

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

**DAMLATMA VE SPİN COATING YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN
Au/Pd/Borik Asit/Metil Kırmızısı/n-Si/Al/Ag YAPIDAKİ SCHOTTKY
TİPİ GÜNEŞ PİLLERİNİN I-V KARAKTERİSTİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EBUBEKİR DEMİR

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

**TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Kadir EJDERHA**

BİNGÖL-2025

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans eğitimim boyunca danışmanlığımı yapan, tez konusunun belirlenmesinden tezin teslimine kadar olan sürede her an yardımlarını ve bilgilerini eksik etmeden yanımda duran değerli danışmanım Doç. Dr. Kadir EJDERHA hocama, vermiş olduğu destek ve emeklerinden dolayı teşekkürü borç bilir saygılarımı sunarım.

Bu tez çalışmasının yapımında desteklerinden dolayı değerli arkadaşlarım Muhammet Bıra ŞAHİN ve Erhan AKYOL'a teşekkür ederim.

Tez deneylerimi yaptığım Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar personellerine, hoşgörülü ve yardımsever tavırlarından dolayı teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca desteklerini sonuna kadar hissettiğim annem Hilal DEMİR ve babam Sadullah DEMİR'e, değerli eşim Zeynep DEMİR ve oğlum Ali Haydar DEMİR ile birlikte tüm aileme teşekkür ederim.

Ebubekir DEMİR

Bingöl 2025

DAMLATMA VE SPİN COATING YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN Au/Pd/Borik Asit/Metil Kırmızısı/n-Si/Al/Ag YAPIDAKİ SCHOTTKY TİPİ GÜNEŞ PİLLERİNİN I-V KARAKTERİSTİKLERİ

ÖZET

Bu çalışmada suda çözünen borik asit ve kloroform çözücüsünde çözünen metil kırmızısı ile birinin yüzeyi nano piramitleştirme için tahrip edilmiş iki numunenin arayüzeyi oluşturulmuştur. Au/Pd/Borik Asit/Metil Kırmızısı/Al/Ag yapıdaki iki numuneden yüzeyi pürüzsüz olana damlatma yöntemi ile, yüzeyi asitle tahrip edilen numuneye de spin coating yöntemi ile kaplama yapılmıştır. Fabrikasyonu tamamlanan cihazların; 300 K sıcaklığında, karanlık ortamda, 30 mW /cm², 60 mW /cm² ve 100 mW /cm² ışık şiddetlerinde ölçümleri alınmıştır. Diyot ve güneş pili parametreleri bu ölçümler ile elde edilen bilgiler ile hesaplanmış ve tablolar halinde çıkarılmıştır. Genel olarak 3 numunede diyot ve güneş pili özelliği göstermiştir. Elde edilen sonuçlara göre engel yüksekliği ve fill faktörü paralel değişim göstermiştir. Verim değeri ışık arttıkça genel olarak düşmüş, bu da arayüzeyin ışık geçirgenliğini düşürmesi olarak düşünülmüştür. Tüm numunelerde ışık arttıkça akım değeri de artmış ve gerilim üretmeye başlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Güneş pilleri, schottky güneş pilleri, diyot, organik arayüzey, spin coating, omik kontak.

I-V CHARACTERISTICS OF SCHOTTKY TYPE SOLAR CELLS AS THE Au/Pd/Boric Acid/Methyl Red/n-Si/Al/Ag STRUCTURE OBTAINED BY DROP CASTING AND SPIN COATING METHODS

ABSTRACT

In this study, the interfaces of two samples were formed using water-soluble boric acid and methyl red dissolved in chloroform solvent, with one of the sample surfaces being damaged for nano-pyramidal structuring. Coatings were applied to the smooth-surfaced sample using the drop-casting method, while the acid-etched sample was coated using the spin-coating method. Measurements of the fabricated devices were performed in a dark environment at 300 K and under light intensities of 30 mW/cm², 60 mW/cm², and 100 mW/cm². Diode and solar cell parameters were calculated based on the data obtained from these measurements and were presented in tables. Overall, all three samples exhibited diode and solar cell characteristics. According to the results, the barrier height and fill factor showed parallel variations. The efficiency value generally decreased with increasing light intensity, which was attributed to the reduced light transmittance of the interface. In all samples, as the light intensity increased, the current value also increased, and voltage generation was observed.

Keywords: Solar cells, schottky solar cells, diode, organic interface, spin coating, ohmic contact.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ	x
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	4
2.1. Güneş Pili Tarihçesi	4
2.2. Güneş Pili Çeşitleri.....	6
2.2.1. Monokristal Güneş Pilleri	6
2.2.2. Polikristal Güneş Pilleri.....	6
2.2.3. Amorf Güneş Pilleri	7
2.2.4. İnce Film Güneş Pilleri.....	7
2.2.5. Organik Güneş Pilleri.....	8
2.2.6. Boya Sentezli Güneş Pilleri.....	8
2.3. Czochralski Yöntemi	8
2.4. Yarıiletkenler.....	9
2.4.1. Yarıiletkenlerin Özellikleri ve Yapıları.....	10
2.4.2. Yarıiletkenlerin İletime Geçme Durumu.....	11
2.4.3. Yarıiletkenlerin Tipleştirme	12
2.4.4. N Tipi Yarıiletkenler	12
2.4.5. P Tipi Yarıiletkenler	13
2.4.6. PN Eklemleri	14
2.5. Metal Yarıiletken Kontaklar.....	15
2.5.1. Schottky Kontaklar.....	17
2.5.2. Omik Kontaklar	18
2.6. Güneş Pilleri ve Fotodiyotlar.....	19

2.6.1. Güneş Pillerinin Parametreleri	21
3. KAYNAK ÖZETLERİ	26
4. MATERYAL VE YÖNTEM	31
4.1. Bor Elementi, Özellikleri ve Kullanım Alanları.....	31
4.1.1. H ₃ BO ₃ (Borik Asit)	32
4.2. Metil Kırmızısı, Molekül Yapısı ve Özellikleri	34
4.3. N Tipi Kristal Silisyum Malzemesinin Temizlik İşlemi	35
4.4. Buharlaştırma İle Kaplama Tekniği	36
4.5. Arayüzey Kaplama İşlemi	37
4.5.1. Damlatma İle Kaplama Yöntemi.....	38
4.5.2. Spin Coating İle Kaplama Yöntemi	38
4.6. Manyetik Alanda DC Saçtırma Tekniği İle Kontak Oluşturma	39
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	42
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	50
KAYNAKLAR	52

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Å	: Angström
Si	: Silisyum
Ge	: Germanyum
B	: Bor
Al	: Alüminyum
Ag	: Gümüş
Au	: Altın
Ar	: Argon
Pd	: Paladyum
C	: Karbon
µm	: Mikrometre
AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
HCl	: Hidroklorik Asit
HF	: Hidrojen Florür
H ₂ O ₂	: Hidrojen Peroksit
KOH	: Potasyum Hidroksit
N ₂	: Azot
UV	: Ultraviyole
I-V	: Akım-Gerilim
e ⁻	: Elektron İyonu
E _f	: Fermi Enerji Seviyesi
E	: Elektrik Alan
Φ _m	: Metal İş Fonksiyonu
Φ _s	: Yarıiletken İş Fonksiyonu
Φ _b	: Engel Yüksekliği
V	: Gerilim
I	: Akım

I_o	: Doyma Akımı
eV	: Elektron Volt
J	: Akım Yoğunluğu
A^*	: Richardson Sabiti
A^{**}	: Etkin Richardson Sabiti
T	: Sıcaklık
K	: Kelvin
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat Derece
I_{kd}/I_{sc}	: Kısa Devre Akımı
V_{ad}/V_{oc}	: Açık Devre Gerilimi
mW	: Miliwat
q	: Elektron Yüğü
k	: Boltzman Sabiti
I_f	: Diyot Üzerinden Geçen Akım
I_m	: Maksimum Akım
V_m	: Maksimum Gerilim
P_m	: Maksimum Güç
P_{in}	: Giriş Gücü
DC	: Doğru Akım
FF	: Fill Faktörü
η	: Verim

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	1954 Yılında Bell Laboratories'te Üretilen İlk Silikon Tabanlı Güneş Pili	5
Şekil 2.2.	Monokristal (solda) ve Polikristal (sağda) Güneş Pilleri	7
Şekil 2.3.	Czochralski Yöntemi ile Kristal Oluşum Adımları	9
Şekil 2.4.	Silikon Atomları Arasında Bulunan Kovalent Bağlar	11
Şekil 2.5.	Yalıtkanlar (solda), Yarı İletkenler (ortada) ve İletkenlerin (sağda) Bant Diyagramı	12
Şekil 2.6.	N Tipi Yarıiletken Atom Bağ Yapısı	13
Şekil 2.7.	P Tipi Yarıiletken Atom Bağ Yapısı	14
Şekil 2.8.	PN Eklemine Temsili Gösterimi	15
Şekil 2.9.	Kontakların Temsili Gösterimi	16
Şekil 2.10.	Schottky Kontak ve Omik Kontakın Akım-Gerilim (I-V) Karakteristikleri ..	19
Şekil 2.11.	Güneş Pili Çalışma Prensipli Temsili	20
Şekil 2.12.	Elektron – Boşluk Çifti Hareketi	21
Şekil 2.13.	Direnç Yüküne Sahip Güneş Pilleri	22
Şekil 4.1.	Bor Kristal Yapısı Temsili	31
Şekil 4.2.	Borik Asit Kristal Şeklindeki Formu (solda) ve Bileşik Yapısı (sağda)	33
Şekil 4.3.	Metil Kırmızısının Molekül Temsili	35
Şekil 4.4.	Buharlaştırma İşleminin Yapıldığı Bingöl Üniversitesi Merkez Laboratuvarında Bulunan Termal Buharlaştırma Cihazı	36
Şekil 4.5.	Tavlama Fırınının Bölümlerini Gösteren Temsili Görseli	37
Şekil 4.6.	Damlatma Tekniğiyle Yüzey Kaplama	38
Şekil 4.7.	Spin Coating Yöntemi Temsili	39
Şekil 4.8.	DC Saçırma Yöntemi Temsili	40
Şekil 4.9.	2 Numaralı Numunenin Kesit Temsili	41
Şekil 4.10.	3 Numaralı Numunenin Kesit Temsili	41
Şekil 5.1.	1 Numaralı (Referans) Numunenin Karanlıkta ve Işık Altında Gösterdiği I-V Karakteristiği	42
Şekil 5.2.	2 Numaralı Numunenin Karanlıkta ve Işık Altında Gösterdiği I-V Karakteristiği	43

Şekil 5.3. 3 Numaralı Numunenin Karanlıkta ve Işık Altında Gösterdiği I-V Karakter- istiği.....	44
Şekil 5.4. Numune 1,2 ve 3'ün Karanlıkta ve 100 mW/cm ² Işık Şiddeti Altındaki Kar- akteristikleri.....	45
Şekil 5.5. Karanlıkta I-V Karakteristiğine Denklem Çıkarma Amacıyla Çizilen Teğet.	46
Şekil 5.6. (a) ve (b), 2 Numaralı Numuneye Ait SEM Görüntüleri	48
Şekil 5.7. (a) ve (b), 3 Numaralı Numuneye Ait SEM Görüntüleri	49

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Yarıiletken ve Fonksiyon İşlevlerine (Φ) Göre Kontak Çeşitleri.....	17
Tablo 4.1. Asit – Baz İndikatörleri ve pH Çalışma Aralıkları	34
Tablo 5.1. Numunelerin Işık Şiddetine Bağlı Elektriksel Parametreleri.....	45
Tablo 5.2. Numunelerin Doluluk Oranı (FF) ve Engel Yüksekliği Değerleri	46
Tablo 5.3. 3 Numuneye Ait Işık Şiddetine Bağlı Verim Değerleri.....	47

1. GİRİŞ

Enerji kavramı tarihsel sürecin her aşamasında insanlığın ihtiyacı olmuştur. İlk tekerleğin keşfinden günümüzde kullanılan son teknoloji nükleer santrallere kadar olan süreç bütünüyle insanoğlunun kendi öz enerjisini kullanmak istememesi yani bir başka deyişle az efor sarfederek büyük işler yapma isteğinin bir dışa vurumudur. Tarihin tüm basamaklarında teknolojik gelişmeler sürekli ilerleme kaydetmiştir. Bu durum refahın yükselmesine, insanın rahata düşkünlüğünün artmasına ve refahın yükselmesiyle gelen güven ortamından kaynaklanan nüfus artışına yol açmıştır. Tüm bu gelişmeler, insanoğluna daha fazla enerji ihtiyacı doğurmuştur. İnsanların enerji ihtiyacı, onları yeni enerji kaynakları arayışına yönlendirmiş ve yakın geçmişin en önemli kaynağı olan fosil yakıtlar keşfedilmiştir. Ancak, fosil yakıtların kullanımının yaygınlaşması; bir yandan rezervlerinin azalması ve sınırlı olması, diğer yandan hava kirliliğinin artışı nedeniyle doğal dengenin bozulması gibi ciddi sorunları beraberinde getirmiştir. Bu nedenle enerji ihtiyacını karşılamak için alternatif kaynakların araştırılması uzun süredir bilim insanlarının bir numaralı hedefi haline gelmiştir. Bu bağlamda, herhangi bir atık üretmeyen ve yeryüzü tarihi boyunca canlılar için temel enerji kaynağı olan güneş enerjisi, enerji arayışı içinde olan araştırmacılar ve bilim insanları için en büyük fenomen haline gelmiştir. Günümüzde güneşten direkt enerji elde etmek için kullanılan yarıiletken tabanlı güneş pilleri günümüzde yoğun bir şekilde araştırılan bir alan haline gelmiştir.

Günümüzde güneş enerjisinin direkt olarak elektrik enerjisine dönüştürülmesinde kullanılan cihazların üretiminde, yaklaşık olarak %95 oranında silisyum (Si) yapıları malzemeler tercih edilmektedir. Silisyumun yüksek verimliliği, doğada bol miktarda bulunması ve yarıiletken özellikleri bu maddeyi vazgeçilmez bir hale getirmiştir. Özellikle monokristal ve polikristal olarak farklı iki şekilde imal edilebilmesi, farklı ihtiyaçlara cevap verdiğinden araştırmacılar ve bilim insanları için geniş bir kullanım alanı sunmaktadır (Bereznev et al. 2007). Silisyum malzemesi, çevresel faktörlere (özellikle sıcaklık ve nem gibi değişkenlere) karşı yüksek dayanıklılık göstermesinin yanı sıra, yük taşıma ve iletim konusunda oldukça etkili bir performans sergiler (Yağcı, 2011).

Güneş enerjisi alanında yapılan kapsamlı araştırma ve geliştirme çalışmaları sonucunda, farklı türlerde güneş pilleri kullanılmaya başlanmıştır. Ancak; bazı güneş pillerinin toksik maddeler yayma riski ve yüksek üretim maliyeti gibi dezavantajları, bilim insanlarını alternatif malzeme arayışına yönlendirmiştir. Son dönemde güneş pili üretiminde organik malzemelerin kullanılması yaygınlaşmıştır. Organik malzemelerin tercih edilme sebepleri elektriksel ve optik özellikleri geliştirmek, yani maksimum ışık geçirgenliğini sağlamak ve direnç değerlerini minimum seviyeye indirmektir. Organik malzemeler, düşük maliyetli yapıları, kolay üretilbilme olanağı ve moleküler düzeyde yapılacak ufak değişimler ile çok farklı fiziksel özellikler kazanabilmeleri ile dikkat çekmektedirler. Ayrıca organik malzemelerin esnek altlık yüzeylere uygulanabilir olması, onları birçok uygulama için tercih edilen bir seçenek haline getirmiştir (Yiğit, 2022).

Güneş pillerinin verimini arttırmak için kullanılan malzemelerden biri de bor elementidir. Bor, güneş pillerinin performansını arttırmak için bir doping etkisi oluşturur. Güneş pillerinde silisyumun p-tipi yarıiletken özellik kazanabilmesi için, silisyuma katkı maddesi olarak bor eklenir. Silisyum eriyiğine bor ilave edilmesi ile madde içinde pozitif yük taşıyan boşluklar oluşur. Bu boşlukların fazlalaşması güneş pilinin elektrik üretim kapasitesini optimize eder. Bor, silisyumun ısıl dayanıklılığını arttırarak çok uzun süreler kullanılmasına olanak sağlar. Yük taşıyıcıların (boşluk) daha etkili bir şekilde hareket etmesine olanak sağladığından enerji dönüşüm verimliliğini arttırır. Doğada yüksek miktarda bulunduğu ve maliyeti düşük olduğundan katkı olarak kullanılması en cazip maddelerdendir.

Bir güneş pili, temel olarak p-n eklem yapısından meydana gelir. Güneş pilleri genel olarak Schottky ve p-n eklemlili yapılar olarak iki gruba ayrılır. Bu yapıların her ikisi tek monokristal, polikristal, heteroeklem ve amorf kristal gibi farklı türlerdeki güneş pillerinde bulunabilir. Bu yapılar tamamen veya kısmi olarak organik malzemelerle kaplanmış arayüzeylere sahip olabilir. Yapılan araştırmalarda, organik arayüzeylerin özellikle Schottky yapıların doğrultma özelliklerini değiştirdiği gözlemlenmiştir. Bir güneş pili; iyi bir Schottky kontak yapısı oluşturulması durumunda, verimli bir elektrik üretici olarak kullanılabilir (Bekil, 2019).

Bu çalışmamda amaç; üretimini yaptığım referans numune, damlatma yöntemi ve spin coating yöntemi (bu numunede yüzey alanı arttırmak amacıyla asit ile yüzey tahribatı yapıldı) ile ayrı ayrı hazırladığım bor ve metil kırmızısı organik arayüzeyli Schottky güneş pillerinin karakteristik davranışlarını gözlemlemektir. Üretimini yaptığım malzemelerin oda sıcaklığında, karanlık ve güneş simülatörü ile farklı ışık şiddetleri altındaki parametrelerini hesaplandı. Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) cihazında malzemelerin yüzey yapısı görüntülendi.

2. GENEL BİLGİLER

2.1. Güneş Pili Tarihçesi

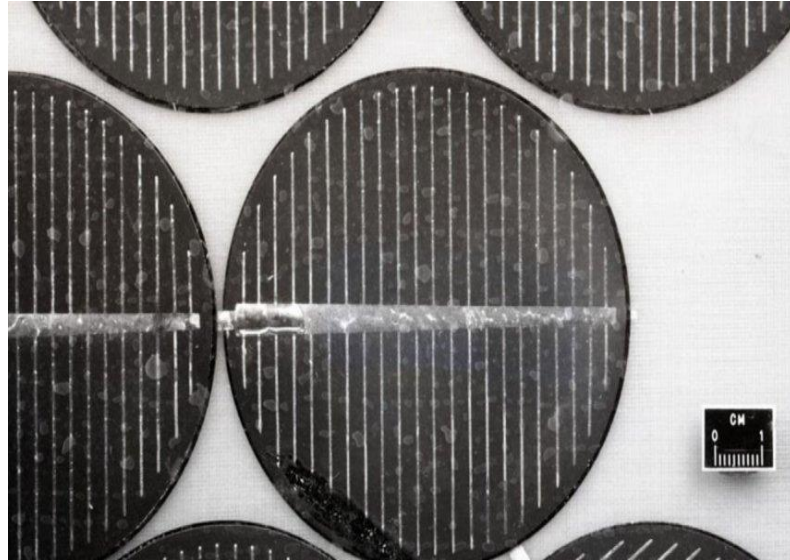
Dünyanın en bol ve yenilenebilir enerji kaynaklarının başında güneş gelir. Güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren güneş pilleri, son yıllarda hızla gelişen ve geniş bir kullanım alanı bulan bir teknoloji haline gelmiştir. Güneş pillerinin tarihi 19. Yüzyılın ortalarına kadar uzanmakta olup, birçok önemli bilimsel keşif ve gelişme sayesinde günümüzdeki haline ulaşmıştır.

Güneş pillerinin çalışma prensibi, fotovoltaiik etkiye dayanmaktadır. Fotovoltaiik kelimesini incelediğimizde foto ışık, volt ise elektriksel gerilim anlamını taşımaktadır. Yani ışık ile gerilim üretilesi anlamına gelmektedir. Fotovoltaiik etkilerin temelleri, 1939 yılında Fransız fizikçi Alexandre Edmond Becquerel tarafından atılmıştır. Becquerel, güneş ışığının bir elektrot üzerinden geçerek elektrik akımı oluşturduğunu keşfetmiş ve böylece güneş ışığının doğrudan elektrik enerjisine dönüşmesinin mümkün olduğunu dünyaya göstermiştir. Tabi bu keşif güneş enerjisinin pratikte kullanılabilir hale gelmesi için yeterli olmamıştır. Fakat Becquerel enerji dönüşümünün yapılabilir olduğunu gösteren ilk bilim adamıdır.

1873 yılında İngiliz Bilim Adamı Willoughby Smith, selenyum elementinin ışık altında elektrik iletkenliğinin arttığını gözlemlemiştir. Bu buluş, güneş enerjisiyle elektrik üretme sürecinde bir mihenk taşı olmuştur. Smith'in yaptığı keşif, güneş enerjisi ile çalışan ilk ilkel cihazların üretimine olanak sağlamış olsa da bu cihazların verimliliği kayda değer görülmemiştir.

Tarihteki güneş pillerinin ilk başarılı örneği, Amerikalı Bilim Adamı Charles Fritts tarafından 1883 yılında üretilmiştir. Fritts, selenyum tabakasını altınla kaplayarak ilk ilkel güneş pilini oluşturmuştur. Bu pilin verimliliği çok çok düşük olsa da güneş enerjisinin elektrik üretiminde kullanılabilir olduğunu göstermiş ve güneş pili teknolojisinin temellerini atmıştır.

Günümüzde kullandığımız fotovoltaik pillerin temelini atan en önemli gelişme, 1954 yılında Bell Laboratories bünyesinde çalışan Daryl Chapin, Calvin Souther Fuller ve Gerald Pearson tarafından yapılmıştır. Silikondan yapılan ilk güneş pilini üretmişlerdir. %6-7 verimle çalışabilen bu piller ilk ticari güneş pilleri olarak tarihteki yerini almıştır. (incehesap.com)



Şekil 2.1. 1954 Yılında Bell Laboratories'te Üretilen İlk Silikon Tabanlı Güneş Pili (incehesap.com)

1970 enerji krizi, güneşten üretilen enerjiye talebi ve ilgiyi bir hayli arttırmıştır. Çevre dostu alternatif enerji arayışının artması ile güneş enerjisi bir anda ilgi odağı olmuştur. Uzay biliminin gelişmesiyle beraber uzay araştırmalarında da kullanılmaya başlayan güneş pilleri, iyice insan hayatına yerleşmiştir. Uydu ve uzay sistemlerinde başarıyla kullanılan güneş pilleri artık güvenilirliğini ispat etmiş duruma gelmiştir. 1980 ve 1990'lar güneş pillerinin en hızlı geliştiği zamanlar olmuştur. Alternatif materyal kullanımları ve farklı üretim teknikleri sayesinde güneş pillerinin performansı artmış, malzeme üretim tekniklerinin farklılaşması nedeniyle maliyetler düşmüştür. Bu gelişmeler güneş enerjisinin ticari kullanımını yaygınlaştırmış ve enerji santrallerinin kurulmasına olanak tanımıştır. Aynı zamanda evlerde kullanılan güneş panelleri de yaygınlaşmaya başlamıştır. Milenyumdan sonra güneş enerjisi sektör halini almış ve hızla gelişmeye başlamıştır. Verimlilik ve performans artık iyiden iyiye artarken maliyetler çok büyük ölçüde düşüşe geçmiştir. Güneş, dünya çağında önemli bir alternatif enerji kaynağı haline gelmiştir. Yenilikçi malzeme kullanımı, daha verimli ve ucuz güneş pillerinin üretilmesinin sağlamıştır. Ayrıca güneş enerjisinin depolama teknolojilerindeki gelişmeler sayesinde

güneş enerjisi, daha kesintisiz ve güvenilir bir enerji kaynağı olarak kullanılmaya başlanmıştır (sunartpv.com).

Güneş enerjisi teknolojisi 19. Yüzyıldan itibaren önemli gelişim aşamaları kaydetmiştir. Yapılan bilimsel keşifler ve teknolojik ilerlemeler, güneş enerjisinin küresel çapta yaygın bir enerji kaynağı olarak kullanılmasını sağlamıştır. Güneş pillerinin verimliliği ve ekonomik sürdürülebilirliği arttıkça, bu teknoloji gelecekte enerji üretiminde önemli bir alan işgal edecektir. Güneş enerjisinin çevreye zararsız olması ve yenilenebilir bir kaynak olması, insanlığın enerji ihtiyacının karşılanması konusunda yerini en üst sıraya çıkarmıştır.

2.2. Güneş Pili Çeşitleri

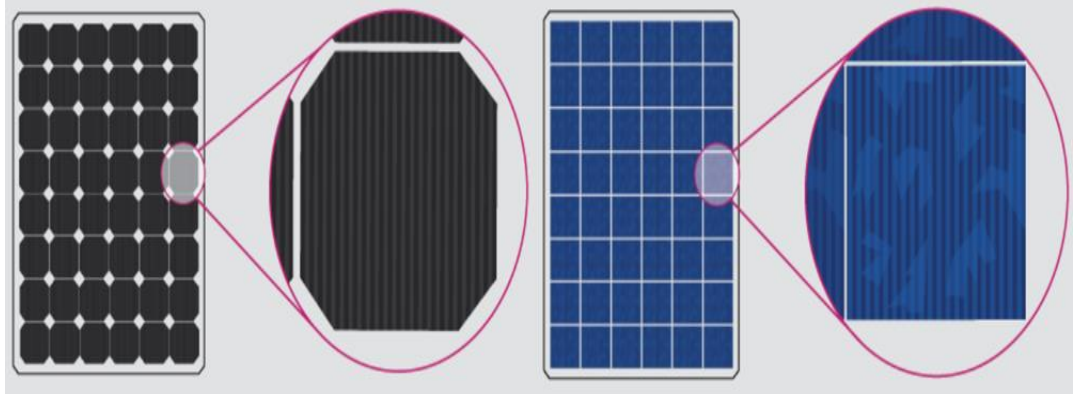
2.2.1. Monokristal Güneş Pilleri

Monokristal güneş pilleri, günümüzün en verimli güneş pili teknolojilerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu piller, tek bir silisyum kristalinin düzgün bir yapıya sahip olması sayesinde ışık emilimini ve elektrik üretimini daha etkin bir şekilde gerçekleştirir. Monokristal güneş pilleri, fotovoltaik alanda yaygın olarak kullanılır ve özellikle yüksek verimlilik gerektiren sistemlerde tercih edilir. Yüksek saflıkta silikon kullanılarak üretilir ve bu silikon, tek bir kristal halinde olmalıdır. Genellikle Czochralski yöntemiyle üretilir. Bu yöntemde erimiş haldeki silikon, kristalleşerek silindirik bir yapı oluşturur ve bu yapı ince tabakalar halinde kesilerek (wafer) güneş pillerinin tabanını oluşturur. Önemli avantajlara sahiptir. Yüksek verimlilikleri sayesinde daha az alanda daha fazla enerji üretir. Ömürleri alternatiflerine göre daha uzundur. Ortalama olarak doğru bakımla ömürleri 25 yılın üzerinde olur. (linquip.com).

2.2.2. Polikristal Güneş Pilleri

Polikristal güneş pilleri, fotovoltaik alanda yaygın olarak tercih edilen bir diğer güneş pili türüdür. Bu piller, birden fazla silikon kristalinin birleşiminden oluşur ve üretim süreçlerinin daha basit ve maliyetlerinin daha düşük olması sayesinde monokristal pillerden daha ekonomik bir seçenek sunar. Polikristal güneş pilleri, silikon malzemenin düzensiz şekilde kristalleşmesiyle oluşur. Üretim süreci, monokristal pillerin yöntemine

kıyasla daha basit ve az maliyetlidir. Erimiş silikon bir kalıba dökülür ve soğutulurken kristaller farklı yönlerde doğru yönelir. Bu piller maliyeti nedeniyle çok kullanılır fakat verimlilikleri monokristal pillere göre daha düşüktür (linquip.com).



Şekil 2.2. Monokristal (solda) ve Polikristal (sağda) Güneş Pilleri

2.2.3. Amorf Güneş Pilleri

Amorf güneş pilleri, kristal yapıya sahip silikon yerine, düzensiz bir yapıya sahip amorf silikon kullanılarak üretilir. Bu pillerin fabrikasyonu sırasında silikon tabakaları, sıvı veya buhar halinde bir yüzeye kaplanarak birleştirilir ve güneş pillerinin aktif katmanları oluşturulur. Amorf silikonun düzenli bir atom dizilimine sahip olmaması, bu pillerin verimliliğini monokristal ve polikristal pillere göre düşük olmasını sağlar. Verimleri %5-10 arasındadır (Baba, 2014).

2.2.4. İnce Film Güneş Pilleri

İnce film güneş pilleri yönteminde, daha yüksek ışık emme kapasitesine sahip malzemelerin kullanılmasıyla düşük kaliteli bir plak yüzeyine ince bir silikon tabaka üretilir. İlk kez 1980 yılında Wolf M. Ve J. Lofersky tarafından, güneş pili uygulamalarında daha ince tabakalar oluşturma fikri ortaya atılmıştır. Bu pillerin ince filmleri önemli bir avantaj sağlar. Filmlerin kalınlığı azaldıkça, açık devre gerilimi artarken, saturasyon akım değeri düşer. Verimlilikleri %7-9 arasındadır (Korun, 2016).

2.2.5. Organik Güneş Pilleri

Kullanılan yöntemlerin kolaylığı, malzeme parametrelerinin değiştirilmesindeki kolaylık ve düşük maliyet gibi özellikleri sayesinde organik güneş pilleri fotovoltaik alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu piller karbon (C) içeren polimerlerden üretilir. Rulodan ruloya işleme tekniği ile yüksek hızda güneş pilleri imal etmek son derece basittir. Düşük sıcaklıkta uygulanan bu metot diğer tekniklere göre daha verimlidir. Aktif Kristal maddeler, bir çözücüyle çözündükten sonra, kaplama cihazı yardımı ile plastik bir tabaka üzerine uygulanır. 1980'lerde güneş pili teknolojisinde polimer malzemelerin kullanımı üzerine ilk çalışmalar yapılmış ama bu çalışmaların verimleri çok düşük kalmıştır. Sonraki yıllarda önemli gelişmeler yaşanmış ve elde edilen verim %1'e ulaşmıştır. Günümüzde verimleri %9-11 arasındadır. En büyük avantajları kolay üretim, düşük maliyet ve yüzeylere kolay uygulanabilmesidir (Polat, 2020).

2.2.6. Boya Sentezli Güneş Pilleri

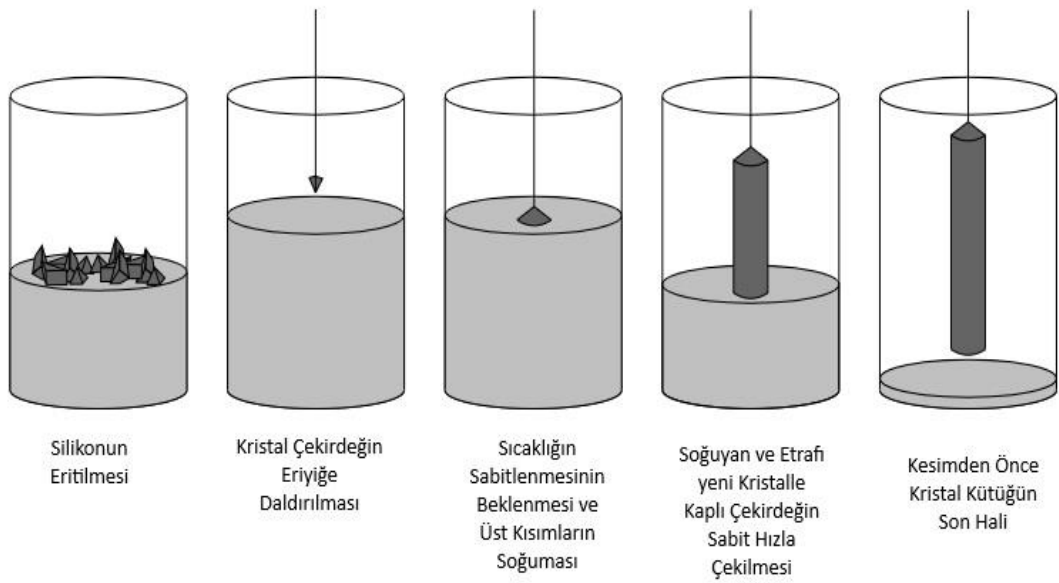
1991 yılında Michael Gratzel tarafından geliştirilen bu güneş pilleri, fotosenteze benzer bir çalışma prensibine sahiptir ve geleneksel yarıiletken teknolojilerinden farklıdır. Işığın soğrulması ve yük taşınması gibi işlevler diğer yarıiletkenlerin çalışması bakımından ayrıdır. Kristal silisyum teknolojisinin yerine geçmesi beklenen bu sistem, yaklaşık %11 verimle çalışmaktadır. Düşük maliyetli olmasından dolayı büyük potansiyele sahiptir (Alpaslan, 2009).

2.3. Czochralski Yöntemi

Güneş hücreleri, Galyum (Ga), Arsenik (As), Silisyum (Si) ve İndiyum (In) gibi farklı materyaller ile imal edilebilir. Güneş hücresi sektöründe, hammaddesinin bol miktarda bulunabilmesi ve dolayısıyla maliyetlerindeki düşüklük nedeniyle Silisyum maddesi en çok kullanılan maddedir (Özyahni, 2024).

Czochralski yöntemi, özellikle monokristal silikon üretimi için yaygın olarak kullanılan bir kristalleştirme yöntemidir. Yarıiletken sektöründe, yüksek saflıkta ve düzenli bir kristal yapı oluşturmak için en çok kullanılan tekniktir. Bu yöntem, 1916 yılında Polonyalı bilim adamı Jan Czochralski tarafından geliştirilmiş olup, adını mucidinden almıştır.

Bu yöntem yüksek saflıkta bulunan silikon maddesinin yüksek sıcaklıkta eritilmesi ile başlar. Bu eriyikler bir havuz içerisinde bulunur. Sıcaklık yaklaşık 1420 °C değerinde sabitlenir. Bir kristal çekirdek bu havuza daldırılır. Kristal sıcaklığı dengeleninceye kadar havuzda bekletilir. Sonrasında kristal döndürülerek yavaşça havuz dışına çekilir. Bu işlemde soğuyan silikon kristal çubuk etrafında katı hal alır ve dönmenin etkisi kristal yönlerini aynı yapar. Büyüyen kristal tamamen soğutulduktan sonra ince tabakalar halinde kesilerek güneş hücrelerinde kullanılan silikon wafer oluşturulur.



Şekil 2.3. Czochralski Yöntemi ile Kristal Oluşum Adımları

2.4. Yarıiletkenler

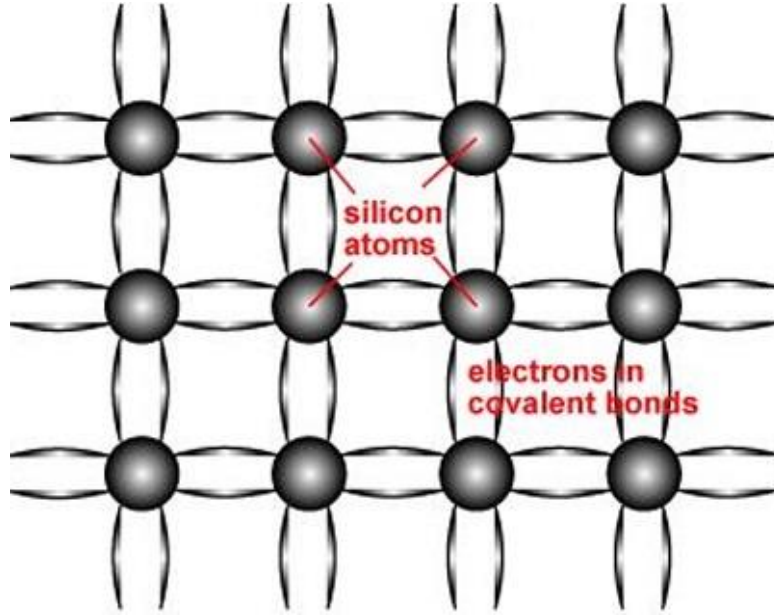
İletkenlik; bir malzemenin elektriksel geçirgenlik kabiliyetidir. Yalıtkanlık; bir malzemenin elektrik akımına karşı koyduğu dirençtir. Doğadaki maddeleri bu tanımlardan yola çıkarak ikiye ayırabiliriz diye düşünülebilir. Fakat doğada bazı maddeler vardır ki bunlar belli şartlar altında iletken, belli şartlar altında ise yalıtkan özellikler gösterebilirler. Bunlara literatürde yarıiletkenler denir. Bu malzemeler iletkenlik ile yalıtkanlık arasında kalan bir takım özel elektriksel malzemelerdir. Teknoloji dünyasında yeri doldurulamayacak kadar önemli olan bu materyaller dış etkenlere (ışık, ısı, manyetik alan vb.) bağlı olarak iletkenlik özelliklerini değiştirebilirler. Bu benzersiz özellik günümüz teknolojisinin temel taşıdır. Yarıiletkenlerin keşfi ve gelişimi, elektroniğin temelini

oluşturmaktadır. 1833 yılında Michael Faraday, Gümüş sülfürün (Ag_2S) iletkenliğinin ısıtınca fazlaştığını keşfetmiştir. Bu keşif yarıiletkenlerin tarihteki keşfi olarak nitelendirilebilir.

Periyodik tablodaki farklı gruplardan gelen yarıiletken malzemeler, bazı ortak özelliklere sahiptir. Bir yarıiletkenin özellikleri, atomik yapısıyla doğrudan ilişkilidir ve gruplar arasında farklılık gösterir. Fotovoltaik uygulamalar için doğru malzemenin seçilmesinde bu atomik özellikler önemli rol oynar. Genellikle silisyum (Si), germanyum (Ge) ve bu elementlerin bileşikler kullanılır.

2.4.1. Yarıiletkenlerin Özellikleri ve Yapıları

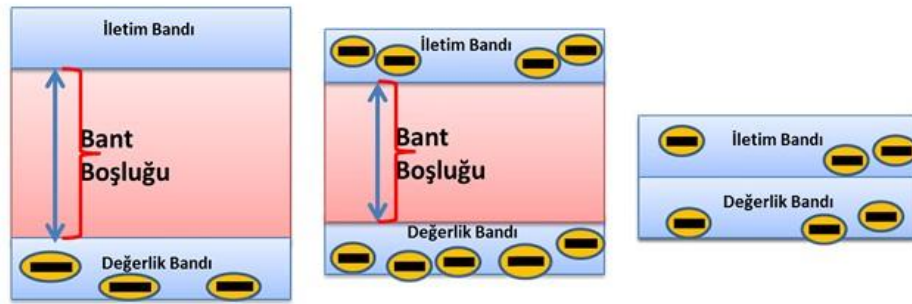
Yarıiletkenler, düzenli bir yapı oluşturacak şekilde bir araya gelen atomlardan meydana gelir. Örneğin silikon atomları, dört değerlik elektronu paylaşarak çevresindeki diğer atomlarla kovalent bağlar oluşturur. Silikon her atomun 8 elektronla çevrelendiği düzenli ve tekrar eden bir yapı oluşturan atomlardan oluşur. Bir atom, pozitif yüklü protonlar ve yüksüz nötronlardan oluşan bir çekirdek ile bu çekirdeğin etrafında yüksek hızlarda hareket eden elektronlardan oluşur. Bu durum doğadaki tüm atomlarda aynıdır. Proton ve elektron sayıları eşit olduğundan bir atom nötrdür. Yarıiletkenlerde her atomun çevresindeki elektronlar kovalent bağlar aracılığı ile diğer atomlar ile paylaşılır. Kovalent bağ; İki atomun elektronlarını paylaşması ile oluşur. Her silikon atomu, çevresindeki dört atomla dört kovalent bağ kurar, bu durum toplamda her silikon atomunun çevresinde 8 elektron olmasını sağlar (Görmez 2021).



Şekil 2.4. Silikon Atomları Arasında Bulunan Kovalent Bağlar (asdn.net)

2.4.2. Yarıiletkenlerin İletime Geçme Durumu

Bir elektron, iletme geçmek için serbest hale geçtiğinde, yüksek enerji durumuna ulaşır. Elektron bağlı olduğunda ve dolayısıyla iletme katılamadığında ise düşük enerji durumunda demektir. Bu durum, iki atom arasındaki bağın varlığıyla elektronlar için iki farklı enerji seviyesi oluşturur. Elektron, bu iki seviye arasında bir enerji değerine sahip olamaz. Ya bağa bağlı olarak düşük enerjide bulunur ya da serbest hale gelmek için yeterli enerjiyi kazanmış olup belirli bir minimum enerji seviyesindedir. Bu minimum enerji seviyesi, bir yarı iletkenin bant aralığı olarak tanımlanır. Metallerde, yarıiletkenlerde ve yalıtkanlarda elektronlar, atomik kuvvetler tarafından belirli enerji bantlarıyla sınırlandırılmıştır. Bu nedenle diğer enerji bölgelerinde kalamazlar. Valans bandının en üst seviyesi ile iletim bandının en alt seviyesi arasındaki enerji farkına yasak enerji aralığı denir. Bir elektronun iletim bandına geçebilmesi için, yasak enerji aralığının enerjisinin artması gerekmektedir. Elektronlar, biraz ısı veya minimum yasak enerji aralığı enerjisine sahip bir fotonu absorbe ederek iletim bandına geçiş için gerekli olan enerjiyi kazanabilirler. yasak enerji aralığından düşük enerjiye sahip fotonlar, elektronları ayıramazlar. Yüksek enerjili fotonlar ise ısılarıyla bir elektron ve bir boşluk oluştururlar. Bant aralıkları kullanılan materyale göre değişir fakat yarıiletken kristallerde, sabit enerji seviyeleri nedeniyle değişmezler (asdn.net).



Şekil 2.5. Yalıtkanlar (solda), Yarı İletkenler (ortada) ve İletkenlerin (sağda) Bant Diyagramı (Görmez,2021)

Yalıtkanların değerlik bandı ile iletim bandı arasındaki yasak enerji aralığı büyük olduğundan elektronlar iletim seviyesine gelemeyiz. Yarıiletkenlerde yasak enerji aralığı yalıtkanlara görece daha küçüktür ve belli bir enerji verilerek elektronlar iletim seviyesine getirilebilirler. İletkenlerde de yasak enerji aralığı olmadığından kolayca ilettime geçebilirler.

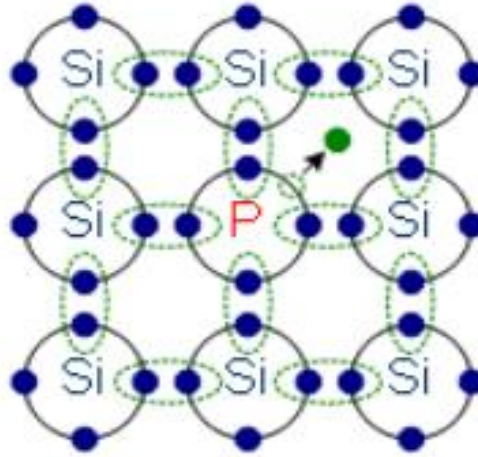
2.4.3. Yarıiletkenlerin Tipleştirme

Saf silikon ve germanyum, doğası gereği kendiliğinden yarıiletken özellik gösteren malzemelerdir. Bu, kimyasal olarak saf olmaları ve başka bir madde içermemeleri anlamına gelir. Bu yarıiletken malzemelerin yarıiletkenlik parametrelerini kontrol edebilmek, bazı maddelerin eklenmesiyle mümkün olur. Serbest elektronların ve boşlukların oluşmasını sağlamak için bu saf malzemelere verici veya alıcı olarak adlandırılan farklı maddeler eklenebilir. Yarıiletken maddelerin atomlarına belirli türde atomların eklenmesine katkılama adı verilir. Bu işlem sonucunda silikon artık saflığını kaybeder ve bu duruma safsızlık denir. Katkılama işlemi ile silikon malzeme, yeterli miktarda safsızlık içerecek şekilde dönüştürülerek N tipi ya da P tipi yarı iletken özelliği kazanır (halbleiter.org).

2.4.4. N Tipi Yarıiletkenler

Safsızlaştırma veya katkılama işlemi, yarıiletken maddelerin içinde bulunan elektron ve boşluk (hole) miktarını değiştirmek amacıyla uygulanan bir yöntemdir. Periyodik tablonun IV. Grubunda yer alan yarıiletken malzemelere, V. Grup elementlerinin atomları

eklendiğinde N tipi yarıiletkenler meydana gelir. Benzer şekilde, IV. Grup yarıiletkenlere, III. grup elementlerinden atomların eklenmesiyle P tipi yarıiletkenler meydana getirilir. Bu süreç, malzemenin elektriksel özelliklerini kontrol etmek için temel bir tekniktir. N tipi yarıiletkenlerde, serbest elektronların sayısının artırılması, yarıiletkenin iletme geçme anında iletkenlik seviyesini yükseltir. Benzer şekilde P tipi yarıiletkenlerde boşluk (hole) miktarının artırılmasıyla iletkenlik yükselir. N tipi safsızlaştırma (katkılama) sürecinde saf silikona arsenik veya fosfor gibi elementler eklenerek malzeme N tipi bir yarıiletkene dönüştürülür. Arsenik atomu, kovalent bağlanmaya dahil olmayan fazladan bir elektrona, yani negatif bir yüke sahiptir. Beş değerlikli bu katkı maddeleri, silikon atomlarından bir fazla dış elektrona sahiptir. Beş dış elektronun dördü silikon atomlarıyla bağlanırken, beşinci elektron serbest kalır ve şarj taşıyıcı elektron olur. Bu serbest elektron, silikonun iç. İletkenliğine katkıda bulunur ve diğer elektronlardan daha az enerji ile iletim bandına geçer. Elektron sağlayan bu katkı maddelerine elektron vericisi ya da dopant denir (Şahin, 2024).

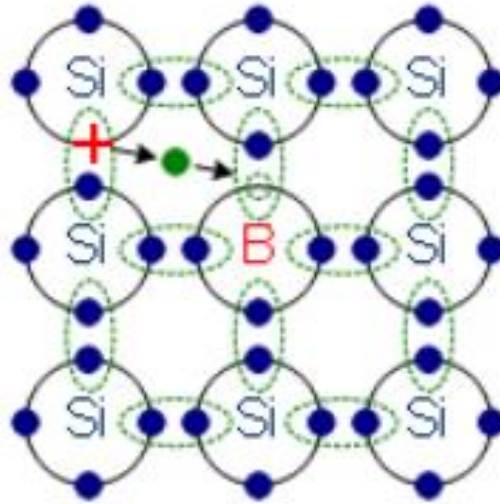


Şekil 2.6. N Tipi Yarıiletken Atom Bağ Yapısı

2.4.5. P Tipi Yarıiletkenler

P tipi safsızlaştırma sürecinde, saf silisyuma indiyum (In) veya galyum (Ga) gibi elementler eklenerek P tipi yarıiletken malzemeler elde edilir. Bu tür katkı maddeleri üç değerlik elektrona sahiptir ve dördüncü bir elektronla bağ oluşturmak isterler. Ancak eksik olan bu elektron nedeniyle değerlik bandındaki elektronlar daha hareketli hale gelir. Bu durumda, elektronların hareketine zıt yönde hareket eden boşluklar oluşur. Bir elektronun

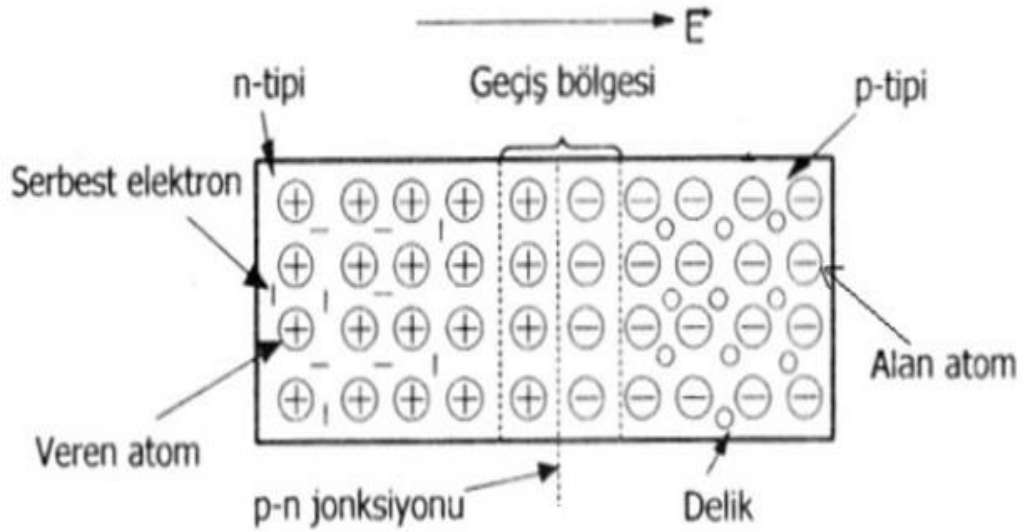
bu boşluğa katılması durumunda, katkı maddesi negatif bir yük kazanır ve bu tür katkı maddelerine alıcı denir. Katkı maddesi kristal yapının içine sabitlenmiş olsa da yalnızca pozitif yük taşıyan boşluklar hareket edebilir. Kristal yapıdaki bu pozitif boşluklardan dolayı bu materyallere P tipi yarıiletkenler denir. P tipi yarıiletkenlerde; boşluklar çoğunluk yük taşıyıcılarını oluştururken, serbest elektronlar azınlık yük taşıyıcılarıdır (Görmez, 2021).



Şekil 2.7. P Tipi Yarıiletken Atom Bağ Yapısı

2.4.6. PN Eklemi

PN eklemi, P tipi ve N tipi yarıiletken materyallerin bir araya getirilmesiyle oluşan temel bir yarıiletken yapısıdır. Bu yapı, elektronik cihazların çoğunda temel bileşen olarak kullanılır. P tipi malzeme, çoğunluk yük taşıyıcıları olarak boşluklara (pozitif yük) sahipken, N tipi malzeme serbest elektronları (negatif yük) içerir. PN eklemesinde, N bölgesindeki elektron yoğunluğu ile P bölgesindeki boşluk yoğunluğu birbirine eşit değildir. Bu iki bölgenin Fermi enerji seviyeleri (E_f) başlangıçta farklıdır P ve N tipi bölgeler birleştirildiğinde, yük taşıyıcılar arasında difüzyon başlar. . Elektron akışı, yük dağılımını dengeye getirmek ve Fermi enerji seviyelerini eşitlemek için devam eder. Bu süreç, bir elektriksel alan oluşturarak PN eklemesinin kenarında bir yük bariyeri meydana getirir. Bu bariyer, P ve N bölgelerindeki yük taşıyıcılarının serbest hareketini engeller ve eklemesinin tek yönlü iletkenliğini sağlar (Sze ve Ng, 2007).

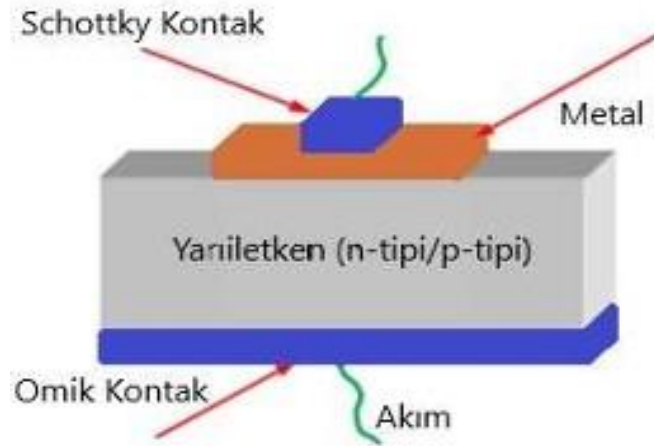


Şekil 2.8. PN Ekleminin Temsili Gösterimi

PN eklemi; diyot, transistör ve güneş pilleri gibi birçok elektronik cihazın temelini oluşturur. Örneğin, bu yapı sayesinde elektrik akımı yalnızca bir yönde iletilir ve bu durum, elektronik devrelerin işlevselliği açısından kritik öneme sahiptir. Ayrıca PN eklemi ışığa duyarlıdır ve fotodiyotlar veya güneş pillerinde ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek için kullanılır (Streetman ve Banerjee, 2006).

2.5. Metal Yarıiletken Kontaklar

Schottky diyotların karakteristik özelliklerinin anlaşılabilmesi, yalıtkan ve yarıiletken kristallerin iletkenlik özelliklerinin incelenmesini gerektirir. Bu bağlamda, kullanılan yöntemlerden biri de kristale uygun kontakların uygulanmasıdır. Kontak, iki farklı malzemenin asgari değerdeki direnç ile atomik seviyede bir temas oluşturmasıdır. İdeal bir kontak elde etmek için temas direncinin sıfıra yakın olması hedeflenir. Bu durum; temas eden yüzeylerin oldukça düzgün, temiz ve pürüzsüz olması ile sağlanabilir. Kontaklama işlemi yapılırken yarıiletken malzeme olarak P tipi veya N tipi malzemeler tercih edilirken, metal malzeme olarak ise genellikle alüminyum, altın, gümüş, kalay ve indiyum gibi metaller kullanılır. Metal – Yarıiletken temaslar; metal P tipi ve metal N tipi yarıiletken temaslar olarak iki ana gruba ayrılır. Metal – yarıiletken kontaklar iletim şekillerine göre omik kontak ve Schottky kontak olarak iki grup oluştururlar (Crowley ve Sze, 1965).



Şekil 2.9. Kontakların Temsili Gösterimi

Schottky ve omik kontak türlerinin belirlenmesi, metal ile yarıiletkenin fonksiyonları ve yarıiletken malzemenin P tipi ya da N tipi olma durumu ile ilişkilidir. Tablo 2.1’de özetlenen bu ilişkiye göre, metal P tipi yarıiletken kontaklarda, metalin iş fonksiyonu (Φ_m), yarıiletkenin iş fonksiyonundan (Φ_s) büyük olduğunda omik; yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s) metalin iş fonksiyonundan (Φ_m) büyük olduğunda ise Schottky kontak meydana gelir. Metal N tipi kontaklarda ise bu durum ters işlemektedir (Şahin, 2024).

Fermi Enerji Seviyesi (E_f): Valans ve iletkenlik bantlarındaki taşıyıcı yoğunluğuna bağlı olarak, yasak enerji bandında yer alan referans seviyeye verilen isimdir. İletkenlerde mutlak sıfır sıcaklık noktasında elektronlar tarafından doldurulmuş en alt ve en üst enerji seviyelerini ifade eder. Yalıtkan malzemelerde ise fermi seviyesi, valans ve iletkenlik bantlarındaki taşıyıcı yoğunluğuna ve sıcaklığa bağlı olarak yasak enerji bandında yer alan izafi bir seviyeyi temsil eder.

Metalin İş Fonksiyonu (Φ_m): Bir metal yüzeyinden bir elektronu serbest bırakmak için ihtiyaç duyulan en düşük enerji miktarını ifade eder. Diğer bir deyişle, metalin yüzeyindeki bir elektronu vakum ortamına taşımak için gerekli olan enerjidir. Bu özellik, metalin yüzey yapısını ve elektronların yüzeye olan bağlılık derecesini tanımlayan temel bir fiziksel parametredir.

Yarıiletkenin İş Fonksiyonu (Φ_s): Yarıiletken yüzeyindeki bir elektronu vakuma çıkarmak için gerekli olan asgari enerji miktarını temsil eder. Yarıiletkenin enerji seviye tanımlarından biridir ve birimi elektron voltur (eV).

Tablo 2.1. Yarıiletken ve Fonksiyon İşlevlerine (Φ) Göre Kontak Çeşitleri

Yarıiletken	Fonksiyon	Kontak
N Tipi	$\Phi_m > \Phi_s$	Doğrultucu
P Tipi	$\Phi_s > \Phi_m$	Doğrultucu
N Tipi	$\Phi_s > \Phi_m$	Omik
P Tipi	$\Phi_m > \Phi_s$	Omik

2.5.1. Schottky Kontaklar

Schottky kontakları, bir metal ile bir yarıiletken arasında oluşturulan ve doğrultucu özellik sergileyen özel bir temas türüdür. Bu tür kontaklar, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklanan bir enerji bariyerine sahiptir. Schottky kontaklarının temel özelliği, bir yönde elektrik akışına izin verirken diğer yönde akımı önemli ölçüde sınırlandırmasıdır. Bir Schottky kontağın oluşabilmesi için, metalin iş fonksiyonunun (Φ_m), yarıiletkenin N tipi olması durumunda yarıiletkenin iş fonksiyonundan (Φ_s) büyük olması gerekir. Bu durumda, metal ile yarıiletken arasındaki temas bölgesinde bir potansiyel bariyer oluşur. Bu bariyer, yarıiletkenin iletkenlik bandındaki serbest elektronların metale kolayca geçmesini engeller. Böylece akımın yalnızca belirli bir yönde akmasına izin verir. Düşük geçiş süreleri sayesinde yüksek frekanslı devrelerde tercih edilir. Schottky diyotlar, ileri yönde daha düşük gerilim kaybına sahiptir ve bu da Schottky kontaklara enerji verimliliği konusunda avantaj sağlar. Schottky kontaklarda ters yönde küçük bir kaçak akım gözlemlenir. Bu durum, cihazın yapısına ve kullanılan materyallere bağlıdır. Bu kaçak akım nedeniyle bazı uygulamalarda kullanılamaması bu kontakların dezavantajıdır (Sze ve Ng, 2007).

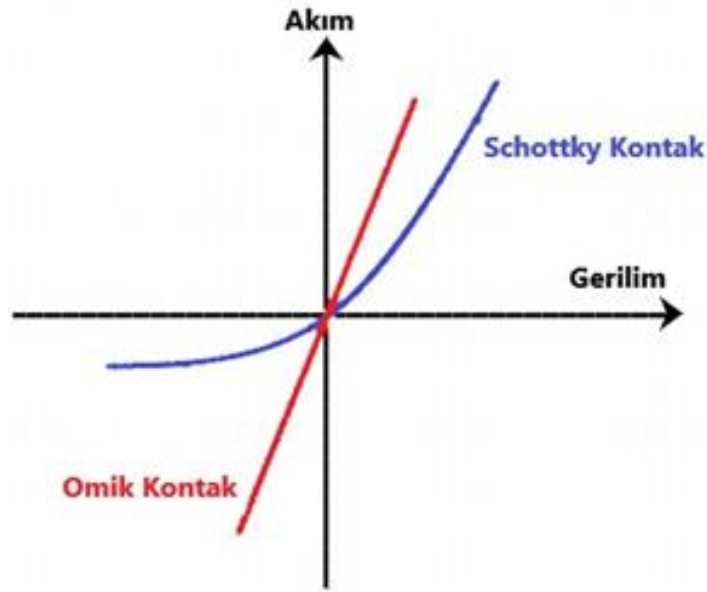
Schottky kontaklar, yarıiletken cihazlarda doğrultucu diyotlar, güç kontrol devreleri, yüksek hızlı anahtarlama devreleri ve güneş panelleri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılır. Ayrıca, düşük ileri gerilim düşüşleri nedeniyle enerji tasarrufu sağlayan

uygulamalarda tercih edilirler. Sonuç olarak Schottky kontaklar, metal – yarıiletken arayüzlerinde doğrultucu davranış sağlamak için kullanılan ve elektronik cihazların performansını önemli ölçüde etkileyen kritik bir teknolojidir.

2.5.2. Omik Kontaklar

Omik kontaklar, bir metal ile bir yarıiletken arasında oluşturulan ve elektrik akımını her iki yönde de serbestçe iletebilen özel bir temas türüdür. Bu kontaklarda, doğrultucu bir davranış yerine, akım-voltaj (I-V) eğrisi doğrusal bir ilişki sergiler. Omik kontaklar, bir cihazın elektriksel performansını belirleyen önemli bir bileşen olup, enerji kayıplarını minimumda tutmak için düşük temas direncine sahip olacak şekilde tasarlanır. Bir Omik kontakın gerçekleşmesi için gereken şartlar Tablo 2.1’de gösterilmiştir. Tabloda gösterilen durum gerçekleşip Omik kontak olduğu durumda, metal ve yarıiletken arasında enerji bariyeri oluşmaz ya da oluşan bariyerler o kadar düşük olur ki, elektronların veya boşlukların metal – yarıiletken arayüzünden serbestçe geçmesine olanak tanır. Elektrik akımının kolay geçişine izin verir ve bu durum enerji kayıplarını azaltmak için önemlidir. Omik kontaklar hem ileri hem de geri yönde aynı kolaylıkta akım iletebilir. Bu kontak türü, uygulanan voltaja karşılık doğrusal bir akım değeri gösterir. Omik kontaklar yarıiletken cihazların hemen hemen her türünde bulunur. Özellikle, transistörler, güneş hücreleri ve sensörler gibi cihazlarda yaygın olarak kullanılır. Elektrik akımının az dirençle iletilmesini sağladıkları için, bu kontaklar yarıiletken teknolojisinin temel yapı taşlarından biri olarak kabul edilir (Şirin, 2021).

Omik kontaklar yarıiletken devrelerinde akımın verimli bir şekilde taşınmasını sağlar ve cihazların performansını doğrudan etkiler. Omik temasın sağlanamaması durumunda elektriksel kayıplar artabilir ve cihazın çalışma verimliliği düşer. Bu nedenle, metal – yarıiletken arayüzünün doğru bir şekilde tasarlanması ve malzeme seçiminin dikkatli bir şekilde yapılması büyük önem taşır. Sonuç olarak Omik kontaklar, yarıiletken teknolojisinin vazgeçilmez bir parçası olup, cihazların hem enerji verimliliğini hem de elektriksel performansını optimize etmek için kritik bir rol oynar.

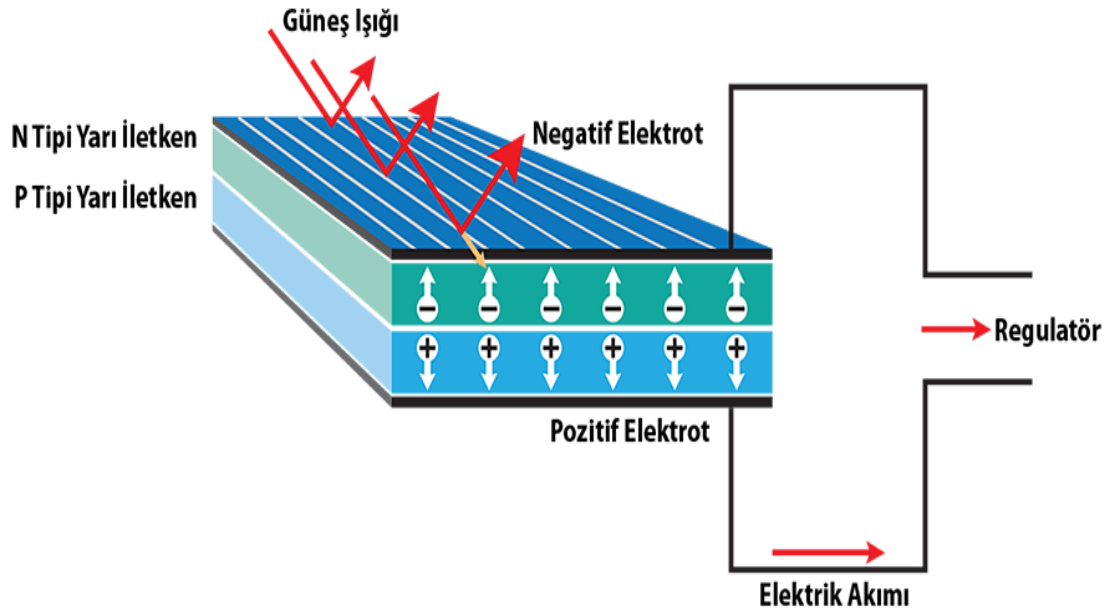


Şekil 2.10. Schottky Kontak ve Omik Kontakın Akım-Gerilim (I-V) Karakteristikleri

2.6. Güneş Pilleri ve Fotodiyotlar

Güneş pilleri ve fotodiyotlar, genel olarak ters besleme ile çalışacak şekilde tasarlanmış cihazlardır. Güneş pilleri çoğunlukla PN eklemli olup, sadece ışığı emmeye odaklanmış büyük diyotlar olarak işlev görürler. Fotodiyotlar ise ışığa duyarlı elemanlardır ve üzerine yeterli seviyede ışık düştüğünde aktif hale gelirler. Güneş enerjisi sistemleri, fotodiyotların bir alt türü olarak isimlendirilebilirler. Basitçe ifade edersek, güneş pilleri güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürerek elektrik enerjisi üretirler. Elektrik enerjisi oluşturma işlemi, eklem bölgesine yeterince enerjisi olan bir foton düştüğünde başlar. Bu foton yarıiletken malzeme tarafından soğrulur ve enerjisiyle bir elektron, değerlik bandından iletim bandına geçer. Bu işlem sırasında elektron, kazandığı enerjiyle birlikte bir boşluk bırakır ve bir elektron boşluk çifti oluşur. Güneş pilindeki PN eklem bölgesinde mevcut olan elektrik alan bu çiftleri birbirinden ayırarak elektronları PN eklemine N tipi bölgesine, boşlukları ise P tipi bölgeye yönlendirir. Sonuç olarak, bu çiftler arasında bir gerilim farkı oluşur ve çıkış uçlarında fotovoltaj bir gerilim elde edilir. Eklem alanına düşen fotonlar fazlaştıkça bu süreç başa döner ve tekrar eder. Bu mekanizma sayesinde güneş pilleri sürekli olarak elektrik enerjisi üretir. Güneş pilinin çıkış uçlarında serbest kalan elektronlar, daha sonra bağlı oldukları harici devre boyunca sahip oldukları enerjiyi kullanarak güneş piline geri dönerler. Fotovoltajik enerji dönüşüm sistemlerinin çoğunda,

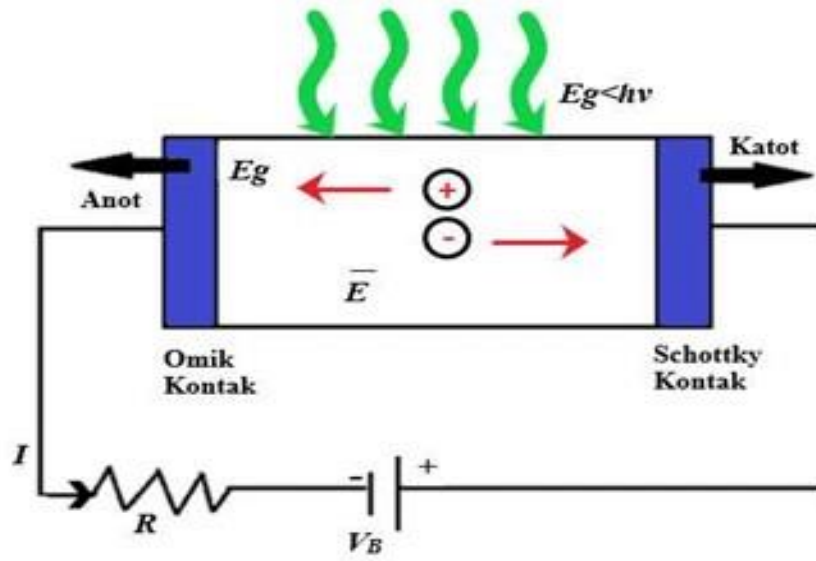
PN eklemli malzemeler tercih edilmektedir. Şekil 2.11’de bir güneş pilinin temel çalışma prensibi temsil edilmiştir.



Şekil 2.11. Güneş Pilinin Çalışma Prensibi Temsili (aydinlatma.org)

Güneş ışığı güneş paneli hücrelerinin kristaline geldiği esnada ışıktaki fotonlar N tipi yarı iletkenin üzerinden enerjilerini aşağıya doğru iletmeye başlarlar. İletilen enerji P tipi yarıiletkenin bulunan elektronlara devredilir. Elektronlar aldıkları bu enerjiyi bariyer boyunca N tipi alana fırlamak ve harici devreye gitmek için harcarlar. Son olarak harici devredeki görevlerini tamamlayan elektronlar yeniden devreye dönerler.

Dışarıdan bir enerji kaynağıyla fotodiyot cihazına enerji verildiğinde, valans bandında bulunan elektronların enerjisi artar. Eğer verilen enerji, malzemenin yasak enerji aralığı (E_g) değerini aşarsa, bu elektronlar iletim bandına geçiş yapar. Bu geçiş sırasında, valans bandında bir boşluk meydana gelir. Enerji sağlanmaya devam ettiğinde, bu boşluklar başka elektronlarla birleşerek dolar. Birleşen elektron, kendi bulunduğu konumda yine bir boşluk bırakır. Bu süreçte, enerjisi artan her bir elektron iletim bandına geçtiğinde arkasında bir boşluk bırakarak bir elektrik alanının (E) oluşmasına yol açar (Honsberg ve Bowden, 2024).



Şekil 2.12. Elektron – Boşluk Çifti Hareketi

Fotodiyotlar, yeterli miktarda ışık aldıklarında çalışmaya başlar ve temel prensip olarak foton taşıyıcılarının diyot eklem yapısı içinde hareket etmesine dayanır. Bu malzemeler üzerine düşen ışık miktarının artışıyla ters akım değerinin de artmasını sağlayacak şekilde tasarlanmışlardır. Fotodiyotlar, ışık şiddetini elektriksel bir sinyale dönüştürme konusunda en verimli şekilde çalışır. Bu dönüşümün verimliliği, fotodiyot cihazının akım-gerilim (I-V) karakteristiğine bağlı olarak dağılım gösterir.

2.6.1. Güneş Pillerinin Parametreleri

Güneş pillerinin karakteristiklerinin belirlenmesi için en önemli yöntem akım – gerilim (I-V) karakteristiklerinin belirlenmesidir. Bu yöntem, güneş pili hücrelerinin temel elektriksel özelliklerini ortaya koyarak güneş ışığı altında maksimum verimliliği sağlamak için hücre parametrelerinde yapılabilecek değişiklikler hakkında önemli ipuçları sunar. Bu sayede, güneş pillerinin performansını arttırmak için hangi alanlarda iyileştirmeler yapılması gerektiği daha net bir şekilde değerlendirilebilir. Güneş pilleri, aslen bir diyot gibi davranır ve ışık altında çıkış uçları arasında bir potansiyel fark oluşur. Güneş pili hücrelerinin çıkış uçlarına, yani elektrotlarına bir direnç bağlandığında, devreden bir akım geçmeye başlar. Düz besleme (V_d) durumunda akım, P tipi bölgeden N tipi bölgeye doğru serbestçe akar. Ters besleme durumunda, güneş pilinden akım akışı gerçekleşmez. Ancak nano seviyede oldukça küçük az bir seviyede ters doyma akımları (I_0) gözlemlenebilir. Karanlık doyma

akımı olarak adlandırılan bu akım, ısı etkileri sonucu oluşan taşıyıcıların hareketiyle meydana gelir. Bu süreçte elektronlar N tipi bölgeye, boşluklar ise P tipi bölgeye doğru hareket eder. Güneş pilleri esas olarak bir PN ekleminden oluşur. Güneş pilleri diyot özellikleri gösterdiğinden akım – gerilim (I-V) ilişkisi denklem 2.1’de gösterilmiştir.

$$I_F = I_o \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.1)$$

I_F : Diyot Üzerinden Geçen Akım

V : Gerilim

I_o : Ters Doyma Akımı

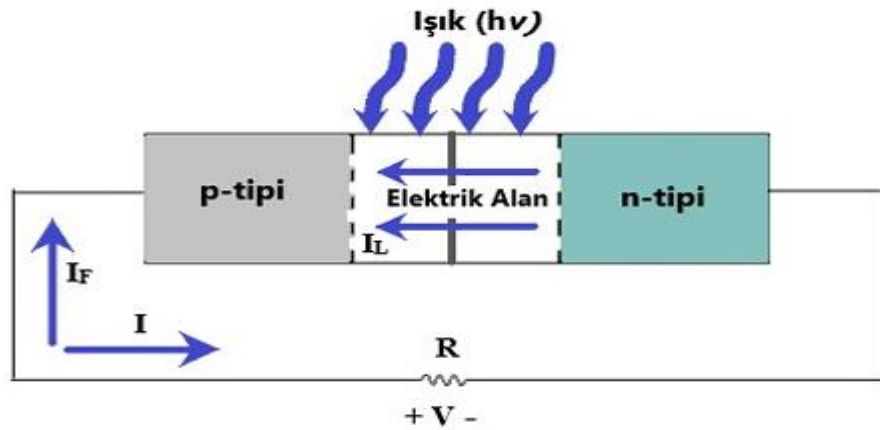
T : Sıcaklık (Kelvin)

e : Elektronik Yük

k : Boltzmann Sabiti

Güneş hücresine ışık düştüğünde hücre, enerji üretmeye başlar ve bu durum akım-gerilim eğrisinin y eksenini boyunca kaymasına neden olur. Bu kayma, güneş pillerinin ideal bir diyot gibi davranmasını engeller. Işık tarafından üretilen I_L akımı, bu davranışı açıklamak için denkleme eklenir.

$$I_F = I_o \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) - I_L \quad (2.2)$$



Şekil 2.13. Direnç Yüküne Sahip Güneş Pilleri (Ejderha 2012)

I_L akımı devrede bulunan direnç üzerinde bir gerilim düşürür. Oluşan bu gerilim, diyot üzerinde ileri yönlü bir besleme etkisi yapar ve üretilen akımın bir kısmının diyot üzerinden geçerek kaybolmasına yol açar. Böylece güneş pilinin net akımı, ters yönde;

$$I_{net} = I_L - I_F = I_L - I_o \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) \quad (2.3)$$

I_{net} : Güneş Pilinin Net Akımı I_F : İleri Beslem Akımı I_L : Fotoakım

$$I_o = A \cdot A^* T^2 e^{\left(\frac{-e\Phi_{Bn}}{kT} \right)} \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'ü ele alırsak: Diyot ileri yönde kutuplandığında, uzay yükü bölgesinde oluşan elektrik alanın (E) şiddeti azalır, fakat tamamen sıfıra inmez ve işaret değiştirmez. Bu nedenle, net akım her zaman fotoakım ile aynı yönde hareket eder ve ikisi de birbirine zıt yönlüdür. İki temel sınır durumu olan kısa devre ve açık devre durumlarına dayanarak belirli değerler hesaplanabilir. Kısa devre durumunda yani direnç sıfır olduğunda ($R=0$), gerilim de sıfır olur ($V=0$). Bu koşullarda geçen net akım, kısa devre akımıdır. (Çaldıran, 2013)

$$I_{net} = I_{kd} = I_L \quad (2.5)$$

Direncin sonsuz büyüklükte olduğu durum açık devre durumudur. Bu durumda akan bir akım olmadığından akım değeri sıfırdır ve V_{ad} şu şekilde bulunur:

$$I_{net} = 0 = I_L - I_o \left(e^{\frac{eV_{ad}}{kT}} - 1 \right) \quad (2.6)$$

V_{ad} 'yi yalnız bırakırsak,

$$V_{ad} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_L}{I_o} + 1 \right) \quad (2.7)$$

kT/e ifadesi termal potansiyel (V_t) ifadesi ile aynı olduğundan denklem yeniden düzenlenirse,

$$V_{ad} = V_t \ln \left(\frac{I_L}{I_o} + 1 \right) \quad (2.8)$$

Şeklinde yazılabilir.

Denklem 2.4 düzenlenirse ve I değeri A (alan)'ya bölünürse;

$$J_0 = A \cdot T^2 \left(e^{\frac{q \cdot \Phi_b}{k \cdot T}} \right) \quad (2.9)$$

Denklem 2.9'da Φ_b yalnız bırakılarak engel yüksekliği bulunur.

Fotovoltaik uygulamalarda elde edilen gerilim değeri, kullanılan yarıiletken malzemenin bant aralığına bağlıdır. Bant aralığının geniş olması, yüksek gerilim değerlerinin elde edilmesini sağlar.

Bununla birlikte bant aralığı küçük olan malzemeler, daha fazla foton absorbe edebilme kapasitesine sahiptir. Bu durum, fotonların oluşturduğu yük taşıyıcıların sayısında artışa neden olur ve dolayısıyla fotoakım değerini yükseltir.

Sonuç olarak, bir güneş pilinin performansını belirleyen en önemli parametrelerden biri olan verimlilik (η), yarıiletken malzemenin bant aralığıyla doğrudan ilişkilidir.

Bir güneş pilinin verimlilik değeri (η),

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100\% = \frac{I_m V_m}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.10)$$

P_m : Hücrede Üretilen Maximum Güç P_{in} : Hücreye Düşen Işığın Gücü

Bir silisyum tabanlı güneş pilinin günümüzde verdiği maximum verim yaklaşık olarak %28'dir (Bekil 2019).

Maximum güç noktasındaki akım ve gerilim değerlerinin çarpımı ile elde edilen alanın, açık devre gerilimi (V_{oc}) ile kısa devre akımının (I_{sc}) çarpımıyla oluşan alana oranı, fill faktörü (FF) denir.

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{kd} V_{ad}} = \frac{P_m}{I_{kd} V_{ad}} \quad (2.11)$$

Fill faktörü (FF) başka bir açıdan, güneş pilinin akım – gerilim eğrisinin ideal bir diyot eğrisinden ne kadar sapma gösterdiğinin bir ölçüsüdür. Bu oran, Schottky kontak bariyerinin yüksekliğinin homojenliğiyle doğrudan ilişkilidir.

3. KAYNAK ÖZETLERİ

İki farklı organik malzeme kullanılarak fotodiyot cihazlarının imalatı gerçekleştirilmiştir. Üretilen fotodiyot malzemelerin karakteristiklerini belirleme çalışmaları yapılmıştır. Bu süreçte P tipi silisyum yarıiletken kristalinin parlak yüzeyine, termal buharlaştırma yöntemi ile organik malzemeler ince film şeklinde kaplanmıştır. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) cihazı ile numunelerin yüzey yapısı detaylı bir şekilde incelenmiş, yüzey pürüzlülük değerleri 0,25 nm ve 0,98 nm olarak ölçülmüştür. Cihazların fotovoltaiik özelliklerini değerlendirmek için, ışıksız ortamda ve 30 – 100 mW/cm² aralığındaki değerlerde suni güneş ışığı üreten cihaz ile akım – gerilim (I-V) ölçümleri alınmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda, fotodiyotların engel yüksekliğı ve idealite faktörleri hesaplanmıştır. Işıksız ortamda idealite faktörleri 1,88 ve 1,86 olarak hesaplanırken engel yükseklikleri 0,73 eV belirlenmiştir. Organik materyaller ile kaplanmış cihazlarda, negatif besleme bölgesindeki akım değerlerinin, ışık şiddetinin artışıyla birlikte yükseldiğı gözlemlenmiştir. Ayrıca, fiziksel bir uyarıcı olan ısının Schottky diyotlar üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, cihazlara belirli aralıklar ile artan sıcaklık verilip karakteristik yapılarındaki değışiklikler kaydedilmiştir. Bu kayıtlardan elde edilen grafikler kullanılarak engel yüksekliğı ve idealite faktörü gibi değerler hesaplanmıştır (Bekil, 2019).

İlk kez sentezlenen ftalosiyanin bazı materyallerin yer aldığı çok katmanlı yapılar incelenmiştir. İnorganik katman olarak Cds, ZnO₂, SnO₂ ve TiO₂ gibi malzemeler kullanılmış, bu tabakaların üzerine organik bileşenlerden ftalosiyanin, P₃HT ve PEDOT uygulanarak farklı ITO/inorganik/organik/Al yapılarına sahip cihazlar üretilmiştir. Bu yapılar, katmanların birbiri ile birlikte kullanılması ile oluşturulmuştur. Cihazların performansını analiz etmek için oda sıcaklığında ışıksız ve ışık altında akım – gerilim (I-V) ölçümleri yapılmıştır. Güneş pilleri karakteristik parametreleri arasında I_{kd}, V_{oc}, P_m, verim ve FF hesaplamaları yapılmıştır. Analiz sonuçları, güneş pili performansının kullanılan inorganik katmanın türü ve kalınlığına bağılı olarak değışkenlik gösterdiği bilgisine ulaşılmıştır. Elde edilen veriler, cihazların tasarımında inorganik malzemelerin büyük bir rol oynadığını doğrulamıştır (Yağıcı, 2011).

Alq3 organik bileşeninin diyotlar üzerindeki fotovoltaiik etkisini analiz etmek amacı ile iki farklı cihaz hazırlanmıştır. Bunlardan biri referans numunesi olarak hazırlanmış ve Al/ p-Si/Al yapıda imal edilmiştir. Diğer i ise kristalin yüzeyine Alq3 organik malzemesi uygulanarak Al/Alq3/p-Si/Al formunda üretilmiştir. Her iki cihazda buharlaştırma yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen bu aygıtların fotovoltaiik performansı, suni güneş ışığı kullanılarak hem ışısız ortamda hem de 30 ile 100 mW/cm² arasında değışen farklı aydınlatma şiddetleri altında incelenmiştir. Fotovoltaiik analiz kapsamında I_{kd}, V_{oc}, verim ve FF gibi değerler hesaplanmıştır. Yapılan ölçümler, aygıtların fotodiyot özellikleri sergilediğini ortaya koymuştur. Özellikler ışık şiddeti arttıkça, Alq3 organik malzemesi içeren numunenin negatif besleme bölgesindeki I değerin, referans diyotun akım değeriine kıyasla belirgin bir şekilde daha fazla arttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, Alq3 organik katmanının fotovoltaiik etkideki katkısını göstermiştir. İdealite faktörü ve engel yüksekliği gibi diyot parametrelerini belirlemek amacıyla her iki numunede oda sıcaklığında ve ışısız ortamda ölçülmüştür. Yapılan hesaplamalar sonucunda referans numune inin engel yüksekliği 0,79 ve verim 1,61 olarak bulunurken, organik katmanlı malzeme için engel yüksekliği 0,81 ve verim 1,44 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca organik yüzey özelliklerini ve incelemek amacıyla SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) kullanılmıştır. Bu sonuçlar, Alq3 organik malzemesi içeren diyotların fotovoltaiik performansını artırma potansiyelini vurgulamış ve hibrit yapıların enerji dönüştürme uygulamalarında kullanılabilirliği açısından önemli bir adım atıldığını göstermiştir (Canlı, 2018).

Yapılan çalışmada P tipi Silisyum kristalinin yüzeyine, CuPc (bakır ftalosiyanın) buharlaştırma yöntemiyle uygulanarak Au/CuPc/p-Si yapısında bir cihaz üretilmiştir. Cihazın elektriksel özellikleri, ışısız ortamda gerçekleştirilen ölçümler ile incelenmiştir. Bu ölçümler sonucunda, cihazın engel yüksekliği 0,71eV, İdealite faktörü ise 2,38 olarak hesaplanmıştır. Cihazın optoelektronik performansını değerlendirmek amacıyla, ışık şiddeti altında yapılan analizler, cihazın fotodiyot davranışı sergilediğini ortaya koymuştur. Elde edilen veriler, CuPc malzemesinin fotodiyotlarda ışık duyarlılığı açısından önemli bir bileşen olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Bu çalışma, hibrit yapıların fotovoltaiik ve optoelektronik uygulamalarda kullanılabileceğini tekrardan göstermiştir (Yakuphanoglu, 2007).

Seçkin tarafından yapılan çalışmada, iletken cam yüzeye kaplanmış titanyum ve titanyum plakalar anodize edilerek TiO_2 nanotüp yapıları elde edilmiştir. Bu nanotüpler, boyar maddeli güneş pilinin anodu olarak kullanılmıştır. Boyar maddeli nanotüpler, hücrenin ön yüzeyinden aydınlatılarak test edilirken, titanyum plakalar üzerinde oluşturulan nanotüpler hücrenin arka yüzeyi aydınlatılarak incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, ön yüzeyden aydınlatılan hücrelerde en fazla %4,7 verime ulaşılırken, arka yüzeyden aydınlatılan hücrelerde verim %7 ye kadar ulaşmıştır. Bu çalışma, TiO_2 nanotüplerin boyar maddeli güneş pilleri için etkili bir anot malzemesi olabileceğini ve ışığın aydınlatma yönüne bağlı olarak hücre veriminin değişebileceğini ortaya koymuştur (Seçkin, 2010).

Sajjad bu çalışmada, iki farklı grup fotovoltaiik aygıtın üretimini gerçekleştirmiş ve bu aygıtların elektriksel karakterlerini incelemiştir. Araştırmada, birinci grup aygıtların inorganik ve organik katmanlardan, ikinci grup aygıtların ise tamamen organik katmanlardan oluştuğunu belirtmiştir. İnorganik malzeme olarak elektrokimyasal aşındırma yöntemiyle gözenekli hale getirilmiş N tipi ve P tipi monokristaller kullanılmıştır. Bu kapsamda birinci grup aygıtlar, n-GS/organik katman/Al ve p-GS/organik katman/Al yapısında tasarlanmıştır. Tamamen organik katmanlardan oluşan ikinci grup aygıtlar ise ITO (indiyum kalay oksit) kaplı altlıklar üzerine uygulanmıştır. İki grup aygıtta da organik katman olarak ortak üç malzeme kullanılmıştır: ftalosiyanın bileşikleri, fulleren (C_{60}) ve tris(8-hydroxyquinolino)alüminyum (Alq_3). Üretilen cihazların elektriksel performansı, ışıksız ve ışıklı ortamda yapılan ölçümler ile değerlendirilmiştir. I_{kd} , V_{oc} , P_m ve FF gibi temel güneş pili değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlara göre inorganik ve organik katmanlardan oluşturulan aygıtlarda kullanılan Si yüzeylerinin aşındırma süresi arttıkça, I_{kd} değerinin arttığı ancak V_{oc} değerinin azaldığı gözlenmiştir. Maximum kısa devre akımı, V_{oc} , P_m ve FF değerlerinin, kullanılan Si kristalinin türüne bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Tamamen organik katmanlardan oluşan fotovoltaiik aygıtların performansının ise organik malzemenin türüne büyük ölçüde bağlı olduğu görülmüştür. Genel olarak, hem P tipi hem de N tipi Silisyum kristallerinin kullanıldığı yapılarda aşındırma süresinin ayarlanmasıyla tüm parametrelerin maximum düzeye ulaşabileceği sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar, farklı malzeme türlerinin ve üretim parametrelerinin fotovoltaiik aygıt performansı üzerindeki etkisini ortaya koyarak, yüksek verimli cihazların geliştirilmesi için ipuçları sunmaktadır (Sajjad, 2013).

Bir başka çalışmada bir Schottky güneş pili tasarımında engel yüksekliğinin hücre performansını belirleyen temel parametrelerden biri olduğu ortaya koyulmuştur. Buhar kaplama yöntemiyle P tipi silisyum yüzeyinde metal – organik In-situ InP kuantum noktaları büyütülerek Schottky bariyer yüksekliği kontrol altına alınmıştır. Araştırmada, 0,71 eV engel yüksekliğine sahip bir cihazın, standart güneş ışığı altında yapılan testler sonucunda $V_{oc}=0,51$ V, $J_{sc}=13,29$ mA/cm² ve $n=3,89$ değerleri rapor edilmiştir. Nano yapıların engel yüksekliğini değiştirmeye yönelik yapılan modifikasyonların, referans numune ile karşılaştırıldığında cihaz performansında %2,82’lik bir iyileşmeye yol açtığı belirlenmiştir. Bu çalışma; nano yapılar aracılığıyla engel yüksekliğini optimize etmenin, Schottky güneş pillerinin verimliliğini arttırmak için iyi bir strateji olduğunu ortaya koymuştur (Halder vd., 2015).

Monokristal ve polikristal silisyum güneş pili hücrelerinin karakterizasyonunu incelemek amacıyla, karanlık koşullarda ve farklı ışık yoğunluklarında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde, her iki tür güneş pilinin de diyot ve güneş pili karakteristikleri hesaplanmış ve bu parametrelerin ışık şiddetine göre değişkenlikleri incelenmiştir. Elde edilen verilere göre, her iki güneş pilinin de ışık şiddeti arttıkça V_{oc} değerinde bir artış gözlemlenmiştir. Bu artışın, yüzey rekombinasyonunun azalmasıyla ilişkili olduğu ve bunun sonucunda I_{kd} ’nin artarken, doyma akımının azaldığı belirlenmiştir. Işık şiddetinin artmasıyla birlikte FF değerinin az da olsa azaldığı tespit edilmiştir. Bu durum ideal durumdan sapıldığını ortaya koymuştur. Işıksız ortamda iki güneş pilinde de idealite faktörü yaklaşık 2,7 olarak bulunmuş, ancak ışık şiddetinin artışıyla birlikte bu değer azaldığı gözlemlenmiştir. Elde edilen bu idealite faktörü değerinin, literatürde kabul edilen sınırlar içinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca ışık şiddetine bağlı olarak hesaplanan verimliliğin polikristal hücrelerde, monokristal hücrelere kıyasla daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar, farklı kristal yapıya sahip güneş pili hücrelerinin performansını etkileyen temel faktörleri göstermiştir (Görmez, 2021).

Bir başka çalışmada N tipi yarıiletken kristali kullanılarak üretilen güneş hücrelerinin yüzeyine metil mavisi ile kaplama yapılmıştır. Bu organik malzemenin diyotların karakteristikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Mo/Metil Mavisi/n-Si/Al/Au yapısındaki güneş pili cihazlarının üretim sürecinde, Schottky kontaklar saçtırma tekniğiyle, Omik kontaklar buharlaştırma yöntemiyle yapılmıştır. Organik malzemenin yüzeye kaplanması işlemi, damlatma ve spin coating teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Asitlerin

etkisini incelemek amacıyla, N tipi Silisyum numunelerinden biri %10 seyreltik HCl çözeltisinde, diğeri ise %seyreltik HF çözeltisinde yüzdürülmüştür. Schottky kontaktları olarak kullanılan Mo metal, üç farklı kalınlıkta kaplanarak, numuneler 400 °C sıcaklıkta beş dakika boyunca saf azot gazı altında tavlantıya tabi tutulmuştur. Bu işlemten sonra, elde edilen aygıtların elektriksel özelliklerini analiz etmek amacıyla suni güneş ışığı altında ölçümler yapılmıştır. Elde edilen veriler, organik malzeme kaplamasının kalınlığının, tavlama sıcaklığının ve süresinin yanı sıra ışık şiddetinin de, güneş parametreleri üzerinde önemli etkiler oluşturduğunu göstermiştir. Bu bulgular, organik malzemelerin güneş pili performansı üzerindeki etkilerini göstermiştir (Tahseen, 2017).

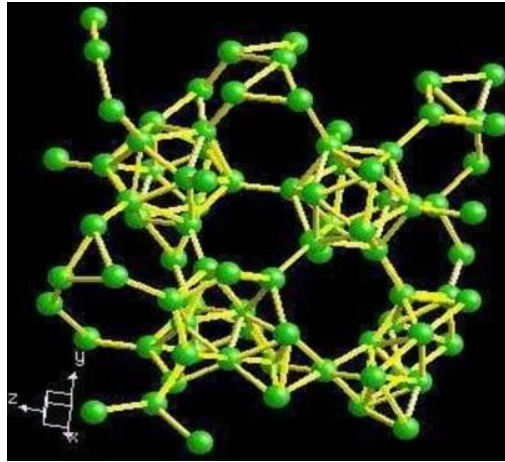
Bu çalışmada organik malzeme kullanılarak yüksek verimli, düşük maliyetli ve yeniliklere açık bir organik arayüzeyli Schottky güneş pili aygıtının üretilmesi hedeflenmiştir. Asit – Baz göstergesi olarak bilinen metil kırmızısı metil kırmızısı ($C_{15}H_{15}N_3O_2$), PH değişimlerine karşı gösterdiği belirgin renk farklılıkları ile bilinmektedir. Elektron açısından zengin bir yapıya sahip olması, metal ve yarıiletken katmanları arasında organik bir tabaka olarak kullanılmasına olanak sağlamıştır. Metil kırmızısı kloroform çözücüsü ile, bor ise saf su ile çözelti haline getirilmiş ve kimyasal temizleme işlemleri uygulanmıştır. N tipi yarıiletken malzemenin yüzeyine 250 µl temizleme çözeltisi damlatılmıştır. Ardından, yüzeyi nano piramitleşmiş hale getirmek için çeşitli kimyasal çözeltilerle aşındırma işlemi yapılmıştır. Hazırlanan yüzeye Spin Coating Yöntemi ile 175 µl metil kırmızısı kaplanmıştır. Daha sonrasında 50 µl bor çözeltisi damlatma yöntemi ile kaplanmıştır. Omik kontak elde etmek için gümüş ve alüminyum metaller termal buharlaştırma yöntemi ile kaplanmış ve optimum sonuç alınabilmesi adına, 585 °C’de, saf azot (N_2) gazı ortamında 3 dakika boyunca tavlantıya tabi tutulmuştur. Schottky kontak üretimi ise, saçtırma yöntemi kullanılarak, 5mm ve 1 mm maskeler yardımıyla paladyum ve altın ile gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde üretim süreci tamamlanmıştır. Elde edilen arayüzeyli ve organik arayüzeyli güneş pili aygıtlarının elektriksel performansını değerlendirmek amacıyla, oda sıcaklığında ve karanlık ortamda I/V ölçümleri alınmış, güneş pili karakteristikleri hesaplanmıştır. Üretilen cihazlardaki organik tabakanın varlığı ve kalınlığı gibi ayrıntıları analiz etmek için kesit görüntüleri SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) cihazı ile elde edilmiştir.

4. MATERİYAL VE YÖNTEM

Materyal ve yöntem başlığı altında bu çalışmada kullanılan yöntemler, araçlar, ölçüm araçları ile temizleme işleminde kullanılan materyaller hakkında bilgiler verilmiştir.

4.1. Bor Elementi, Özellikleri ve Kullanım Alanları

Bor elementi ilk defa 1808 yılında Fransız kimyagerler Gay Lussac ile Baron Louis Thenard tarafından keşfedilmiştir. Periyodik tabloda “B” simgesi ile yer alan borun; atom numarası 5, atom kütlesi 10,8 g/mol, yoğunluğu 2,84 g/cm³, erime noktası 2200 °C ve kaynama noktası 3660 °C’dir. Bor, metal ile ametal özellikleri arasında yer alan bir yarıiletkenidir. Elmasın ardından en sert element olarak bilinen borun kristal yapısı oldukça dikat çekicidir (Demir 2007). Şekil 4.1’de borun kristal yapısının temsil edilmiştir.



Şekil 4.1. Bor Kristal Yapısı Temsili (slideshare.net)

Dünya bor rezervlerinin %72’sine sahip olan Türkiye, bu alanda lider konumdadır. Küresel bor üretiminin yaklaşık %90’ını Türkiye ve ABD gerçekleştirmektedir. Üretilen bor ürünlerinin önemli bir kısmı ihracata yönlendirilmektedir. Bor tüketimi dünya genelinde bölgesel farklılıklar göstermektedir. Örneğin ABD’de bor kullanımının %68’i cam ve türevlerinin üretiminde, %5’i temizlik malzemeleri üretiminde, %3,5’i seramik üretiminde, %3,5’i tarımda ve 3,5’i diğer sektörlerde tüketilmektedir. Avrupa’da bor ürünleri ekseri olarak temizlik malzemelerinde kullanılmaktadır. Avrupa bor tüketiminde zirveyi %35 ile

temizlik malzemeleri alırken, %23 cam ve türevleri, %10 seramik sektöründe kullanılmaktadır. Bor mineralleri ve türevlerinin sanayi, teknoloji ve tarım sektörlerindeki stratejik önemi, dünya genelinde artan bir talebi beraberinde getirmektedir (etimaden.gov.tr).

Bor, birçok endüstride benzersiz özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Cam sanayisinde, eriyik haldeki bor; camın viskozitesini artırır, yüzey sertliğini ve dayanıklılığını yükselterek yükselterek sıcaklık izolasyonu gereken ürünlerde tercih edilir. Seramik sanayisinde, bor kaplamalar emayın oksitlenmesini önler ve çizilmeye karşı dayanıklılık sağlar. Temizlik sektöründe mikrop dezenfektanı etkisi ve beyazlatma etkisiyle kullanılır. İnşaat sanayisinde çimentonun dayanıklılığını arttıran ve dış etkenlere karşı (ısı, nem vb.) dayanıklılık sağlar. Borun yüksek olan erime noktası, yangınla mücadele sistemlerinde önemli bir noktaya koyar. Örneğin itfaiyecilerin giydiği yangına karşı dayanıklı giysilerin üretiminde ucuz bir hammadde olarak kullanılabilir. Ayrıca, nötron soğurma kapasitesinin yüksekliği, boru nükleer enerji uygulamalarında vazgeçilmez bir noktaya getirir. Enerji sektöründe; hidrojen stoklama, motor yakıtı ve katkı maddesi olarak kullanımı giderek artmaktadır. Tarımda kimi zaman bitki büyümesini desteklemek, kimi zamanda zararlı bitkileri imha etmek amacıyla kullanılabilir. Bor uygun koşullarda kullanıldığında, çeliğin sertliğini artırır. Bu da metalurji alanında kullanılabildiğini gösterir. Sağlık sektöründe kanser önleyici veya kanserli hücrelerin tahrip edilmesi uygulamalarında kullanılmaktadır. Bor; çok yönlü bir element olduğundan, birçok sektörde sürdürülebilir ve yenilikçi çözümler sunar (Yenialaca, 2009).

4.1.1. H_3BO_3 (Borik Asit)

Borik asit (H_3BO_3), bor elementinin en yaygın bileşiklerinden biridir. Fiziksel ve kimyasal özelliklerinin işlevselliği ile dikkat çeker. Renksiz, kristal yapıya sahip bir katı olan borik asit, genellikle suda çözünerek hafif asidik bir çözelti oluşturur. Özkütlesi $1,44 \text{ g/cm}^3$, molekül ağırlığı $61,83 \text{ g/mol}$, erime noktası $170,9$ ve kaynama noktası $300 \text{ }^\circ\text{C}$ olan borik asit bileşiği, özellikle kimyasal kararlılığı ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı ile literatürde bilinir. Borik asit; antiseptik, alev geciktirici ve nötron soğurucu özellikleri sayesinde pek çok sektörde kullanılır. Borik asidin yarı iletken malzemeler ile uyumluluğu, onu güneş pilleri için muazzam şekilde değerli kılar. Güneş pillerinde, özellikle silikon bazlı

fotovoltaik uygulamalarda yüzey temizleyici ve koruyucu bir katkı olarak kullanılır. Üretim sürecinde, silikon altlıkların (wafer) yüzey kalitesini arttırarak güneş pillerinin enerji dönüşüm verimliliğini arttırır. Ayrıca, güneş pillerinin performansını olumsuz etkileyen yabancı partikülleri ve organik kalıntıları temizlemede etkilidir. Borik asit bazlı kaplamalar ile güneş pilleri yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturulduğunda pillerin çevresel faktörlere (sıcaklık, nem, oksidasyon gibi) karşı dayanıklılığını arttırır ve uzun bir kullanım ömrü sağlar. Özellikle çok yüksek sıcaklıkların bulunduğu ortamlarda, termal kararlılık özellikleri sayesinde silikonun hasar görmesini önler.

Güneş pillerinin enerji üretim verimliliğinde, borik asidin kimyasal özellikleri büyük rol oynar. Yüzeyde oluşturulan ince film borik asit tabakası, elektron akışını iyileştirerek hücrelerin genel performansını arttırır. Borik asidin toksik madde saçmaması, çevre dostu güneş pillerinin üretilmesine olanak sağlamaktadır. Borik asit sadece güneş pillerinde değil, aynı zamanda enerji depolama ve yeni nesil fotovoltaik teknolojilerde de kullanılır. Gelişen fotovoltaik teknolojide tüm özellikleri nedeniyle vazgeçilmez bir katkı maddesi olacağı bilim adamları tarafından ön görülmektedir. Sonuç olarak: borik asit; güneş pili üretim süreçlerinde enerji verimliliğini optimize eden, dayanıklılığı arttıran ve çevresel sürdürülebilirliği destekleyen çok yönlü bir materyaldir.



Şekil 4.2. Borik Asit Kristal Şeklindeki Formu (solda) ve Bileşik Yapısı (sağda) (amazon.com)

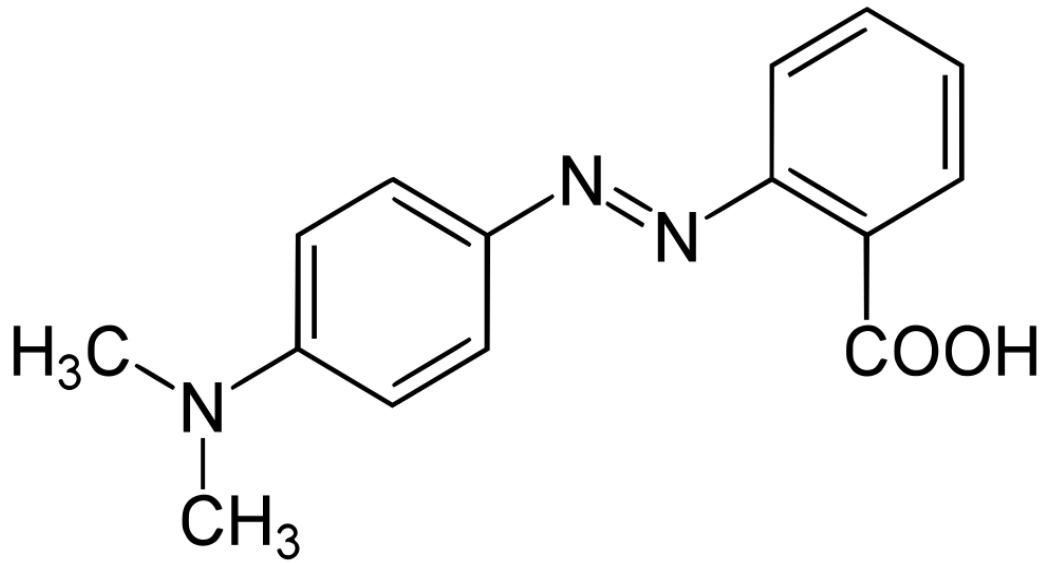
4.2. Metil Kırmızısı, Molekül Yapısı ve Özellikleri

Metil kırmızısı ($C_{15}H_{15}N_3O_2$) bir azo boyasıdır. Molekül ağırlığı 293 g/mol olan bileşik; molekül yapısında, azo grubu ($-N=N-$) ve dimetilamin grubu ($-N(CH_3)_2$) içeren halkalar bulunur. Bu yapı, metil kırmızısının asit – baz belirteci olarak işlev görmesini sağlar. Metil kırmızısı, pH 4.4’ün altında kırmızı, pH 6.2’nin üzerinde ise sarı renk alır. Bu nedenle pH aralığı 4.4 – 6,2 olan çözeltilerde indikatör olarak kullanılır. Ayrıca, mikrobiyolojide metil kırmızısı testi adı verilen bir testte, glikozun fermentasyonu ile asit üreten bağırsak bakterilerinin tespiti ve sınıflandırılmasında kullanılır.

Tablo 4.1. Asit – Baz İndikatörleri ve pH Çalışma Aralıkları

İndikatör	Asit Rengi	Baz Rengi	Ph aralığı
Timol Mavisi	Kırmızı	Sarı	1,2 – 2,8
Metil Oranj	Kırmızı	Sarı	3,1 – 4,5
Brom Krezol Yeşili	Sarı	Mavi	3,8 – 5,5
Metil Kırmızısı	Kırmızı	Sarı	4,2 – 6,3
Turnusol	Kırmızı	Mavi	5,0 – 8,0
Brom Timol Mavisi	Sarı	Mavi	6,0 – 7,6
Timol mavisi	Sarı	Mavi	8,0 – 9,6
Fenolftalein	Renksiz	Kırmızı	8,3 – 10,0
Alizarin sarısı	Sarı	Eflatun	10,0 – 12,1

Teorik olarak metil kırmızısı güneş pillerinde organik materyal olarak kullanılabilir. Boya duyarlı güneş pillerinde (DSSC) kullanımı üzerine literatürde çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda boyaların kimyasal yapısı, ışık soğurma özellikleri ve enerji dönüşüm verimlilikleri incelenmiş; ve olumlu sonuçlara ulaşılmıştır. Örneğin; bazı iletken polimerlerin güneş pili uygulamalarında kullanımı üzerine yapılan bir çalışmada, polimerlerin ince film tabakası yapımında hızlı ve düşük maliyetli olması nedeniyle büyük avantajlar sağladığı bildirilmiştir (Alpaslan 2009). Bu tür çalışmalar, metil kırmızısının güneş pillerinde bir bileşen olarak kullanılabilme potansiyelini ortaya koymuştur. Uluslararası Kanseri Araştırmaları Ajansı (IARC) metil kırmızısının sağlık açısından bazı riskler barındırdığını, ancak kanser oluşturma potansiyelinin olmadığını rapor etmiştir. Uluslararası Kanseri Araştırmaları Ajansı’nın açıklamasına göre bu malzeme “Solunduğunda veya yutulduğunda zararlı etkiler gösterebilir; ayrıca göz, deri ve solunum sistemine temas ettiğinde tahrişe neden olabilir. Yapılan araştırmalar sonucunda kanserojen etkisine dair herhangi bir bulguya rastlanmamıştır.” Denmiştir.



Şekil 4. 3. Metil Kırmızısının Molekül Temsili

4.3. N Tipi Kristal Silisyum Malzemesinin Temizlik İşlemi

Oluşturulacak hücrenin yüzeyinin fiziksel ve kimyasal yabancı maddelerden arındırmak ve mevcut oksit tabakasını en az düzeye getirmek amacıyla temizlik işlemlerimiz yapıldı. Temizlik sürecinde aygıtta özelliklerini kaybettirecek malzeme ve yöntemler kullanılmadı. Spin Coating yöntemi ile organik materyal kaplanacak olan yüzeyin nano piramitli bir hale getirilmesi gerektiğinden asit yardımıyla piramitleştirme işlemi yapıldı.

Yüzey tahribatı yapacak olan karışım; 160 ml HCl, 45 ml KOH, 7,5 ml H₂O₂ ve 4,5 ml HF kullanılarak bir petri kabında karıştırılarak oluşturuldu (Andre Stapf vd., 2017). Aygıtlarımızın parlak yüzeyi karışıma denk gelecek şekilde aygıtlar karışımında yüzdürüldü. Daha sonra karışımdan alınan silisyum kristali Ultrasonik Temizleme cihazında C₂HCl₃ ile 15 dakika boyunca yıkandı. Yıkama işlemi aynı cihaz içerisinde 15 dakika boyunca Aseton ile devam etti. Daha sonra asetondan çıkarılan numuneler yine ultrasonik temizleyici cihazında metanol ile 15 dakika boyunca yıkandı. Numuneler daha sonra deiyonize su ile durulandıktan sonra ultrasonik temizleme cihazında 20 dakika boyunca saf suda tekrar yıkandı. Islak halde cihazdan çıkarılan numuneler N₂ gazı ile kurutuldu. Çalışmanın temizlik aşamasında kullanılan kaplar, maskeler, cımbızlar, camlar gibi tüm araçlar izopropanol ve metanol kullanılarak yıkandı. Yıkama işleminden sonra azot ve argon ile kurulandı.

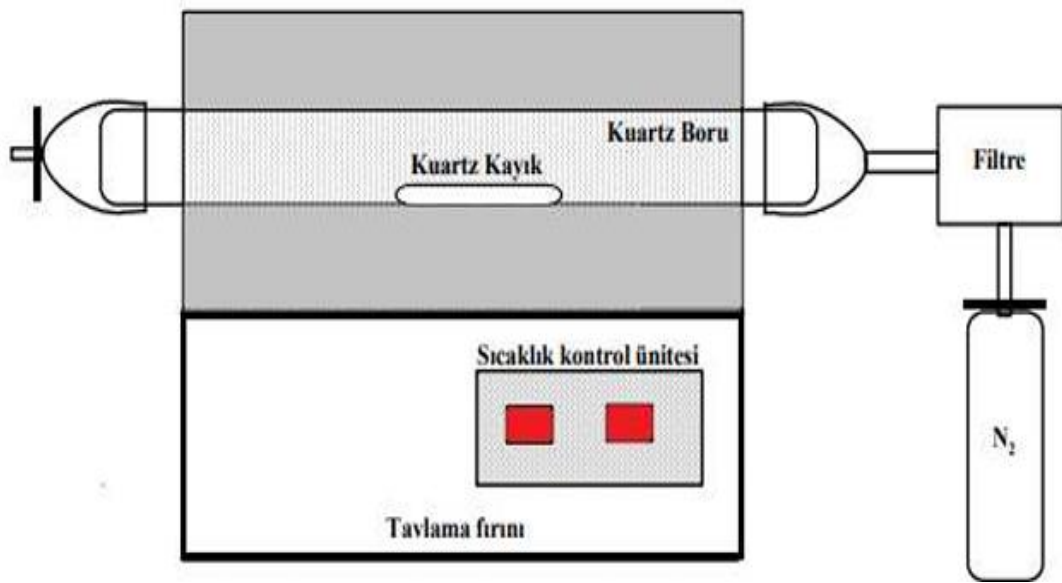
4.4. Buharlaştırma İle Kaplama Tekniği

Temizlik işleminden sonra silisyum kristalini bir güneş hücresine dönüştürecek olan fabrikasyon aşamasına geçildi. Buharlaştırma işlemi NANOVAK NVTs-400 Cihazında gerçekleştirildi. Tüm aşamalardan önce buharlaştırma işleminin gerçekleştirileceği vakum cihazında, numunelerin yerleştirildiği kuvars pota ve kristalin mat yüzeyine kaplanacak olan gümüş malzemesi ultrasonik temizleme cihazı içerisinde aseton ile 10 dakika boyunca yıkandı. Cihazın, buharlaştırılacak malzemenin konulacağı kısmına (pota) gümüş malzemesi yerleştirildi. Kristalin mat yüzeyine gelecek şekilde kristal yerine yerleştirildi. Cihaz çalıştırılarak vakum işlemi yapıldı. Ortamın basıncı μ torr seviyelerinde kadar indi. Cihazın içindeki basınç 6 μ torr değerine ulaştığında potaya elektrik verilerek gümüş malzemesi buharlaştırıldı. Kristalin alt kısmına gümüş biriktiği görüldü. Kapatma prosedürü başlatıldı ve vakum seviyesi atmosfer basıncı ile eşitlendiğinde aygıtlar cihazdan çıkarıldı.



Şekil 4.4. Buharlaştırma İşleminin Yapıldığı Bingöl Üniversitesi Merkez Laboratuvarında Bulunan Termal Buharlaştırma Cihazı

Alt yüzeyi gümüş ile kaplanan numuneler tavlama işlemi için tavlama fırınına yerleştirildi. Fırın 585 °C'ye ayarlanarak kuartz bir kap yardımıyla ısınan fırının içerisine yerleştirildi. Azot (N₂) gazlı ortamda 3,5 dakika boyunca süren tavlama işleminden sonra numuneler ucunda çengel bulunan kuartz bir çubuk ile fırından çıkarıldı. Fırının açık kapağının önünde soğuması beklenen numunelerin kontak (omik) işlemleri böylece tamamlanmış oldu.



Şekil 4.5. Tavlama Fırınının Bölümlerini Gösteren Temsili Görseli (Ejderha 2012)

4.5. Arayüzey Kaplama İşlemi

Bu çalışmada numunelerin arayüzeylerinin kaplama işlemlerini yapma amacıyla bor ve metil kırmızısı organik materyali tercih edilmiştir. Tercih edilen organik madde katı formda bulunduğundan damlama işlemi için kloroform içerisinde çözündürülmesi gerekmektedir. Çözelti için 20 miligram metil kırmızısı, 100 ml kloroform içine eklenmiş ve yaklaşık 2 saat boyunca manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Yine aynı şekilde 100 ml saf suya 5 gram borik asit eklenmiş ve manyetik karıştırıcıda 1 saat boyunca karıştırılmıştır. Hazırlanan çözeltiler, mikropipet yardımıyla damlatma yöntemiyle kaplanacak olan numuneye uygulandı. İlk olarak numuneye her bir damlası 20 µl olacak şekilde metil kırmızısı 10 damla halinde damlatılıp sıvısının buharlaşması beklenmiştir. Daha sonra aynı

miktarda ve aynı ölçekte borik asit çözeltisi damlatılmış ve buharlaşma beklenmiştir. Borik asit çözücüsü olarak su kullanıldığından borik asit damlatma işleminde buharlaşma süreci metil kırmızısına kıyasla bir hayli fazla sürmüştür.

Diğer numunenin arayüzeyi spin coating yöntemi ile yapılmıştır. Bu işlem için numune spin coating cihazının vakum yatağına yerleştirilerek vakum uygulanmış ve mikropipet ile toplamda 10'ar damla ve her bir damla 15 µl olacak şekilde arayüzey kaplamaları yapılmıştır.

4.5.1. Damlatma İle Kaplama Yöntemi

100 ml kloroform çözücüsüne 20 miligram metil kırmızısı katılarak yapılan karışımdan numune yüzeyine her bir damla 20 µl olacak şekilde 10 damla uygulandı. Ardından 100 ml suya 5 gram bor konularak hazırlanan çözeltiden yine her biri 20 µl olacak şekilde damlatıldı. Damlama işleminden sonra sıvıların buharlaşması beklendi ve istenilen şekilde kaplama işlemi tamamlandı.



Şekil 4.6. Damlatma Tekniğiyle Yüzey Kaplama

4.5.2. Spin Coating İle Kaplama Yöntemi

Spin Coating, bir yüzeyi ince ve homojen bir film tabakası ile kaplamak için kullanılan, özellikle elektronik ve optik gibi alanlarda yaygın olarak tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntemde, kaplama yapılacak yüzey öncelikle temizlenir ve pürüzsüz hale getirilir. Ardından kaplama işlemi için hazırlanan sıvı çözelti, kaplanacak yüzeyin merkezine dikkatlice damlatılır. Çözelti uygulandıktan sonra, yüzey bir spin coating cihazına yerleştirilir ve vakum yardımıyla sabitlenir. Cihaz, yüzeyi yüksek hızda döndürerek

santrifüj kuvveti sayesinde sıvının yüzeye eşit şekilde dağılmasını sağlar. Döndürme işlemi sırasında, fazla sıvı yüzeyden uzaklaşırken kalan sıvı yüzeyde ince film bir tabaka oluşturur. Çözücünün buharlaşmasıyla birlikte ince ve sabit bir kaplama elde edilir. Kaplama kalınlığı; döndürme hızı, süre ve çözelti viskozitesi gibi parametreler ile ayarlanabilir.

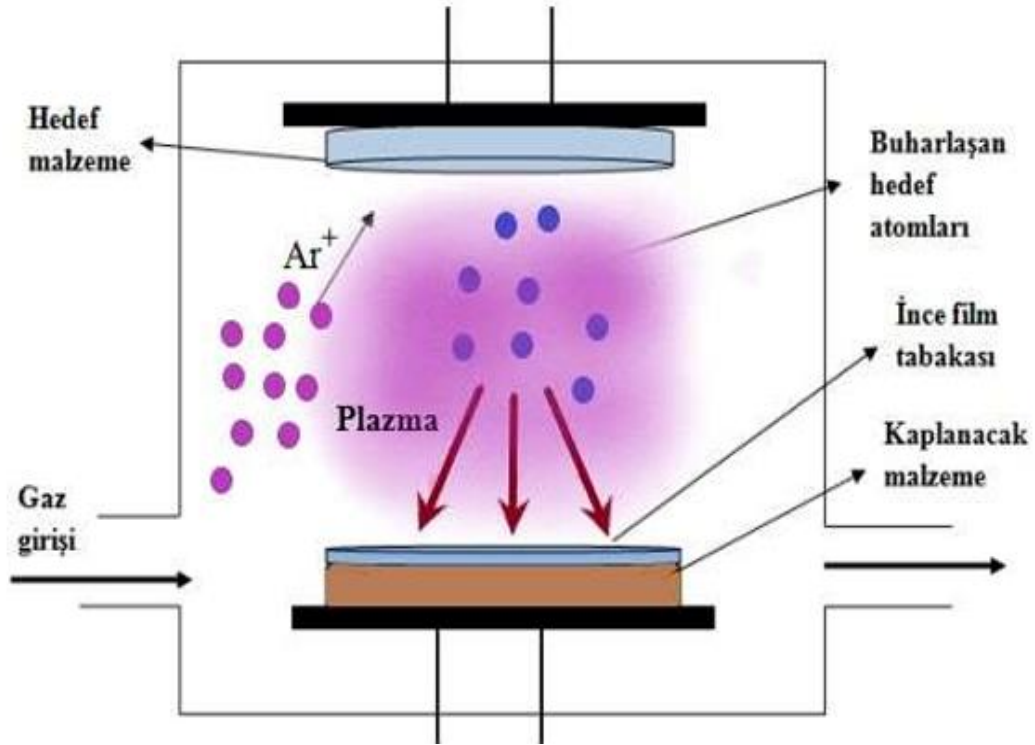


Şekil 4. 7. Spin Coating Yöntemi Temsili

4.6. Manyetik Alanda DC Saçtırma Tekniği İle Kontak Oluşturma

Manyetik alanda DC saçtırma yöntemi, yüksek saflıkta ince metalik filmler oluşturmak için kullanılan ileri bir kaplama tekniğidir. Bu yöntemde, bir vakum odası içinde hedef malzeme olarak adlandırılan metal bir katot ve bir altlık yerleştirilir. Sistem öncelikle yüksek vakum altına çalıştırılarak ortamdaki gaz molekülleri minimum seviyeye indirilir. Ardından, genellikle argon gibi bir asal gaz ortama eklenir ve belirli bir basınca ayarlanır. Uygulanan doğru akım (DC) voltajı, hedef malzeme üzerinde güçlü bir elektrik alan oluşturur ve bu alandaki atomlar, iyonize edilmiş argon gazının pozitif iyonları tarafından bombardımana tutulur. Bu bombardıman, hedef malzemenin yüzeyinden atomların kopmasına neden olur. Kopan bu atomlar, manyetik alanın etkisi ile kontrollü bir şekilde altlığa doğru hareket ederek yüzeyde birikir ve homojen bir ince film tabakası oluşturur. Manyetik alanın kullanılması, plazmayı stabilize eder ve saçılma verimliliğini artırarak daha hızlı ve daha kontrollü bir kaplama sağlar (semicore.com). Metal yarıiletken kontaklarının üretiminde Bu yöntemle; bu çalışmada, her biri 15 µl olacak şekilde 10 damla metil kırmızısı ve ardından 10 damla borik asit çözeltisi numune yüzeyine uygulanmıştır. sputtering tekniği, iyi mekanik yapışma özelliklerine sahip metal filmler oluşturabilme yeteneği sayesinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem, çok yüksek vakum koşullarına ihtiyaç duyulmadan da etkili bir şekilde

uygulanabilir. Sputtering, yüksek kaliteli ve homojen metal kaplamalar elde etmek için uygun bir yöntem olması nedeniyle, özellikle elektronik ve yarıiletken endüstrisinde tercih edilmektedir (Ejderha 2012).



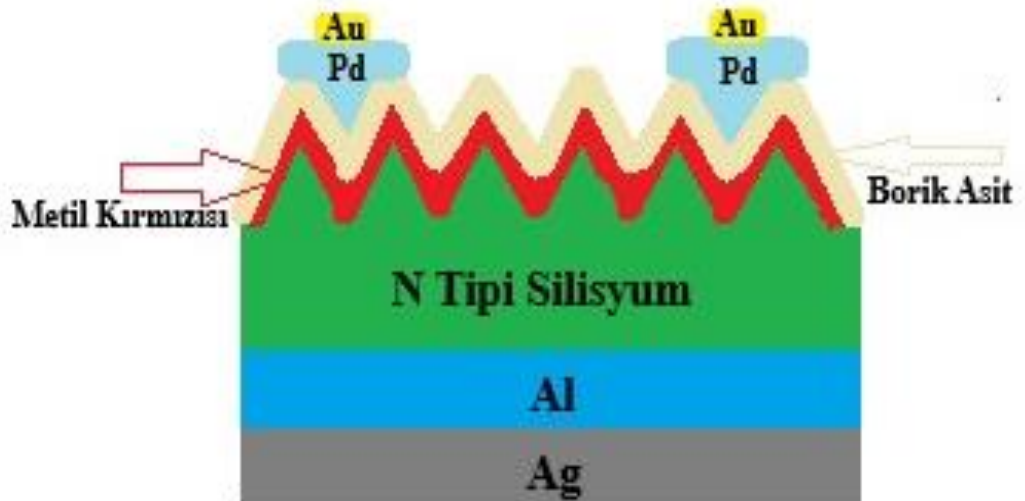
Şekil 4.8. DC Saçtırma Yöntemi Temsili

Cihazların imalatı sırasında, 5 mm ve 1 mm çapında boşluklara sahip maskeler kullanılmıştır. Bu maskeler, tutucular arsına yerleştirilmiş ve aygıtların Omik kontak yüzeyleri 5 mm delikli maskelerin üzerinde tam hizalanacak şekilde yerleştirilmiştir. Numunelerin sabitlenmesi için maskelerin boyutlarına uygun camlar kesilip yerleştirilmiş ve saçtırma işlemi için cihaz ortamı vakumlanmaya başlamıştır. Vakum işlemi sırasında, basınç turbo moleküler pompalar ile 0,001 ila 0,01 torr arasına ayarlanmıştır. Saçtırma işlemi için saf argon gazı kullanılmış ve bu gaz ile plazma oluşturulmuştur. Plazma ortamında hedef malzeme olarak kullanılan paladyum, maskelerin deliklerinden geçerek yarıiletken yüzeyinde birikmiştir. Bu süreç sonucunda, yarıiletken yüzeyinde dairesel Schottky kontaklar oluşturulmuştur. Aynı sistem kullanılarak 1mm'lik maskeler yardımıyla altın kaplaması da yapılmış olup kontak işlemi başarılı bir şekilde sonlandırılmıştır.

Tüm fabrikasyon aşamaları bittikten sonra Numune 1 (Referans), Numune 2 ve Numune 3 olarak hazırlanmıştır. Numunelerin karakteristiklerini ölçmek ve güneş parametrelerini bulmak için, numunelerin akım – gerilim (I-V) ölçümleri yapıp kayıt altına alınmıştır. Daha sonra SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) cihazı ile 2. ve 3. numunelerin yüzey yapıları incelenmiş ve görüntüleri kaydedilmiştir. Hazırlanan aygıtların kesitlerinin temsilleri Şekil 4.9 ve Şekil 4.10’da gösterilmiştir. Keithley 2400 cihazı, LabWiew tabanlı program ve propstation üzerinde solar simülatör yardımıyla ölçümler yapılmıştır.



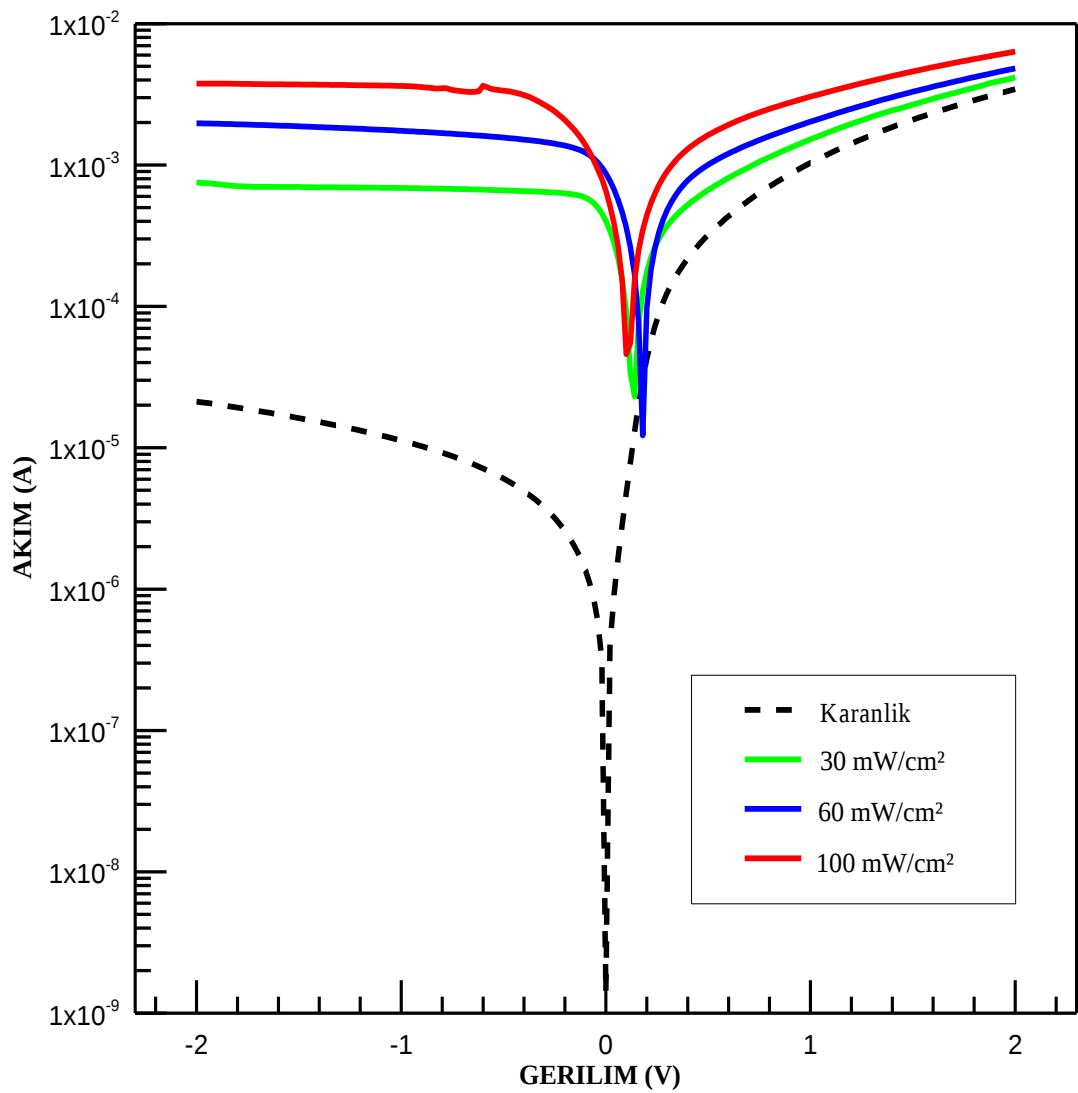
Şekil 4.9. 2 Numaralı Numunenin Kesit Temsili



Şekil 4.10. 3 Numaralı Numunenin Kesit Temsili

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

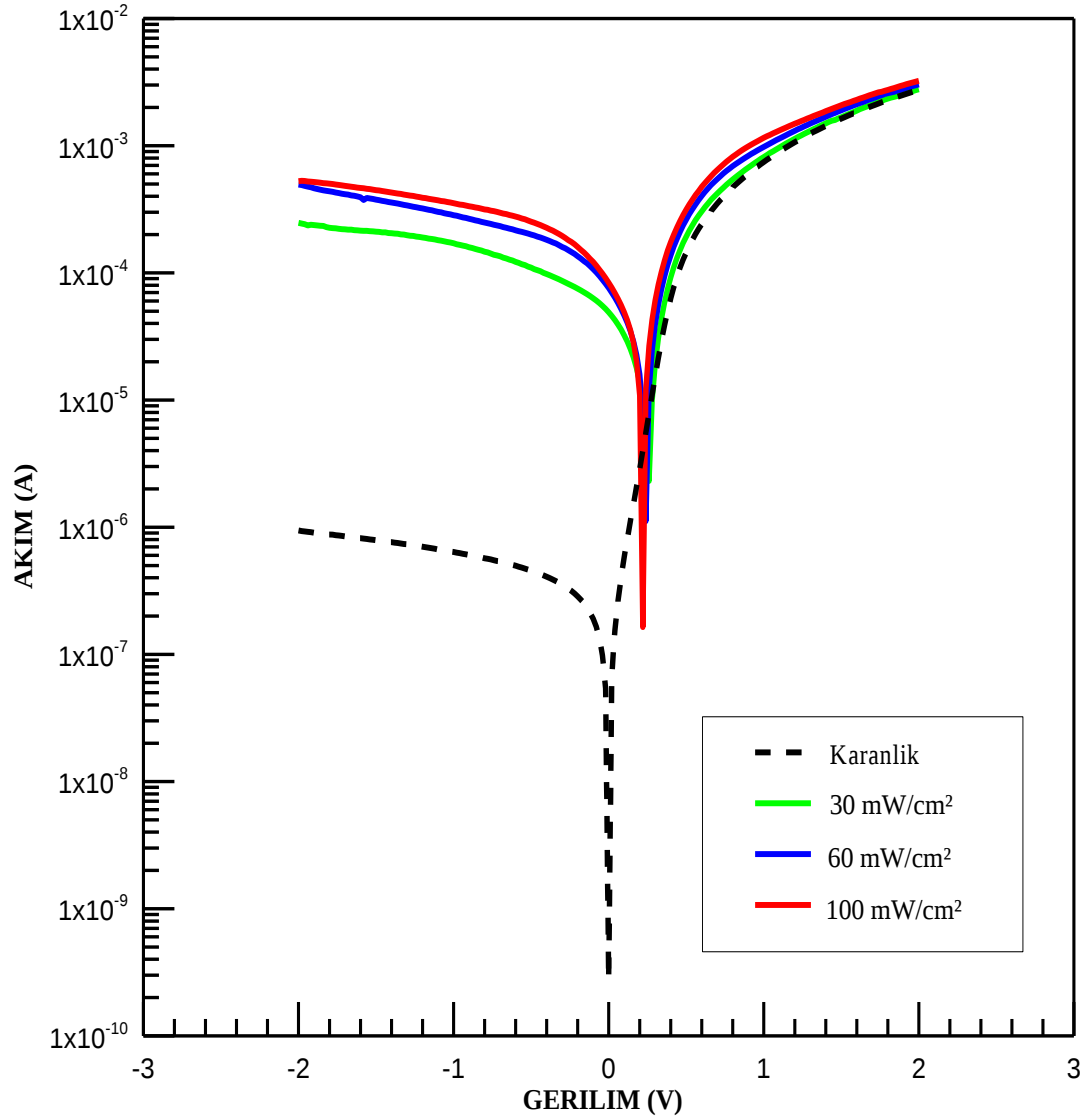
Fabrikasyondan sonra cihazlar karanlıkta ve suni güneş ışığı altında ölçümlere tabi tutulmuştur. Suni ışık şiddeti değerleri 30 mW/cm^2 , 60 mW/cm^2 ve 100 mW/cm^2 'dir. Kaydedilen sonuçlar, Grapher 7 programı ile grafiklere dökülmüş ve hesaplamaları yapılmıştır.



Şekil 5.1. 1 Numaralı (Referans) Numunenin Karanlıkta ve Işık Altında Gösterdiği I-V Karakteristiği

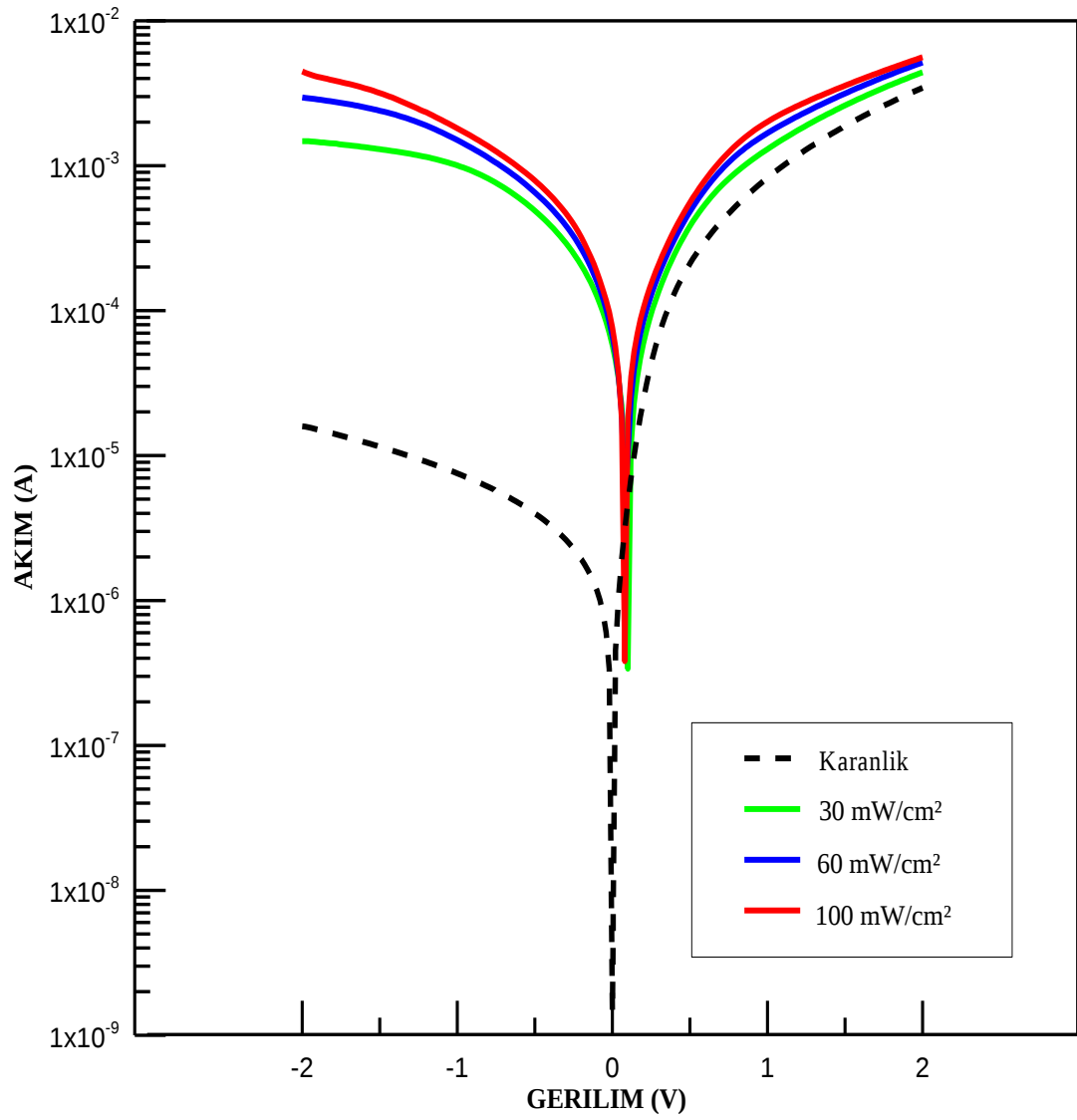
Şekilde 5.1'de referans numunenin karanlık karakteristiği bir diyot karakteristiğini göstermektedir. Işık altında akım değeri bariz şekilde arttığından bu numuneye bir

fotodiyot denilebilir. Işık altında gerilim değeri olması güneş pili özelliği gösterdiğinin bir kanıtıdır. Işık değeri artıkça akım değerleri de doğru orantılı olarak artmıştır. Referans numunesinin güneş pili özellikli olarak çalışması bize diğer numuneler için referans alınabileceğini göstermiştir.



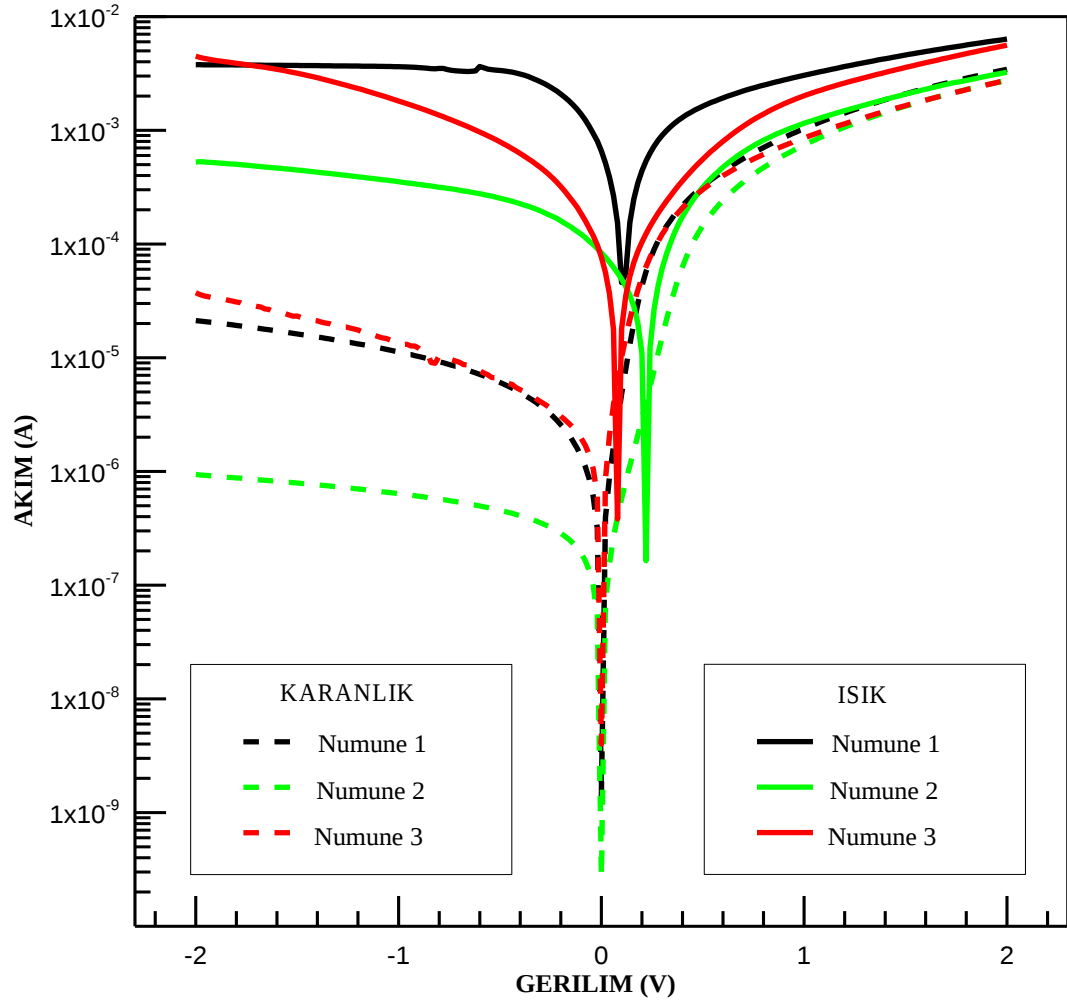
Şekil 5.2. 2 Numaralı Numunenin Karanlıkta ve Işık Altında Gösterdiği I-V Karakteristiği

Şekil 5.2’de damlatma yöntemiyle arayüzeyi elde edilen 2 numaralı numunenin grafiğine bakıldığında; ışık şiddetine bağlı olarak akım değerinin artış gösterdiği ve ışık şiddeti altında gerilim ürettiği görülmektedir.



Şekil 5.3. 3 Numaralı Numunenin Karanlıkta ve Işık Altında Gösterdiği I-V Karakteristiği

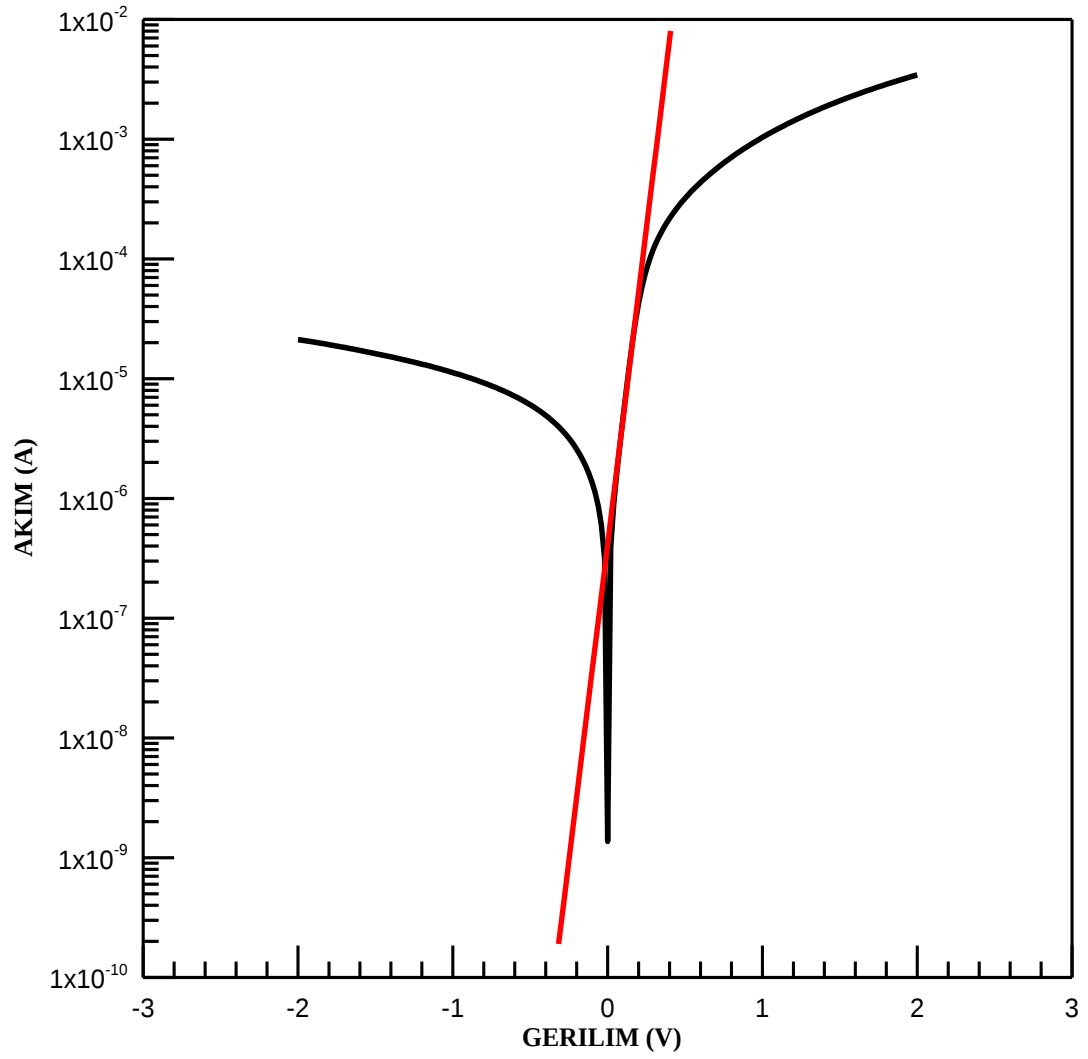
Şekil 5.3'te spin coating yöntemiyle arayüzeyi elde edilen 3 numaralı numunenin grafiğine bakıldığında; ışık şiddetine bağlı olarak akım değerinin artış gösterdiği ve ışık şiddeti altında gerilim ürettiği görülmektedir.



Şekil 5. 4. Numune 1,2 ve 3'ün Karanlıkta ve 100 mW/cm² Işık Şiddeti Altındaki Karakteristikleri

Tablo 5.1. Numunelerin Işık Şiddetine Bağlı Elektriksel Parametreleri

NUMUNE NO	IŞIK ŞİDDETİ (mW/cm ²)	I _{kd} (A)	V _{ad} (V)	P _m (W)	I _m (A)	V _m (V)
1	30	403 x 10 ⁻⁶	140 x 10 ⁻³	131 x 10 ⁻⁷	219 x 10 ⁻⁶	60 x 10 ⁻³
	60	873 x 10 ⁻⁶	180 x 10 ⁻³	371 x 10 ⁻⁷	464 x 10 ⁻⁶	80 x 10 ⁻³
	100	659 x 10 ⁻⁶	99 x 10 ⁻³	159 x 10 ⁻⁷	266 x 10 ⁻⁶	60 x 10 ⁻³
2	30	49 x 10 ⁻⁶	260 x 10 ⁻³	35 x 10 ⁻⁷	28 x 10 ⁻⁶	119 x 10 ⁻³
	60	76 x 10 ⁻⁶	240 x 10 ⁻³	49 x 10 ⁻⁷	40 x 10 ⁻⁶	119 x 10 ⁻³
	100	836 x 10 ⁻⁷	220 x 10 ⁻³	50 x 10 ⁻⁷	42 x 10 ⁻⁶	119 x 10 ⁻³
3	30	577 x 10 ⁻⁷	100 x 10 ⁻³	13 x 10 ⁻⁷	33 x 10 ⁻⁶	40 x 10 ⁻³
	60	667 x 10 ⁻⁷	80 x 10 ⁻³	14 x 10 ⁻⁷	34 x 10 ⁻⁶	40 x 10 ⁻³
	100	768 x 10 ⁻⁷	80 x 10 ⁻³	14 x 10 ⁻⁷	31 x 10 ⁻⁶	40 x 10 ⁻³



Şekil 5. 5. Karanlıkta I-V Karakteristiğine Denklem Çıkarma Amacıyla Çizilen Teğet

Tablo 5.2. Numunelerin Doluluk Oranı (FF) ve Engel Yüksekliği Değerleri

NUMUNE NO	IŞIK ŞİDDETİ	FİLL FAKTÖRÜ	ENGEL YÜKSEKLİĞİ
1	30 mW/cm ²	0,233	0,518
	60 mW/cm ²	0,236	
	100 mW/cm ²	0,242	
2	30 mW/cm ²	0,273	0,552
	60 mW/cm ²	0,268	
	100 mW/cm ²	0,276	
3	30 mW/cm ²	0,232	0,488
	60 mW/cm ²	0,262	
	100 mW/cm ²	0,238	

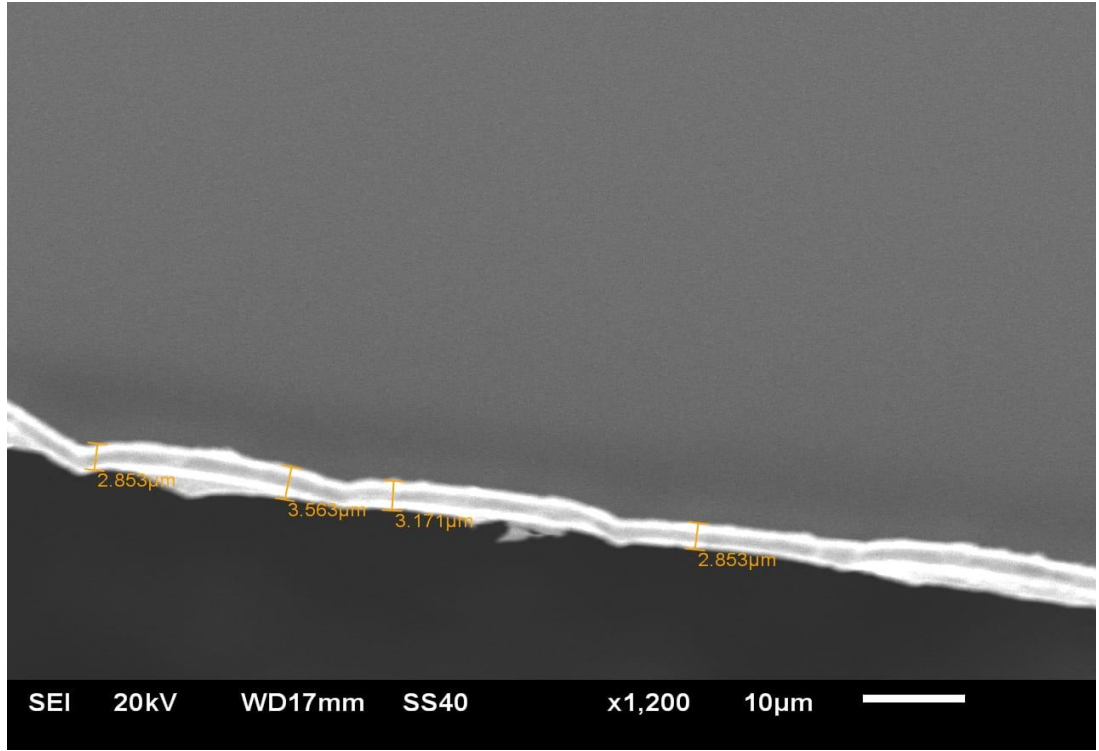
Şekil 5.5'te çizilen teğetin denkleminde akım değeri bulunmuştur. Akım değeri yüzey alanına bölünerek akım yoğunluğu bulunmuştur. Sonrasında tüm değerler Denklem 2.9'da yerine yazılarak engel yüksekliği bulunmuştur.

Tablo 5.1'de bulunan değerler Denklem 2.11'da yerine yazılarak doluluk oranı (fill faktörü) bulunmuştur.

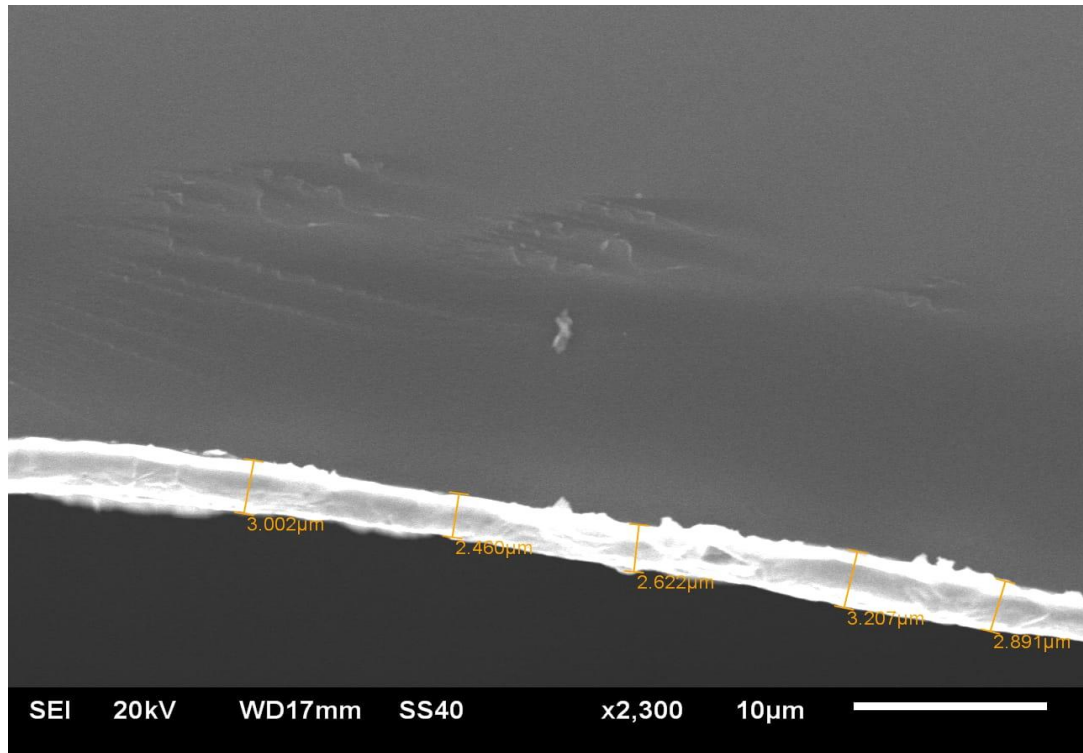
Tablo 5.3. 3 Numuneye Ait Işık Şiddetine Bağlı Verim Değerleriz

NUMUNE NO	IŞIK ŞİDDETİ	VERİM
1	30 mW/cm ²	22,3 x 10 ⁻²
	60 mW/cm ²	31,5 x 10 ⁻²
	100 mW/cm ²	8,1 x 10 ⁻²
2	30 mW/cm ²	5,9 x 10 ⁻²
	60 mW/cm ²	4,1 x 10 ⁻²
	100 mW/cm ²	2,6 x 10 ⁻²
3	30 mW/cm ²	2,2 x 10 ⁻²
	60 mW/cm ²	1,2 x 10 ⁻²
	100 mW/cm ²	0,7 x 10 ⁻²

Işık şiddetine bağlı verim değerleri, Tablo 5.1'de bulunan P_m , I_{kd} , V_{ad} ve kontak alanını Denklem 2.10'da yerine yazarak bulundu. 3 numunenin verim değerleri Tablo 5.3'e çıkarılmıştır.

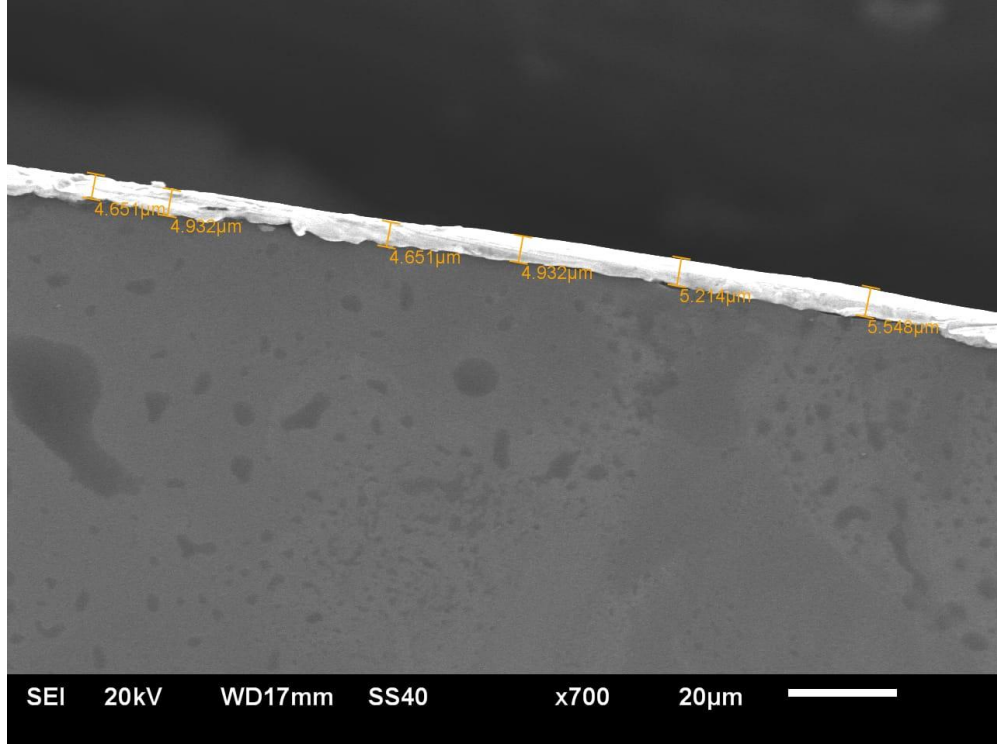


(a)

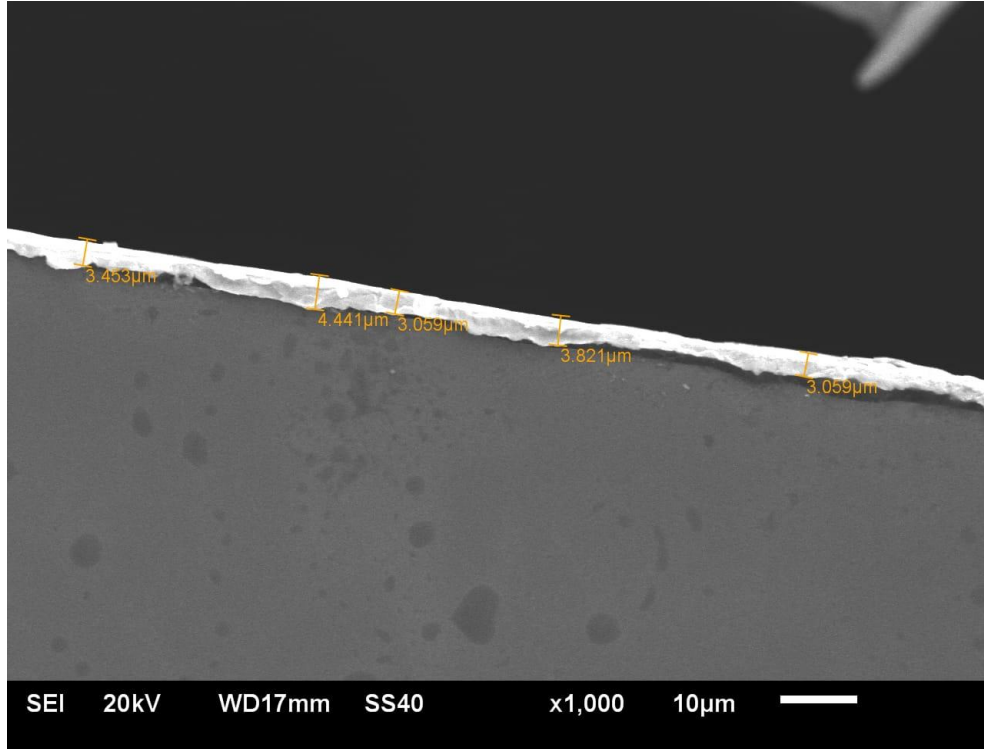


(b)

Şekil 5. 6. (a) ve (b), 2 Numaralı Numuneye Ait SEM Görüntüleri



(a)



(b)

Şekil 5. 7. (a) ve (b), 3 Numaralı Numuneye Ait SEM Görüntüleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında üç eşit parça halinde kesilen silisyum tabakalar bir takım temizlik işlemlerinden geçtikten sonra kaplama işlemlerine tabi tutulmuştur. Referans numunesi (Numune 1) arayüzey kaplaması olmadan kontaklanmıştır. 2 numaralı numune damlatma yöntemi ile önce metil kırmızısı organik maddesi ile ve sonra bor ile kaplanmıştır. 2 numaralı numunenin kesiti Şekil 4.9’da temsil edilen şekilde üretilmiştir. 3 numaralı numunede silisyum tabaka, HCl, KOH, H₂O₂ ve HF kullanılarak yüzeyde nano piramitler oluşturmak için tahrip edilmiştir. Daha sonra spin coating yöntemi ile yüzeyinde film şeklinde önce metil kırmızısı ve daha sonra bor ile kaplanmıştır. 3 numaralı numunenin kesiti Şekil 4.10’da temsil edilen şekilde üretilmiştir.

Fabrikasyon aşamasından sonra 300 K sıcaklıkta ölçümleri alınmıştır. I – V ölçümleri 3 numune için de sırasıyla karanlıkta, 30 mW/cm² ışık şiddeti altında, 60 mW/cm² ışık şiddeti altında ve 100 mW/cm² ışık şiddeti altında yapılmıştır. Değerler kaydedilmiş, grafiklere ve tablolara çıkarılmıştır. Üç numunede de ortak olarak diyot özelliği görülmüştür. Şekil 5.1, Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 incelendiğinde; ışık şiddeti arttıkça üç numunede de hem akım değerleri doğru orantılı olarak artış göstermiş hem de güneş pili özelliğinden dolayı gerilim üretildiği görülmüştür. Grafikler incelendiğinde akım değerleri güneş şiddeti arttıkça artış göstermiştir. Şekil 5.4’ye bakılınca arayüzeyi olmayan referans numunenin diğer numunelere göre daha fazla akım geçirdiği görülmüştür. Bunun nedeninin, arayüzey kaplamasının ışık geçirgenliğini düşürdüğü olarak düşünülmektedir. Tablo 5.2’de bulunan engel yüksekliklerine bakıldığında damlatma ile arayüzey yapılan 2. Numunede, engel yüksekliği referansa göre artış gösterirken; 3. numunede engel yüksekliği düşmüştür. Genel olarak fill faktörü değerleri ile engel yüksekliği değerlerinin paralel olarak değişim gösterdiği görülmektedir. Tablo 5.3’e bakıldığında genel olarak 3 numunenin de ışık şiddeti arttığında, verim değerleri düşüş göstermektedir. Bunun nedeninin, kaplama ve kontak malzemelerinin yüzeyde ışık geçirgenliğini azaltması olarak düşünülmüştür. I_{kd}, V_{ad}, P_m, I_m ve V_m değerleri 2. ve 3. numunelerde ışık ile doğru orantılı olarak artarken, referans numunede 60 mW/cm² ışık şiddetinden sonra genellikle düşme eğilimi göstermiştir. Genel olarak parametrelere bakıldığında, arayüzey kaplamasının fotodiyot

özelliklerini bazı noktalarda arttırmışken, bazı noktalarda ışık geçirgenliğini azalttığından düşürmüştür. Şekil 5.6 Ve Şekil 5.7’de bulunan SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntülerinde yüzeyde arayüzey kaplamasının varlığı net bir şekilde görülmektedir. Şekil 5.6’da bulunan 2 numaralı numuneye ait SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri incelendiğinde yüzeyin neredeyse pürüzsüz bir kaplama ile kaplandığı görülmektedir. Arayüzey kalınlığı yüzey üzerinde ilerledikçe küçük farklar göstermiştir. Şekil 5.6’da arayüzeyin en kalın kaplandığı nokta $3,56\ \mu\text{m}$ iken, en ince kaplandığı yer de $2,46\ \mu\text{m}$ ’dir. Bu da yüzeye kaplamanın ne kadar homojen dağıldığını göstermektedir. Şekil 5.7 incelendiğinde arayüzey kaplaması yüzeye daha dalgalı olarak kaplandığı görülmektedir. Yüzey üzerinde ilerledikçe arayüzey kalınlığı büyük farklar göstermiştir. Şekil 5.7.’da arayüzeyin en kalın kaplandığı bölgede kalınlık $5,50\ \mu\text{m}$ iken, en ince kaplandığı bölge $3,05\ \mu\text{m}$ olduğu görülmüştür. Bunun nedeninin, yüzey nano piramitleştirme (textury) için yüzeye uygulanan asit tahribatı olduğu düşünülmektedir. Bu durum yüzey üzerinde dengesizlik oluşturduğu için engel yüksekliği 3. numunede, diğer iki numuneye göre bariz düşüş göstermiştir. Bu duruma asit tahribatının yol açtığı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Alpaslan, Z. (2009). *Bazı İletken Polimerlerin Güneş Pili Uygulamaları*. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

Baba, B. A. (2014). *Modeling and Simulation of Thin-Film Solar Cells*. Meliksah University.

Becquerel, A. E. (1839). *On the effects of light on electricity*. Annales de Chimie et de Physique, 3, 337-345.

Bekil, A. (2019). *Sputter Yöntemiyle Elde Edilen Sade ve Bor Katkılı Organik Arayüzeyli Metal/P-Si Güneş Pillerinin Karakterizasyonu*. Bingöl Üniversitesi.

Bereznev, S. A., Ivanov, Y. P., Petrov, A. N. and Sidorov, M. V. (2007). *CuInS₂ ve organik tampon-duyarlılaştırıcı katmanlara dayalı hibrit güneş pilleri*. Thin Solid Films, 515(15), 5759-5762.

Canlı, S. (2018). *Silisyum Tabanlı Alq₃ Arayüzeyli Fotodiyotların Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi*. Bingöl Üniversitesi.

circuitbread.com (Erişim tarihi: 04.05.2024)

Crowley, R. E. and Sze, S. M. (1965). *Theory of Schottky barrier solar cells*. Journal of Applied Physics, 36(1), 331-337.

Çaldıran, Z. (2013). *Au/Antrakinin/P-Si/Al Schottky Diyodun Temel Karakteristik Parametrelerinin Sıcaklığa Bağlı I-V (Akım-Voltaj) Ve C-V (Kapasite-Voltaj) Ölçümlerinden Tayin Edilmesi*. Atatürk Üniversitesi.

Ejderha, K. (2012). *Magnetron Saçtırma Yöntemiyle Hazırlanan Metal/P-InP Schottky Diyotların Karakteristik Parametrelerinin Tavlama ve Numune Sıcaklığına Bağlı Değişimlerinin İncelenmesi*. Atatürk Üniversitesi.

Görmez, S. (2021). *Silisyum Tabanlı Güneş Pili Hücrelerinin Üretim Teknolojileri ve Bazı Ticari Silisyum Güneş Pillerinin Elektriksel Karakteristiklerinin Tayini*. Giresun Üniversitesi.

Halder, N. N., Biswas, P., Kundu, S. and Banerji, P. (2015). *Au/p-Si Schottky junction solar cell: Effect of barrier height modification by InP quantum dots*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 132, 230-236.

Honsberg C. B. and Bowden, S. G. (2019). *Photovoltaics Education Website*, www.pveducation.org.

Korun, M. (2016). *Farklı Yarı İletken Malzemelerle Üretilmiş Güneş Pillerinde Verim Analizi*. Gazi Üniversitesi.

Özyahni, V. (2024). *Mitigation of Light Induced Degradation and, Light and Elevated Temperature Induced Degradation Mechanisms in Boron Doped Czochralski Grown Silicon Wafers*. Middle East Technical University.

Pakma, O., Çavdar, Ş., Koralay, H. Tuğluoğlu, N. and Yüksel, Ö. F. (2017). *Improvement of Diode Parameters in Al/n-Si Schottky Diodes with Coronene Interlayer Using Variation of the Illumination Intensity*. Physica B: Condensed Matter 527:1–6.

Polat, S. (2020). *Farklı P-Tipi Yarıiletkenlerin Tek Kristallerinin Büyütülmesi, Karakterizasyonu ve Organik Güneş Pillerinde Performans Üzerine Etkisinin İncelenmesi*. Konya Teknik Üniversitesi.

Sajjad, S. (2013). *Organik Tabanlı Güneş Pili Üretimi ve Karakterizasyonu*.” Yıldız Teknik Üniversitesi.

Streetman, B. G., and Banerjee, S. (2006). *Solid state electronic devices* (6th ed.). Pearson.

Sze, S. M., and Ng, K. K. (2007). *Physics of semiconductor devices* (3rd ed.). Wiley-Interscience.

Şahin, M. B. (2024). *Saçtırma yöntemiyle elde edilen sade ve metil kırmızısı organik arayüzeyli pd/n-si Schottky güneş pillerinin elektriksel ve fotovoltaiik karakterizasyonu*. Ardahan Üniversitesi.

Şirin, D. Ş. (2021). *Au/4H n-SiC Schottky Diyotların Sıcaklığa Bağlı Akım İletim Mekanizmasının İncelenmesi*. Hitit Üniversitesi.

Tahseen, O. M. (2017). *The Photovoltaic Characterization Of Mo/Methylene Blue/N-Si/Al/Au Contacts*. Bingöl University.

[tr.wikipedia.org/wiki/Kovalent_ba%C4%9F_\(Eri%C5%9Fim_tarihi:_14.09.2024\)](https://tr.wikipedia.org/wiki/Kovalent_ba%C4%9F_(Eri%C5%9Fim_tarihi:_14.09.2024))

[www.asdn.net/asdn/physics/semiconductor.php_\(Eri%C5%9Fim_tarihi:_11.09.2024\)](http://www.asdn.net/asdn/physics/semiconductor.php_(Eri%C5%9Fim_tarihi:_11.09.2024))

[www.elektrikrehberiniz.com/elektrik/gunes-pili-nedir-5666_\(Eri%C5%9Fim_Tarihi:_1.11.2024\)](http://www.elektrikrehberiniz.com/elektrik/gunes-pili-nedir-5666_(Eri%C5%9Fim_Tarihi:_1.11.2024))

[www.etimaden.gov.tr/turkiyede-bor_\(Eri%C5%9Fim_Tarihi:_16.11.2024\)](http://www.etimaden.gov.tr/turkiyede-bor_(Eri%C5%9Fim_Tarihi:_16.11.2024))

[www.halbleiter.org/en/fundamentals/doping_\(Eri%C5%9Fim_tarihi:_15.12.2024\)](http://www.halbleiter.org/en/fundamentals/doping_(Eri%C5%9Fim_tarihi:_15.12.2024))

[www.linquip.com/blog/what-is-a-monocrystalline-solar-panel_\(Eri%C5%9Fim_tarihi:_4.11.2024\)](http://www.linquip.com/blog/what-is-a-monocrystalline-solar-panel_(Eri%C5%9Fim_tarihi:_4.11.2024))

[www.slideshare.net/slideshow/bor-11852608/11852608_\(Eri%C5%9Fim_tarihi:_25.10.2024\)](http://www.slideshare.net/slideshow/bor-11852608/11852608_(Eri%C5%9Fim_tarihi:_25.10.2024))

[www.sunartpv.com/bilgi-bankasi/gunes-paneli-turleri_\(Eri%C5%9Fim_Tarihi:_8.11.2024\)](http://www.sunartpv.com/bilgi-bankasi/gunes-paneli-turleri_(Eri%C5%9Fim_Tarihi:_8.11.2024))

Yağci, Ö. (2011). *Organik Tabanlı Güneş Pillerinin Üretimi ve Karakterizasyonu*. Marmara Üniversitesi.

Yakuphanoglu, F. (2007). *Electronic and Photovoltaic Properties of Al/p Si/Copper Phthalocyanine Photodiode Junction Barrier*. Solar Energy Materials and Solar Cells 91(13): 1182–86.

Yenialaca, Ç. (2009). *Bor ve kullanım alanları*. Gazi Üniversitesi.

Yiğit, E. (2022). *Fotokromik Organik Ligandlar Kullanılarak Elde Edilen Fotodiyotların Fabrikasyonu ve Elektriksel Karakterizasyonu*. Bingöl Üniversitesi.