_{b0} ve R_s bahsedilen denklemlerden hesaplanan deneysel verileri Tablo2'de sunulmuştur.

Tablo 2. ZnO\Si heteroeklem fotodiyotun elde edilen parametrelerin değerleri

İdealite Faktörü	Doyma Akımı (A)	Bariyer Yüksekliği (eV)	Seri Direnç Rs (Ω)
6.6	1.6×10^{-6}	0.084	8.09

4. TARTIŞMA

Literatürde bahsedilen (Lee vd 2002) yaptıkları çalışmada püskürtme yöntemiyle ürettikleri numuneleri özellikle 300C°'de hazırlanan bir n-ZnO\Si hetero-eklemlili fotodiyot fotoelektrik etkilerin neredeyse hiçbir belirtisini göstermemiştir. 670 nm dalga boyuna sahip tek renkli kırmızı ışık kullanılarak aydınlatma altında fotoelektrik etkiler sergilenmiştir. ZnO filmi 480C°'lik bir optimum sıcaklıkta biriktirildiğinde, bir n-ZnO/p-Si hetero-eklem 'den ters gerilim koşulları altında maksimum miktarda fotoakım elde edilmiştir. Aynı zamanda 240C sıcaklığında spin döndürme yöntemiyle elde ettiğimiz numuneyi ters gerilim altında şekil 25'ya iyi bir şekilde fotodiyot özelliği gösterdiği onlarinkinden çok daha üstünde bir fark gösterdiği gözle görülür bir şekilde ortadadır. Daha düşük biriktirme sıcaklığı ve hazırlama yöntemin basitliği, ışığa duyarlılık hassasiyeti açısından da avantajlıdır.

Literatürde yer alan (Yakuphanoglu ve arkadaşları 2010) yaptıkları diyotun idealite faktörü ve ters doyma akım değerleri akım-voltaj grafiğinden belirlenmiş ve 3.18 ve 5.66×10^9 A, sırasıyla olarak bulmuşlardır

Benzer bir şekilde (F. Z. Bedia vd(2014) ZnO ince filmleri 550C°'de spreyl piroliz yöntemi ile hazırladılar ZnO filmi, n-Zn 0 / p-Si heteroekleminin oluşturmak için Si substratları üzerine biriktirmişlerdir ve I-V ölçümleri ile gerçekleştirmişler. Karanlıkta ve aydınlatma altında oda sıcaklığında ölçtükleri n-ZnO / p-Si heterojunction cihazının akım-voltaj karakteristiği (lambda / 160 W). P-n hetero-yapısının akım-gerilim (I-V) İdealite faktörünü 5.12 ve doyma akımını 8.01×10^{-8} mA olarak hesapladılar.

(Keskenler vd 2019) Sol-jel yöntemi ile çok katmanlı sandviç cihaz biriktirme için p-Si altlıkları üzerinde n- ZnO ince filmler elde etmişlerdi. Au ve Al, fiziksel buhar biriktirme tekniği ile hetero-eklemi iki tarafında gerçekleştirdiler, yaptıkları çalışmada İdealite faktörü 1.4 olarak hesaplanmıştır. Arayüz yapısının homojenliğinden dolayı idealite faktörünün bire yakın olması diyotun ideale yakın bir karakterizasyon sergilediğini göstermektedir. Bu çalışmada, bulunan idealite faktörü değeri 1 ile 2 arasında olduğundan, taşıyıcı taşınması sırasında baskın bir tünelleme akımı mekanizması katkıda bulunabilir.

Bu çalışmada ZnO-Si heteroeklem foto diyot ölçümleri analizlerine göre idealite faktörü ideal değerden daha büyüktür ve ideal olmayan davranış sergilediğini gösterir. Oksit katmanı ve yüzey durumları varlığı bu durumu açıklayabilir.

4. 1. Öneriler

Bu tez çalışmasında, Sol-gel yönteminin döndürerek kaplama tekniği ile Si altlık üzerinde, düşük hazırlama sıcaklığında, ZnO ince film büyütür bir fotodiyot üretme ve elektriksel özelliklerini analiz etmek amaçlanmaktaydı. Çok ideal diyot gibi davranışı göstermemesine rağmen ZnO-Si fotodiyot üretmek bir başarıdır. Elde edilen sonuçlar Çinko oksit filmler güneş paneller, optikal ve fotovoltik gibi diğer uygulamalar için optiksel ve yapısal parametreleri açısından iyi bir umut verici aday malzemedir.

Kaplama tur sayısı, tavlama sıcaklığı, döndürme hızı ve film kalınlığı gibi deneysel koşullar değiştirilerek filmlerin kristal yapısı optimize edilebilir ve daha ideal diyot üretilebilir.

KAYNAKÇA

- Anand, V. K. (2010). Characterization Of Zno Thin Film Deposited By Sol-Gel Process. Researchgate, 398-405.
- Chala, S. (2018). Extraction Of Zno Thin Film Parameters For Modeling A. Elseveir Energy, 30.
- J.Y. Lee. (2002). Optimizing N-Znoyp-Si Heterojunctions For Photodiode Applications. Elseveir, 553–557.
- Jagadish, C. A. (2006). Basic Properties And Applications Of Zno. V. A. Jagadish İçinde, Basic Properties And Applications Of Zno (S. 1-20). Canberra: Elsevier.
- Keskenler, E. (2013). Growth And Characterization Of Ag/N-Zno/P-Si/Al Heterojunction Diode By Sol–Gel Spin Technique. Elseveir.
- Kiyotaka Wasa, M. K. (2004). Thin Film Materials Technology Sputtering Of Compound Materials. M. K. Kiyotaka Wasa İçinde, Thin Film Materials Technology Sputtering Of Compound Materials (S. 1--16). Yokohama: Science Direct.
- Klingshirn, C. F. (2010). Zinc Oxide From Fundamental Properties Towards Novel Applications. New York: Springer.
- Merih, A. A. (2014, 12 03). Zno/Nio Pn Eklem Diyotunun Sol-Jel Yöntemiyle Hazırlanması Ve Elektronik Özelliklerinin Araştırılması. Elazığ, Elazığ, Türkiye.
- Morosanu. (1990). Thin Films By Chemical Vapour Depositionmorosanu. C. E. Morosanu İçinde, Thin Films By Chemical Vapour Depositionmorosanu (S. 01-29). Elseveir.
- Nabil Rochdi, N. (2020). Deposition And Properties Of Znsio3-Containing Zinc Oxide Thin Films. Seleveir, 33.
- Naghdi, S. (2021,222). Thin Films: Definition, Deposition Techniques, And Applications. Thin Films: Definition, Deposition Techniques, And Applications. Webinar.
- Nahhas, A. M. (2019). Introductory Chapter: Overview Of Zno Based Nano Materials And Devices. A. M. Nahhas İçinde, Introductory Chapter: Overview Of Zno Based Nano Materials And Devices (S. 10).
- Özcan. (2014). KatkıSIZ Ve Katkılı Cdte İnce Filmlerin Elektrik Fotoe.
- Özgür. Alivov, C. L. (2005). A Comprehensive Review Of Zno Materials And Devices. Journal Of Applied Physics.

- R. Romero, M. L.-B. (2004). Electrical Properties Of The N-Zno/C-Si Heterojunction Prepared By Chemical Spray Pyrolysis. Elsevier, 7.
- Rahman, A. (2014). A Review On Semiconductors Including Applications And Temperature Effects In Semiconductors. American Scientific Research Journal For Engineering, Technology, And Sciences, 21.
- Rana, F. (2022). Semiconductor Heterostructures. F. Rana İçinde, Semiconductor Optoelectronics (S. 20-50). New York.
- Righinia, G. C. (2014). Glass Optical Waveguides: A Review Of Fabrication Techneques. Optical Engineering, 1-15.
- Sarı. (2008). Yariletken Fiziği: Elektronik Ve Optik Özellikler, Ders Notları, Ankara Üniv. Yariletken Fiziği: Elektronik Ve Optik Özellikler, Ders Notları, Ankara Üniv. Ankara, Ankara, Türkiye: Ankara Üniversitesi.
- Sharma, A. (2022). Applications Of Green Nanomaterials In Electronic And Elctrical Industries. Science Direct, 16.
- Singha, S. K. (2019). Analysis Of Current Transport Mechanisms In Sol-Gel Grown Si/Zno Heterojunction Diodes In High Temperature Environment. Elsevier, 48-55.
- Soylu, M. (2013). Electrical Andopticalpropertiesofzno/Siheterojunctions. Science Direct, 7.
- Sönmezoğlu, S. (2012). İnce Film Üretim Teknikleri. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi,, 390--415.
- Şafak Toygun. (2012). General Principles Of Sol - Gel. Mühendislik Ve Fen Bilimleri Dergisi, 456-478.
- Teja, R. (2021, May 15). What Is A Photodiode? Working, V-I Characteristics, Applications. Electronicshub : <https://www.electronicshub.org/photodiode-working-characteristics-applications/> Adresinden Alındı
- Terna, A. D. (2021). The Future Of Semiconductors Nanoparticles: Synthesis, Properties. Science Direct, 24.
- Url2.(2022,0729).Washington.Edu:https://depts.washington.edu/matseed/mse_resources/webpage/semiconductor/semiconductor.htm) Adresinden Alındı
- Url3.(2022,730).<https://byjus.com/physics/class-12-physics-index/>:<https://byjus.com/physics/class-12-physics-index/> Adresinden Alındı
- Url1.(2021,1202).Bettrained.In:<https://bettrained.in/cbse/12-physics-part-i/semiconductor-electronics-materials-devices-and-simple-circuits> Adresinden Alındı

- Url4. (2022,810).4url.Byjus.Com:Https://Byjus.Com/Physics/Photodiodes-Applications/ Adresinden Alındı
- Url5. (2022,811). Understanding About The P-N Junction Diode Theory And Working. Elprocus – Electronic Projects For Engineering Students: Https://Www.Elprocus.Com/P-N-Junction-Diode-Theory-And-Working/ Adresinden Alındı
- Vyas, S. (2020). A Short Review On Properties And Applications Of Zinc Oxide Based Thin Films And Devices. Johnson Matthey Technol. Review, 202-218.
- Vyas, S. (2020). A Short Review On Properties And Applications Of Zinc Oxide Based Thin Films And Devices. Johnson Matthey Technology, 17.
- Yahia, A. A. (2019). Structural, Optical, Morphological And Electrical Properties Of Indium Oxide Thin Films Prepared By Sol Gel Spin Coating Process. Surfaces And Interfaces, 01-24.
- Yakuphanoglu, F. (2010). ZnO/P-Si Heterojunction photodiode by sol–Gel deposition of. Science Direct, 4.
- Yaonan Hou, Z. M. (2014). Semiconductor Ultraviolet Photodetectors Based On ZnO And Mg_{0.98}Zn_{0.02}O. Journal Of Physics D: Applied Physics, 1-27.