

T.C.
ANADOLU ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

T. C.
ANADOLU ÜNİVERSİTESİ

YARIİLETKEN GÜNEŞ PİLLERİ VE VERİMLİLİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN
Doç. Dr. Muhsin ZOR

T. C.
ANADOLU ÜNİVERSİTESİ
MERKEZ KÜTÜPHANESİ

Salih KÖSE

ESKİŞEHİR 1986

ÖZET

Güneş pilleri güneş ışınlarını doğrudan elektriğe çeviren cihazlardır. Işınların doğrudan elektriğe çevrimi üç ayrı cihazla olmaktadır. Bunlar fotoemissif selüller, fotorezistans selüller ve yarıiletken güneş pilleridir. Bu cihazların en kullanışlısı yarıiletken güneş pilleridir.

Yarıiletkenler, birbirinden yasak enerji aralığı ile ayrılmış, üstte iletim, altta valans bandı bulunan bir band yapısına sahiptirler. Yarıiletkenlerde iletim elektron ve hollerle sağlanır ve mutlak sıfır sıcaklığında yalıtkan gibi davranır. Yarıiletkenlerin iletkenlikleri sıcaklıkla doğru orantılı olup, $10^3-10^{-7}(\Omega\text{-cm})^{-1}$ arasında değişir. En çok kullanılan yarıiletkenler silisyum ve germanyumdur.

Transistör, güneş pili ve FET gibi elektronik elemanların herbiri p-n eklemi içerir. p-n eklemi kristal büyütme esnasında p-tipi yarıiletken içerisinde n-tipi bir bölge veya n-tipi yarıiletken içerisinde p-tipi bir bölge oluşturulmak suretiyle yapılır.

İlk güneş pili 1954 yılında Bell Telephone Laboratuvarında yapılmıştır. En yaygın kullanılan güneş pilleri silisyum ve galyum arseniktir. Bu pillerin ideal verimlilikleri sırasıyla % 22 ve % 27 dir.) Ancak uygulamada bu pillerin verimi % 12-15 ve % 10 civarında değişmektedir. Bu düşüslere antiyansıtıcı, toplayıcı, ızgara ve pil yüzeyini koruyan tabakaların soğurma kayıpları sebep olmaktadır. Uygulamada en çok silisyum güneş pilleri kullanılmaktadır. Çünkü bugün özellikleri en iyi bir şekilde anlaşılmış ve teknolojisi gelişmiş durumdadır. Galyum arsenik güneş pil-

leri sıcaklık ve radyasyona, silisyum güneş pillerinden daha dayanıklı olduklarından uzay uygulamalarında kullanılması düşünülmektedir. Galyum arsenik direkt band aralığına sahip olmasından dolayı daha az materyal kullanımını gerektirir, ancak silisyum pillerine göre on kez daha pahalı olmasından dolayı yeryüzü uygulamalarında kullanılması ekonomik olmamaktadır.

Dünya genelinde 1972 yılında toplam güneş pili üretim kapasitesi 1 MW_p , 1982 yılında ise bu kapasite 15 MW_p olmuştur.

Araştırmacılar yeryüzü uygulamaları için daha ekonomik ve yüksek verimle çalışan, uzay uygulamaları için radyasyona ve sıcaklığa dayanıklı güneş pilleri yapmak için çalışmalarını büyük bir hızla sürdürmektedirler. 2000 yılından itibaren dünyada üretilen toplam enerjinin % 30 u ve elektrik üretiminin % 10 u güneş pilleriyle elde edileceği tahmin edilmektedir.

Güneş pillerinin diğer enerji üretim sistemlerine göre bazı avantajları vardır. Bu avantajlar, sessiz çalışırlar, artık maddeleri olmadığı için hava kirliliği yaratmazlar, uzun ömürlüdürler.

ABSTRACT

The solar cells are the photovoltaic devices which convert the sunlight directly into the electrical energy. There are three kinds of solar cells. These are photoemissive, photoresistance and semiconductor solar cells. Of these semiconductor cells are much more important and efficient.

Semiconductors have the uppermost conduction band and below a valence band and a forbidden energy band gap between them. Their electrical conductivities that are strongly temperature dependent are due to the electrons in the conduction band and the holes in the valence band. They vary between 10^3 and 10^{-7} ohms⁻¹ - cm⁻¹

The semiconductor solar cell had first been used by G.L. Pearson and C.S. Fuller and D.M. Chapin in Bell Telephone Laboratory in 1954. Silicon is the most widely used material. Its theoretical efficiency is 22 percent. In practice the efficiencies drop appreciably because of the surface recombination of the charges, series resistance and absorption losses, contact materials.

Gallium arsenide solar cells are more resistant to the radiation than the silicon solar cells. For this reason it is more suitable for the space application.

Less gallium arsenide materials are necessary for the solar cells. It is because gallium arsenide has a direct band gap whereas silicon has indirect band gap. Still, economically gallium arsenide solar cells come out more expensive than silicon solar cells.

The production capacity of the solar cells throughout the world increased from 1MWp in 1972 to 15 MWp in 1982.

Research workers are trying to improve the efficiencies of the semiconductor solar cells and searching for the new efficient

materials.

It was estimated that about 30 % of the total energy and 10 % of the electrical energy will be produced by the solar cells in the next decade.

There are so many advantages of the solar cells over the other systems. Mainly these are that they are working quietly, they have long life time and they produce no pollution of any kinds.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	v
SEMBOLLER.....	vii
AÇIKLAMALAR.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
BÖLÜM I	
GİRİŞ.....	1
1.1 Çalışma Konusunun Tanıtılması.....	1
1.2 Güneş Pilleriyle İlgili Yapılan Çalışmalar..	2
BÖLÜM II	
YARIİLETKENLER VE p-n EKLEMİ.....	5
2.1 Yarıiletkenler Hakkında Genel Bilgi.....	5
2.2 Fermi Enerji Düzeyi.....	9
2.3 Yarıiletken Tipleri.....	11
2.4 p-n Eklemi ve Çalışma Prensipleri.....	18
BÖLÜM III	
YARIİLETKEN GÜNEŞ PİLLERİ.....	28
3.1 Yarıiletken Güneş Pilleri Hakkında Genel....	28
Bilgi.....	
3.2 Yarıiletken Güneş Pillerinin Çalışma.....	30
Prensipleri.....	
3.3 Yarıiletken Güneş Pilleri İçin Materyal.....	41
Seçimi.....	
BÖLÜM IV	
YARIİLETKEN GÜNEŞ PİLLERİNİN SINIFLANDIRILMASI	44
4.1 p-n Homoeklemlı Yarıiletken Güneş Pilleri...	44
4.1.1 Silisyum Güneş Pili.....	45
4.1.2 Galyum Arsenik Güneş Pili.....	46

	<u>Sayfa</u>
4.2 p-n Heteroeklem Yarıiletken Güneş Pilleri...	48
4.2.1 Kadmiyum Sülfür-Bakır Sülfür Pili.....	49
4.2.2 Silisyum-Kadmiyum Sülfür Pili.....	51
4.2.3 Bakır Sülfür-Çinko Kadmiyum Sülfür Pili	51
4.3 Amorf Silisyum Güneş Pili.....	54

BÖLÜM V

YARIİLETKEN GÜNEŞ PİLLERİNİN VERİM HESABI VE VERİMLİLİĞİ ETKİLEYEN ETKENLER.....	56
5.1 Yarıiletken Güneş Pillerinin Verim Hesabı...	56
5.2 Yarıiletken Güneş Pillerinin Verimliliğini Etkileyen Etkenler.....	66
5.2.1 Doğal Etkenler.....	66
5.2.2 Teknolojik Etkenler.....	69

BÖLÜM VI

6 GÜNEŞ PİLLERİNİN UYGULAMALARI.....	72
SONUÇ.....	74
TABLolar.....	76
KAYNAKLAR.....	78

SEMBOLLER

A_0	Diyodun ideal olma faktörü
A_{\uparrow}	Güneş pilinin toplam alanı
$A_{a.}$	Güneş pilinin aktif alanı
D	Difüzyon uzunluğu
D_n	Elektronların difüzyon uzunluğu
D_p	Hollerin difüzyon uzunluğu
d	Yansıtıcı olmayan tabaka kalınlığı, yarıiletken kalınlığı
E_c	İletim bandının alt kenar enerji seviyesi
E_{c_n}	n-tipi yarıiletkenin, iletim bandı alt kenar enerji seviyesi
E_{c_p}	p-tipi yarıiletkenin, iletim bandı alt kenar enerji seviyesi
E_g	Yasak enerji aralığı
E_{v_n}	Valans bandı üst kenar enerji seviyesi
E_{v_n}	n-tipi yarıiletkenin valans bandı üst kenar enerji seviyesi
E_{v_p}	p-tipi yarıiletkenin valans bandı üst kenar enerji seviyesi
E_r	Birleşme merkezlerinin enerji seviyesi
FF	Fil faktörü
I_d	Diyod akımı (diyodun içerisinde geçen akım)
I_g	Oluşum akımı
I_{kd}	Kısa devre akımı
I_L	Pilin dış yük direncinden geçen akım
I_{max}	Maksimum akım
I_o	Diyodun ters doyum akımı
I_r	Birleşme akımı
I_s	Seri dirençten geçen akım
I_{sh}	Şönt direncinden geçen akım
J_d	Diyoddan geçen akım yoğunluğu

J_g	Oluşum akım yoğunluğu
J_{ng}	n-tipi yarıiletken için oluşum akım yoğunluğu
J_{pg}	p-tipi yarıiletken için oluşum akım yoğunluğu
J_{nr}	n-tipi yarıiletken için birleşme akım yoğunluğu
J_{pr}	p-tipi yarıiletken için birleşme akım yoğunluğu
L_n	Elektronun difüzyon uzunluğu
L_p	Hol difüzyon uzunluğu
N_a	Akseptör atomlarının yoğunluğu
N_c	İletim bandındaki etkin hal yoğunluğu
N_d	Donör atomlarının yoğunluğu
N_r	Birleşme merkezlerinin yoğunluğu
N_v	Valans bandındaki etkin hal yoğunluğu
n	Elektron yoğunluğu
n_i	Saf yarıiletkendeki yük yoğunluğu
n_n	n-tipi yarıiletkendeki elektron yoğunluğu
n_{no}	Denge durumundaki elektron yoğunluğu (n-tipi)
n_p	p-tipi yarıiletkendeki hol yoğunluğu
n_f	E_g 'den büyük enerjiye sahip fotonların birim yüzüye birim zamanda gelen toplam sayısı
P_{in}	Gelen radyasyonun güç yoğunluğu
P_n	n-tipi yarıiletkendeki hol yoğunluğu
P_{no}	n-tipi yarıiletkende denge durumundaki hol yoğunluğu
P_p	p-tipi yarıiletkendeki hol yoğunluğu
P_{max}	Maksimum güç yoğunluğu
R	Yüzeyin yansıtma katsayısı
R_L	Yük direnci
R_S	Seri direnç
R_{sh}	Şönt direnci
s	Yüzey birleşim hızı veya kesit alanı
T	Mutlak sıcaklık
V_{ad}	Açık devre voltajı
V_d	Diyod üzerindeki görülen gerilim
V_L	Yük direncinin uçları arasındaki görülen gerilim farkı
V_T	Termal potansiyel

ϵ	Elektrik alanı
X	p-n eklemının genişliği
X_d	p-n eklem bölgesinin derinliği
X_n	p-n eklem bölgesinin n-tipi tarafındaki genişliği
X_p	p-n eklem bölgesinin p-tipi tarafındaki genişliği
α	Absorbsiyon katsayısı
λ	Dalgaboyu
ϕ_0	p-n eklemının kontak potansiyeli
σ	İletkenlik
μ	Mobilite (Hareketlilik)
μ_n	Elektronların mobilitesi
μ_p	Hollerin mobilitesi
ω	Uzay yük bölgesinin genişliği, açısal frekans
τ	Taşıyıcı ömrü

AÇIKLAMALAR

- AMO Dış uzaydaki güneş spektrumu (135 mW/cm²)
- AMI Deniz seviyesinde güneşin tam tepe noktasına geldiği durumdaki güneş spektrumu (100 mW/cm²)
- AM2 Yeryüzündeki ortalama hava şartlarındaki güneş spektrumu
- e Elementer yük
- eV Elektron volt
- E Fermi enerji seviyesi; 0°K de elektronların bulunabileceği en yüksek enerji seviyesidir
- R_{sh} Güneş pilinin çıkışındaki yük direncine paralel bağlanmış ve pilin kenarlarından kaçak akımları önler. Düşük ışık şiddetinde etkisi kuvvetlidir.
- R_s Güneş pilinin yapısından kaynaklanan dirençtir. Düşük ışık şiddetinde etkisi azdır.
- Omik Kontak İhtiyaç ölçüsünde yarıiletken elektron veya hol verebilen metal kontaklıdır.
- Latis Uyuşmazlığı İki kristal materyalin örgü atomları arasındaki uzaklıkların farklı değerlere sahip olması
- Fresnel Lens Eğrilik yarıçapı ve yüzeyi büyük kalınlığı küçük olan ve üzerine gelen ışığı bir bölgede toplayan merceklerdir. Bu mercekler bir çok ışık prizmalarından oluşmuş gibi bir yapı özelliği gösterirler
- Etkin Kütle Serbest bir elektronun veya holün kristal içerisinde sahip olduğu kütlelerdir.

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Saf bir yarıiletkenin iletim ve valans bandının şematik gösterimi (a) 0 °K (b) 300 °K	6
Şekil 2.2 Silisyum atomunun atomlar arası uzaklığın bir fonksiyonu olarak 1s, 2s ve 2p durumlarından meydana gelen bandlar	7
Şekil 2.3 Fermi-Dirac dağılım fonksiyonunun gösterimi	8
Şekil 2.4 n ve p-tipi yarıiletken materyallerde Fermi enerji düzeyleri ve elektron-hol yoğunlukları için dağılım fonksiyonu (a) n-tipi (b) p-tipi yarıiletken	14
Şekil 2.5 Çoğunluk taşıyıcı yüklerinin difüzyonu ile oluşmuş elektrik alanı ve uzay yük bölgesi	19
Şekil 2.6 p-n eklemının şematik gösterimi	20
Şekil 2.7 p-n eklemının uygulama geriliminin yokluğundaki enerji band diyagramı	22
Şekil 2.8 p-n eklemının doğru yönde beslenmesi (a) şematik (b) enerji band diyagramı	23
Şekil 2.9 p-n eklemının ters yönde beslenmesi (a) şematik (b) enerji band diyagramı	24
Şekil 2.10 p-n eklemının akım voltaj karakteristiği	25
Şekil 3.1 p-n eklemli güneş pilinin şematik gösterimi	30
Şekil 3.2 p-n eklemli bir güneş pilinin enerji band diyagramı	31
Şekil 3.3 p-n fotovoltaik bir güneş pilinin (a) eşdeğer devresi (b) ideal eşdeğer devresi	34
Şekil 3.4 Diyodun ideal olma faktörünün sıcaklık değişimi	35
Şekil 3.5 Diyodun ideal olma faktörünün tersi ile ters doyum akım yoğunluğunun değişimi	36

Şekil 3.6	Açık devre voltajının sıcaklıkla değişimi	36
Şekil 3.7	Kısa devre akımının sıcaklıkla değişimi	37
Şekil 3.8	Güneş pilinin üst yüzey metal kontağının şekli	38
Şekil 3.9	Güneş pilinin ön yüzeyine kaplanan anti-yansıtıcının şematik olarak gösterimi	39
Şekil 3.10	Güneş pilinin verimin pil kalınlığı ile ilgili değişimi	40
Şekil 3.11	Fotovoltaik güneş pilinin akım-voltaj karakteristiği	40
Şekil 3.12	Çeşitli yarıiletken materyallerin teorik olarak verimliliklerinin yasak enerji aralıkları ile karşılaştırılması	41
Şekil 3.13	Band geçişleri (a) direkt geçiş (b) indirekt geçiş	43
Şekil 4.1	p-n homoeklemlili güneş pilinin enerji band diyagramı	45
Şekil 4.2	GaAs ve Si güneş pillerinin fotoakımının toplam pil kalınlığı ile değişimi	47
Şekil 4.3	p-n heteroeklemlili diyodun enerji band diyagramı	48
Şekil 4.4	n-CdS/p-Cu ₂ S güneş pilinin şematik kesit görünüşü	50
Şekil 4.5	n-CdS/p-Cu ₂ S güneş pilinin akım voltaj karakteristiği	50
Şekil 4.6	p-Si/n-CdS güneş pilinin şematik kesit görünüşü	51
Şekil 4.7	Cu ₂ S/Zn _x Cd _{1-x} S güneş pilinin farklı Zn konsantrasyonları için akım voltaj karakteristiği	52
Şekil 4.8	Absorbsiyon katsayısının dalgaboyu ile değişimi	55
Şekil 5.1	Fil faktörünün sıcaklıkla değişimi	57
Şekil 5.2	Bir güneş pilinin akım-voltaj karakteristiği	60
Şekil 5.3	Sive GaAs güneş pilleri için teorik verimin sıcaklıkla değişimi	65
Şekil 5.4	Güneş pilinin veriminin optik radyasyonla değişimi	65

Sayfa

Şekil 5.5	Absonbsiyon katsayısının dalgaboyu ile değişimi	66
Şekil 5.6	Güneş ışınlarının dalgaboyuna karşılık enerji yoğunluğunun ortalama bir grafiği	68
Şekil 5.7	Bir güneş pilinin veriminin iç seri dirençle değişimi	69
Şekil 5.8	Toplam verimin gelen ışınların dalgaboyu ile değişimi	70

BÖLÜM I

GİRİŞ

1.1 Çalışma Konusunun Tanıtılması

İnsanoğlu hayatı boyunca birbirine sıkı bir şekilde bağlı üç ayrı problemle karşılaşır. Bu üç problem sırasıyla, tüketilen enerji miktarının artması, gelişen teknolojinin yarattığı çevre kirliliği ve her geçen gün dünya nüfusunun artmasıdır.

Bu üç problemin temelinde kullanılan enerji kaynaklarının sınırlı olması yatmaktadır. Bu nedenle dünyada her geçen gün daha ekonomik ve daha kolay elde edilebilen başka enerji kaynakları bilim adamları ve bilim kuruluşları tarafından araştırılmaktadır. Çünkü alışılmış enerji kaynakları olan petrol ve kömür gibi fosil yakıtların rezervi hızla azalmakta olup, bu kaynaklardan elde edilen enerji maliyeti ise daha pahalı olmaktadır. Son zamanlarda özellikle 1973 yılındaki petrol krizinden sonra ilim adamları çalışmalarını, çevre kirliliği yapmayan, tükenmeyen güneş enerjisi üzerinde yoğunlaştırmışlardır.

Güneş enerjisinin esası nükleer füzyona (çekirdek kaynaşmasına) dayanmaktadır. Güneş enerjisi hidrojen (${}^1\text{H}$) elementinin yüksek sıcaklıklarda birleşerek daha ağır bir element olan helyum (${}^4\text{He}$) çekirdeğini oluştururken çok az bir kütle kaybının enerjiye dönüşümü sonucunda meydana gelir. Güneş yılda ortalama olarak 3.37×10^{27} kW.Saat'lik enerji yaymaktadır.

Güneş enerjisinden; konutların ısıtılmasında, güneş ışınlarından direkt olarak elde edilen elektrik enerjisinin aydınlatma ve güç gerektiren makinelerin çalıştırılmasında kullanılmak suretiy-

le faydalanılır. Ayrıca güneş enerjisinden elde edilen buharla, türbinler çevrilerek elektrik enerjisi elde edilmektedir.

Bugün güneş pilleriyle direkt olarak güneş ışınlarından doğrudan elde edilen elektrik enerjisinin dünyada elde edilen toplam enerjiye önemli bir katkısı olduğu söylenemez. Ancak yapılan tahmini hesaplara göre 2000 yılına kadar dünya enerji üretiminin % 30'u ve dünya elektrik üretiminin % 10'u güneş pilleriyle sağlanacağı tahmin edilmektedir. Bu durum ise gelecekte güneş pilleriyle elde edilen enerjinin önemini belirtmektedir.

1.2 Güneş Pilleriyle İlgili Yapılan Çalışmalar

İlk güneş pili 1954 yılında Bell Telephone Laboratuvarında L. Pearson, C.S. Fuller ve D.M. Chapin tarafından yapılmıştır. Bugüne kadar güneş pilleri üzerinde çeşitli araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmış olup ve temel amaç, daha ekonomik ve daha yüksek verimle çalışacak güneş pillerinin planlanması olmuştur.

1972 yılında Institute of Energy Conversion de National Science Foundation"(I.E.C) programı ile CdS-Cu₂S ince film çalışmaları başlatıldı. CdS-Cu₂S ince film polikristal güneş pillerinin yeryüzü uygulamalarında verimlilikleri % 3.5 olmasına rağmen I.E.C. tarafından yapılan bir araştırmaya göre 24 adet CdS-Cu₂S güneş pili içeren panel üzerinde yapılan ölçüm ve hesaplar sonucunda verim % 6.7 olarak bulunmuştur. Teorik hesaplara göre ise CdS-Cu₂S pilinin verimliliği % 10 civarındadır. 1976 yılında 60 adet CdS-Cu₂S güneş pili içeren bir panelden güneş ışınlarının aydınlatması altında yapılan ölçümlerle elde edilen verim % 5 ve aynı panelin maksimum verimliliği ise % 5.9 bulunmuştur. Eğer bu panelle Tungsten-İodine lambasının aydınlatması altında ölçümler alındığında verimlilik % 5.1 olarak bulunmuştur. Bütün bu deneyler Delaware Üniversitesi'nde yapılmıştır².

Bakır-İndiyum-Sülfür (CuInS₂) ince film homoeklem güneş pilleri ile yapılan ölçümler sonucunda 0.124 cm² yüzeyli pilin açık devre voltajı (V_{ad}) 0.41 V, kısa devre akımı (I_{kd}) 2.34 mA, fill faktörü (FF) 0.43, verimi % 3 olarak hesaplanmıştır. J.J. Meese tarafından yapılan analitik hesaplara göre CuInS₂ ince

film homoeklem güneş pilinin verimi % 28 olarak bulunmuştur³.

Bell Telephone Laboratuvarında (A.B.D.) indiyum-fosfor (InP) ince film güneş pili ile yapılan ölçüm sonuçlarına göre verim %5, aynı materyalden yapılmış homoeklem pilin verimi % 14 bulunmuştur.

IBM Araştırma Laboratuvarında çok iyi bir teknikle elde edilen galyum arsenik (GaAs) kristalinden yapılan homoeklem güneş pilinin verimi % 18 bulunmuştur. Aynı laboratuvarda eklem genişliği 0.3-0.5 μm , eklem derinliği 1-5 μm arasında olan homoeklem GaAs güneş pili ile AMO ve AMI deki ölçümlerden hesaplanan verim % 4.5 ve % 19 olarak bulunmuştur. Aynı pil ile AMO de ve 200 $^{\circ}\text{C}$ de yapılan ölçümde elde edilen verim % 9 ve 300 $^{\circ}\text{C}$ de ise % 6.1 olarak bulunmuştur².

York-Town ve Boston da IBM araştırma grubu tarafından verilen bir konferansta fabrikasyon olarak yapılmış GaAs ince film güneş pillerinin verimi % 10 olacağını belirtmişler ve bunlardan bazı numuneler göstermişlerdir. Bu pillerin kalınlığının 1 μm olduğu ve tungsten tabanlar üzerine yapıldığı açıklanmıştır.

Bir Fransız araştırma grubu ise bakır sülfür (Cu_2S) taban üzerine kadmiyum sülfürü püskürtme yöntemi ile CdS/ Cu_2S pilleri yapmış ve bu yöntemle nemlilik ve oksitlenmenin önleneyeğini belirtmişlerdir. Aynı yöntem Stuttgart Üniversitesi'nde, Delaware Üniversitesi'nde de kullanılmıştır. Brown Üniversitesi'nde püskürtme yöntemiyle çeşitli tabanlar üzerine CdS güneş pilleri yapılmıştır. Bell Telephone Laboratuvarında püskürtme yöntemi ile yapılan indiyum fosfor-kadmiyum sülfür (InP/CdS heteroeklem güneş pilinin AM2 de yapılan ölçümlerde verim % 12 bulunmuştur.

Türkiye'de; Türkiye Atom Enerji Kurumu bünyesinde bulunan Ankara Nükleer Araştırma Eğitim Merkezi ile Elektrik İşleri Etüt İdaresi arasında "Güneş Pilleri Araştırma ve Geliştirme" adı altında bir proje grubu oluşturulmuştur. ANAEM katıhal fiziği laboratuvarında n-Si/ SiO_2 -Au ve p-Si/ SiO_2 -Al metal yalıtkan ve yarıletken (MİS) güneş pilleri üzerinde çalışmaktadır.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ) fizik laboratuvarında CdS/ Cu_2S ve $\text{Cu}_2\text{S}/\text{Si}$ ince film polikristal güneş pilleri araştırma

ve geliştirme amacıyla yapılmaktadır. Bu laboratuvarında CdS/Cu₂S pilleriyle 70 mW/cm²'lik aydınlatma altında yapılan ölçümde verim % 3 olarak bulunmuştur⁴.

BÖLÜM II

YARIİLETKENLER VE p-n EKLEMİ

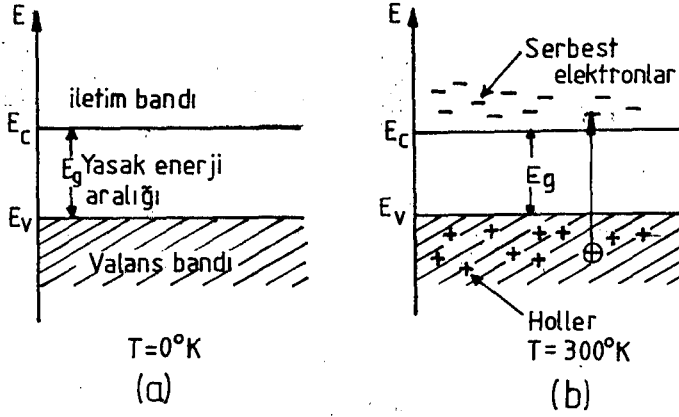
2.1 Yarıiletkenler Hakkında Genel Bilgi

Yarıiletkenlerin elektronik endüstrisinde çok önemli bir yeri vardır. Diyod, transistör, FET ve güneş pilleri (fotopil) gibi elektronik devre elemanlarının temelini yarıiletkenler teşkil eder. Yarıiletken materyaller yalıtkanlardan ve metallerden elektriksel ve optik özellikleri bakımından ayrılırlar ve bu nedenle özelliklerin iyi bilinmesi gerekir.

Yarıiletken materyallerin tarihi E. Becquerel ve Faraday'a kadar uzanır. 1839 yılında E. Becquerel aynı elektrolitik sıvı içerisinde batırılmış iki elektrodun birinin üzerine ışık düşürerek, bu elektrodun arasında potansiyel farkın meydana geldiğini gözlemştir. 1915 yılında galen dedektörler kullanılmaya başlanmış ve 1923 yılında Schottky kuru redresörlerin teorisini yayınlamasıyla yarıiletkenlerin incelenmesine ilk adım atılmıştır⁵.

Yarıiletkenlerde iletim elektron ve hollerle (boşluk) sağlanır. 0 °K sıcaklığında bir yalıtkan gibi davranan yarıiletkenlerin iletkenliği sıcaklığın yükselmesiyle artar. Oda sıcaklığında (300 °K de) yarıiletkenlerin iletkenliği $10^3-10^{-7} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ arasında değişir.

Mutlak sıfır sıcaklığında (0°K) bulunan bir yarıiletkenin sıcaklığı yükseltildiği zaman valans bandındaki atomların valans elektronları termal etkiyle yasak enerji aralığına eşit veya ondan büyük bir enerji kazandıkları zaman valans bandından sökülen elektronlar, valans bandında söküldükleri yerlerde holleri bırakarak iletim bandına geçerler ve iletim elektronları adını alırlar. Holler valans bandı içerisinde boş kuantum durumlarını meydana getirirler. Bu boş kuantum durumları komşu atomlardan bir



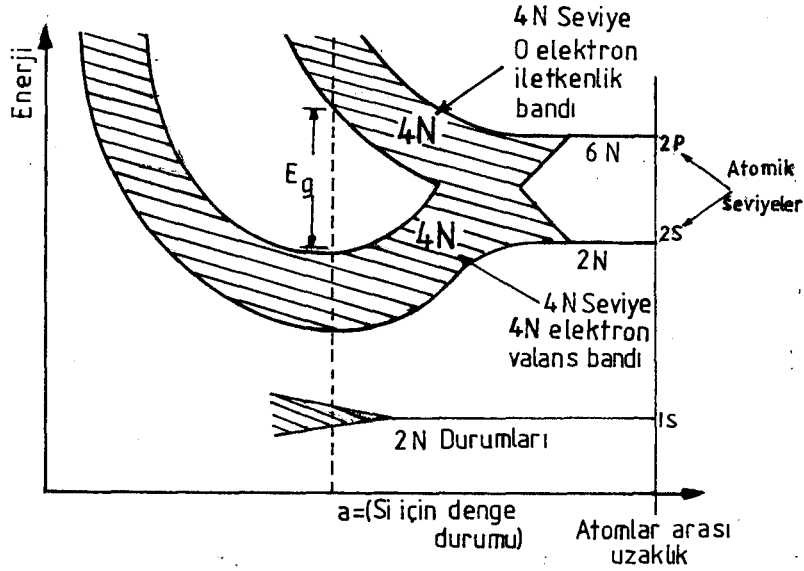
Şekil 2.1 Saf bir yarıiletkenin iletim ve valans bantının şematik gösterimi (a)T=0°K(b)T=300 °K

elektronla birleşerek yok olur ve holle birleşen bu elektron kendi yerinde yeni bir hol bırakır. Böylece bu durum devam eder ve holler valans bandı içerisinde serbest taşıyıcı bir yük gibi dolaşır.

Elektronlar negatif ve holler pozitif yüklü olduklarından elektrik alanından etkilenirler. Elektronun hareket yönü elektrik alanının yönüne zıt, hollerinki ise elektrik alanla aynı yöndedir. Fakat elektronların ve hollerin elektrik alanda meydana getirdikleri akımlar, bu iki yükün işaretinin zıt olmasından dolayı her zaman aynı yöndedir.

Bir kristal materyalde atomlar düzgün olarak yerleşmiş diziler halinde bulunurlar. Atomların bu şekilde bir yapı oluşturmalarına aralarında bulunan ve bu atomların bir arada olmalarını sağlayan kuvvetler vardır. Kristal örgü içerisinde atomlar birbirlerine çok yakın yerleşmiş olduklarından son yörüngeyi ve kuantum durumlarını etkileyecek şekilde birbirini etkilerler. Böylece son yörüngelerde etkileşmelerden dolayı farklı enerji seviyelerine sahip bir takım yarılmalar meydana gelir. Bu yarılan enerji seviyeleri arasındaki fark 10^{-19} eV. civarındadır⁶. Bu enerji seviyeleri arasındaki farkın çok küçük olmasından dolayı yarılan enerji seviyeleri sürekli bir enerji bandı gibi kabul edilebilir. Elektronların dalga fonksiyonlarının kuvvetli etkileşmele-

ri nedeniyle dış yörüngelere ait enerji bandları iç yörüngelere ait enerji bandlarından daha geniştir. Çünkü iç yörüngelerdeki elektronlar komşu atomlardan daha az etkilenirler ve çekirdeğe bağlanma enerjileri daha büyüktür. Kristal atomlarının valans bandlarındaki valans elektronları; termal, optik, kuvvetli bir elektrik alan veya şiddetli bir mekanik etkiyle serbest hale geçerler. Böylece ait oldukları atomlar iyonlaşırlar ve kristale elektrik alanı uygulandığı zaman kristal içerisinde akım meydana gelir.



Şekil 2.2 Silisyum atomunun atomlar arası uzaklığın bir fonksiyonu olarak 1s , 2s ve 2p durumlarından meydana gelen bandlar

Kristal katıların band yapısı, içerisinde bulunan serbest bir elektronun nasıl davranacağı hakkında bilgi verir. Böylece kristalin band yapısının bilinmesiyle o katının elektriksel özellikleri hakkında bilgiler elde edilebilir.

Kristal örgünün termal etkiyle genişlemesinden dolayı yasak enerji aralığının (E_g) sıcaklığa zayıf bağlı olmasından dolayı azalmaktadır. Kristal örgüyü (Crystal lattice) meydana getiren atomlar arasındaki mesafe çok büyük olduğu zaman atomlar arası etkileşimler çok küçük olacağından ihmal edilebilirler ve böyle bir

durumda enerji seviyeleri izole bir atomun enerji seviyeleri gibi olur. Eğer kristal örgünün atomları arasındaki uzaklıklar azaltılırsa, kristalin her atomu, kristalin komşu atomu üzerine elektriksel bir kuvvetle etki eder. Böylece elektronlara ait dalga fonksiyonları kesişirler ve kristal yapı Pauli'nin dışarlama ilkesine uyan elektronik bir sistem halini alır. Kristal örgü atomlarının sayısı N olsun ve N çok büyük ise elektronların enerji seviyelerindeki yarılmalar arasındaki farklar çok küçük olacağından enerji bandı adı verilen bir band oluşur. Kristalin atomları arasındaki uzaklık yeteri kadar küçük olduğunda bu enerji bandları birbiriyle kesişirler. Bu durum Şekil 2.2'de görüldüğü gibi $6N$ tane enerji seviyesi altdaki $2N$ tane enerji seviyesi ile birleşerek $4N$ tane elektron tarafından doldurulan $8N$ tane enerji seviyesini meydana getirir ve her atom dört elektronunu banda verir. Artık bu elektronların hangi atoma ait olduğu söylenemez, çünkü bunlar bütün kristale aittir.

Enerji band diyagramı atomların uzayda birbirlerine göre yerleşmelerine ve bu atomların yapısını belirleyen atom numarasına yani sahip olduğu elektron sayısına bağlıdır. Şekil 2.2 de gösterilmiş enerji band diyagramında kristalin gerçek atomları arasındaki uzaklığın, $4N$ tane elektronla doldurulmuş valans, $4N$ tane boş enerji seviyesine sahip iletim bandı ve iki bandın arasında yer alan E_g genişliğindeki yasak enerji aralığı yer almıştır.

Yarıiletken materyallerde iletimi sağlayan elektron ve hollerin etkin kütleleri sırasıyla m_n^* ve m_p^* ile gösterilir. Bu etkin kütleler momentum uzayında

$$m_n^* = \frac{\hbar^2}{d^2E/dk^2} \quad m_p^* = \frac{\hbar^2}{d^2E/dk^2} \quad (2-1)$$

ile ifade edilirler. Burada $\hbar (= \frac{h}{2\pi})$ Planck sabiti, E enerjiyi ve k momentum uzayını gösterir.

Serbest elektron ve hol yoğunlukları sıcaklıkla artar ve bu yoğunluklara bağlı olarak yarıiletkenin iletkenliği artar. Bu yarıiletkenin iletkenliği (σ) elektronların ve hollerin yoğunluklarına bağlıdır. Herhangi bir T °K sıcaklığında elektronların ve hollerin yoğunlukları ve mobiliteleri sırasıyla n , μ_n , p ve μ_p ise

iletkenlik

$$\sigma = e n \mu_n + e p \mu_p \quad (2-2)$$

dir.

Bir elektrik alanında elektronların meydana getirdikleri akım yoğunluğu

$$J_n = n e V_{dr} \quad (2-3)$$

ile verilir. Burada V_{dr} elektronların drift (sürüklenme) hızını gösterir. Aynı şekilde holler içinde bir akım yoğunluğu ifadesi yazılabilir. Herhangi bir $T^{\circ}K$ sıcaklığında saf (intrinsic) yarıiletkenlerin elektron ve hol yoğunlukları eşit olur. Yani $n=p$ olduğu zaman (2-2) ifadesi buna göre aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$\sigma = e n (\mu_n + \mu_p) \quad (2-4)$$

2.2 Fermi Enerji Düzeyi

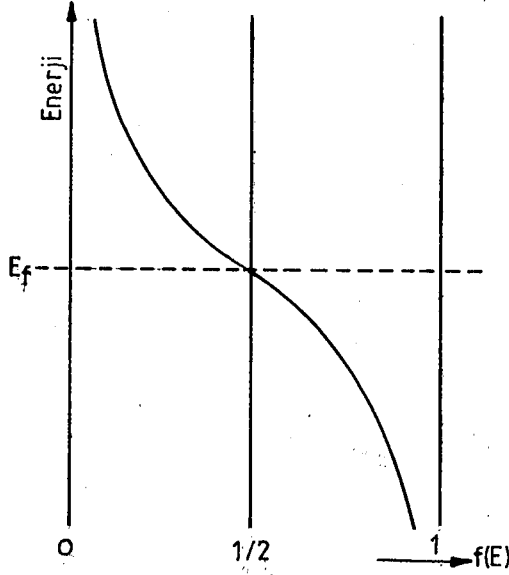
Yarıiletkenlerde elektron ve holler Fermi-Dirac istatistiğine göre bir dağılım gösterirler. Bu dağılım Pauli'nin dışarlama ilkesine uyar ve bir enerji seviyesinin dolu olmasını bir olasılık faktörü ile verir. Bu olasılık faktörü Fermi dağılım fonksiyonu $f(E)$ ile verilir.

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_f)/kT}} \quad (2-5)$$

Burada E_f fermi düzeyini, k Boltzmann sabitini, E elektronunun bulunabileceği enerji düzeyini göstermektedir. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu E_f 'nin etrafında simetrik bir dağılım göstermektedir.

Fermi enerji düzeyinden yukarı doğru çıkıldıkça dolu olma olasılığı azalmakta, aşağı doğru inildikçe artmaktadır. Buna göre yarıiletkenlerde dolu durumlar iletim bandına boş durumlar valans bandına yakındır. E_f enerjisi saf yarıiletkenlerde elektron ve

holün etkin kütlelerinin birbirlerine eşit olduğu durumlarda yasak enerji aralığının tam ortasında, n-tipi yarıiletkenlerde iletim bandına, p-tipi yarıiletkenlerde valans bandına doğru kaymış durumda bulunur.



Şekil 2.3 Fermi-Dirac dağılım fonksiyonunun gösterimi

İletim bandındaki elektronlarla valans bandındaki hollerin yoğunlukları $f(E)$ olasılık faktörü yardımı ile hesaplanabilir. İletim bandındaki elektronların hal yoğunluğu N_c ve iletim bandının dolu olma olasılığı $F(E_c)$ ise iletim bandındaki elektronların $T^\circ K$ sıcaklığındaki yoğunluğu, n

$$n = N_c f(E_c)$$

$$n = N_c \cdot \frac{1}{1 + e^{(E_c - E_f)/kT}} \quad (2-6)$$

ile verilir. Buradaki E_c iletim bandının minimum taban enerji düzeyidir. Oda sıcaklığında $E_c - E_f \gg kT$ olduğundan (2-6) denkleminin paydasındaki birinci terim eksponansiyel terim yanında ihmal edilebilir ve n yeniden yazılabilir.

$$n = N_c \cdot e^{-(E_c - E_f)/kT} \quad (2-7)$$

Valans bandındaki hol yoğunluğu p ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$p = N_p \cdot e^{-(E_f - E_v)/kT} \quad (2-8)$$

Buradaki N_p valans bandındaki hollerin hal yoğunluğunu gösterir.

2.3 Yarıiletken Tipleri

Yarıiletkenler saf (intrinsic), ve katkılı (impurity) olmak üzere ikiye ayrılır. Saf yarıiletkenler iletim bandındaki elektron sayısının valans bandındaki hol sayısına eşit olan materyallerdir. İçerisinde belirli oranlarda yabancı madde atomları bulduran ($n \neq p$) ve iç dirençleri küçük olan yarıiletkenlere katkılı yarıiletken adı verilir.

Katkılı yarıiletken katkı atomlarının cinslerine göre iki şekilde incelenir. Eğer saf silisyum (Si) kristali içerisine belirli oranda ve şartlarda beş değerli (beş valans elektronuna sahip) arsenik (As) atomları katkılı olduğunda bu beş valans elektronundan dördü komşu Si atomları ile kovalent bağ için kullanılır, beşinci valans elektronu ise As atomuna zayıf olarak bağlı olduğundan çok küçük bir enerji ile bu bağ koparak Si kristali içerisinde serbest hale geçer. Böylece silisyum kristali içerisinde bir elektron fazlalığı meydana gelir. Bu tip yarıiletkenlere n-tipi yarıiletken adı verilir. As bir elektronunu kristale vermesinden dolayı verici anlamına gelen donör adını alır. Donör enerji düzeyleri iletim bandına yakın bir enerji düzeyinde bulunur. n-tipi yarıiletkenlerde iletme en büyük katkı elektronlardan gelir.

Donör atomlarının iyonlaşma enerjileri çok küçüktür. Oda sıcaklığında bu tip katkı atomları iyonlaşır, yani beşinci valans elektronunu kristale verebilir. As atomlarının Si kristali içerisinde iyonlaşma enerji 0.05 eV tur⁷. Yani iletim bandının enerji düzeyi ile donör atomlarının bulunduğu enerji düzeyinin arasındaki farktır.

Saf bir Si kristali içerisine belirli oranda ve belirli şartlarda üç değerlikli indiyum In atomları katkılı olduğunda, In atomları komşu dört Si atomları ile kovalent bağ yapabilmeleri

için bir elektrona daha ihtiyacı vardır, bu elektronu Si atomlarından temin ederler. Böylece Si kristali içerisinde bir hol fazlalığı oluşmuştur. Son yörüngesindeki elektron sayısını dörte çıkaran In atomu kararlı hale geçer ve Si kristalinden bir atom aldığı için alıcı anlamına gelen akseptör adını alır. Bu tip yarıiletkenlere p-tipi yarıiletken adı verilir. p-tipi yarıiletkenlerde iletme en büyük katkı hollerden meydana gelir.

Akseptör atomlarının iyonlaşma enerjileri çok küçüktür. Oda sıcaklığında bu atomlar hemen hemen tamamen iyonlaşır, yani kristal atomlarından bir elektron alabilirler. İndiyum atomunun iyonlaşma enerjisi 0.16 eV. tur'. Akseptörlerin iyonlaşma enerjisi, valans bandının üst kenar enerji düzeyiyle akseptör atomlarının buldukları enerji düzeyleri arasındaki farka eşittir.

Donör ve akseptör atomlarının buldukları enerji düzeyleri sırasıyla E_d ve E_a ise bu atomların iyonlaşma enerjileri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta E_d = E_c - E_d \quad (\text{Donörler için}) \quad (2-9)$$

$$\Delta E_a = E_a - E_v \quad (\text{Akseptörler için}) \quad (2-10)$$

Yarıiletkenlerin iletkenliğinin hesap edilebilmesi için elektron ve hol yoğunluklarının bilinmesi gerekir. Saf veya n-tipi yarıiletkenlerin iletkenlik bandında birim hacimde ve enerjileri E ile $E+dE$ arasında bulunan elektronların yoğunluğu dn_0 .

$$dn_0 = f_0(E) g_c(E) dE = \frac{8\sqrt{2}\pi}{h^3} m_n^{*3/2} \frac{\sqrt{E-E_c}}{1+e^{(E-E_c)/kT}} dE \quad (2-11)$$

ile verilir. Burada $f_0(E)$ dengedeki Fermi dağılım fonksiyonunu, $g_c(E)$ elektronların oluşum oranını göstermektedir.

$$g_c(E) dE = \frac{8\sqrt{2}\pi}{h^3} m_n^{*3/2} \sqrt{E-E_c} dE \quad (E_c > E) \quad (2-12)$$

Eğer E_f enerji seviyesi iletkenlik bandından birkaç kT birimlik uzaklıkta bulunuyorsa yani $E-E_c > kT$ ise (2-11) denkleminin paydasındaki eksponansiyol terim "1" in yanında çok büyük olacağından ihmal edilebilir. Buna göre (2-11) denkleminin yeni ifadesi

(2-13) ile verilir.

$$dn_o = \frac{8\sqrt{2\pi}}{h} m_n^*{}^{3/2} \sqrt{E-E_c} e^{-(E-E_f)/kT} dE \quad (2-13)$$

Bu diferansiyel denklemi E_c ile ∞ sınırları için integre edildiğinde bu aralıkta elektronların yoğunluğu

$$n_o = N_c e^{-(E_c - E_f)/kT} \quad (2-14)$$

olarak bulunur. Buradaki N_c iletim bandındaki elektronların etkin hal yoğunluğudur.

$$N_c = 2(2\pi m^* kT/h^2)^{3/2} \quad (2-15)$$

N_c nin $T=300$ °K deki sayısal değeri $2.5 \times 10^{-19} \text{cm}^{-3}$ dür.

Yarıiletkenin valans bandındaki birim hacimde ve enerjileri E ile $E+dE$ arasında olan hollerin yoğunluğu dp_o ise

$$dp_o = f_{p_o}(E) g_v(E) dE \quad (2-16)$$

Burada f_{p_o} valans bandında işgal edilmemiş hollerin bulunma olasılığını, $g_v(E)$ hollerin oluşum oranını göstermektedir.

$$f_{p_o}(E) = 1 - f_o(E) = \frac{1}{1 + e^{(E_f - E)/kT}} \quad (2-17)$$

Eğer E_f enerjisi valans bandının bir kaç kT birimlik yukarısında bulunuyor ve $E_f - E > kT$ ise (2-17) denkleminin paydasındaki eksponansiyel terimi "1" den büyük olacağı için "1" terimi ihmal edilebilir ve (2-17) ifadesi yeniden yazılabilir.

$$f_{p_o}(E) = e^{-(E_f - E)/kT} \quad (2-18)$$

$$g_v(E) dE = \frac{8\sqrt{2\pi}}{h^3} m_p^*{}^{3/2} \sqrt{E_v - E} dE \quad (E_v < E)$$

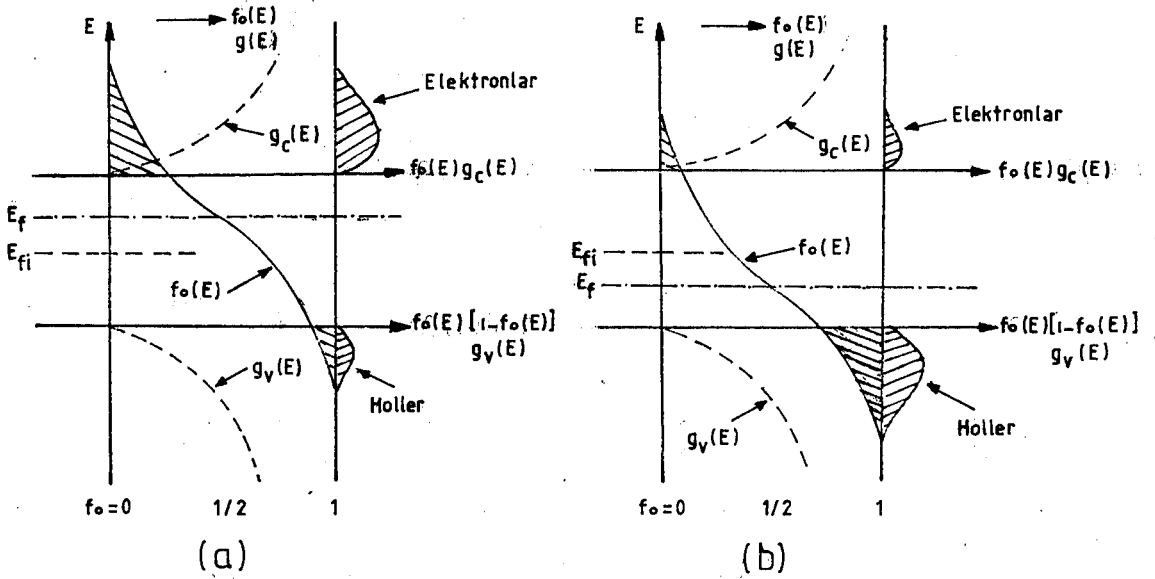
Bu ifadelerle göre (2-16) denklemini yeniden yazılıp E_v ile $-\infty$ sınır

değerleri için integre edilirse valans bandındaki hol yoğunluğu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$p_0 = N_v e^{(E_v - E_f)/kT} = N_v e^{-(E_f - E_v)/kT} \quad (2-19)$$

Burada N_v valans bandındaki hollerin etkin hal yoğunluğudur.

$$N_v = 2(2\pi m_p^* kT/h^2)^{3/2} \quad (2.20)$$



Şekil 2.4 n ve p-tipi yarıiletken materyallerde Fermi enerji düzeyleri ve elektron-hol yoğunlukları için dağılım fonksiyonu (a) n-tipi (b) p-tipi yarıiletken

Eğer yarıiletken saf ise $n_0 = p_0 = n_i(T)$ olur, çünkü termal uyarım sonucu oluşan her bir elektrona karşılık bir hol meydana gelir, n_0 ve p_0 'ın çarpımları yapıldığı zaman

$$n_0 \cdot p_0 = n_i^2(T) = N_c N_v e^{-E_g/kT} \quad (2-21)$$

bulunur. $n_i(T)$ saf yarıiletken için elektron veya hol yoğunluğunu gösterir ve $n_i(T)$

$$n_i(T) = 2 \left[\frac{2\pi (m_p^* m_n^*)^{1/2} kT}{h^2} \right]^{3/2} e^{-E_g/2kT} \quad (2-22)$$

dir.

Saf yarıiletkenlerde taşıyıcı yük yoğunluklarının çarpımı sıcaklığa kuvvetli bir şekilde bağlıdır. Aynı zamanda bu taşıyıcı yoğunlukları E_g 'ye ve etkin kütleye de bağlıdır. Verilen herhangi bir yarıiletken için E_g ve etkin kütle sabit olacağından $n_i(T)$ yalnızca sıcaklığa bağlıdır. Saf yarıiletkenlerde E_f enerji düzeyi (2-14) ve (2-19) denklemlerinden bulunabilir. Saf yarıiletkenler için $n = p$ olacağından

$$N_c e^{-(E_c - E_f)/kT} = N_v e^{-(E_f - E_v)/kT} \quad (2-23)$$

şeklinde yazılabilir ve heriki tarafın logaritması (e tabanına göre) alınarak, E_f enerji düzeyi

$$E_f = \frac{1}{2}(E_c + E_v) + \frac{1}{2}kT \ln \frac{N_v}{N_c} \quad (2-24)$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifade etkin kütleler cinsinden belirtilirse aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$E_{f_i} = \frac{1}{2}(E_c + E_v) + \frac{1}{2}kT \ln \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right)^{3/2} \quad (2-25)$$

Eğer $m_n^* = m_p^*$ ise (2-25) ifadesi yeniden ifade edilirse E_f enerji düzeyi

$$E_f = \frac{1}{2}(E_c + E_v) \quad (2-26)$$

dir.

Katkılı yarıiletkenlerde de E_f enerji düzeyi için saf yarıiletkenlerde izlenen yol izlenerek hesaplanır. Ancak burada yabancı katkı madde konsantrasyonları işin içerisine girer. Donör ve akseptör atomlarının konsantrasyonları sırasıyla N_d ve N_a ise katkı atomlarının durum yoğunlukları $2N_d f(E - E_d)$ ve $2N_a f(E - E_a)$ Dirac delta fonksiyonu ile verilir. Buradaki 2 rakamı iki spin

durumu belirtmektedir. Katkılı bir yarıiletken için Fermi dağılım fonksiyonu

$$f(E) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} e^{(E-E_f)/kT}} \quad (2-27)$$

ile verilir. n-tipi yarıiletkenlerde donör seviyelerini işgal eden birim hacimdeki toplam donör atomlarının sayısı N_d ise, iyonlaşmamış donör atomlarının sayısı n_d ,

$$n_d = \frac{N_d}{1 + \frac{1}{2} e^{(E_d-E_f)/kT}} \quad (2-28)$$

dir. Buradaki E_d donör atomlarının bulunduğu enerji seviyesidir. Akseptör enerji seviyesindeki (E_a) birim hacimdeki akseptörlerin toplam sayısı N_a ve iyonlaşmamış akseptörlerin sayısı n_a

$$n_a = \frac{N_a}{1 + \frac{1}{2} e^{(E_f-E_a)/kT}} \quad (2-29)$$

ile verilir. $E_d - E_f > kT$ ve $E_f - E_a > kT$ ise (2-28) ve (2-29) denklemlerinin paydalarındaki eksponansiyel terim "1"den büyük olacağından "1" ihmal edilebilir ve bu iki denklem aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$n_d = 2N_d e^{-(E_d-E_f)/kT} \quad (2-30)$$

$$n_a = 2N_a e^{-(E_f-E_a)/kT} \quad (2-31)$$

Donör ve akseptör enerji düzeylerinde birim hacimde bulunan iyonlaşmış donör ve akseptör atomlarının sayısı sırasıyla, $N_d^* = N_d - n_d$ ve $N_a^* = N_a - n_a$ ile verilir. Eğer donör ve akseptör atomlarının tamamen iyonlaşması durumunda $N_d^* = N_d$ ve $N_a^* = N_a$ olur.

Denge durumundaki bir yarıiletkende, termal bir hol veya her elektron için pozitif olarak yüklenmiş olan donör iyonu veya negatif olarak yüklenmiş bir akseptör iyonunun olması gerekir. Denge durumunda yarıiletken elektrik yükleri bakımından nötr durumdadır. Nötrleşme şartı bu elektrik yüklerinin cebirsel toplamaları sıfıra eşitlenerek ifade edilir. Yani,

$$P_o - n_o + (N_d - n_d) - (N_a - P_a) = 0 \quad (2-32)$$

Burada $(N_d - n_d)$ ve $(N_a - P_a)$ sırasıyla iyonlaşmamış donör ve akseptörlerin konsantrasyonlarıdır. En düşük sıcaklıklar ve en yüksek katkı konsantrasyonları hariç Boltzmann yaklaşımı iletim ve valans bandları ile donör ve akseptör seviyelerinin herbiri için geçerli olacağından iyonlaşmamış donör ve akseptör konsantrasyonları ihmal edilebilir ve (2-32) denklemini aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir. Yani

$$P_o - n_o + N_d - N_a = 0 \quad (2-33)$$

Katkılı yarıiletkenlerde Fermi enerji düzeyi, (2-28) ve (2-30) denklemleri kullanılarak (2-34) eşitliği elde edilir.

$$N_v e^{-(E_f - E_v)/kT} - N_c e^{-(E_c - E_f)/kT} + (N_d - N_a) = 0 \quad (2-34)$$

(2-34) denkleminin çözümünden E_f enerji düzeyi

$$E_f = \frac{1}{2} (E_c + E_v) + kT \ln \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right)^{3/4} + kT \sinh^{-1} \left[\frac{N_d - N_a}{2 \sqrt{N_c N_v} e^{-E_g/2kT}} \right] \quad (2-35)$$

şeklinde bulunur. (2-35) denkleminde (2-21) ve (2-25) eşitlikleri ile verilen değerler yerlerine yazılarak E_f yeniden ifade edilebilir. Yani

$$E_f = E_{fi} + kT \sinh^{-1} \left[\frac{N_d - N_a}{2 n_i(T)} \right] \quad (2-36)$$

Denklem (2-36) deki hiperbolik terim; eğer $\frac{N_d - N_a}{2 n_i(T)} > 0$ ise pozitif, $\frac{N_d - N_a}{2 n_i(T)} < 0$ ise negatiftir. $N_d = N_a$ olduğu zaman, katkılı yarıiletken saf bir yarıiletken gibi davranır. Eğer $|N_d - N_a| \gg n_i(T)$ ise termal uyarım sonucunda meydana gelen taşıyıcı konsantrasyonları toplam konsantrasyonlardan küçük olduğundan (2-36) denklemindeki ters hiperbolik ifadesi $\frac{N_d - N_a}{2 n_i(T)}$ nin büyük değerleri için $\sinh^{-1} \frac{N_d - N_a}{2 n_i(T)} \approx \ln \frac{N_d - N_a}{2 n_i(T)}$ olarak alınabilir ve buna göre (2-36) denkleminde E_f enerji düzeyi

$$E_f = E_{f_i} \pm kT \ln \frac{|N_d - N_a|}{2 n_i(T)} \quad (2-37)$$

olarak yeniden yazılabilir³.

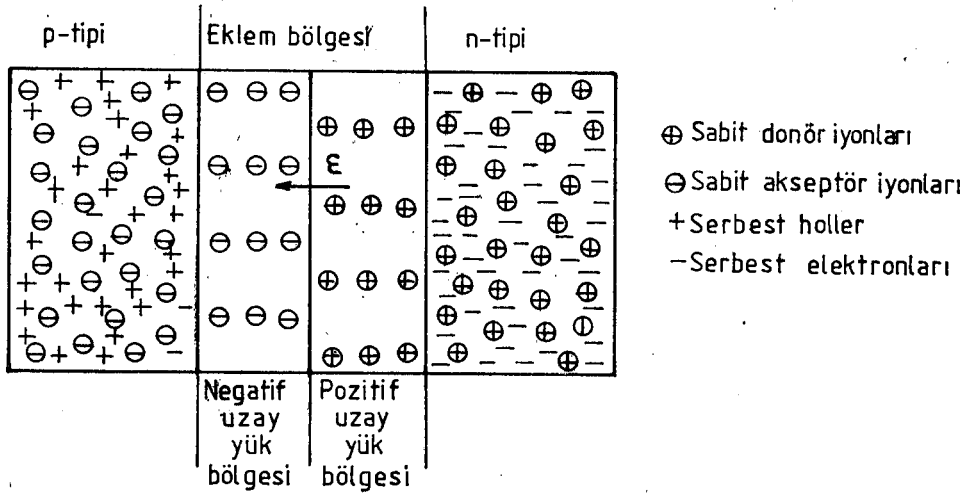
Yarıiletkenlerin iletkenlikleri sıcaklıkla artar, örneğin silisyumun iletkenliği her sıcaklık derecesi artışı için % 8, germanyumunki ise % 6 dır⁸. Silisyum ve germanyumun iletkenliklerinin sıcaklığa kuvvetli bir şekilde bağlı olması bazı devrelerde yarıiletken elemanların kullanımını sınırlar, bazı çevrelerde ise faydalı olmaktadır. Bu yönüyle termometrelerde, güç ölçümü için kullanılan ısı rölelerinde ve sıcaklık değişimleri ile çalışan kontrol mekanizmalarında kullanılır.

2.4 p-n Eklemi ve Çalışma Prensipleri

Diyod, transistör güneş pili gibi elektronik devre elemanları p-n eklemi içerirler. Güneş pillerinin çalışma prensiplerinin esasını teşkil eden fotovoltatik olayları anlayabilmek için p-n ekleminin özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekir.

Basit bir p-n eklemi uygun şartlar altında n-tipi bir yarıiletken içerisinde oluşturulacak bir p-tipi bölgeyle (veya p-tipi yarıiletken içerisinde oluşturulan n-tipi bir bölgeyle) elde edilir. p-n eklemi p-tipi ve n-tipi bölgeler arasında kristal büyüme esnasında oluşturulan dar bir bölgedir. Pratikte p-n ekleminin oluşturulması zordur. Hiçbir zaman p-tipi ve n-tipi iki yarıiletken üst üste bastırılarak p-n eklemi yapılamaz. Çünkü yüzeydeki tekrar birleşmeler çoğunluk taşıyıcıların ortak yüzeyden difüzyonunu önler⁹. Bir başka deyişle p-n eklemi, yarıiletkenin iletkenliğinin bir tipten diğer tipe değiştiği bölgedir. Bu eklem bölgesinde iyonlaşmış sabit donör ve akseptör atomları bulunur ve bu atomlar hareketsiz olduklarından dolayı p-n ekleminden geçen akıma herhangi bir katkıda bulunamazlar. p-n eklem bölgesi (transition region) veya hareketli yüklerin olmamasından dolayı kıtlık bölgesi (depletion region) adı verilir. p-n eklem bölgesi hareketli yüklerden yoksun olması nedeniyle yalıtkan özelliği gösterir.

p-n ekleminin oluşumu esnasında n-tipi bölgesinde çoğunlukta olan serbest elektronlar p-tipi bölgesine p-tipi bölgesinde

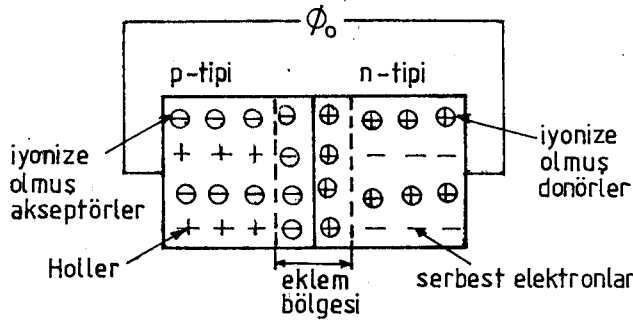


Şekil 2.5 Çoğunluk taşıyıcı yüklerinin difüzyonu ile oluşmuş elektrik alanı ve uzay yük bölgesi

çoğunlukta olan serbest holler n-tipi bölgesine doğru difüz ederler. Bu nedenle n-tipi bölgesinin yakınındaki p-tipi bölgesi negatif, p-tipi bölgesinin yakınındaki n-tipi bölgesi pozitif olarak yüklenmiş olur. Bu çoğunluk taşıyıcıların difüzyonu p ve n tipi bölgeler arasında termodinamik bir denge kuruluncaya kadar devam eder. Yani heriki bölgede Fermi enerji seviyesinin aynı olmasına kadar taşıyıcı yük geçişleri devam etmektedir. p-tipi ve n-tipi bölgelerindeki serbest elektron ve hollerin yer değiştirmelerinden dolayı eklem bölgesinde yönü n-tipinden p-tipine doğru bir elektrik alanı meydana gelir. Bu elektrik alanı difüz eden serbest elektron ve hollerin difüzyonunu engelleyecek değere ulaştığı zaman p-n eklemi dengeye ulaşır ve artık bir taraftan diğer tarafa net yük akışı durur.

p-n eklemının n-tarafındaki donör iyonları difüzyon yoluyla p-tipinden n-tipine geçen hollerle, p-tarafındaki akseptör iyonları da difüzyon yoluyla n-tipinden p-tipine geçen elektronlarla birleşerek yok olurlar.

p-n eklemının oluşumu esnasında kontak (temas veya difüzyon) potansiyeli olarak adlandırılan ve değeri hiçbir zaman sıfır yapılamayan sabit bir potansiyel meydana gelir. Bu kontak potansiyeli (ϕ_0) p-n eklemının heriki tarafındaki sabit yükler tarafından oluşturulur. p-n eklemının oluşumu esnasında p-tipi bölgeden



Şekil 2.6 p-n eklemının şematik gösterimi

n-tipi bölgeye doğru bir hol difüzyonu, n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye doğru da bir elektron difüzyonu meydana gelir. Bu difüzyon akımları eklem bölgesindeki elektrik alanı ϵ tarafından meydana getirilen sürüklenme akımları ile dengelenir. Sürüklenme akımları ϵ alanının n-tipi bölgedeki holleri p-tipi bölgeye, p-tipi bölgedeki elektronların n-tipi bölgeye sürüklenmesiyle meydana gelir. Difüzyon akımlarının sürüklenme akımları ile dengelenmesi sonucunda p-n eklemi dengeye ulaşır. ϵ elektrik alanı

$$\epsilon = \frac{dV}{dx} \quad (2-40)$$

veya

$$\epsilon = -\frac{\Phi_0}{d} \quad (\text{Denge durumunda}) \quad (2-41)$$

ile belirtilir. Buradaki d p-n eklemının genişliğini gösterir.

Φ_0 kontak potansiyelinin değeri uzay yük bölgesinden uzakta p-n eklemının heriki tarafındaki elektron ve hollerin denge durumdaki yoğunluklarından faydalanarak ifade edilebilir. (2.14) ve (2.19) denklemlerine göre n-tarafındaki elektron ve hollerin yoğunlukları sırasıyla

$$n_{n0} = N_c e^{-(E_{cn} - E_f)/kT} \quad (2-42)$$

$$n_{p_0} = N_c e^{-(E_{c_p} - E_f)/kT} \quad (2.43)$$

ile verilir. (2-42) ve (2-43) denklemlerinin E_{c_n} ve E_{c_p} için çözümlerse, kontak potansiyeli ϕ_0 ,

$$\phi_0 = \frac{E_{c_p} - E_{c_n}}{e} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{n_{n_0}}{n_{p_0}}\right) \quad (2-44)$$

ile ifade edilir. p-n eklemının heriki tarafındaki elektron ve hol yoğunlukları arasında aşağıdaki gibi bir bağıntı vardır. Yani n-tipindeki elektron yoğunluğu n_{n_0} ile hol yoğunluğu n_{p_0} çarpımı, p-tipindeki elektron yoğunluğu p_{n_0} ile hol yoğunluğu p_{p_0} çarpımı sabit $n_i(T)$ değerini verir. Yani

$$n_{n_0} \cdot p_{n_0} = p_{p_0} \cdot n_{p_0} = n_i^2(T) \quad (2-45)$$

dir. Bu bağıntıda n_{p_0} yalnız bırakılarak işlem yapıldığında ve bu değer (2-44) eşitliğinde yerine konularak ϕ_0 potansiyeli ifade edilir.

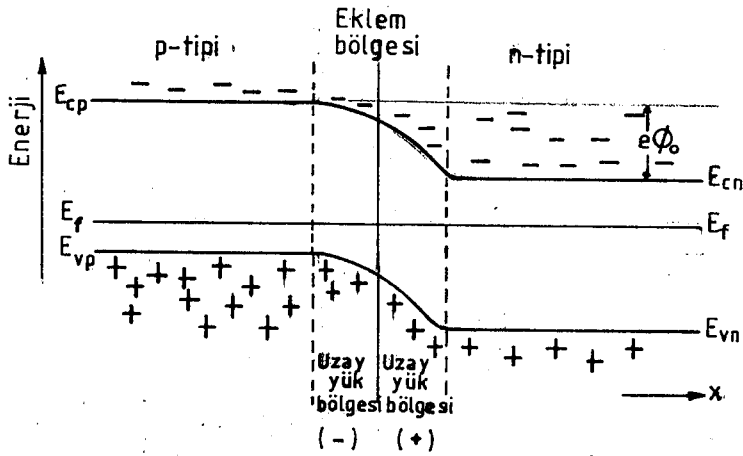
$$\phi = V_T \ln \frac{n_{n_0} p_{p_0}}{n_i^2(T)} \quad (2-46)$$

Burada V_T termal potansiyeli göstermektedir. $V_T = \frac{kT}{e}$ dir.

Eğer donör ve akseptör atomları tamamen iyonlaşmış ve yarıiletken materyal çok katkılı ise $n_{n_0} \approx N_d$ (kuvvetli katkılı n-tipi) veya $n_a \approx N_a$ (kuvvetli katkılı p-tipi) olur. O halde tamamen iyonlaşmış donör ve akseptör konsantrasyonu cinsinden yazıldığında kontak potansiyeli aşağıdaki gibi verilir.

$$\phi_0 = V_T \ln \frac{N_d \cdot N_a}{n_i^2(T)} \quad (2-47)$$

ϕ_0 kontak potansiyeli sıcaklığın ve katkı konsantrasyonlarının bir fonksiyonu olduğunu (2-47) denklemi göstermektedir. Termal, optik veya başka etkenlerle oluşturulan doğru ve zıt akımlardan dolayı ϕ_0 kontak potansiyeli azalır fakat tekrar birleşme akımları ϕ_0 'ın değerini yeniden artırır.



Şekil 2.7 p-n eklemının uygulama geriliminin yokluğundaki enerji bandı diyagramı

Φ_0 kontak potansiyeli bir gerilim kaynağı değildir. Çünkü p-n eklemi kısa devre yapıldığında omik kontakın iç direncinden dolayı ısınması gerekirdi. Halbuki yapılan deneyler sonucunda omik kontakın ısınmadığı ve devreden herhangi bir akım akmadığı anlaşılmıştır.

Elektronların ve hollerin oluşum akım yoğunlukları J_{ng} ve J_{pg} , birleşmi akım yoğunlukları J_{nr} ve J_{pr} dir. p-n eklemi termal dengeye ulaştığı zaman

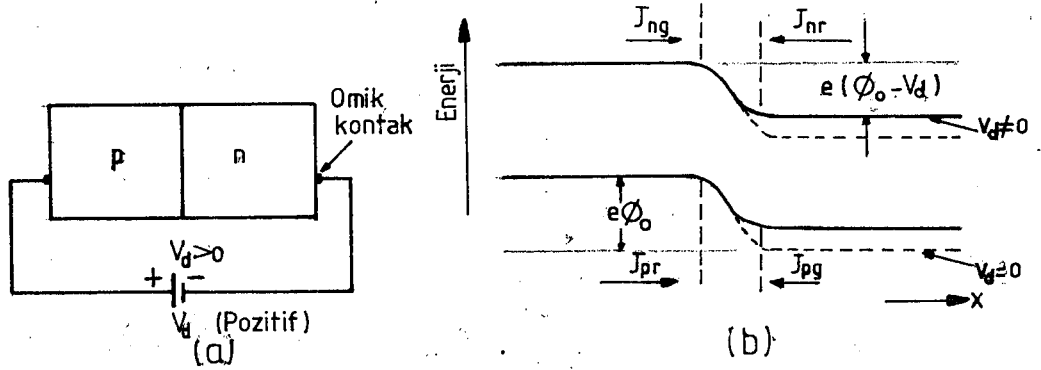
$$J_{ng} = J_{nr} \quad (2-48)$$

$$J_{pg} = J_{pr} \quad (2-49)$$

olur. J_{ng} akım yoğunluğu p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye geçen elektronların sayısına, J_{pg} oluşum akım yoğunluğu da n-tipinden p-tipine geçen hollerin sayısına bağlıdır.

p-n eklemi doğru yönde ve ters yönde olmak üzere iki şekilde beslenir. p-n eklemını doğru yönde beslemek için ekleme uygulanacak V_d dış voltaj kaynağının pozitif kutubu p-tarafına, negatif kutubu n-tarafına bağlanarak yapılmaktadır. Doğru besleme de p-n eklemının engel yüksekliği $-eV_d$ değeri kadar azalır. Çoğunluk taşıyıcı yüklerinin geçişine engel teşkil eden potansiyel engel yüksekliği azaldığından dolayı J_{nr} ve J_{pr} birleşim akım

yoğunlukları artar.



Şekil 2.8 p-n eklem bölgesinin doğru yönde beslenmesi
(a) şematik (b) enerji band diyagramı

p-n eklemine doğru yönde beslenmesi durumunda meydana gelen elektron ve holler için birleşim akım yoğunlukları

$$J_{nr} = J_{ng} e^{eV_d/kT} \quad (2-50)$$

$$J_{pr} = J_{pg} e^{eV_d/kT} \quad (2-51)$$

ile verilir. p-n eklemine doğru yönde beslenmesi halinde eklem- den geçen net elektron ve holler için ayrı ayrı akım yoğunlukları toplamı J_n ve J_p

$$J_n = J_{ng} - J_{nr} = -J_{ng} (e^{eV_d/kT} - 1) \quad (2-52)$$

$$J_p = J_{pr} - J_{pg} = J_{pg} (e^{eV_d/kT} - 1) \quad (2-53)$$

ile verilir. Doğru besleme durumunda eklem- den geçen net toplam akım yoğunluğu elektronların ve hollerin meydana getirmiş oldukları akım yoğunluklarının toplamına eşittir. Eklem- den geçen net akım yoğunluğu J_d ise

$$\begin{aligned} J_d &= J_p - (-J_n) \\ &= J_{pg} (e^{eV_d/kT} - 1) - [-J_{ng} (e^{eV_d/kT} - 1)] \end{aligned}$$

göstermektedir. Çünkü $n_i(T)$ sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklık artarken I_0 hızlı bir artış gösterir. I_0 teorik olarak ters besleme geriliminden bağımsız gibi gözükmesine rağmen deneysel sonuçlar I_0 'ın uygulama gerilimine çok az da olsa bağlı olduğu görülmüştür. Çünkü p-n eklem bölgesindeki elektrik alanından dolayı kontak potansiyeli ϕ_0 'ın değeri az da olsa düşmekte dolayısıyla I_0 artmaktadır.

Yarıiletken ve p-n eklemindeki optik olayları iki şekilde açıklamak mümkündür. Birinci fotoiletkenlik ikincisi ise fotovoltaik olaydır. Güneş pillerinin çalışma prensiplerinin iyi anlaşılması bu iki olayın çok iyi bilinmesiyle mümkündür. Monokromatik veya güneş ışınının etkisi altında kalan yarıiletkenlerin elektrik özelliklerin değişmesine fotoiletkenlik olayı adı verilir. Fakat fotoiletkenlik olayının olabilmesi için yarıiletkenin üzerine gelen ışının dalgaboyuna karşılık gelen enerji, yarıiletkenin yasak enerji aralığının değerine eşit veya ondan büyük olması gerekir. Bunun yanında katkılı yarıiletkenlerde, katkı atomlarının iyonlaşma enerjileri çok küçük olduğundan fotoiletkenlik daha büyük dalgaboyuna sahip ışınlarla da meydana gelebilir. Fotoiletkenliğin olabilmesi için aşağıdaki şartın sağlanması gerekir. Yani

$$E \leq \frac{hc}{\lambda_f} \quad (2-59)$$

olmalıdır. Burada h planck sabiti, c ışığın hızı ve λ_f gelen ışınların dalgaboyunu gösterir.

Yarıiletken kristal üzerine gelen I_f şiddetindeki foton, yarıiletken içerisinde ilerlerken şiddeti, yarıiletkenin kalınlığıyla eksponansiyel olarak azalır. Bu azalma oranı absorpsiyon katsayısı olarak bilinir ve α ile gösterilir.

$$\alpha = \frac{1}{I_f} \frac{dI}{dx} \quad (2-60)$$

Burada x yarıiletkenin kalınlığını gösterir. α nın büyüklüğü materyalin yapısına iletim ve valans bantlarındaki durum yoğunluklarına, fotonun dalgaboyuna yarıiletkenin direkt veya indirekt band geçişine bağlıdır.^{10.}

Yarıiletkenin iletim bandındaki elektronlar yasak enerji aralığındaki tuzaklar tarafından tuzaklanabilir ve bu durum da enerji uygun geçiş şartları altında foton salınımı olarak açığa çıkar ve bu olaya radyatif birleşim denir.

Işın etkisiyle herhangi bir yarıiletkende elektron-hol çiftinin oluşması olayına fotovolttaik olay adı verilir. Fotovolttaik olay sonucu meydana gelen akıma fotoakım denir. p-n ekleminden uzakta ışın etkisiyle meydana gelen elektron-hol çiftinin tekrar birleşmelerden dolayı fotoakıma herhangi bir katkısı olmaz.

p-n eklemının oluşumu hızlı bir şekilde oluşmuş ise keskin, yavaş bir şekilde oluşmuş ise yayvan (graded) bir yapıya sahiptir. Eğer p-n eklemi keskin (abrupt) yapılı ise dar, yayvan yapılı ise geniş bir bölgede oluşur. Güneş pillerinde keskin yapılı yarıiletkenler tercih edilir. Çünkü daha az materyal kullanılır fakat ekonomik açıdan yayvan yapılı yarıiletkenler tercih edilir.

BÖLÜM III

YARIİLETKEN GÜNEŞ PİLLERİ

3.1 Yarıiletken Güneş Pilleri Hakkında Genel Bilgi

Güneş ışınlarını doğrudan elektriğe dönüştüren elektronik cihazlara güneş pili veya fotopil (solar cell) adı verilir. Güneş ışınları üç ayrı elektronik cihazla elektriğe dönüştürülür. Bunlar fotoemissif selüller, fotorezistans selüller ve yarıiletken güneş pilleridir.

Fotoemissif Selüller: Havası boşaltılmış bir cam ampül içerisine yerleştirilmiş, biri negatif yüklü katot, diğeri pozitif yüklü anod adı verilen iki elektroddan oluşmuş bir cihazdır. Katot genellikle toprak alkali metallere yapılmış olan ve yarım silindirik bir geometrik yapıyı andırır. Anod ise ince bir telden yapılmış çubuktur.

Katot ışığa karşı duyarlıklı olup ışınların etkisinde kaldığında yüzeyden sökülen ve yeterli kinetik enerjiye sahip elektronlar anoda gider ve böylece devreden bir akım geçer. Fakat yeterli enerjiye sahip olmayan elektronlar ise anod ile katot arasında bağlanan doğru akım (DC) kaynağı yardımı ile bunların da anoda gitmeleri sağlanır.

Daha güçlü bir fotoemissif selül yapmak için ampül içerisine asal gaz konulur. Bu tür selüllerde elde edilen akım şiddeti gelen ışınların şiddetine ve katot ile anod arasında uygulanan DC gerilime bağlıdır.

Fotorezistan Selüller: Selenyum (Se) ve talium (Ta) gibi bazı metallere direnci; ışınların etkisi altında kaldıkları zaman düşer. Porselen veya cam üzerine kafes şeklinde sarılmış teline selenyum veya talium sürüldüğü zaman ve ışınların etkisi altında bırakıldığında kafesin iki ucu arasında bir potansiyel fark

fark meydana gelir. Böyle bir cihazın çıkış uçları arasına bir yük bağlandığında yük içerisinde bir akım aktığı görülür.

Fakat bu üç güneş pilinden en verimlisi ve en kullanışlısı yarıiletken güneş pilleridir.

İlk güneş pili Schottky, Lange ve Grondahl gerçekleştirilmiştir. Bu ilk güneş pili bakır oksit (Cu_2O) ve selenyumdan (Se) yapılmıştır. Ancak ilk esaslı güç elde edilen fotovoltaiik güneş pili 1954 yılında Bell Telephone Laboratuvarında (ABD) G.L Pearson, C.S Fuller ve D.M. Chapin tarafından gerçekleştirilen p-n homoeklemlili silisyum (Si) güneş pilidir. Bu pilin verimi % 15 civarında bulunmuştur.

Birçok organik veya inorganik maddeler ışıklara karşı duyarlı olmalarına rağmen hiçbirinin verimliliği yarıiletken güneş pillerinin verimliliği kadar elverişli değildir. Fotovoltaiik güneş pili yapımında en çok kullanılan materyaller, silisyum, galyum arsenik, kadmiyum sülfür ve kadmiyum telürdür.

Güneş pilleri ilk zamanlar yalnız uzay çalışmalarında kullanıldı. Ancak 1973 yılındaki petrol krizinden sonra yeryüzünde de enerji üretimi için kullanılması düşünüldü. Uzay çalışmalarında güneş pillerinin fazla ekonomik olması düşünülmemesine rağmen yeryüzü uygulamalarında bu hususa çok önem verilmektedir. Çünkü güneş pillerinin yeryüzünde yaygın olarak kullanılması için hem ekonomik hem de yüksek verimle çalışması gerekmektedir.

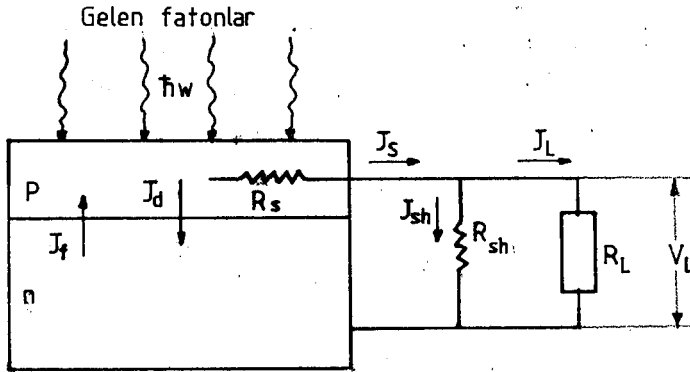
Dünyada ilk güneş pili santrali 1982 yılında Arco Solar Inc. tarafından A.B.D.'inin Kaliforniya Eyaleti'nde kurulmuş olan 1 MW gücündeki santraldir. Bu santral ulusal elektrik şebekesine bağlanmıştır. Bir başka santral yine A.B.D. inin Los Angeles kentinin kuzey doğusunda 1 MW gücünde ve güneşi izleyebilen 108 adet pil panelinden ve 90.000 adet monokristal güneş pili içeren ve Arco Solar Inc. ile Southern California Company işbirliğiyle kurulmuş olan santraldir¹¹.

Bu tür büyük güneş pili santrallerinin bir takım enerji kayıpları olması her zaman mümkündür. Bu kayıplar, iç ve genel kayıplar, eğer güneşi izleyen bir dizayn söz konusu ise dışlilerden ileri gelen mekanik kayıplar ve gölgelemelerden ileri gelen kayıplardır.

3.2 Yarıiletken Güneş Pillerinin Çalışma Prensipleri

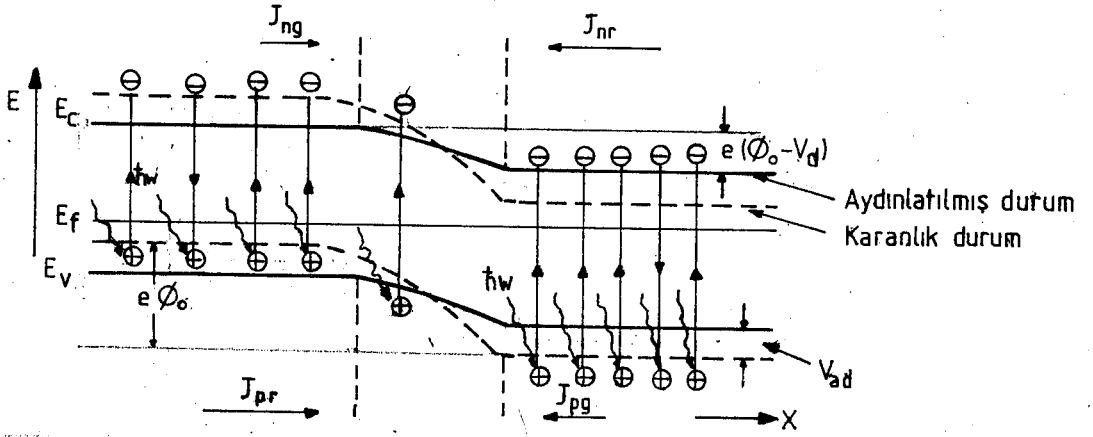
Yarıiletken güneş pillerinin çalışma esası fotovolttaik dönüşümlere dayanır. Fotovolttaik olay iki aşamada meydana gelir. Bunlar, birer taşıyıcı yük çifti olan elektron-hol çiftinin oluşturulması ve bu yük çiftlerinin birbirinden ayrılması olayıdır. Bir cihazın güneş pili olarak kullanılabilmesi için en az iki özelliğe sahip olması gerekir. (i) Cihazın üzerine gelen ışınların cihaz tarafından absorblanması, (ii) Absorblanan ışınların bir kısmı tarafından oluşturulan, taşıyıcı yük çiftlerinin birbirinden ayrılmasını sağlayacak temel bir elektrik alanının olmasıdır.

p-n eklemli fotovolttaik güneş pilleriyle elektrik elde etmek için pil üzerine gelen ışınlar eklem bölgesine veya bu bölgenin yakınına düşürülmelidir. Çünkü eklem bölgesinden uzak bölgelerde ışınların etkisiyle oluşan yük çiftlerin tekrar birleşmelerinden dolayı meydana getirecekleri akımların fotoakıma herhangi bir katkısı olmaz.



Şekil 3.1 p-n eklemli güneş pilinin şematik gösterimi

Fotovolttaik güneş pilleri, absorblanmış fotonların meydana getirmiş olduğu akımı geçirecek yönde olan bir diyod üzerine paralel bağlanmış sabit bir akım kaynağı gibi davranır. Fotovolttaik güneş pilleri daima ileri yönde beslenmiş bir p-n eklem diyo-du gibi çalışır.



Şekil 3.2 p-n eklemli bir güneş pilinin enerji band diyagramı

p-n eklemli fotovoltaik bir güneş pilinde fotonların absorblanmasıyla eklem her iki tarafında taşıyıcı yük (elektron-hol) fazlalıkları meydana gelir. Eklem her iki yanındaki çoğunluk yük taşıyıcıları difüzyon yoluyla, azınlık taşıyıcı yükleri ise eklem bölgesinde var olan elektrik alanının (ϵ) sürüklemesiyle eklem bölgesini geçerek fotoakım yoğunluğunu meydana getirirler. Fotoakım yoğunluğu (J_f) p-n eklemine ileri yönde kutuplar. Eğer fotovoltaik güneş pilinin çıkışında herhangi bir yük bağlı ($R_L=0$) değilse o zaman J_f p-tipi bölgeyi pozitif n-tipi bölgeyi negatif olarak yükler ve bu anda p-n eklemnin potansiyel engel yüksekliği, ϕ_0 azalacağından çoğunluk taşıyıcı yükleri azınlıkta oldukları bölgelere doğru difüz ederler. Bu çoğunluk taşıyıcı yüklerin oluşturduğu birleşim akım yoğunluğu J_r , p-tipi bölgeyi negatif, n-tipi bölgeyi pozitif olarak yükler. Bu yüklenmeden dolayı J_f fotoakım yoğunluğu p-n eklemnin ters yönde besler ve ϕ_0 potansiyel engel yüksekliği artacağından, çoğunluk taşıyıcı yüklerinin eklem bölgesini geçişleri engellenmiş olur. Bu anda tekrar bir foton absorblanır ve ϕ_0 'nın yüksekliği tekrar azalır. Böylece ϕ_0 'ın bir azalıp bir artması güneş pilinin ışınların etkisinde kaldığı sürece devam eder.

Aydınlatılmış fotovoltaik bir güneş pilinin içerisinde geçen toplam akım yoğunluğu J , elektronların ve hollerin meydana getirdikleri akım yoğunluklarının toplamına eşittir. Herhangi bir x konumunda ve λ dalgaboylu fotonların güneş pili içerisinde meydana getirmiş oldukları elektron ve hol akım yoğunlukları sırasıyla, $J_n(x, \lambda_f)$ ve $J_p(x, \lambda_f)$ ise o zaman J akım yoğunluğu

$$J(\lambda) = J_n(x, \lambda_f) + J_p(x, \lambda_f) \quad (3-1)$$

ile verilir. J_n ve J_p akım yoğunlukları gelen fotonların dalgaboyuna bağlıdır. Bu akım yoğunlukları aşağıdaki süreklilik denklemleri ile verilir.

$$J_n(x, \lambda) = e \cdot \left[+D_n \frac{dn(x, \lambda)}{dx} + \mu_n \epsilon_p n(x, \lambda) \right] + \frac{1}{e} \frac{dJ_n(x, \lambda)}{dx} + g(x, \lambda) - \frac{n(x, \lambda) - n_0(x)}{\tau_n} = 0 \quad (3-2)$$

$$J_p(x, \lambda) = e \cdot \left[-D_p \frac{dp(x, \lambda)}{dx} + \mu_p \epsilon_n p(x, \lambda) \right] - \frac{1}{e} \frac{dJ_p(x, \lambda)}{dx} + g(x, \lambda) - \frac{p(x, \lambda) - p_0(x)}{\tau_p} = 0 \quad (3-3)$$

Burada ϵ_n ve ϵ_p sabit olmayan katkı konsantrasyonlarından meydana gelen elektrik alanlarıdır, D_n , D_p , μ_n , μ_p , τ_n ve τ_p sırasıyla elektronların ve hollerin difüzyon katsayılarını, mobilitelerini ve ömürlerini, $n(x, \lambda)$ ve $p(x, \lambda)$ azınlık taşıyıcı konsantrasyonlarını, $g(x, \lambda)$ elektron ve hollerin oluşum oranlarını gösterir.

$$g(x, \lambda) = (1 - R(\lambda)) \alpha(\lambda) Q(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)x} d\lambda \quad (3-4)$$

Burada $Q(\lambda)$, pil üzerine gelen λ dalgaboylu fotonların akısını gösterir. $Q(\lambda)$, birim yüzeye gelen $P(\lambda)$ güç yoğunluğuna bağlıdır. $R(\lambda)$ pilin ön yüzey yansıtma katsayısını, $\alpha(\lambda)$ absorpsiyon katsayısını ifade eder.

$$Q(\lambda) = \frac{1}{hc} \lambda P(\lambda) = 5.035 \times 10^{15} \lambda P(\lambda) \quad (3-5)$$

(3-2) ve (3-3) süreklilik denklemlerinden $J_n(x, \lambda)$ ve $J_p(x, \lambda)$ akım yoğunlukları gelen radyasyonun dalgaboyuna ve konuma bağlı olduğu görülmektedir. Bu süreklilik denklemleri kendi aralarında düzenlenerek aşağıdaki denklemler elde edilir¹³.

$$D_n \frac{d^2 n(x, \lambda)}{dx^2} - \mu_n |\epsilon_n| \frac{dn(x, \lambda)}{dx} - \frac{n(x, \lambda) - n_0(x)}{\tau_n} + g(x, \lambda) = 0 \quad (3-6)$$

$$D_p \frac{d^2 p(x, \lambda)}{dx^2} + \mu_p |\epsilon_p| \frac{dp(x, \lambda)}{dx} - \frac{p(x, \lambda) - p_0(x)}{\tau_p} + g(x, \lambda) = 0 \quad (3-7)$$

Güneş pili içersindeki taşıyıcı yüklerin ömürlerini ve mobilitelerini konumdan bağımsız kabul ederek (3-6) ve (3-7) denklemlerinin çözümleri aşağıdaki sınır şartları için yapılabilir;

1. Ön yüzeyde $x=0$ için birleşme meydana gelir yani elektronların ön yüzeyde birleşme hızlarının akım yoğunluklarına bağlılığı

$$J_n = e S_n (n - n_0) \quad (3-8)$$

ile verilir. S_n elektronlarının yüzey birleşim hızını gösterir.

2. Eklem düzleminde $x=W_p$ keskin ve ince olan geçiş ihmal edilebilirse elektron ve hollerin yoğunlukları sırasıyla aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$n - n_0 = n_0 \left[e^{eV_d/kT} - 1 \right] \quad (3-9)$$

$$p - p_0 = p_0 \left[e^{eV_d/kT} - 1 \right] \quad (3-10)$$

Buradaki V_d , p-n eklemine uygulanan gerilimdir.

3. Arka yüzeyde $x=W_n+W_p$ için birleşmenin meydana gelişi yani hollerin birleşmesi ile akım yoğunlukları arasındaki bağıntı

$$J_p = e S_p (p - p_0) \quad (3-11)$$

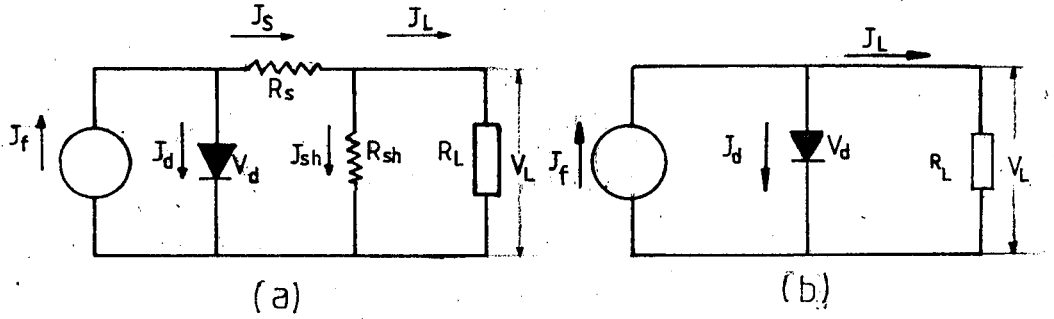
ile verilir. S_p hollerin yüzey birleşim hızıdır.

Fotovoltaik bir güneş pilinin içersinden geçen toplam akım yoğunluğu olan $J(\lambda)$, (3-6) ve (3-7) diferansiyel denklemlerinin çözümünden elde edilir.

$$J(\lambda) = J_0 (e^{eV_d/kT} - 1) - J_f(\lambda) \quad (3-12)$$

Burada $e^{eV_d/kT}$ Maxwell-Boltzmann faktörüdür. $J_f(\lambda)$ fotoakım yoğun-

İüğunu ifade eder.



Şekil 3.3 p-n eklemli fotovolttaik bir güneş pilinin
(a) eşdeğer devresi (b) ideal eşdeğer devresi

$J_f(\lambda)$ gelen fotonların dalgaboyuna bağlıdır. Eğer toplam fotoakım yoğunluğu J_f ise

$$J_f = \int_0^{\lambda_{\text{foton}}} J_f(\lambda) d\lambda \quad (3-13)$$

ile verilir. Burada $\lambda_{\text{foton}} = \frac{hc}{E_g}$ dir. Şekil 3.3 deki R_s güneş pilinin iç seri direncini, R_{sh} şönt direncini, R_L yük direncini, J_L, R_L yük direnci içerisinde geçen akım yoğunluklarını gösterir.

İdeal bir güneş pili için $R_s=0$ ve $R_{sh}=\infty$ kabul edilebilir ve bu durumda pilin kısa devre şartı altında yani $V_d=0$ olması halinde pilin kısa devre akım yoğunluğu J_{kd} fotoakım yoğunluğuna eşit olur. Yani

$$J_{kd} = -J_f \quad (3-14)$$

dir. Güneş pilinin çıkışına bağlanmış bir R_L yük direnci üzerinde görülen V_L voltajı $R_s=0$ ve $R_{sh}=\infty$ için diyod üzerinde görülen V_d voltaj düşmesine eşit olacaktır. Fakat $R_s \neq 0$ ve $R_{sh} \neq \infty$ için V_L voltajı

$$V_L = V_d - |J| R_s \quad J_L = |J| \quad (3-15)$$

olur. Burada $|J|$, R_L yük direncinden geçen akım yoğunluğudur. $|J|$ akım yoğunluğu

$$|J| = J_f - J_0 (e^{eV_d/kT} - 1) - \frac{V_L}{R_{sh}} \quad (3-16)$$

ile verilir. Kısa devre şartı altında R_{sh} nin herhangi bir etkisi olmaz fakat $V_L = 0$ olacağından kısa devre akım yoğunluğu

$$|J_{kd}| = \frac{1}{R_s} \frac{kT}{e} \ln\left(1 + \frac{J_f - |J_{kd}|}{J_0}\right) \quad (3-17)$$

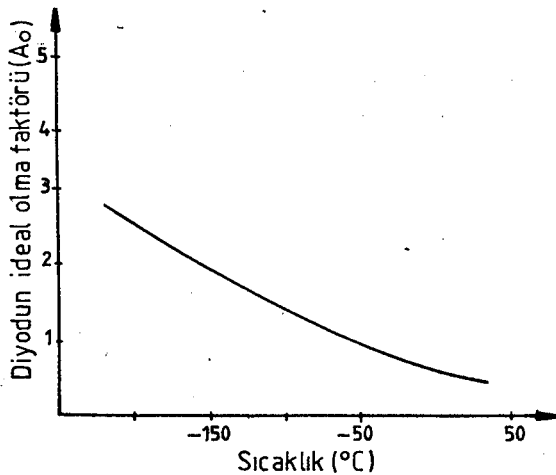
ile verilir. Açık devre şartı altında yani yük direnci $R_L = \infty$ için $J_L = 0$ olacağından açık devre voltajı V_{ad} , (3-15) ve (3-16) denklemlerinden faydalanarak aşağıdaki gibi bulunur.

$$V_{ad} = \left(\frac{R_{sh}}{R_s + R_{sh}}\right) \frac{A_0 kT}{e} \ln\left(1 + \frac{J_f}{J_0} - \frac{V_{ad}}{J_0 R_{sh}}\right) \quad (3-18)$$

Burada şönt direncini $R_{sh} = \infty$ alındığında (3-18) denkleminin yeni ifadesi

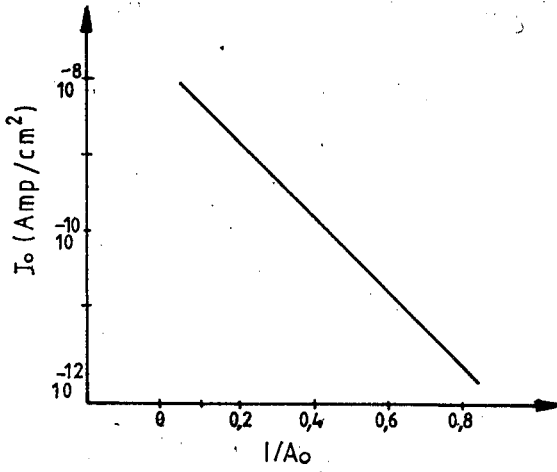
$$V_{ad} = \left(\frac{V_0 kT}{e}\right) \ln\left(1 + \frac{J_f}{J_0}\right) \quad (3-19)$$

şeklinde olur. Burada A_0 p-n eklemının (diyodun) ideal olma faktörüdür. A_0 'ın değeri teorik olarak 1-5 arasında değişmektedir. Fakat yapılan deney sonuçlarına göre 1-2 arasında bir değişim gösterdiği anlaşılmıştır. Örneğin, silisyum için 1.5 civarındadır. A_0 sıcaklıkta eksponansiyel olarak azalmaktadır.



Şekil 3.4 Diyodun ideal olma faktörünün sıcaklıkla değişimi

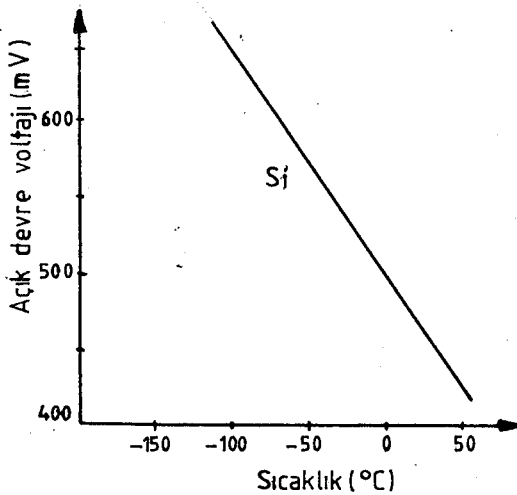
Şekil 2.5 den diyodun ideal olma faktörünün sıcaklıkla eksponansiyel olarak azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.5 Diyodun ideal olma faktörünün tersi ile ters doyum akım yoğunluğunun değişimi

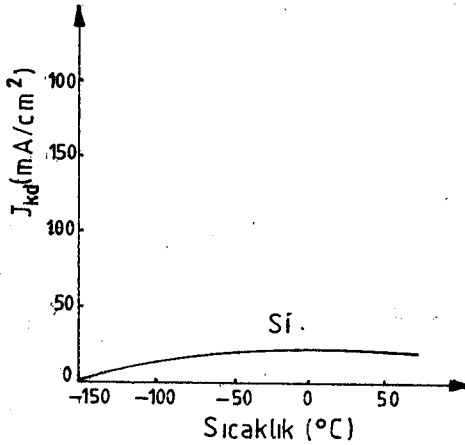
Güneş pilinin açık devre voltajının yüksek olması p-n eklemının karanlık doyum akım yoğunluğunun (J_0) büyük olmasına, sıcaklığın düşük olmasına, yarıiletken materyalin yasak enerji aralığının ve şönt direncinin büyük olmasına bağlıdır.

p-n eklemli fotovolttaik bir güneş pilinin açık devre voltajı, eklemının potansiyel engel yüksekliğinin azalma miktarına eşittir. Yani bu azalma miktarı güneş pilinin elektromotor kuvvetini (e.m.k) verir.(Şekil 3.2).



Şekil 3.6 Açık devre voltajının sıcaklıkla değişimi

Şekil 3.6 de açık devre voltajı sıcaklıkla lineer bir şekilde azaldığı görülmektedir. Halbuki kısa devre akımı yoğunluğu sıcaklıktan fazla etkilenmez. Ayrıca gelen radyasyon şiddeti arttığı zaman pilin iç seri direnci azalır ve şönt direnci büyür ve dolayısıyla açık devre voltajı da buna bağlı olarak artar.



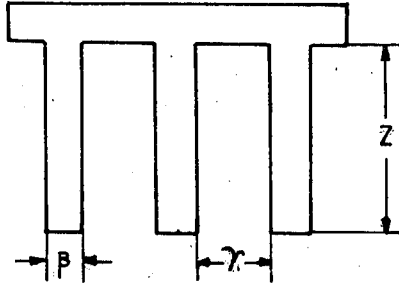
Şekil 3.7 Kısa devre akımının sıcaklık değişimi

Şekil 3.7 den kısa devre akım yoğunluğunun sıcaklıktan fazla etkilenmediği görülmektedir.

İç seri direnç R_s ve şönt direnci R_{sh} fotovolttaik güneş pilinin akım voltaj karakteristiğini olumsuz yönde etkilemektedir. Güneş pili üzerine gelen ışın, şiddetin büyüklüğüne göre R_s ve R_{sh} in etkisi değişmektedir. Eğer, gelen ışınların şiddeti yüksek ise R_s 'nin etkisi R_{sh} den daha kuvvetli, ışınların şiddeti az olduğu zaman R_s nin etkisi R_{sh} den daha kuvvetli olmaktadır. O halde yüksek şiddetli radyasyon için R_{sh} 'yi, düşük şiddetli radyasyon için R_s ihmal edilebilir. R_s ve R_{sh} dirençlerinin etkileri iyi bir dizayn ve dikkatli bir fabrikasyonla azaltılabilir¹².

Güneş pilinin iç seri direnci farklı tabakalardan geçen akımdan gelen bir dağılım olduğu kabul edilmektedir. Bundan dolayı karanlıkta ve aydınlıkta R_s 'nin değerleri farklı farklı olmaktadır. Seri direnç, omik kontak direncini, yarıiletkenin bulk bölgesinin dirençlerini, yüzey tabakasının direncini ihtiva eder. Küçük yüzeyli ve tek kristalden yapılmış güneş pillerinde seri direnç, şönt direncinden daha etkilidir. Fakat büyük yüzeyli gü-

neş pillerinde kenar akım kaçakları ve yüzey kusurları olduklarından R_{sh} büyük olmaktadır. Güneş pillerinde elektrik kontağını sağlayan üst kafesin parmak sayılarının artması seri direncin değerini azaltır. Ancak, parmak sayısının uygun olarak artırılması ve bunun yanında parmaklar arası mesafenin, parmakların yüzey genişliğinin ve parmak yüksekliğinin de uygun olarak seçilmesi gerekir.



Şekil 3.8 Güneş pilinin üst yüzey metal kontak parmakları

Kafes parmakların genişliği β , uzunluğu z ve iki parmak arası γ ile gösterilirse ve uygun bir parmak seçimi için β ve γ aşağıdaki gibi verilir¹.

$$\beta = 2^{5/4} \frac{R_k^{3/4}}{R_p^{1/2}} (BCJ_0 e^{BV_L})^{1/4} z^{3/2} \quad (3-20)$$

$$B = \frac{e}{A_0 kT} \quad C = 1 - \frac{J_0}{J_f} (e^{BV_L} - 1)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{2\beta}{BC_0 R_p J_0 e^{BV_L}}} - \frac{2\beta}{3} \quad (3-21)$$

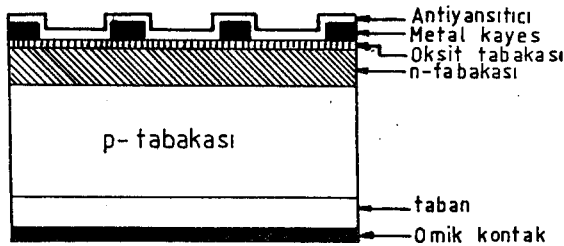
Burada R_k metal kafes kontağın bir parmağının tabaka direncini, R_p p-tabakasının direncini ve J_0 güneş pilinin ters doyum akım yoğunluğunu ve V_L güneş pilinin çıkış voltajını gösterir.

Güneş pilinin üst metal kafes kontağın parmak yüzey genişliği, büyük olursa pilin ışınlar karşı aktif yüzey azalacak dolayısıyla pilin çıkış akımı azalacak, küçük alındığı zaman metal

kontakta direnci artacak ve yüzey birleşimlerinden dolayı da metal kafes taşıyıcı yükleri toplayamayacak ve güneş pilinin çıkış gücü azalacaktır. Bundan dolayı metal kafes parmak sayıları, parmak yüzey genişlikleri optimum değerde olması gerekir. O halde güneş pilinin iyi çalışabilmesi için yani veriminin yüksek olması kontak kafes dizaynına da bağlıdır.

$1 \times 2 \text{ cm}^2$ yüzeyli bir güneş pili için optimum parmak sayısı 5, herbir parmağın genişliği $6 \times 10^{-2} \text{ cm}$ ve iki parmak arası mesafe 0.4 cm dir.

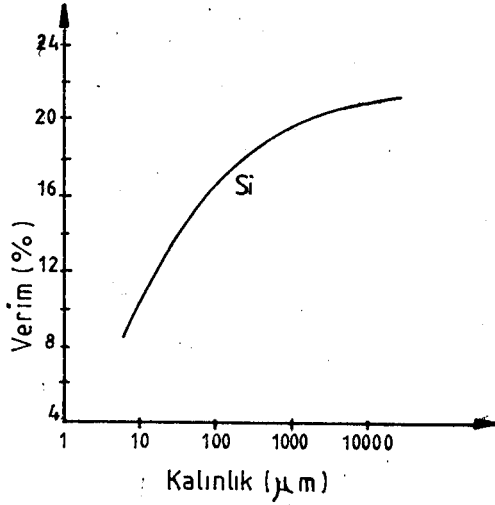
Güneş pilleri üzerine gelen ışınların bir kısmını yansıtırlar ve bu durum güneş pilinin çıkış gücünü olumsuz yönde etkiler. Bunu önlemek için antiyansıtıcı maddeler kullanılır. Antiyansıtıcı tabakalar saydam madde olup, buharlaştırma, kimyasal çöktürme ve oksitleme yoluyla güneş pilinin ön yüzeyine kaplanır². Aynı zamanda bu tabaka güneş pilinin yüzeyini çeşitli dış etkilerden korur.



Şekil 3.9: Güneş pilinin ön yüzeyine kaplanan antiyansıtıcının şematik olarak gösterimi

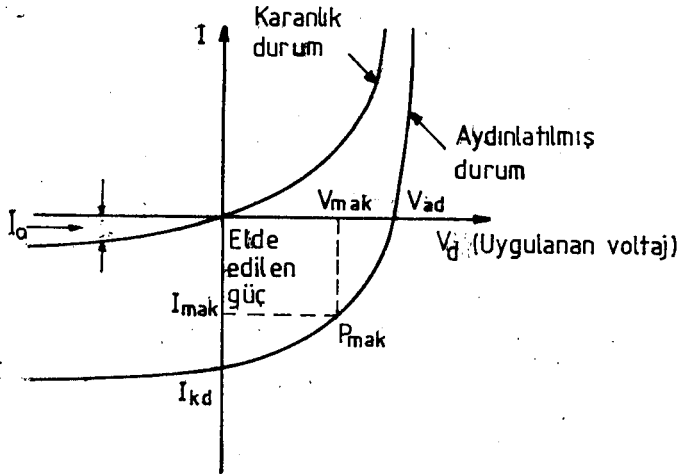
Güneş pilinin kalınlığı da önemlidir. Pil kalınlığı küçütüldüğü zaman geçirilmiş ışınlardan dolayı kayıp artar. Bu kayıp indirekt band geçişli materyallerde, direkt band geçişli materyallere göre daha büyüktür. Pil kalınlığının küçük olması durumunda arka yüzdeki omik kontakta etkisi daha büyük olmaktadır. Çünkü arka yüzeyde enjekte edilmiş taşıyıcılar ve ışınların etkisiyle meydana gelen fazla taşıyıcı yüklerinin tekrar birleşmelerinden dolayı, p-n eklemının karanlık diyod akım yoğunluğu artar ve toplama verimi azalır. Fakat bu etki pil kalınlığı, taban bölgesindeki azınlık taşıyıcıların difüzyon uzunluğundan daha bü-

yük veya ona yakın değerde bulunursa, ancak o zaman önemli olur². Dolayısıyla güneş pilinin kalınlığı verimi etkiler.



Şekil 3.10 Güneş pilinin veriminin pil kalınlığı ile değişimi

Seri, şönt ve pil kalınlığı fotovoltaik güneş pilinin akım-voltaj (I-V) karakteristiğini etkiler.



Şekil 3.11 Fotovoltaik güneş pilinin akım-voltaj (I-V) karakteristiği

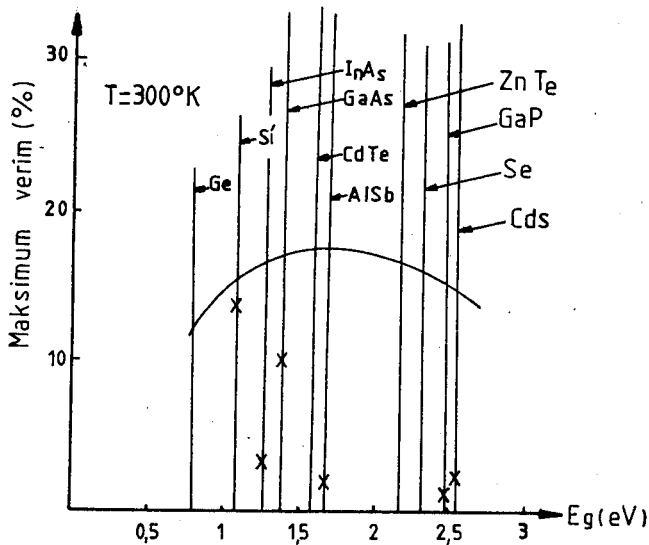
3.3 Yarıiletken Güneş Pilleri İçin Materyal Seçimi

Güneş pillerinin yapımında kullanılacak materyallerin önceden uygun bir seçimi yapılması gerekir. Bu seçim hem ekonomik hem de verimlilik açısından çok önemlidir.

Güneş pillerinin yapımında kullanılacak yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı gözönünde bulundurulmalıdır. Güneş pilinin açık devre voltajı V_{ad}

$$V_{ad} = \frac{kT}{e} \ln\left(1 + \frac{J_f}{J_0}\right) \quad (3-22)$$

ile verilir. Kullanılan yarıiletkenin yasak enerji aralığı E_g büyük olduğunda, J_0 azalır çünkü pil tarafından absorblanan $h\nu$ ($h\nu > E_g$) enerjili fotonların sayısında bir azalma olacaktır. E_g çok küçük olduğu zaman J_0 artarken J_f azalır. Çünkü gelen fotonların tamamı absorblanamaz ve absorblanan fotonların oluşturduğu elektron-hol çiftinin tamamı toplanamadığından J_f azalır, bu durum pilin verimini düşürür. O halde verimin yüksek olabilmesi için, pil yapımında kullanılan materyallerin iyi bir seçimi için yasak enerji aralığının uygun olması gerekir. İngiltere'de pil yapımı için çeşitli deneyler yapılmış ve İngiltere şartları için en uygun materyalin yasak enerji aralığının 1.78 eV. olduğu bulunmuştur¹³.



Şekil 3.12 Çeşitli yarıiletken materyallerin teorik olarak, verimlerinin yasak enerji aralıkları ile karşılaştırılması

Şekil 3.12'e bakıldığında yasak enerji aralığı 1 ve 2.5 değerleri arasında kalan materyallerden yapılan güneş pillerinin veriminin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu değerler arasında kalan materyaller Si (1.21 eV), InP (1.27 eV), GaAs (1.43 eV) aliminyum antimuan (AlSb-1.49 eV), kadmiyum tellür (CdTe-1.50 eV) ve galyum fosfor (2.24 eV) dur. Güneş pili yapımında kullanılacak materyallerin hangisinin daha uygun olacağı Şekil 3.12 deki eğri-den faydalanılarak seçilebilir.

Güneş pili yapımında kullanılacak yarıiletkenlerin, indirekt veya direkt band geçişlerinesahip olup olmadıklarına da bakmak gerekir. Çünkü direkt band geçişli materyallerde gelen ışınlar daha kısa mesafelerde absorblanmalarına rağmen, indirekt materyallerde ise daha derinlerde absorblanmaktadır. Bu durum direkt band geçişli materyallerin daha az ve ince, indirekt materyallerin ise daha çok ve kalın olmalarını gerektirir. Dolayısıyla indirekt band geçişli materyallerde yüzey birleşmeleri daha çok olacağından pilin çıkış gücü düşecektir. Diğer yandan direkt band geçişli yarı iletkenlerin pratikte elde edilmesi hem zor hem de pahalı olması, yapılacak bu tercihi sınırlamaktadır.

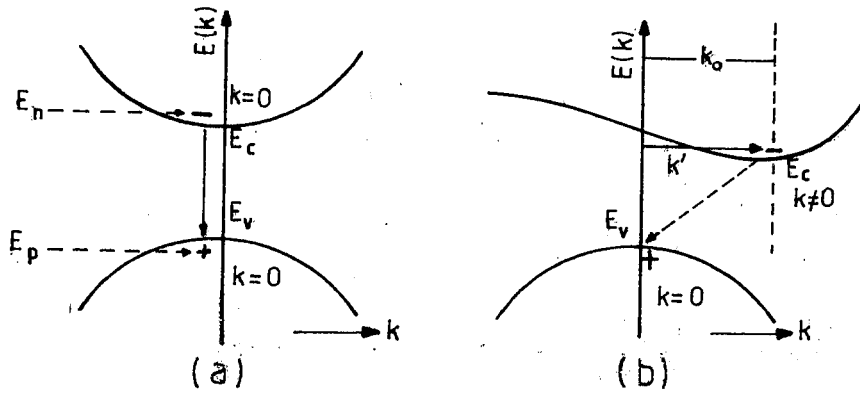
Direkt Band Geçışı

İletim bandındaki bir elektronun valans bandındaki bir holla herhangi bir enerji yardımı olmaksızın birleşmesine direkt band geçışı denir. Direkt band geçişinde gelen fotonların açısıl frekansı ω ise bu fotonların enerjileri $\hbar\omega$,

$$\hbar\omega = E_n - E_p \approx E_c - E_v \quad (3-23)$$

ile verilir. Burada E_n iletim bandındaki elektronların, E_p valans bandındaki hollerin enerji düzeylerini, E_c iletim bandının alt kenar, E_v valans bandının en üst enerji düzeylerini göstermektedir.

Direkt geçişte iletim bandının minimum enerjisi ile valans bandının maksimum enerjisi $k=0$ uzayında bulunur. GaAs ve CdS direkt band geçişine sahiptirler.



Şekil 3.13. Band geçişleri (a) direkt geçiş
(b) indirekt geçiş

İndirekt Band Geçışı

Germanyum (Ge) ve Silisyum da olduğu gibi iletim bandının minimumu ile valans bandının maksimum enerji düzeyleri her zaman $k=0$ uzayında bulunmazlar. Ancak valans bandının maksimum enerji düzeyi daima $k=0$ uzayında bulunur. İletim bandındaki bir elektron valans bandındaki bir holle birleşmesi için başka bir enerjiye ihtiyaç vardır. Çünkü elektronun valans bandındaki holle birleşmesi için $E_c - E_v \approx E_n - E_p$ enerjisi yeterli olmadığı zaman, geçişin olabilmesi için kristalden enerji alınır veya kristale enerji verilir. Bu ise kristalde meydana gelen fononlarla sağlanır. Böyle bir geçişte fotonların enerjisi hw ,

$$\hbar w = E_n - E_p \pm E(k_0) = E_v - E_c \pm E'(k_0) \quad (3-24)$$

ile verilir. Buradaki $E(k_0)$ iletim bandı içerisindeki herhangi bir elektronla valans bandı içerisindeki bir holün birleşmesi için kristal fononlarına verilmesi veya alınması gereken enerji miktarıdır. $E'(k_0)$ iletim bandının minimum enerji düzeyindeki bir elektronun birleşmesi için fononlara verilmesi veya alınması gereken enerjidir. $E'(k_0)$, materyalin yasak enerji aralığı E_g ile karşılaştığında küçüktür⁷. İndirekt geçişte momentum, direkt geçişte enerji konumu önemlidir.

Sonuç olarak, direkt band geçişli ve yasak enerji aralığı büyük, sıcaklığa ve radyasyona karşı dayanıklı olan materyaller tercih edilmelidir.

BÖLÜM IV

YARIİLETKEN GÜNEŞ PİLLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

p-n eklemli fotovoltaik güneş pilleri kullanılan kristal cinslerine göre üç ana grupta toplanabilir. Bunlar tek tip kristalden yapılan homoeklemlili, iki farklı kristalden yapılan heteroeklemlili ve üçüncüsü de amorf-silisyum (a-Si) güneş pilleridir.

Heteroeklemlili güneş pillerinin yapım teknolojisi homoeklemlililere göre daha kolay ve ekonomiktir. Fakat homoeklemlili (homojunction) güneş pilleri daha yüksek verimle çalışırlar ve ömürleri daha uzun olur.

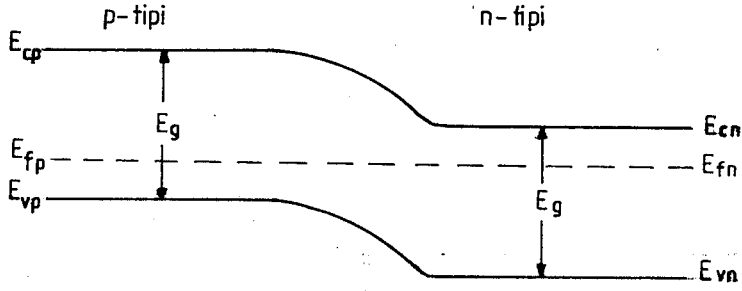
Amorf-silisyum güneş pillerinin yapımı araştırma safhasında olduğundan tam geliştirilememiştir. Amorf-silisyum güneş pillerinin maliyeti düşüktür.

4.1 p-n Homoeklemlili Yarıiletken Güneş Pilleri

p-n homoeklemlili güneş pilleri aynı cins yarıiletken kristalden veya polikristalden yapılan tek kristal güneş pilleridir.

Polikristallerin elde edilmesi zor ve pahalıdır. Bu nedenle, bu materyallerden yapılan homoeklemlili güneş pillerinin yüzünde kullanım alanları sınırlanmaktadır. Polikristalden yapılan homoeklemlili güneş pilleri aynı cins kristalden yapılan homoeklemlili güneş pillerine göre sıcaklığa karşı daha dayanıklı, verimlilikleri daha yüksek ve uzun ömürlüdürler. p-n homoeklemlili güneş pillerinin ideal verimlilikleri yani kafes, antiyansıtıcı ve koruyucu ince filmlerin absorpsiyon kayıplarının olmadığı durumda, % 28 civarındadır¹⁴.

En yaygın kullanılan p-n homoeklemlili güneş pilleri silisyum ve galyum arseniktir. Silisyum güneş pillerinin ideal verimliliği % 22, galyum arseniğin (GaAs) ideal verimliliği % 27 civarındadır.



Şekil 4.1 p-n homoeklemlı güneş pilinin enerji band diyagramı

4.1.1 Silisyum Güneş Pili

Bugün özelliği en iyi bilinen yarıiletken materyal silisyumdur. Uzay çalışmalarında kullanılan güneş pillerinin hemen hemen tamamını silisyumdan yapılan güneş pilleri teşkil etmektedir. Silisyum tabiiatta bol miktarda bulunan silisyum oksitten (SiO_2) elde edilmektedir. Silisyum indirekt band yapısına sahiptir ve yasak enerji aralığı 0°K de 1.21 eV, oda sıcaklığında (300°K de) 1.12 eV. tur.

Silisyumun açık devre voltajı germanyumun açık devre voltajından daha büyük olduğundan güneş pili yapımında germanyuma göre tercih edilmektedir. Fakat germanyum kızılötesi ışınlar karşısında duyarlı olmalarına rağmen silisyum duyarlı değildir. Güneş ışınları kullanıldığında bunun pek önemi yoktur. Fakat akkor ışın kaynağı kullanıldığında zaman Si güneş pilinin açık devre voltajı Ge güneş pilinin açık devre voltajından büyük olmasına rağmen çıkışından elde edilen güç daha düşüktür. Çünkü, Si'nin yasak enerji aralığı germanyumun yasak enerji aralığından daha büyüktür. Bu nedenle Ge güneş pilinde fotoakım daha küçük enerjilerde meydana gelmektedir. Si güneş pillerinin açık devre voltajı sıcaklığın artışına göre düşmektedir. Bu 1°C de 2.2 mV. Silisyum güneş pillerinin p-tabakasının kalınlığı genellikle 1 μm civarındadır ve böylece p-n eklem bölgesinin aydınlatılmış yüzeye yakınlığı sağlanmış olur.

Silisyum güneş pillerinin normal verimleri % 12-15 arasında

değişir ve bu verimlilikler sıcaklıkla düşer. Si pillerinin 80°C den yüksek sıcaklıklarda çalıştırılmaması gerekir¹⁴.

Silisyum kristali dört ayrı metodla büyütülmektedir. Bunlar kimyasal buharlaştırma, Czochralski, yüzdürme ve kesme metodlarıdır. Silisyum kristalinde bir kaç katkı maddesi kullanılır, bunlar galyum (Ga), arsenik (As), boron (B), fosfor (P) ve aliminyumdur. Bunlardan en önemlileri uzay uygulamaları için katkı maddeleri olarak kullanılan boron ve fosfordur².

Silisyum güneş pilinin ışınlarla karşı olan yüzeyinde yansımayı önlemek için buharlaştırma yoluyla aşağı yukarı 8000 \AA kalınlığında silisyum monoksit (SiO) tabakası oluşturulur.

4.1.2 Galyum Arsenik Güneş Pilleri

Silisyum yarıiletkeninden sonra üzerinde en fazla çalışılmış yarıiletken galyum arseniktir. Bu yarıiletkenin özelliklerinin araştırılması 1960 yılından beri devam etmektedir.

Polikristal bir materyal olan galyum arseniğin (GaAs) yasak enerji aralığı 300°K de 1.34 eV . tur. GaAs direkt band yapısına sahip olduğundan üzerine gelen ışınları daha kısa mesafelerde absorblar bu nedenle daha az bir materyal kullanımını gerektirir. GaAs sıcaklığa ve radyasyona karşı Si dan daha fazla dayanıklıdır.

GaAs güneş pilleri hem elektrik hem de termal enerji elde etmek üzere iki amaç için kullanılır. Bu durum Fresnel merceklerinin arkasına uygun bir şekilde yerleştirilmiş GaAs güneş pil panelleri ile sağlanır. Bu paneller su ile soğutularak 120°C ve 140°C arasında sıcak su buharı elde edilmekte ve klima cihazları çalıştırılmaktadır.

GaAs kristali üç metodla büyütülür. Bunla Czochralski, kesme tekniği ve Brüdgmán tekniğidir. En yaygın kullanılan metod Bridgman tekniğidir⁹.

GaAs yarıiletkeninde en çok kullanılan katkı maddeleri, çinko (Zn) kadmiyum (Cd), selenyum (Se) ve sülfürdür.

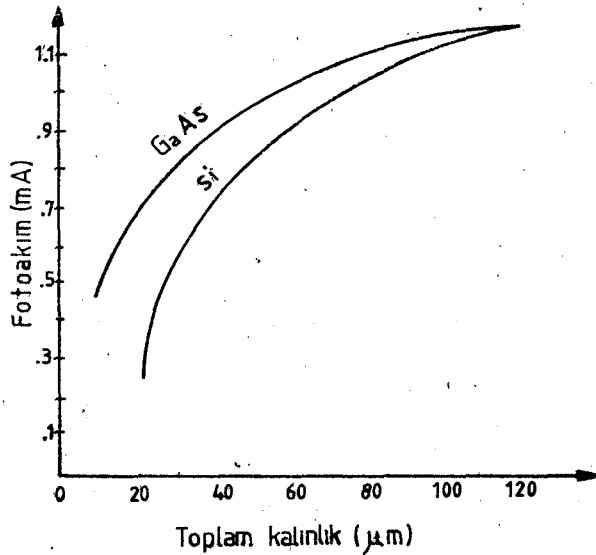
GaAs güneş pillerinin verimliliği % 10 civarındadır.

GaAs güneş pilleri yüksek yüzey birleşim hızlarına sahip olduklarından çıkış gücü olumsuz yönde etkilenir. GaAs : direkt band yapısına sahip olduklarından absorpsiyon kalınlığı çok ince yapılabilir ve böylece serbest taşıyıcı yüklerinin difüzyon uzunlukları ve ömürleri kısa olur. Gelen ışınların tamamının absorblanabilmesi için GaAs'ın kalınlığı 5 μm , Si'nin kalınlığı 100 μm dir.

Aşağıda bir kaç sıcaklık için AMO ve AM2 şartlarında Si ve GaAs için yapılan ölçümler sonucu elde edilen veriler görülmektedir.

200 °K de ve AMO da yapılan ölçmeler sonucunda Si güneş pilleri için verim % 22, GaAs için % 18 dir. 300 °K de ve AM2 de Si güneş pilleri için verim % 22 ve GaAs için % 26 dir. 500 °K de ise GaAs güneş pilinin verimi 300 °K deki veriminin üçte ikisi kadar Si için ise bu sıcaklıktaki verim 300 °K deki verimin dörtte birine kadar düşer.

GaAs güneş pilleri sıcaklığa ve radyasyona karşı daha dayanıklı olduklarından uzay çalışmalarında Si güneş pillerine göre tercih edilmektedir. Fakat on kez daha pahalıdır.



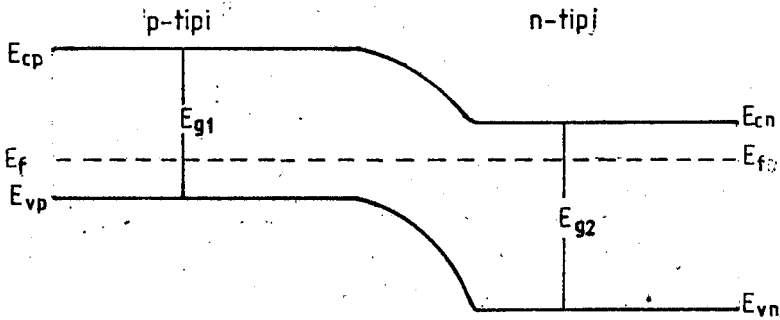
Şekil 4.2 GaAs ve Si güneş pillerinin fotoakımının toplam pil kalınlığıyla değişimi

Şekil 4.2 de GaAs güneş pillerinin fotoakımı Si pillerine göre daha küçük kalınlıklarda büyük olduğu görülmekte ancak ka-

lınlık arttıkça fotoakım düşmektedir. Daha büyük kalınlıklarda heriki pilin fotoakımlarının çakıştığı görülmektedir. Çünkü, GaAs güneş pilindeki birleşmeler hemen hemen Si pilinde meydana gelen tekrar birleşmelere eşit olduğundan heriki pilin fotoakımı eşit olmaktadır.

4.2 p-n Heteroeklemlı Yarıiletken Güneş Pilleri

Son zamanlarda p-n homoeklemlı fotovolttaik güneş pillerinin yerine farklı yarıiletkenlerden yapılmış heteroeklem (heterojunction) adı verilen ince film güneş pilleri kullanılmaya başlanmıştır. Bu ince film güneş pilleri sıcaklığa ve radyasyonlara karşı p-n homoeklemlı güneş pillerine göre daha dayanıklı olup, yapım teknolojileri daha kolay ve ekonomiktirler. Fakat verimlilikleri p-n homoeklemlı güneş pillerinin verimliliklerinden daha düşüktür.



Şekil 4.3 p-n heteroeklemlı diyodun enerji band diyagramı

Heteroeklemlı güneş pilleri farklı yasak enerji aralıklarına sahip materyallerden meydana geldiği için bu materyaller arasında örgü uyumsuzluğunun (lattice mismatching) olması söz konusudur. Örneğin, indiyum fosfor (InP) ile kadmiyum sülfür (CdS) ve CdS ile bakır indiyum selenyum (CuInSe) arasındaki latis uyumsuzlukları sırasıyla 0.001 ve 0.007 nm dir.

Üzerinde en fazla çalışılan heteroeklemlı fotovolttaik güneş pilleri, kadmiyum sülfür-bakır sülfür (n-CdS/p-Cu₂S), kad-

miyum sülfür-bakır indiyum selenyum (n-CdS/p-CuInSe) ve kadmiyum sülfür-silisyum (n-CdS/p-Si) pilleridir. Kadmiyum sülfürün bu derece çok kullanılmasının iki nedeni vardır. Bunlar CdS'nün iyi bir kristal örgüye ve direkt band yapısına sahip olmasından dolayıdır.

4.2.1 Kadmiyum Sülfür-Bakır Sülfür Pili

n-CdS/p-Cu₂S üzerinde en fazla araştırma yapılmış olan heteroeklem güneş pilidir. Saf kristal durumunda bir yalıtkan olan CdS'in yasak enerji aralığı 2.40 eV, Cu₂S ün 1.20 eV tur. n-CdS/p-Cu₂S heteroeklemi oluşturulduğu zaman bu enerji aralıkları sırasıyla 2.31 eV ve 1.21 olur. n-CdS/p-Cu₂S heteroeklem güneş pillerinin en büyük problemi, Cu₂S içerisindeki bakırın zamanla bulunduğu ortamın havasındaki oksijeni ile birleşerek oksitlenmesidir. Bu problem için 10 yıldan beri yapılan araştırmalar netice vermemiştir.

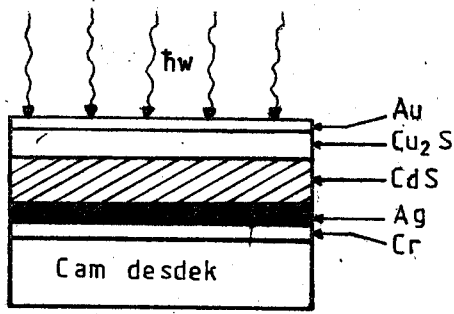
n-CdS/p-Cu₂S güneş pilinin elektrik bağlantıları, CdS için çinko, indiyum, Cu₂S için bakır veya altın ile yapılır. n-CdS/p-Cu₂S güneş pilinde gelen ışınların absorpsiyonu Cu₂S içerisinde olur. Çünkü, bakırın absorpsiyon katsayısı diğer materyallerden bir kaç kat daha büyüktür.

n-CdS/p-Cu₂S güneş pillerinin yapımında birkaç metod kullanılmasına rağmen en çok kullanılan metod pili oluşturan tabakaların vakumda buharlaştırma yoluyla elde edilme metodudur.

Bu pillerin verimliliği teorik olarak % 10 civarında, ancak bu verim uygulamada % 3 ile % 8 arasında değişmektedir.

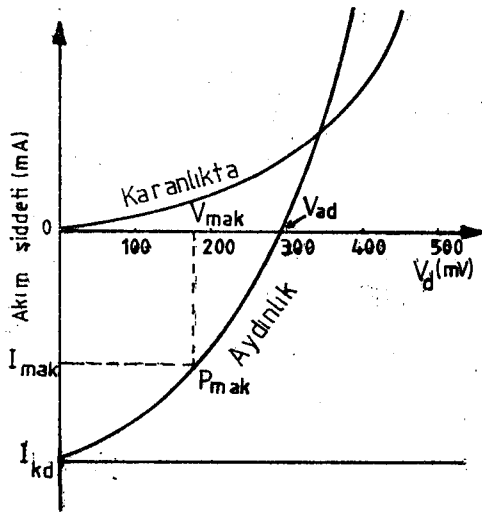
Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Laboratuvarında 70.mW/cm² aydınlatma şiddetinde n-CdS/p-CdS pilleriyle yapılan deneylerde elde edilen veriler, $V_{ad} = 0,360$ mV, fil faktörü 0,40, verimi ise % 3 olarak bulunmuştur. Fil faktörünün bu kadar küçük olması pilin iç seri dirençlerine bağlanmıştır⁴.

Şekil 4.5 de karanlık ve aydınlıkdaki akım-voltaj karakteristikleri kesişmiştir. Bunun sebebi CdS tabakasının fotoiletkenlik özelliğinden kaynaklanmaktadır. Çünkü pil üzerine gelen fotonların bir kısmı CdS tarafından absorblanarak elektron ve hol çiftinin oluşmasına sebep olur. Bunun sonucunda iletkenliğe bir katkı gelir²⁰.



Şekil 4.4 n-CdS/p-Cu₂S güneş pilinin şematik kesit görünüşü

n-CdS/p-Cu₂S güneş pilinin verimini artırmak için temizleme işleminin daha saf bir kimyasal madde ile yapılması, Cu₂S nin oksitlenmesini önlemek için pilin üst metal kafesini buharlaştırma yerine temas yoluyla yapılması ve gelen ışınların yansımalarını önlemek için çoğunu absorblıyan bir madde kullanılır.

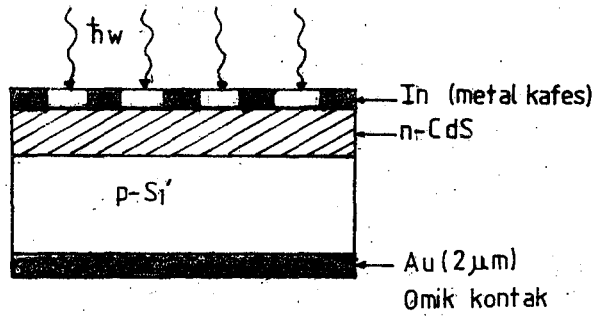


Şekil 4.5 n-CdS/p-C₂S güneş pilinin akım-voltaj karakteristiği

4.2.2 Silisyum-Kadmiyum Sülfür Güneş Pili

p-Si/n-CdS önemli heteroeklem güneş pillerinden biridir. Yasak enerji aralığı 1.21 eV olan Si un . daha geniş bir enerji aralığına sahip CdS (2.24 eV) ile özel şartlar altında birleştirilerek p-n heteroeklemi elde edilir. Bu p-n eklemi p-tipi Si tabanı üzerine CdS kristali kaplanarak yapılır.

p-Si/n-CdS güneş pili üzerine gelen ışınlar Si tabakası tarafından absorblanarak elektron hol çifti meydana gelir. CdS kristali Si'a göre daha iyi absorblayıcı olduğu için Si tabakasından daha ince yapılmaktadır. Bu nedenle gelen ışınlardan az bir kısmı CdS tabakası tarafından absorblanır. Si tabakasında absorblanan ışınlar tarafından oluşturulan taşıyıcı yükler, p-tipi Si den CdS'e geçerek ve üst kafes tarafından toplanarak çıkıştan bir güç elde edilir.



Şekil 4.6 p-Si/n-CdS güneş pilinin şematik kesit görünüşü

p-Si/n-CdS güneş pillerinde Si için omik kontak Au dan ve CdS için ise In dan yapıldığı zaman verim daha yüksek olmaktadır. Yapılan deney sonuçlarına göre p-Si/n-CdS güneş pillerinin verimi % 9 civarında bulunmuştur.

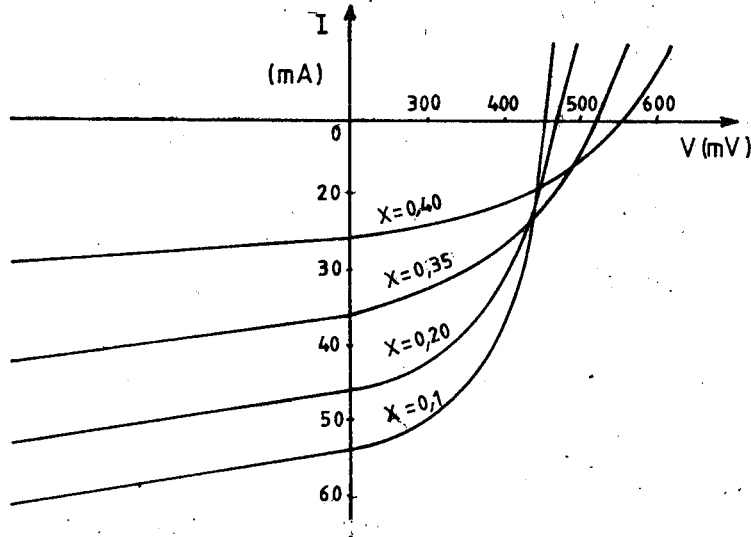
4.2.3 Bakır Sülfür-Çinko Kadmiyum Sülfür Güneş Pili

Bakır sülfür - çinko kadmiyum sülfür ($p\text{-Cu}_2\text{S}/n\text{-Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}$) güneş pilleri, üzerine metal sürülmüş cam taban üzerine aynı şartlar altında (aynı kaynak, basınç ve sıcaklık) ZnS ve CdS'ün vakumda buharlaştırılarak ve daha sonra bakır klorür çözeltisine daldırılarak Cu_2S elde edilir. Bu güneş pilinin performansında $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}$ tabakasındaki Zn konsantrasyonunun artırılması sonucun-

da elde edilen değerler, teorik sonuçlara yakın bulunmuştur.

Açık devre voltajı 500 mV olan n-CdS/p-CdS güneş pilinin verimi % 10 civarında bulunmuştur. Cu_2S ile CdS arasındaki latis uyumsuzluğunu kısmen önlemek için CdS kristalinin yerine $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}$ kristali kullanılmaktadır. Bu durumda pilin açık devre voltajı 800 mV, verimi % 10 dan daha büyük olmaktadır. Buradaki "x" 0.1 den büyük bir değere sahiptir.

$\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}$ materyali içerisindeki Zn konsantrasyonu artırıldığı zaman, bu pilin elektrik ve optik özellikleri değişmekte ve açık devre voltajı artarken kısa devre akımı azalmaktadır. Zn konsantrasyonu yüksek olduğu ve tavlama işleminin uzun olması durumunda V_{ad} ve I_{kd} nin değerlerinde bir azalma gözlenmiştir. Tavlama işlemi yüksek Zn konsantrasyonlu pillerde olumsuz etki yaparken, düşük Zn konsantrasyonlu pillerde ise faydalı olmaktadır.



Şekil 4.7 $\text{Cu}_2\text{S}/\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}$ güneş pilinin farklı Zn konsantrasyonları için akım-voltaj karakteristiği

Şekil 4.7 deki akım-voltaj karakteristiğinde Zn konsantrasyonu arttığında V_{ad} artmakta I_{kd} akımı azalmaktadır.

Tavlama işlemi fotoakımı ve engel yüksekliğini azaltır. Yapılan araştırmalara göre V_{ad} deki azalmaya, kontak potansiyel

engel yüksekliğindeki (ϕ_0) azalma neden olmaktadır. ϕ_0 Cu_2S in yasak enerji aralığına bağlıdır ve

$$\phi_0 = E_{g1} - \Delta X - eV_{dp} - f_1 \quad (4-1)$$

ile ifade edilir. Burada E_{g1} ve Cu_2S in yasak enerji aralığını, ΔX , Cu ve S elementlerin elektron afiniteleri arasındaki farkı, f_1 Cu_2S nin fermi enerji seviyesi ile valans bandı arasındaki enerji farkını ve eV_{dp} Cu_2S nin band bükümünün enerji değerini gösterir. V_{dp} ve f_1 Cu_2S materyalindeki akseptör ve $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}$ materyalindeki donör yoğunluğuna bağlıdır. V_{dp} difüzyon potansiyelini gösterir.

$$V_{dp} = V_{dn} \left[\frac{N_d}{N_a + N_d} \right] \quad (4-2)$$

$$V_{dn} = E_{g1} - \Delta X - (f_1 + f_2) \quad (4-3)$$

$$f = kT \ln \left(\frac{N_v}{N_a} \right), \quad f_2 = kT \ln \left(\frac{N_c}{N_d} \right) \quad (4-4)$$

Denklem (4-3) deki f_2 iletim bandının alt kenar enerji seviyesi ile fermi enerji seviyesi arasındaki enerji farkını, V_{dn} ise elektronlar için difüzyon potansiyelini göstermektedir. Denklem (4-4) ifadesindeki N_v Cu_2S nin valans, N_c ise $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}$ nin iletim bandındaki durum yoğunluklarını belirtir.

$10^{18} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ net konsantrasyona sahip Cd ve Zn daha sonra Cu_2S çözeltisi içerisine daldırılarak $\text{Cu}_2\text{S}-\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}$ fotovoltaiik güneş pili elde edilir. Cu_2S yüzey birleşimleri bu tabakanın ince film haline getirilmesiyle azaltılabilir. Tavlama ve daldırma işlemleriyle Cu_2S tabakası üzerindeki Zn konsantrasyonu zenginleştirilebilir. Fakat artırılmış yüzey birleşimleri azınlık taşıyıcı yüklerinin toplanmasını engellemektedir. Cu_2S tabakasının üzerindeki Zn nin varlığının olumsuz etkisi, $\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}$ içerisindeki Zn konsantrasyonunun % 10 dan büyük olduğu zaman dominant olmaya başlamaktadır. Bu konsantrasyon % 10 dan daha az olduğunda $\text{Cu}_2\text{S}-\text{Zn}_x\text{Cd}_{1-x}\text{S}$ pilinin davranışı $\text{Cu}_2\text{S}-\text{CdS}$ pilinin davranışına yakın olur. Zn konsantrasyonu artırıldığında V_{ad} artar, bu artış % 10 dan büyük olduğu zaman daldırma ve tavlama işlemi sırasında Zn difüzyonu sonunda pilin çıkış gücü azalmaya başlar, çünkü, Zn

konsantrasyonunun artmasıyla yüzey birleşimleri artar, dolayısıyla fotoakım düşer ve böylece pilin çıkış gücü azalmış olur¹⁵.

4.3 Amorf Silisyum Güneş Pilleri

Amorf Silisyum küçük boyutlarda, kristal özelliklerine yakın bir davranış göstermelerine rağmen büyük boyutlarda bu davranışları değiştirmektedir. Amorf materyaller homojen olmayan bir yapıya sahiptirler. Amorf silisyum direkt band yapılı bir kristal özelliği gösterir. Bu nedenle görünür bölgede absorpsiyon katsayısı azalmakta ve amorf yapıdan dolayı direnci artmaktadır. Amorf silisyum yüksek bir iletkenliğe sahiptir.

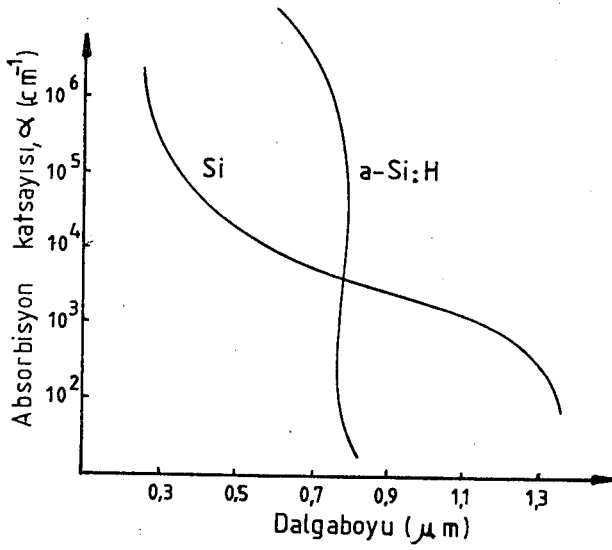
Hidrojenlenmiş amorf silisyum (a-Si:H ilk defa 1969 yılında İngiltere'de R.C. Chittick tarafından incelenmiştir. 1970 yılında İskocya'da Dundee Üniversitesi'nde W. E. Spear ve P. G. Lecomber bu yeni materyalin yani a-Si:H in özellikleri hakkında bir takım araştırma yapmışlardır. Bu araştırma sonucundan a-Si:H içerisinde düşük yoğunlukta kusur durumlarının olduğu anlaşılmıştır. 1974 yılında RCA Laboratuvarı'nda 1 μm kalınlığında a-si:H filmleri elde edilmiştir¹⁶. Böylece güneş pilleri için yeni bir materyal seçimi meydana gelmiştir.

İlk defa a-Si:H güneş pili 1977 yılında Wronski ve Carlson tarafından yapılmış ve verimi % 5.5 civarında bulunmuştur¹⁷. 1978 yılında Japonya'da Osaka Üniversitesi'nde yapılan bir a-Si:H güneş pilinin verimi % 4.5 bulunmuştur. Halbuki a-Si:H in teorik verimi % 15 civarında hesap edilmiştir.

a-Si:H güneş pilinin bazı avantajları vardır.

1. Yüksek absorpsiyon ve büyük fotoiletkenlik,
2. Düşük maliyet,
3. Büyük alanlı ve hiçbir alt taban üzerine epidaksiyal olarak büyütülemezler.

a-Si:H güneş pillerindeki kusur durumları, verimliliği düşürmektedir. Bu pillerin elektrik ve optik özellikleri fabrikasyon tekniğine bağlıdır.



Şekil 4.8 Absorbsiyon katsayısının dalgaboyu ile değişimi

Amorf silisyumun özellikleri henüz tam olarak anlaşılamadığı için ilerde nasıl bir problem getireceği bilinmemektedir¹⁴.

BÖLÜM V

YARIİLETKEN GÜNEŞ PİLLERİNİN VERİM HESABI VE VERİMLİLİĞİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

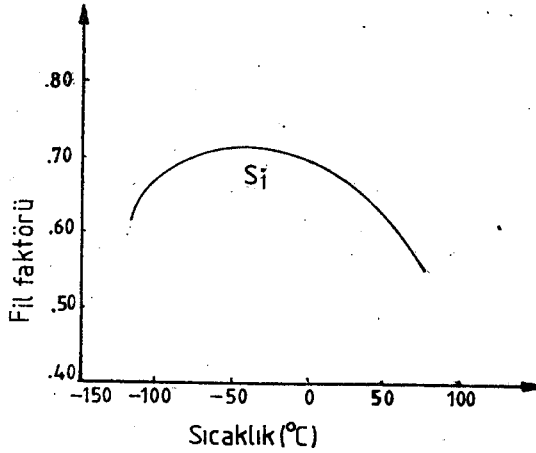
5.1 Yarıiletken Güneş Pilinin Verim Hesabı

Güneş pilinin verimi onun kalitesini belirtmesi açısından çok önemlidir. Verim ne kadar yüksek olursa pil o derece kalitelidir. Ne var ki yıllardır güneş pillerinin açık olarak bir standardasyonu yapılamamıştır. Aynı güneş pili ile açık havada, atmosfer dışında ve sisli havalarda yapılan ölçümlerde elde edilen sonuçlar birbirinden farklı olmuştur.

Güneş pillerinin davranışı üç temel parametre içerisinde incelenir. Birincisi, açık devre voltajıdır, bu açık devre voltajı (V_{ad}) pilin dış devresine bağlanmış yük direnci (R_L) devre direncinden çok daha büyük olduğu durumdaki voltajdır, bu yük direncinin büyük olması nedeniyle devreden herhangi bir akım akmaz. İkinci, parametre kısa devre (I_{kd}) akımıdır. Bu akım, devre direncinin pilin dış devresine bağlanmış yük direncinden büyük olduğu zaman, yük direncinden akan akımdır. Üçüncüsü, pilin maksimum çıkış gücünün V_{ad} ve I_{kd} nin çarpımlarına oranı olan fil faktörüdür. Bu üç parametre güneş pilinin verimini ve pillerin kullanılmasıyla devre şartlarını belirtirler⁸. Dördüncü bir parametre daha var, ancak bu parametre uzay uygulamaları için geçerli olan radyasyon kaybı katsayısıdır.

Fil faktörü (FF) güneş pilinin iç seri direncinden kaynaklanır. Seri direncin büyüklüğü FF'yi küçültür. Fil faktörünün değeri daima 1'e yakın olması istenir. İdeal bir güneş pili için FF ü 1'e eşittir. FF büyük olması güneş pilinin veriminin yüksek olduğunu belirtir. FF ünün büyük olması için seri direncin (R_s) ve diyodun ideal olma faktörünün (A_0), ters doyum akım yoğunluğu-

nun, sıcaklığın küçük ve yasak enerji aralığının büyük olması gerekir.



Şekil 5.1 Fil faktörünün sıcaklıkla değişimi

$$FF = \frac{J_{\text{mak}} \cdot J_{\text{mak}}}{J_{\text{kd}} \cdot V_{\text{ad}}} = \frac{J_{\text{mak}}}{V_{\text{ad}}} \left[\frac{e^{eV_{\text{mak}}/A_0 kT}}{e^{eV_{\text{ad}}/A_0 kT}} \right] \quad (5-1)$$

Açık devre ve kısa devre şartları altında çalıştırılan bir güneş pilinin çıkışından herhangi bir güç alınamaz. Fakat maksimum çıkış gücü J ve V 'nin herhangi bir değeri için elde edilir.

Güneş pilinin çıkışından maksimum güç elde edebilmek için çıkışına bağlanmış yük direncinin (R_L) uygun bir şekilde seçilmesi gerekir. Bu seçim için yük direncinin değeri $R_L \approx \frac{V_{\text{ad}}}{J_{\text{kd}}}$ olmalıdır.

p-n eklemli ideal bir fotovoltajik güneş pilinin ($R_s = 0$, $R_{sh} = \infty$) akım voltaj karakteristiği karanlıkta aşağıdaki gibi bir bağıntı ile verilir.

$$J_d = J_0 (e^{eV_d/A_0 kT} - 1) \quad (5-2)$$

Güneş pilinin kusurlu olması durumunda yani kaçak akımlar söz konusu ise o zaman (5-2) bağıntısı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$J_d = J_0 \left[\left(e^{eV_d/A_0kT} - 1 \right) \right] - J_r \left[\left(e^{eV_d/A_0kT} - 1 \right) \right] - \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (5-3)$$

(5-3) denklemindeki V_d p-n eklem diyodundaki gerilim düşmesini, J_d net diyod akım yoğunluğunu, J_r tekrar birleşme akım yoğunluklarını gösterir. J_0 ve J_r sıcaklığa, konsantrasyona ve eklem alanına bağlıdır. Ayrıca J_0 taban bölgesinin genişliğine ve J_r ise uzay yük bölgesinin genişliğine de bağlıdır. J_0 ve J_r akımları,

$$J_0 = a \frac{e D n_i^2}{NL} \tanh(d/L)$$

$$\approx a \frac{e n_i^2 d}{N\tau} \quad (L \gg d \text{ için}) \quad (5-4)$$

$$J_r = a \frac{e n_i w}{2\tau} \quad (5-5)$$

ile verilir. Burada a eklem alanını, N katkı konsantrasyonunu, d taban bölgesinin genişliğini, D ve L azınlık taşıyıcı yüklerin difüzyon katsayısını ve difüzyon uzunluğunu, w uzay yük bölgesinin genişliğini, τ birleşme ömrünü ve n_i saf durumdaki taşıyıcı konsantrasyonu gösterir. ($n_i(T)$ silisyum için değeri aşağıdaki bağıntı ile verilir. n_i birimi cm^{-3} dür.

$$n_i(T) = 3.9 \times 10^{16} T^{3/2} e^{-E_g/2kT}$$

Aydınlatılmış bir güneş pilinin çıkışına bağlanmış olan yük direnci (R_L) üzerindeki voltaj V_L , dirençten akan akım yoğunluğu J_L ve ışınlar tarafından oluşturulmuş fotoakım J_f ise

$$V_d = V_L + I_s R_s \quad (5-6)$$

$$J_L = J_f - J_d$$

$$J_f = e \int \frac{hc}{E_g} = \lambda \quad F(\lambda) [1 - R(\lambda)] Q(\lambda) d \quad (5-7)$$

şeklinde ifade edilirler. Burada $F(\lambda)$, λ dalgaboyuyla gelen, birim dalgaboyu başına güneş ışınlarının akı yoğunluğunu, $Q(\lambda)$, λ dalgaboyuyla ışınların oluşturduğu azınlık taşıyıcıların toplama verimini ve $R(\lambda)$ güneş pili yüzeyinin yansıtma katsayısını göstermektedir.

Güneş piline gelen ışınların elektron-hol çifti oluşturabilmesi için

$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g} \quad (5-8)$$

şartını sağlaması gerekir. Aksi halde fotoakım oluşmaz. Burada h Planck sabitini, c güneş ışınının hızını, E_g yasak enerji aralığını gösterir.

Bir güneş pilinin veriminin hesap edilebilmesi için akım-voltaj karakteristiğinden geniş ölçüde faydalanılarak yapılır. Bir güneş pilinin akım-voltaj (I - V) karakteristiği üç ayrı yöntemle elde edilebilir. Birincisi sabit bir ışık şiddeti altında değişken bir direncin açık devre ve kısa devre durumları arasında değiştirilerek pilin çıkış uçları arasındaki gerilime karşı dirençten geçen akımın ölçülmesiyle, ikincisi güneş pili karanlıkta bir dış DC besleme kaynak yardımıyla diyod gibi çalıştırılarak ve üçüncüsü ise şiddeti değiştirilebilen bir ışık kaynağın aydınlatması altında V_{ad} ve I_{kd} değerlerinin ölçülmesiyle I - V karakteristiği elde edilir. En basit ve en yaygın kullanılanı birinci yöntemdir.

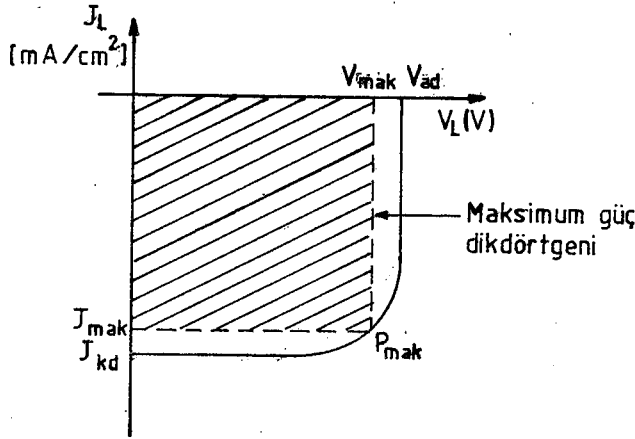
Bir güneş pilinin dış devresine bağlanmış R_L yükünden geçen akım yoğunluğu J_L , aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\begin{aligned} J_L &= J_f - J_d \\ &= J_f - J_0 \left[e^{\frac{eV_d}{A_0 kT}} - 1 \right] - J_r \left[e^{\frac{eV_d}{2A_0 kT}} - 1 \right] - \frac{V_d}{R_{sh}} \\ J_L &= J_f - J_0 \left[\exp\left(\frac{V_L + I_s R_s}{V_T} - 1\right) \right] - J_r \left[\exp\left(\frac{V_L + I_s R_s}{2V_T} - 1\right) \right] \\ &\quad - \frac{V_L + I_s R_s}{R_{sh}} \end{aligned} \quad (5-9)$$

ile verilir. Burada I_s , R_s den geçen akımı göstermektedir. $V_T = \frac{A_0 k T}{e}$ termal potansiyeldir. $J_r \approx 0$ ve $R_{sh} = \infty$ şartı için (5-9) denklemini yeniden yazılırsa

$$J_L = J_f - J_0 \left[\exp \frac{V_L + I_s R_s}{V_T} - 1 \right] \quad (5-10)$$

olur.



Şekil 5.2 Bir güneş pilinin akım-voltaj karakteristiği

Fotovoltaik bir güneş pilinin maksimum çıkış güç yoğunluğu onun akım-voltaj karakteristik eğrisi içerisinde kalan en büyük alanlı dikdörtgene karşılık gelir.

Fotovoltaik bir güneş pilinin çıkış güç yoğunluğu P_ζ , R_L yük direnci üzerindeki V_L gerilimi ve bu yük direncinden geçen J_L akım yoğunluğunun çarpımı ile verilir. Yani,

$$P_\zeta = J_L V_L \quad (5-11)$$

dir. Bu ifade de J_L nin (5-10) denklemindeki değerini koyarak P_ζ aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$P_{\zeta} = J_f - J_0 \left[\exp\left(\frac{V_L + I_s R_s}{V_T}\right) - 1 \right] \cdot V_L \quad (5-12)$$

Eğer (5-12) bağıntısının V_L ye göre türevi alınıp sifıra eşitlenerek ve bazı düzeltmeler yapıldığında maksimum güç noktasına karşılık gelen maksimum voltaj (V_{mak}) ifadesi bulunur. Yani,

$$\frac{dP_{\zeta}}{dV_L} = 0 \quad (R_s \approx 0)$$

ve

$$\exp\left(\frac{V_{mak}}{V_T}\right) \left(1 + \exp\left(\frac{V_{mak}}{V_T}\right)\right) = \left(1 + \frac{J_f}{J_0}\right) \quad (5-13)$$

Maksimum güç noktasına karşılık gelen maksimum akım yoğunluğu, J_{mak}

$$J_{mak} = J_0 \left[\exp\left(\frac{V_{mak}}{V_T}\right) - 1 \right] \left(\frac{V_{mak}}{V_T}\right) \quad (5-14)$$

ile verilir. Denklem (5-13) ve (5-14) den faydalanarak güneş pilinin maksimum çıkış güç yoğunluğu P_{mak} ,

$$P_{mak} = J_{mak} \cdot V_{mak} \quad (5-15)$$

$$P_{mak} = \left(\frac{V_{mak}^2}{V_T}\right) \left(1 + \frac{V_{mak}}{V_T}\right)^{-1} \cdot \left[J_f \left(1 + \frac{J_0}{J_f}\right) \right] \quad (5-16)$$

dir. J_f fotoakımı, J_0 ters doyum akımından büyük olduğundan, $\frac{J_0}{J_f} \approx 0$ kabulü yapılarak (5-15) denklemi yeniden yazılabilir.

$$P_{mak} = \left(\frac{V_{mak}^2}{V_T}\right) \left(1 + \frac{V_{mak}}{V_T}\right)^{-1} \cdot J_f \quad (5-17)$$

Aydınlatılmış fotovolttaik bir güneş pilinde fotoakımı oluşturan ve enerjileri yasak enerji aralığından büyük olan fo-

tonlarının sayısı n olduğu düşünülürse, kısa devre akım yoğunluğu $J_{kd} = -J_f$ ve $J_f = K \cdot n_f$ olur. Buradaki K , yansımadan, geçirgenlikten ve çarpışmalardan kaynaklanan bir sabittir. $K=1$ ise güneş pili ideale yakındır.

Denklem (5-16) daki $\frac{V_{mak}}{V_T} \gg 1$ olduğu zaman "1" terimi ihmal edilebilir ve bu denklem aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir.

$$P_{mak} = J_f \cdot V_{mak} \quad (5-18)$$

P_{mak} güç yoğunluğunu, n_f cinsinden ifade edildiğinde,

$$P_{mak} = K \cdot n_f \cdot V_{mak} \quad (5-19)$$

veya

$$P_{mak} = n_f \cdot V_{mak} \quad (K=1 \text{ için}) \quad (5-20)$$

şeklinde olur. Fotovoltaik bir güneş pili üzerine gelen fotonların toplam sayısı N_f ve her bir fotonun enerjisi E_{foton} ise pil üzerine gelen güç yoğunluğu P_{in} , denklem (5-21) ile verilir.

$$P_{in} = A_T \int_0^{\infty} F(\lambda) \frac{hc}{\lambda} d\lambda = N_f \cdot E_{foton} \quad (5-21)$$

Fotovoltaik bir güneş pili üzerine gelen ve $\frac{hc}{\lambda} \geq E_g$ şartını sağlayan fotonların sayısı ne kadar büyük ise P_{in} (incident power) o derece büyük olur.

Fotovoltaik bir güneş pilinin çevrim verimi η , pilin çıkış güç yoğunluğunun, pil üzerine gelen ışınların güç yoğunluğuna oranı olarak verilir. Güneş pilinin çıkış güç yoğunluğu P_L ile gösterilirse, verim

$$\eta = \frac{P_L}{P_{in}} = \frac{(GE)(FF)(1-P_s) \frac{e}{hc} \int_0^{\infty} [1-R(\lambda)] [1-e^{-\alpha(\lambda)d}] n_{TOP} \cdot P_{in}(\lambda) \lambda d\lambda}{\int_0^{\infty} P_{in}(\lambda) d\lambda} \quad (5-22)$$

ile verilir¹. Buradaki GE gerilim etkeninin, FF gil faktörünü veya eğri etkenini, P_s seri direnç üzerinde kaybolan güç yoğunluğunu, $R(\lambda)$ pil yüzeyindeki yansıma katsayısını, $e^{-\alpha(\lambda)d}$ absorpsiyon

oranını, η_{TOP} azınlık taşıyıcıların toplama verimini, d yarıiletken materyalin kalınlığı ve λ gelen ışınların dalga boyunu gösterir. (5-22) denklemindeki terimlerin eşdeğerlerini yerlerine koyarak ve bazı kısaltma işlemlerinden sonra yeniden ifade edilebilir.

$$GE = \frac{V_{ad}}{E_g} \quad FF = \frac{J_{mak} \cdot J_{mak}}{J_{kd} \cdot V_{mak}} \quad \eta_{TOP} = \frac{J_n(\lambda) + J_p(\lambda)}{eN(\lambda) [1 - e^{-\alpha(\lambda)d}]}$$

$$N(\lambda) = N_i(\lambda) [1 - R(\lambda)]$$

Buradaki $N_i(\lambda)$ birim zamanda birim hacim başına foton aksıdır. O halde (5-22) bağıntısı bu ifadelerle göre yeniden yazıldığı zaman aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\eta = \frac{\left(\frac{1}{hc}\right) \left(\frac{1}{E_g}\right) \left(\frac{J_{mak} \cdot V_{mak}}{J_{kd}}\right) (1 - P_s) \int_0^{\infty} \left(\frac{J_n(\lambda) + J_p(\lambda)}{N_i(\lambda)}\right) P_{in} \lambda d\lambda}{\int_0^{\infty} P_{in}(\lambda) d\lambda} \quad (5-23)$$

Fotovoltaik güneş pilleri için, sadece doğal sınırlama etkenlerinden oluşan limit dönüşüm verimi aşağıdaki gibi verilir.

$$\eta_{lim} = (GE)(FF) \left[\frac{e}{hc} \int_0^{kesim} P_{in}(\lambda) \lambda d\lambda \right] \left[\int_0^{\infty} P_{in}(\lambda) d\lambda \right]^{-1} \quad (5-24)$$

Burada yapılan kabüller, $R(\lambda) = 0$, tam absorpsiyon, elektron-hol çiftlerinin % 100 toplanması ve seri direnç kayıplarınının sıfır olmasıdır. Fakat hiçbir zaman limit dönüşüm verimine ulaşılamaz.

Fotovoltaik bir güneş pili için maksimum çevrim verimi

$$\eta_{mak} = \frac{P_{mak}}{P_{i,n}} \times 100 \quad P_{mak} = J_{mak} \cdot V_{mak} \quad (5-25)$$

$$= \frac{J_{\text{mak}} \cdot J_{\text{mak}}}{P_{\text{in}}} \times 100$$

$$FF = \frac{J_{\text{mak}} \cdot V_{\text{mak}}}{J_{\text{kd}} \cdot V_{\text{ad}}}$$

$$\eta_{\text{mak}} = \frac{FF \cdot J_{\text{kd}} \cdot V_{\text{ad}}}{P_{\text{in}}} \times 100$$

$$P_{\text{in}} = N_f \cdot E_{\text{foton}} \quad (5-26)$$

$$\eta_{\text{mak}} = \frac{J_{\text{kd}} \cdot V_{\text{ad}}}{N_f \cdot E_{\text{foton}}} \times 100$$

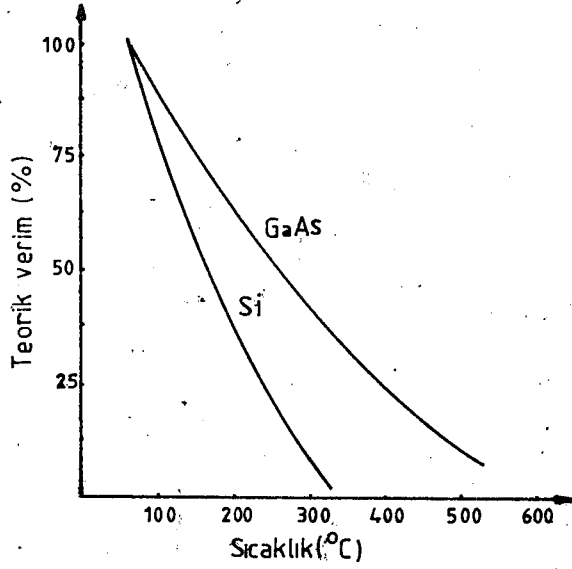
$$(FF=1, R_s=0, R_{sh}=\infty) \quad (5-27)$$

ile verilir. Burada N_f gelen fotonların toplam sayısı, E_{foton} her bir fotonun enerjisini gösterir.

Fotovoltaik güneş pili hakkında bilgi edinmek için pilin akım-voltaj karakteristiğini çizerek bazı temel parametrelere bakmak gerekir. Bunlar açık devre voltajı, kısa devre akım yoğunluğu ve fil faktörüdür. Güneş pillerinden yüksek verim elde etmek için fotonlar tarafından oluşturulan elektron-hol çiftinin p-n eklemine yakın bölgelerde oluşturulması, çünkü donör ve akseptör atomlarının meydana getirdiği sabit birleşme merkezleri taşıyıcı yüklerinin ömürlerini önemli ölçüde azaltır. Bu durum fotoakımın değerini azaltacağından pil çıkış gücü buna bağlı olarak azalır, dolayısıyla pilin çevrim verimi düşer. Güneş pillerinin verimini seri ve şönt dirençlerde düşürür. İyi bir pil dizaynı ile bu dirençlerin etkileri azaltılabilir. R_s ve R_{sh} dirençleri güneş pilinin I-V karakteristik eğrisinin eğiminden hesaplanabilir¹⁵.

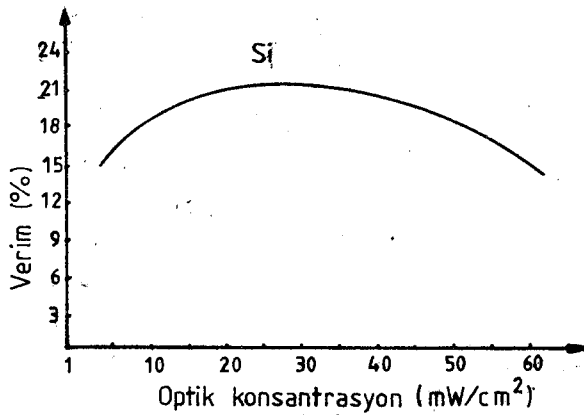
$$\left(\frac{dI_d}{dV} \right)_{I_d=0} \approx \frac{1}{R_s} \quad \left(\frac{dI_d}{dV} \right)_{V_d=0} \approx \frac{1}{R_{sh}} \quad (5-28)$$

Güneş pilinin sıcaklığı, verimin düşmesine neden olur. Sıcaklığı düşük olarak muhafaza etmek için uzayda kullanılacak pillerin üzeri erimiş silikondan yapılmış şeffaf bir örtü ile kaplanır. Bu örtü çok katlı bir filtre özelliği gösterir ve morötesi ışınları pil yüzeyinden yansıtır¹⁵. Ayrıca uzay dışındaki parça-



Şekil 5.3 Si ve GaAs güneş pilleri için teorik verimin sıcaklıkla değişimi

cık radyasyonu yarıiletkenlerde bir takım kusurlar meydana getirdiği için pilin verimini düşürmektedir.



Şekil 5.4 Güneş pilinin veriminin optik konsantrasyonla değişimi

Şekil 5.4 den verim, başlangıçta optik konsantrasyonla yükselmesine karşılık, optik konsantrasyon arttıkça eksponansiyel olarak düşmeye başlamaktadır. Çünkü, konsantrasyonun artmasıyla meydana gelen taşıyıcı yüklerinin tamamı toplanamaz ve tekrar birleşmeyle yok olurlar.

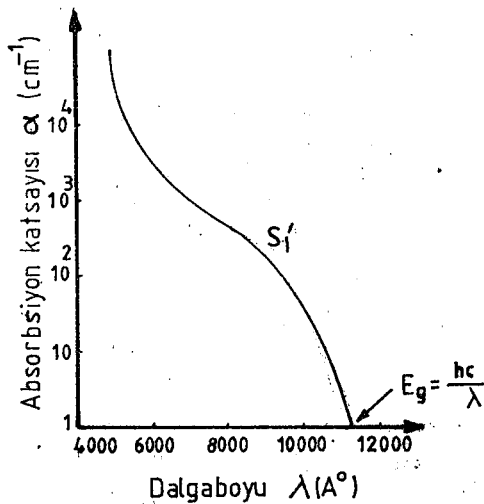
5.2 Fotovoltaik Güneş Pillerinin Verimini Etkileyen Faktörler

Fotovoltaik güneş pillerinin, güneş enerjisini elektrik enerjisine çevrim verimi, diğer enerji çevrim sistemlerine göre daha düşüktür. Verimin düşük olması iki temel sınırlamadan kaynaklanmaktadır. (i) Giderilmesi mümkün olmayan doğal sınırlamalar, (ii) Çözümü olan veya etkileri azaltılabilen teknolojik sınırlamalar¹.

5.2.1 Doğal Etkenler

1. Tam Olmayan Absorbsiyon

Fotovoltaik güneş pilleri, yasak enerji aralığına karşılık gelen dalgalıboylarına sahip olan ışınları absorblarlar. Yasak enerji aralığından daha küçük enerjili ışınları absorblayamazlar. Böylece bir kesilme meydana gelir. Absorbsiyon katsayısının, yasak enerji aralığına yakın dalgalıboylarında değişimi daha hızlıdır.



Şekil 5.5 Absorbsiyon katsayısının dalgalıboyu ile değişimi

Şekil 5.5. de, E_g den sonra absorpsiyon olmadığı görülmektedir. $\alpha(\lambda)$ nın küçük olması fotonların derine nüfuz ettiğini ve yetersiz foton-elektron etkileşmesinden dolayı maddenin bir tarafından diğer tarafa geçişi ifade eder. Böyle bir geçişten doğan P_{gk} güç kaybı

$$P_{gk} = \int_0^{\infty} P_{in}(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)d} d\lambda \quad (5-29)$$

ile verilir. Burada $P_{in}(\lambda)$ gelen radyasyonun güç yoğunluğunu, d yarıiletken tabakanın kalınlığını ve $e^{-\alpha(\lambda)d}$ absorblanmayan enerji kesrini gösterir.

Absorpsiyon kaybı, yasak enerji aralığında oluşturulacak tuzak seviyeleri ve farklı yasak enerji aralıklı materyallerden çoklu tabakaların oluşturulmasıyla azaltılabilir.

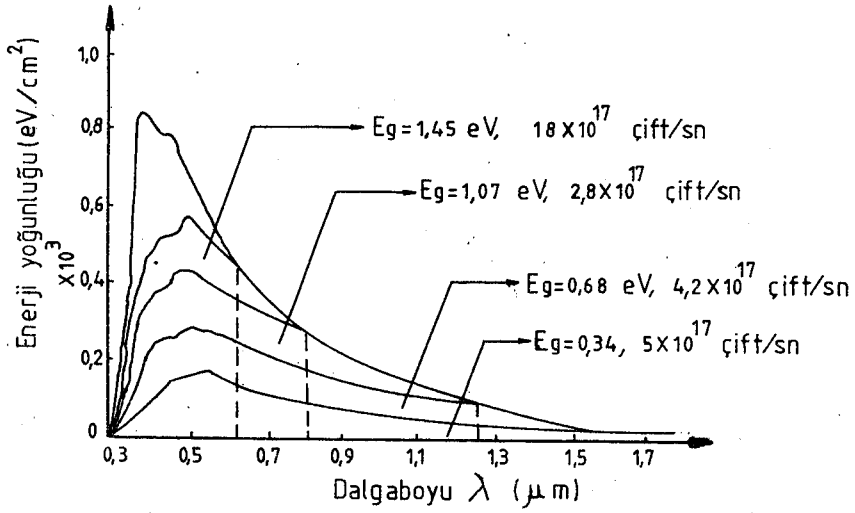
2. Foton Enerjisinin Tamamının Elektron-Hol Çiftinin Oluşturulmasında Kullanılmaması

Absorblanmış fotonların büyük bir kısmı elektron-hol çiftinin oluşması için gerekli olan enerjiden daha büyük enerjiye sahiptir. Fotonların fazla enerjileri ısıya dönüşür yani örgü titreşimlerine katkıda bulunur. Bundan dolayı bir enerji kaybı meydana gelir. Bu enerji kaybı güneş spektrumundan kolayca hesaplanabilir.

Şekil 5.6 da görüldüğü gibi güç kaybı, küçük yasak enerji aralıklı materyallerde daha büyük olmaktadır.

3. Gerilim Etkeni

Fotovoltaik bir güneş pilinde elektron-hol çiftinin üretimi için kullanılabilir enerji miktarı yasak enerji aralığının değerine eşittir. Kazanılan enerji miktarı yasak enerji aralığından her zaman daha küçük olacaktır. Çünkü p-n eklemine uygulanabilir maksimum gerilim eklemnin engel yüksekliğine ($e\phi_0$) eşittir. ϕ_0 , p ve n tipindeki Fermi enerji düzeyleri arasındaki farka eşittir. Fermi enerji düzeyi iletim ve valans bandı arasında bir yerde bulunur, bu nedenle $e\phi_0$, yasak enerji aralığın-



Şekil 5.6 Güneş ışınlarının dalgaboyuna karşılık enerji yoğunluğunun ortalama bir grafiği

dan (E_g) daima küçüktür. Gerilim etken aşağıdaki ifade ile verilir.

$$GE = \frac{V_{ad}}{E_g}$$

4. Eğri Etkeni

Fotovoltaik güneş pilinin akım-voltaj karakteristiğinin maksimum güç noktasına karşılık gelen alan toplam alanın bir kesridir. Bu nedenle aradaki fark eğri etkeninden ileri gelen kayıptır. Bu eğri etkeni maksimum güç noktasına karşılık gelen maksimum akım ve maksimum gerilim çarpımlarının açık devre ve kısa devre akımının çarpımlarına oranı olarak verilir. Bu orana fil faktörü adı verilir. Eğri etkeni ya da fil faktörü (FF) aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$FF = \frac{J_{mak} \cdot V_{mak}}{J_{kd} \cdot V_{ad}}$$

veya,

$$FF = \left[1 - \frac{A_0 kT}{e} \left(1 + \frac{eV_{\text{mak}}}{A_0 kT} \right) \right] \left[1 - \frac{J_0}{J_f} e^{\left(\frac{eV_{\text{mak}}}{A_0 kT} - 1 \right)} \right] \quad (5-30)$$

Eğri etkeni ve gerilim etkenleri uygun yasak enerji aralıklı materyallerin seçimiyle ve uygun katkılama seviyeleri ile azaltılabilir.

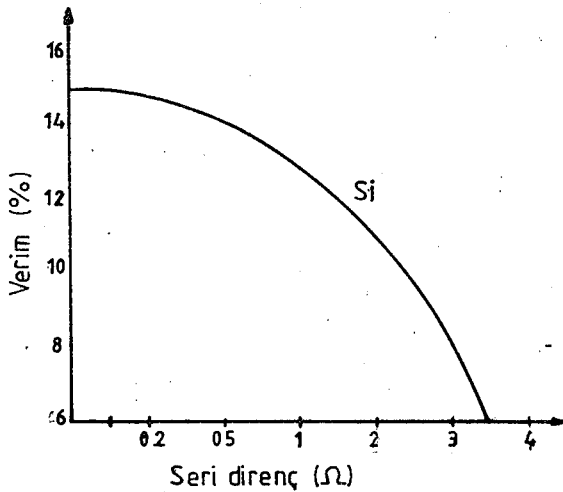
5.2.2 Teknolojik Etkenler

1. Güneş Pilinin İç Seri Direncinden İleri Gelen Kayıplar

Güneş pilinin iç seri direncinden dolayı akım-voltaj karakteristik eğrisinde bir sapma meydana gelir. Seri dirençten ileri gelen kayıplar pil teknolojisinin gelişmesiyle giderilebilir. Seri dirençten geçen akım yoğunluğu I_s , seri direnç R_s ve bu direncin üzerinde harcanan güç yoğunluğu P_s

$$P_s = I_s R_s = \left[J_0 \left(e^{\frac{e}{A_0 kT} (V_d - I_s R_s)} - 1 \right) - J_f \right] R_s \quad (5-31)$$

ile verilir. J_s aynı zamanda pil çıkışındaki yük direncinden geçen akım yoğunluğuna eşittir. V_d diyod voltajını gösterir.



Şekil 5.7 Bir güneş pilinin veriminin iç seri dirençle değişimi

Şekil 5.7 de görüldüğü gibi güneş pilinin iç seri direnci artarken verimi düşmektedir.

2. Fotovoltaik Güneş Pili Üzerindeki Yansıma Kayıpları

Yansıma kayıpları materyalden materyale göre değişmektedir. Silisyum için yansıma katsayısı $R(\lambda)$ oldukça düşüktür. Bu yansıma kayıpları pil teknolojisinin gelişmesi ile azaltılabilir. Pil yüzeyine antiyansıtıcı bir madde kullanılarak bu kayıplar azaltılabilir.

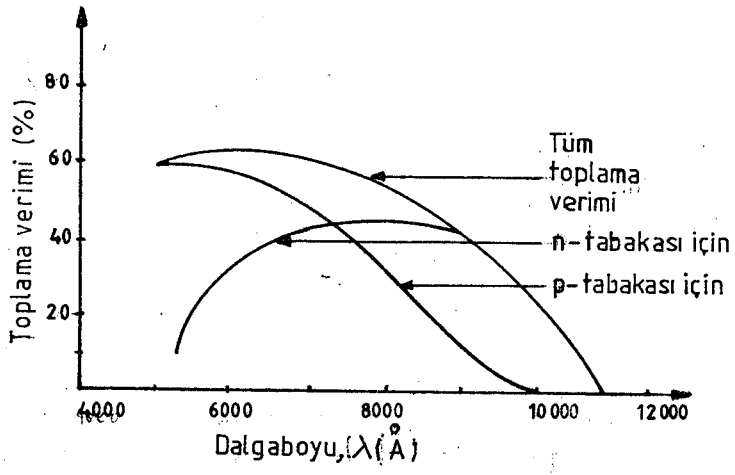
3. Toplama Kayıpları

Güneş pilinde ışınların etkisiyle oluşan elektron-hol çiftleri eğer p-n eklem bölgesinden uzakta oluşmuşlarsa, tekrar birleşmeden dolayı yok olurlar ve bu durum toplama veriminin azalmasına sebep olur. η_{TOP} toplama verimi

$$\eta_{TOP} = \frac{J_n(\lambda) + J_p(\lambda)}{eN(\lambda) [1 - e^{-\alpha(\lambda)d}]} \quad (5-32)$$

ile verilir. Burada $J_n(\lambda)$ ve $J_p(\lambda)$ elektron ve hollerin akım yoğunluklarını, $N(\lambda)$ güneş pili tarafından absorblanan fotonların akışını gösterir. $N_{in}(\lambda)$ pil üzerine gelen fotonların akışı olmak üzere $N(\lambda)$ ile aralarında, $N(\lambda) = N_{in}(\lambda) [1 - R(\lambda)]$ gibi bir bağıntı vardır.

Toplama verimi küçük dalgalı boyları için p-tabakasında, büyük dalgalı boyları için n-tabakasında daha büyüktür.



Şekil 5.8 Toplama verimin gelen ışınların dalgaboyu ile değişimi

BÖLÜM VI

GÜNEŞ PİLLERİN UYGULAMALARI

Güneş pillerinin yeryüzünde ve uzayda çeşitli uygulama alanları vardır. İlk zamanlar yalnız uzay çalışmalarında kullanılan güneş pilleri daha sonra yeryüzünde kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle 1973 yılında dünyada baş gösteren petrol krizinden sonra güneş pilleriyle ilgili çalışmalara önem verilmeye başlanmıştır.

Enerji üretim merkezlerinden uzak olan veya enerji hattı döşenmesinin güç olduğu yerleşim merkezlerinin enerji güneş pilleriyle temin edilir. Bu durum güneş pili panelleri ile sağlanabilir. Örneğin, bu yolla elde edilen elektrik enerjisi ile TV, buzdolabı ve radyo gibi cihazlar çalıştırılabilir.

Güneş pilleri ilk defa 1956 yılında uzaya gönderilen Vanquard-I uydusunda kullanıldı. Bu uydunun 5MW'lık verici antenin enerji ihtiyacı 6 adet güneş pili kullanılarak sağlanmıştır⁵. Böylece güneş pillerinin uzay çalışmalarında kullanılabileceği anlaşılmış oldu. 1960 yılındaki "Apollo Projesiyle" uzay çalışmalarında uzaya gönderilecek araçların enerji ihtiyaçları güneş pilleriyle sağlanması kararlaştırılmıştır⁵.

Bugün halen Japonya'da deniz fenerlerinin, A.B.D.'de orman gözetleme kulüplerinin enerji ihtiyaçları güneş pilleri ile sağlanmaktadır. Pakistan'da kurulmuş 600 Watt lık bir su pompası tamamen güneş pilleriyle elde edilen enerjiyle çalıştırılmaktadır. Yine Pakistan'da bir deniz fenerinin ve buradaki personel lojmanının enerji ihtiyacı güneş pilleriyle temin edilmektedir.

ABD'de Arizona eyaletinde bulunan Schuchuli kasabasının elektrik enerjisi 3500 Watt'lık güneş pili santraliyle temin edilmekte ve eldedilen elektrik, akümülatörlere depolanarak sürekli kullanımı sağlanmaktadır. Bu tesis 1978 yılında hizmete açılmış ve NASA tarafından desteklenmiş ve maliyeti 33 milyon dolardır¹¹

Güneş pili ile çalışan ilk uçak 1979 yılında Larry Mauro adında bir şahıs tarafından yapılan bu uçak 40 km/saat.'lik bir hızla ve 12 m lik bir yükseklikte uçmuştur. Bu uçağın enerjisi kanatların yerleştirilmiş silikon güneş pilleriyle temin edilmiştir¹⁸.

Güneş pillerinin diğer bazı uygulamaları aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. Güneş pilleri büyük ölçüde luxmetre ve fotoğraf makinelerinde,
2. Transistörlü amplifikasyon devrelerinde,
3. Bir rölenin çalıştırılmasında, röle bir kontak anahtarına bağlı ise,
 - a. Yangın alarmı sistemlerinin çalıştırılması,
 - b. Güneş batınca sokak ve vitrin lambalarının yakılması,
 - c. Gemi ambarlarında çıkan yangınların ihbarında,
4. Küçük otomobillerin çalıştırılmasında kullanılır.

1985 yılında Avrupa'da güneş pilleriyle çalışan bir otomobil yarışması yapılmıştır. Avustralya'da ve İsrail'de deneme amacıyla birer otomobil çalıştırılmıştır.

Güneş pillerinin ekonomik bakımdan pahalı olması, kullanım alanlarını büyük ölçüde sınırlamaktadır. O halde güneş pillerinin yeryüzünde yaygın kullanılabilmesi için yüksek verimle çalışması ve ucuz olması gerekir.

SONUÇ

Dünya enerji üretimi her geçen gün büyük bir hızla artmakta ve buna paralel olarak da maliyet yükselmektedir. Bilim adamlarının ve araştırma gruplarının önemle üzerinde durdukları, güneş pilleriyle sağlanan enerjinin dünya enerji üretimine büyük bir katkısı olduğu söylenemez. Fakat tahmini hesaplara göre 21. ci asrın ilk yarısına doğru dünya enerji üretimine önemli ölçüde katkısı olacağı tahmin edilmektedir.

Bugün güneş pilleri yeryüzünde ve uzayda çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. Bu nedenle yeryüzü uygulamalarının yaygın olması için yüksek verimli ve ucuz, uzay çalışmalarında sıcaklığa ve radyasyona dayanıklı güneş pillerinin yapılması gerekir. Çünkü atmosfer dışında radyasyon şiddeti fazla olduğundan güneş pillerinde kullanılan materyallerde bir takım kusurlar oluşturmaktadır. Güneş pillerinin yeryüzünde kullanımını yaygınlaştırmak için pil yapımında kullanılacak materyallerin ucuz bir şekilde elde edilmesini sağlamak ve güneş pilinin verimliliğini düşüren teknolojik etkenlerin giderilmesini sağlayabilecek bir pil teknolojisinin geliştirilmesi gerekir. Bunun için de önceden güneş pilleriyle ilgili bilgi potansiyelinin elde edilmesi ve fermi araştırma yerine grup araştırmalarının teşvik edilmesine büyük önem verilmesi gerekir. Çünkü, dünyada büyük bir hızla gelişen pil teknolojisi ancak bu şekilde takip edilebilir.

Güneş pillerinin diğer enerji kaynaklarına göre bazı avantajları ve dezavantajları vardır.

A. Avantajları

1. Özel uygulamalar için ağırlık birimi başına yüksek güce sahiptirler.
2. Ömürleri uzundur. Yaklaşık 20-30 yıl arasındadır.
3. Hareketli mekanik kısımları olmadığı için sessiz çalışırlar.

4. Artık maddeleri olmadığı için çevre kirliliği yaratmazlar.
5. Hafif olduğundan taşınmaları kolaydır.
6. Güneş pilleri yüksek verim elde etmek için yüksek sıcaklığı ihtiyaç duymayan, cihazlardır.

B. Dezavantajları

1. Güneş pillerinin enerji kaynağı ışık olduğu için ancak ışıklar var olduğu sürece çalışır.
2. Kurulmuş veya kurulması planlanan büyük fotovolttaik güneş pili santralının bakımı güçtür.
3. Güneş pili teknolojisi tam gelişmediğinden güneş pili pahalıdır.

TABLOLAR

Heteroeklem	V (V)	η (%)
n-GaP/p-Si	0,670	24
n-GaP/p-InP	0,810	25
n-GaP/p-GaAs	0,820	21
n-GaAs/p-InP	0,690	25
p-GaP/n-Si	0,690	30
p-GaP/n-InP	0,940	28
p-GaP/n-GaAs	1,050	
p-GaAs/n-InP	0,930	30

Tablo.1 Çeşitli p-n heteroeklem güneş pillerinin AMO için hesaplanmış açık devre voltajları ve verimlilikleri

Güneş Pilleri	X_j (μ)	d (μ)	S_{f-1} cm ² sec	L_n (μ)	L_p (μ)	D_n cm ²	D_p sec ⁻¹	N_d cm ⁻³	N_a cm ⁻³	τ_n sec	τ_p sec
n-ZnSe/p-GaAs	7.5	125	10	2.8	0.2	80	0.5	10	5.10	10 ⁻⁹	10 ⁻⁹
n-GaP/pSi	0.5	500	10	2.15	0.3	23	1	10	2.10	2.10 ⁻⁵	10 ⁻⁹
n-Si/p-Si	0.5	500	10	2.15	1.7	23	3	10	2.10	2.10 ⁻⁵	10 ⁻⁸
n-GaAs/p-GaAs	0.5	125	10	3.5	2	125	4	10	10	10 ⁻⁹	10 ⁻⁸

Tablo.2 Çeşitli güneş pillerinin parametreleri

Yıllar	Toplam Üretim Kapasitesi (MW)	Toplam. Satışlar (MW)
1977	1	0.5
1978	2	1
1979	3.5	1.5
1980	5.5	3
1981	9	5
1982	15-17	8-10

Tablo 3. Dünya genelinde fotovoltaik güneş pili üretim kapasitesi ve satışlar

KAYNAKLAR

1. M. WOLF IRE., 48, 1246, (1960).
2. H.J. HOVEL "Semiconductor and Semimetals", 11, Acedemik Press, New-York, (1975).
3. L.L. KEZMERSKİ and G.A. SANBORN J. Applied Phys., 48, 3178, (1977).
4. Ç. ERÇELEBİ ve E. ÖZSAN EİE Tebliğler Dergisi, (1984).
5. M. ORAL "Güneş Pilleri" Ege Üniversitesi (1979).
6. U. BUGET "p-n Eklemi" Meteksan, Ankara (1983).
7. J.P. McKELVEY "S.S. and Semiconductor Physics" HIE, New-York (1966).
8. J. MILMAL and C.C. HALKIAS "Elektronik Düzenler ve Devreler" 2, İst., (1984).
9. L.V. AZAROFF and J.J. BROPHY "Elektronik Processes In Materials", Tokyo, (1963).
10. D.L PULFREY "Photovoltaic Power Generation" VNR Comp., (1978).
11. T. KONAKLIOĞLU EİE. Bülteni No.122-123, 7; (1986).
12. S. BANERJEE and W.A. ANDERSON Appl. Phys. Lett., 49, 7, (1986).
13. J.R. MALLINON and P.T. LANDSBERG Proc. R. Society, A-135, 115 (1977).
14. Y. SKARLATOS Çağdaş Fizik Dergisi, 3-4, 33, (1978-1979).
15. G. GORDIOLL Solar Cells, 14, 219 (1985).
16. D.E. CARLSON IEEE Spectrum, 39, (1980).
17. Y. HAMAKAVA İ.A.E. AGENCY Yayınları, H.4.SMR./156-26, 112, (1985).
18. N. DERİŞ "Güneş Evleri" İstanbul (1984).
19. D.J. MBEWE, H.C. CARD and D.C. CARD, Solar Energy, 35, 247, (1985).
20. M. WOLF and H. RAUCHENBACR A. Energy Conversion, 3 455, (1963).
21. T.J. COUTTS Thin Solid Films, 50, 99 (1978).
22. L. AMMOR and S. MARTINUZZI Solid State Electronics, 29, 1, (1986).