

GÜNEŞ PİLLERİ ve TARİHSEL GELİŞİMİ

Zafer ŞİMŞEK

Y. Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM

2011

Her Hakkı Saklıdır

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜNEŞ PİLLERİ ve TARİHSEL GELİŞİMİ

Zafer ŞİMŞEK

FİZİK ANABİLİM DALI

ERZURUM
2011

Her Hakkı Saklıdır



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



TEZ ONAY FORMU

GÜNEŞ PİLLERİ ve TARİHSEL GEİŞİMİ

Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM danışmanlığında, Zafer ŞİMŞEK tarafından hazırlanan bu çalışma 22/04/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından. FİZİK Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM

İmza :

Üye : Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL

İmza :

Üye : Prof. Dr. Seydi DOĞAN

İmza :

(imza)

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum
Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Ömer AKBULUT

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Y. Lisans Tezi

GÜNEŞ PİLLERİ ve TARİHSEL GELİŞİMİ

Zafer ŞİMŞEK

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM

Bu çalışmada güneş pilleri ve güneş pillerinde kullanılan malzemeler ele alınmıştır. Küresel ısınmanın sonucu olarak yenilenebilir enerjiye olan ihtiyaç son zamanlarda artmıştır. Bu bağlamda enerji kaynağı olarak güneş büyük ölçüde ilgi çekmiştir. Tezin birinci kısmında güneş enerjisinin mahiyeti ve güneş ışınlarının dünyaya olan etkileri incelenmiştir. İkinci bölümde güneş pillerinin tarihsel gelişimi, maddesel yapısı, çalışma prensibi üzerinde durulmuştur. Üçüncü bölümde yaygın olarak kullanılan malzemeler hakkında temel bilgiler verilmiştir. Son olarak, güneş pillerinin gelişimi ve önümüzdeki yıllarda yapılacak olan çalışmalar için tavsiyeler verilmiştir.

Nisan 2011 60 sayfa

Anahtar kelimeler: Güneş enerjisi, güneş pili, güneş pili tarihi

ABSTRACT

Master Thesis

SOLAR CELLS and THEIRS HISTORICAL DEVELOPMENTS

Zafer ŞİMŞEK

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM

In this work, Solar cells and materials used in solar cells were investigated. As a result of global warming, the need for renewable energy has recently increased. In view of this, the sun as energy source has attracted a great deal of attention. A general nature of the solar energy and the effects of sunlight on earth have been investigated in the first chapter. In the second chapter, the historical development of solar cells, their structures, and working principles have been explained. In the third chapter, basic information about the materials used in these cells have been given. Finally, suggestions for development of solar cells and researches of forthcoming years have been given.

April 2011 60 pages

Keywords: Solar energy, solar cells, solar cell history

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nde hazırlanmıştır. Çalışmalarım süresince her türlü desteğini benden esirgemeyen kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Sayın Yrd. Doç. Dr. Mutlu KUNDAKÇI'ya görüş, öneri ve bilgilerini esirgemediği için, Sayın Yrd. Doç. Aykut ASTAM'a tezimin hazırlanmasında bana her konuda yardımcı olduğu için teşekkür ederim. Ayrıca bu çalışmanın gerçekleşmesine imkân sağlayan Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü'nün değerli öğretim üyelerine ve Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün değerli yöneticilerine teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca bana göstermiş oldukları destek ve teşviklerinden dolayı çok değerli aileme teşekkür ederim.

Zafer ŞİMŞEK

Nisan 2011

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
1.GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	6
2.1. Güneş Enerjisi	6
2.2. Yarıiletkenler.....	11
2.2.1.Asal Yarıiletkenler ve Taşıyıcı Yoğunluğu	12
2.2.2. Yarıiletkenlerde Bant Geçişleri	16
2.2.2.a. Doğrudan bant geçişleri	16
2.2.2.b. Dolaylı bant geçişleri	17
2.2.3. Katkılı Yarıiletkenler	18
2.2.3.a. n-tipi Yarıiletkenler	18
2.2.3.b. p-tipi Yarıiletkenler	21
2.3. P-N Ekleme	23
2.4. Fotovoltaik Etki	25
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	26
3.1. Güneş Pilleri.....	26
3.1.1.Güneş pillerinin tarihsel gelişimi	26
3.1.2 Güneş pillerinin yapısı ve çalışması.....	28
3.1.2.a Kısa devre akımı I_{sc}	31
3.1.2.b Açık devre gerilimi V_{oc}	32
3.1.2.c Dolum faktörü (FF	33
3.1.2.d Verim(η)..	34
3.1.2.e Güneş Pillerinde Verimi Etkileyen Faktörler.....	35
3.2. Güneş Pillerinde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	36
3.2.1. Yasak enerji aralığı	36

3.2.2. Soğurma katsayısı (α).....	38
3.2.3. Azınlık taşıyıcıların ömür süresi	39
3.2.4. Örgü sabiti	40
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	41
4.1. Güneş Pillerinde Kullanılan Malzemeler	41
4.1.1 Tek kristal Si	41
4.1.2. Amorf Si.....	42
4.1.3. GaAs.....	42
4.1.4. CdTe / CdS.....	43
4.1.5. Cu(In,Ga)(Se,S) ₂ (CIGS)	46
4.1.6. Organik yarıiletkenler	49
4.1.7. Boya bazlı güneş pilleri.....	51
4.1.8. Hibrid güneş pilleri	52
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	53
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	61

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

α	Soğurma Katsayısı
μm	Mikrometre
Ω	Ohm
cm	Santimetre
eV	Elektronvolt
K	Kelvin
km	Kilometre
kW	KiloWatt
m	Metre
MeV	Megaelektronvolt
Si	Silikon
W	Watt

Kısaltmalar

NMBI	N-metilbenzimidazol
TBP	4-tert-butilpridin
ITO	İndiyum tin oksit

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. AM0 ve AM1.5 koşullarında güneşten yayınlanan enerjinin spektral dağılımı	8
Şekil 2.2. Türkiye'nin güneş enerjisi haritası	11
Şekil 2.3. Asal yarıiletkenlerde fermi enerji seviyesi	15
Şekil 2.4. Yarıiletkenlerde (a) doğrudan, (b) dolaylı bant geçişleri.....	17
Şekil 2.5. (a) P atomu katkılanan n-tipi Si kristali ve (b) iletim elektronunun oluşumu	19
Şekil 2.6. n-tipi bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı	20
Şekil 2.7. (a) B atomu katkılanan p-tipi Si kristali ve (b) hol hareketi	21
Şekil 2.8. p-tipi bir yarıiletkenin enerji-bant diyagramı	23
Şekil 2.9. p-n eklemi	24
Şekil 2.10. p-n eklemi	24
Şekil 3.1. Tek eklemli fotovoltak pilin yapısı	29
Şekil 3.2. Diyot akım- gerilim grafiği	29
Şekil 3.3. Güneş pili akım- gerilim grafiği	30
Şekil 3.4. Güneş pili eşdeğer şeması.....	31
Şekil 3.5. Güneş pili akım-gerilim grafiği	33
Şekil 3.6. Güneşin spektral ışıması	37
Şekil 3.7. Yarı iletken bant aralığı- verim.....	37
Şekil 3.8. Yarıiletken bant aralığı- soğurma katsayısı	39
Şekil 4.1. Superstrate CdTe/CdS güneş pili yapısı	44
Şekil 4.2. En yüksek verim elde edilen CdTe/CdS güneş pili yapısı	45
Şekil 4.3. CuInSe güneş pili yapısı	48
Şekil 4.4. CuInSe güneş pili yapısı	49

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 2.1. Aylara göre Türkiye güneş enerji potansiyeli ve güneşlenme süresi değerleri	9
Çizelge 2.2. Türkiye'nin yıllık toplam güneş enerjisi potansiyelinin bölgelere göre dağılımı	10
Çizelge3.1 Farklı ışıma spektrumları için güneşten gelen ışıma miktarı	34
Çizelge 4.1 En çok kullanılan saydam iletken oksitler (TOC) ve koruyucu tabakaların özellikleri	44

1.GİRİŞ

Fosil yakıtları günümüzde dünyanın kullandığı en temel yakıtlardır. Fakat bu yakıtlar sürekli bir kaynağa sahip olmadığı için tükenme tehlikesiyle karşı karşıyadır. Bununla birlikte fosil yakıtların kullanımı sırasında ortaya çıkan gazlar yeryüzünden geri dönen ışınların atmosferden geçmesini engelleyerek sera etkisi oluşturmakta ve bunun sonucunda da dünyada ortalama sıcaklık artmaktadır.

Dünyayı tehdit eden küresel ısınma karşısında alınması gereken en önemli önlem şüphesiz, karbon tabanlı yakıtlara alternatif, doğaya zararsız, yenilenebilir enerji kaynaklarını yaygınlaştırmaktır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının başında güneş enerjisi gelmektedir.

Güneşin merkezindeki sıcaklık milyonlarca dereceye ulaşırken, yayımlanan ışınımın spektrumunu belirleyen yüzey tabakasının (fotoser) sıcaklığı 6000 °K'dir. Işınım, elektromagnetik özelliğe sahip olup gücün spektral dağılımı (birim dalga boyunda birim alana, birim zamana gelen enerji) sıcaklığın bir fonksiyonudur. Diğer yıldızlardan yeryüzüne elektromagnetik spektrumun değişik aralıklarında enerji gelmektedir. Ancak, yer kürenin temel enerji kaynağı güneş olup, yerküreye gelen ışınımın büyükçe bir bölümü görünür bölgededir. Enerji taşıyan birimler gibi düşünülebilecek “fotonlar”, spektrumun görünür bölgesinin kırmızı tayfında daha küçük enerji, mavi-mor tayfında daha büyük enerji taşırlar. Seçilen bir dalga boyundaki fotonun taşıdığı enerji ve o dalga boyunda birim yüzeye birim zamanda gelen foton sayısı, seçilen dalga boyundaki gücü tanımlar. Dünyamıza güneşten gelen spektrumun, kırmızı ışığın ötesinde kalan kızılötesi ve mor ışığın ötesinde kalan morötesi bölgelerinde bulunan ışınımında toplam enerjiye önemli bir katkısı vardır. Güneşin gücü, yani bir saniyede güneş sistemine verdiği enerji çok büyük olmasına rağmen yer küre atmosferinin dışına ulaşan enerji, yalnızca küçük bir bölümüdür. Güneş ışınımı atmosferi geçerken uğradığı değişimin bağlı olduğu değişkenlerin sayısı oldukça çok olmasına karşın en önemli değişken, ışığın atmosferde aldığı yolun uzunluğudur. Genellikle güneş ışınımı değerlendirilirken atmosfer dışındaki seçilen nokta ele alınır buna hava kütle sıfırı (air mass 0) adı verilir. Havaküre

dışında birim yüzeye gelen toplam güç, tüm spektrumun üzerinden dikkate alınırsa, ulaşılan değer 13267 W/m^2 olup bu değer “güneş değişmezi” olarak kullanılır. Güneş ışınları havaküreyi geçerken spektrumları önemli ölçüde değişikliğe uğrar. Bulutsuz ve güneşli bir havada bile güneş ışınları havaküreyi geçerken su buharı, oksijen, karbondioksit, ozon, azot, metan gibi gaz moleküllerinin yanında aerosol ve toz zerreciklerinden saçılır ve yeryüzüne ancak havaküre dışındaki enerjinin %70’i ulaşır. Deniz seviyesinde açık bir havada optik hava-kütle (air mass); güneş ışınlarının aldığı gerçek yolun, güneş tam tepedeyken aldıkları yola oranı olarak tanımlanır. Örneğin güneş tam tepedeyken bu değer, hava-kütle olarak adı verilir. Yeryüzüne düşen güneş ışınları, doğrudan güneşten gelen ve havakürede saçıldıktan sonra difüzyona uğramış ışınların toplamıdır. Hava koşullarına bağlı olarak doğrudan güneşten gelen ışınların, saçılmış ışına oranı değişir. Örneğin bulutlu bir günde güneş ışınlarının büyük bir bölümü, saçılmış ışınlardan oluşurken, bulutsuz güneşli bir günde güneş enerjisinin büyük bir bölümü doğrudan ışınlardan oluşacaktır. Doğrudan ve saçılmış ışınım toplamı, küresel ışınım olarak adlandırılır. Fotovoltaik sistemlerin seçiminde, güneş ışınım verileri çok büyük önem taşır.

Güneş enerjisi, daha çok binalarda ısıtma, soğutma ve sıcak su elde etmek için kullanılmaktadır. Sıcak su elde etmek amacıyla kullanım, en yaygın olan kullanım biçimidir. Isıtma amacıyla kullanım, ısıyı depolama tekniklerinin gelişimiyle daha verimli hale gelecektir. Soğutma ise yıllık güneşlenme zamanının uzun olduğu bölgelerde verimli olmaktadır.

Güneş pilleri, uzay programları için geliştirilmeye başlanmış; ancak sonraki yıllarda, bilinen yollarla elektrik üretiminin zor olduğu ya da uzak olan deniz fenerleri, orman gözetleme kuleleri, çiftlik evleri, dağ evleri gibi yerlerde de kullanılmaya başlanmıştır.

İkinci bir uygulama türü ise güneş pilleri kullanarak yapılan fotovoltaik uygulamalardır. Üzerine düşen güneş ışınımını direkt olarak elektrik enerjisine çeviren güneş pilleri doğru akım üretirler. Bu piller, seri veya paralel bağlanarak, ürettikleri akım ve gerilim

değerleri yükseltilebilir. Üretilen akımı depolayabilmek için bir akümülatöre gerek vardır.

Geçmişten günümüze kadar yapılan çalışmalara bakıldığında güneş pilleri büyük bir aşama kaydetmiştir. İlk olarak 1839'da Becquarel'le gözlemlenen fotovoltaiik olay günümüzde birçok materyal ve kullanım alanı ile gelişmeye devam etmektedir.

Güneş pilleri zaman içerisinde yapılan çalışmalar ve teknolojinin gelişmesiyle üç farklı nesil içerisinde toplanmıştır.

1. Nesil güneş pilleri:

Birinci nesil güneş pilleri, tek ya da polikristal silisyumun yonga tabanlı ve tek katmanlı p-n eklem diyotlarından oluşmaktadır. Doğada bu malzemelerin bol miktarda bulunması ve ekonomik yönden avantajları sayesinde kullanılmaktadır. Günümüzde güneş pili piyasasının büyük bir bölümünü bu piller oluşturmaktadır.

İlk olarak 1954'de Bell laboratuvarında Chapin tarafından geliştirilmiştir.(Chapin *et al.* 1954) ilk olarak %6 ile başlayan pil verimliliği çok kısa sürede %10 daha sonrada %12 lere kadar yükselmiştir. Tek kristal güneş pilleri üretmek için genellikle Chochralski(CZ) ve Floating Zone(FZ) teknikleri ile büyütülen kristaller kullanılmıştır (Zuhelner 1989; Fischer and Pschunder 1973). FZ tekniği ile yapılan güneş pillerinin verimleri ve kalitesi çok iyi olmasına karşın maliyeti yüksek olduğundan ticari açıdan CZ tekniği daha çok ilgi görmektedir. Fakat bu teknikle yapılan güneş pillerinin safsızlıklarından dolayı taşıyıcıların ömür süreleri kısadır ve bu durum pilin veriminin düşmesine sebep olur. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için çalışmalar devam etmektedir. Son yıllarda CZ yöntemi kullanılarak yapılan Si güneş pilinde verim yaklaşık olarak %22,7 olarak bulunmuştur (Saitoh *et al.*1999).

2. Nesil güneş pilleri:

İkinci nesil güneş pillerinde ince film teknolojisi kullanılır. Kullanım amacına göre uzay ve kara olmak üzere iki gruba ayırabiliriz. Uzay uygulamalarında GaAs ve bileşikleri kullanılırken, kara uygulamalarında ince filmi Si, amorf Si, CIGS(Cu(In,Ga)(S,Se)) ve CdTe malzemeleri kullanılır. İnce film güneş pillerinde amaç soğurma katsayısı yüksek malzemeler kullanılarak malzemenin kalınlığı düşürmek ve böylece malzemenin tasarruf etmesidir. Örnek olarak dalga boyu katsayısı 0.7 mikrondan küçük bir bölgedeki güneş radyasyonu 1 mikron kalınlığındaki amorf silisyum ile soğurulurken, aynı radyasyonu soğurmak için 500 mikron kalınlığında kristal silisyuma ihtiyaç vardır. Uzay uygulamalarında ilk olarak ASEC(Applied Solar Energy Corporation) tarafından 1993 yılında verimi %20 olan GaAs güneş pili kullanılmıştır ve bu gün verimi %30 civarlarındadır. Kara uygulamalarında ise en çok verim CIGS güneş pillerinden elde edilmiştir. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda verimi %19,7 olarak bulunmuştur (Contreras *et al.* 2005). CdTe güneş pillerinde ise CdS ile farklı bir yapı oluşturularak verim artırılmıştır ve verimi % 16'lara varan güneş pilleri üretilmiştir (Ferekides *et al.* 1993). Amorf Si güneş pillerini geliştirmek için hidrojen katkılanarak verim artırılmıştır (Suntola 1992).

3. Nesil güneş pilleri:

Daha yeni olan bu güneş pillerindeki çalışmalar son yıllarda hız kazanmıştır. Bu güneş pillerinde değerlerinin aksine yapı içerisinde p-n eklem yoktur ayrıca maliyeti düşürmek ve fabrikasyonu basitleştirmek ön planda tutulmuştur. Organik, boya sentezli, kuantum kuyulu ve kuantum noktalı güneş pilleri bu grupta yer almaktadır.

Organik güneş pilleri büyük soğurma katsayısına sahip olduklarından güneş pillerinin çok ince bir şekilde yapılmasına imkan sağlar ve az malzeme kullanılarak az maliyetli güneş pilleri üretilir. Dezavantajları olmasına rağmen organik bazlı güneş pilleri umut vaat etmektedir. Organik pillerin verimliliği 1999'a kadar yaklaşık olarak %1 civarında

iken (Meissner 1999) daha sonrasında verim yaklaşık olarak %3,3'e çıkmıştır (Schön *et al.* 2000).

Boya sentezli güneş pillerini diğerlerinden ayıran en temel özelliği akımın azınlık taşıyıcıların aksine çoğunluk taşıyıcılar tarafından sağlanmasıdır. Maliyeti düşük olan bu malzemelerle elde edilen güneş pillerinde, son yıllarda %9 civarında verim elde edilmiştir (Park *et al.* 2010).

Kuantum kuyulu güneş pilleri elde edebilmek için, yasak enerji aralığı geniş (AlGaAs) bir malzemenin arasına GaAs gibi bir malzeme konulur. Laboratuvar şartlarında ise verim %20-25 arasındadır (Bushnell *et al.* 1999).

Bu güneş pillerinin haricinde tandem güneş pilleri (çoklu eklem), çoklu spektrum güneş pilleri, çoklu soğurma güneş pilleri, çoklu sıcaklık güneş pilleri ve arabant yapılı güneş pilleri de mevcuttur. Bu güneş pillerinin temel prensibi, (Luque and Martin 2005; Honsberg 2005) güneş spektrumunun tamamını soğurarak güneş enerjisinden mümkün olduğu kadar maksimum enerji elde etmektir. Bu güneş pillerinin geliştirilmesi konusunda çalışmalar hızla devam etmektedir (Green *et al.* 2003; Trupke *et al.* 2002; Trupke *et al.*, 2002).

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Güneş Enerjisi

Güneş, Samanyolu galaksisinde yer alan orta büyüklükte bir yıldızdır. Küresel geometrideki bu yıldızın çapı yaklaşık 1,4 milyon km'dir ve dünyadan 150 milyon km uzaklıkta bulunur. Güneş çevresinde çok yoğun gazlar vardır (Oktik, 2001). %75 Hidrojen 'den ve %24,9 Helyum'dan oluşmaktadır (Bu oranlar kütleli oranlardır, atom sayılarına göre %92,1 hidrojen ve %7,8 helyum içerir. Geri kalan her şey (metaller), kütlenin ancak %0,1 'ini oluşturur (Sökmen 2003).

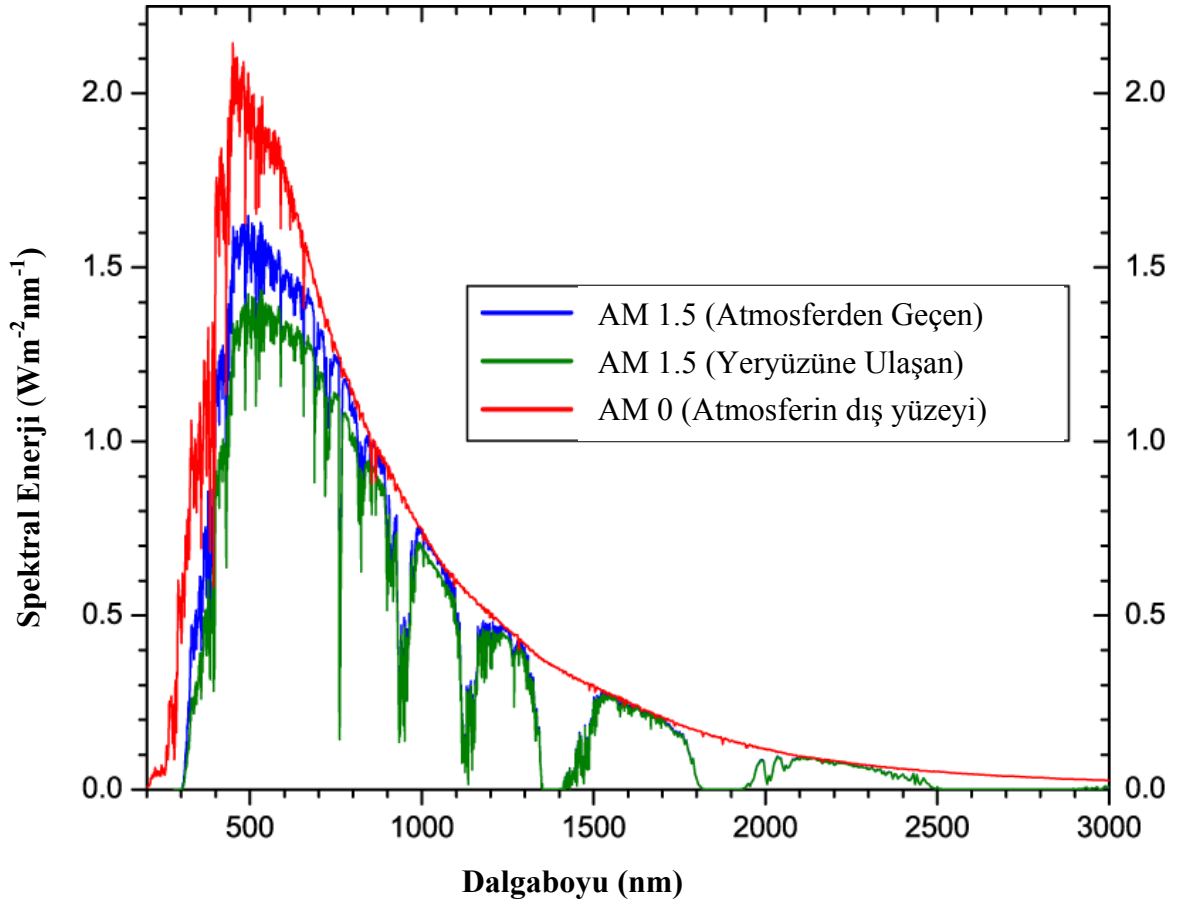
Güneş içerisinde sürekli olarak Hidrojenin Helyuma dönüştüğü füzyon reaksiyonları gerçekleşmektedir ve oluşan kütle farkı, ısı enerjisine dönüşerek uzaya yayılmaktadır. Güneş merkezi füzyon reaksiyonu için uygun bir ortamdır. Bir reaksiyonun basit olarak tanımı; protonla bombardımana tutulan Hidrojen molekülü, Hidrojenin türevi olan Döteryuma dönüşür. Kararsız hale geçen iki Döteryum çekirdeği birleşerek daha ağır olan Helyuma dönüşür. Açıkta kalan iki proton ise reaksiyon zincirinin bu tanımına uygun olarak devam etmesini sağlar. Bu reaksiyon sonucunda açığa çıkan enerji çok fazladır. Güneşin bu enerjiye sahip olabilmesi için saniyede 10–38 füzyon reaksiyonuna ihtiyaç duyduğu hesaplanmıştır. Bu da yaklaşık olarak saniyede 657 milyon ton Hidrojenin 653 ton Helyuma dönüşmesi demektir. Bu reaksiyonlar sonucu kaybolan kütle enerjiye dönüşür. Yaklaşık 10 milyar yıl sonra güneşteki Hidrojen yakıtı bitip reaksiyonların son bulması sonucu güneşin, çekim kuvveti etkisiyle büzülüp beyaz cüce adı verilen ölü bir yıldızla dönüşebileceği tahmin edilmektedir.

Güneş ışığı, farklı frekanstaki elektromanyetik dalgaların bileşimidir. Güneş tarafından yayınlanan elektromanyetik spektrum; bir Angstromun kesirlerinden, yüzlerce metreye kadar uzanır (Oral 1979; Kavcar 2001). Güneş spektrumu üç ana bölgeden oluşur. Dalga boyu 0,4 μm 'den küçük olan ultraviyole (morötesi) bölgenin güneş ışınlamındaki payı %9 'dur. Dalga boyu 0,4 μm ile 0,7 μm arasındaki bölge görünür ışıktır. Görünür

ışık, güneş ışıını içinde %45 yer kaplar. Dalga boyu 0,7 μm 'den büyük olan infrared (kızılötesi) bölgenin payı ise %46'dır ve güneşin ısıtma etkisi buradan kaynaklanır. Dünya atmosferi dışında, birim yüzeye dik olarak, birim zamanda ulasan güneş ışıını, Güneş sabiti olarak tanımlanır ve değeri 1,353 kW/m^2 'dir. Yeryüzüne ulasan maksimum güneş ışıını ise 0,3–2,5 μm dalga boyları arasında 1 kW/m^2 kadardır. Dünyanın yaşanabilir alanlarına gelen güneş enerjisi yere, zamana ve iklime bağılı olarak 3 ile 50 $\text{MJ/m}^2\text{.gün}$ arasında değışir(Ültanır 1996).

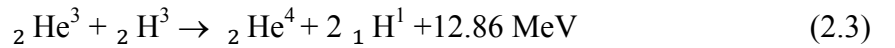
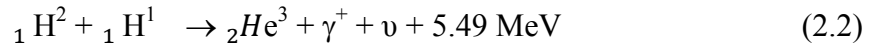
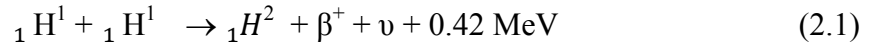
Dünya yüzeyinin aldığı güneş enerjisinin miktarını atmosferik koşullar belirler. Atmosferik koşulların dünya yüzeyine ulasan güneş ışığını etkileme oranı, Air Mass (AM) koşulu ile tanımlanır. Şekil 2.1'de, AM0 ve AM1 koşullarında güneşten yayınlanan enerjinin spektral dağılımını (birim yüzeye, birim dalgaboyunda güneşten ulasan güç) gösteren eğriler görölmektedir. Üstteki eğri, dünya atmosferi dışındaki güneş ışığının (güneş sabitinin) spektral dağılımını gösterir. Bu AM0 koşulu olarak adlandırılır. Altındaki eğri ise güneş tam tepede iken dünya atmosferinden geçerek, yeryüzüne ulasan güneş ışığının spektral dağılımını verir. Bu koşul ise AM1 koşulu olarak bilinir. Son olarak, güneşin dünyanın başucu (tepesi) ile 48°'lik açı yaptığı durumda yeryüzüne ulasan güneş ışığının spektral dağılımı görölmektedir. Bu da AM1.5 koşuludur. AM0, AM1 ve AM1.5 koşullarında dünyaya ulasan ışık şiddetleri ve spektrumları farklıdır. Çünkü bu koşulların her birinde, güneş ışığının dünyaya giriş açıları, yeryüzüne ulasana kadar aldığı yollar, soğurulma ve saçılma oranları farklıdır (Tercan 2000).

Güneş yaklaşık 4,5 milyar yaşındadır. Başlangıcından bu yana, çekirdeğindeki hidrojenin yarısını kullanmıştır. Rahatlıkla bir 5 milyar yıl daha enerji yaymaya devam edecektir. Güneş enerjisi, ekolojik açıdan diğ er bütün enerjilerin temelidir. Fosil yakıtlar, rüzgar, hidroelektrik, biyogaz, termik, dalga gibi diğ er tüm enerji türleri Güneş enerjisinden türerler.



Şekil 2.1. AM0 ve AM1.5 koşullarında güneşten yayınlanan enerjinin spektral dağılımı

Güneş enerjisinin kaynağı güneşin çekirdeğinde meydana gelen füzyon reaksiyonlarıdır. Bu reaksiyonlar sırasıyla,



tepkime denklemleriyle tanımlanır(Engin 1995). Doğal bir füzyon reaktörü olan güneşte; her bir saniyede 564 milyon ton hidrojen, 560 milyon ton helyuma dönüşmekte ve kaybolan 4 milyon ton kütle karşılığı 386 milyon EJ (eksa joule) enerji açığa çıkmaktadır (Ültanır 1996). Füzyon reaksiyonlarının gerçekleştiği çekirdek kısmında, sıcaklık yaklaşık 2×10^7 K olmakla birlikte, yüzey (fotosfer) sıcaklığı yaklaşık

6000K'dir. Bütün sıcak cisimler gibi güneş de, birçok dalga boyunda elektromanyetik ışınlamalar yapar. Güneşin yayınladığı ışınlamaların spektrumu; yaklaşık 6000K sıcaklığında bulunan bir kara cismin yayınladığı spektrum gibidir. Bu nedenle güneşin yayınladığı enerji, siyah cisim ışımasını açıklamak için kullanılan fizik yasaları ile belirlenebilir (Engin 1995).

Ülkemiz, coğrafi konumu nedeniyle sahip olduğu güneş enerjisi potansiyeli açısından birçok ülkeye göre şanslı durumdadır. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü'nde (DMİ) mevcut bulunan 1966–1982 yıllarında ölçülen güneşlenme süresi ve ışınlam şiddeti verilerinden yararlanarak, Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) tarafından yapılan çalışmaya göre, Türkiye'nin ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi 2640 saat (günlük toplam 7,2 saat), Ortalama toplam ışınlam şiddeti 1311 kWh/m²-yıl (günlük toplam 3,6

Çizelge 2.1. Aylara göre Türkiye ortalama güneş enerji potansiyeli ve güneşlenme süresi değerleri

AYLAR	AYLIK TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ		GÜNEŞLENME SÜRESİ (Saat/ay)
	(Kcal/cm ² -ay)	(kWh/m ² -ay)	
Ocak	4,45	51,75	103,0
Şubat	5,44	63,27	115,0
Mart	8,31	96,65	165,0
Nisan	10,51	122,23	197,0
Mayıs	13,23	153,86	273,0
Haziran	14,52	168,75	325,0
Temmuz	15,08	175,38	365,0
Ağustos	13,62	158,40	343,0
Eylül	10,60	123,28	280,0
Ekim	7,73	89,90	214,0
Kasım	5,23	60,82	157,0
Aralık	4,03	46,87	103,0
Toplam	112,74	1311	2640
Ortalama	308,0 cal/cm ² -gün	3,6 kWh/m ² -gün	7,2 saat/gün

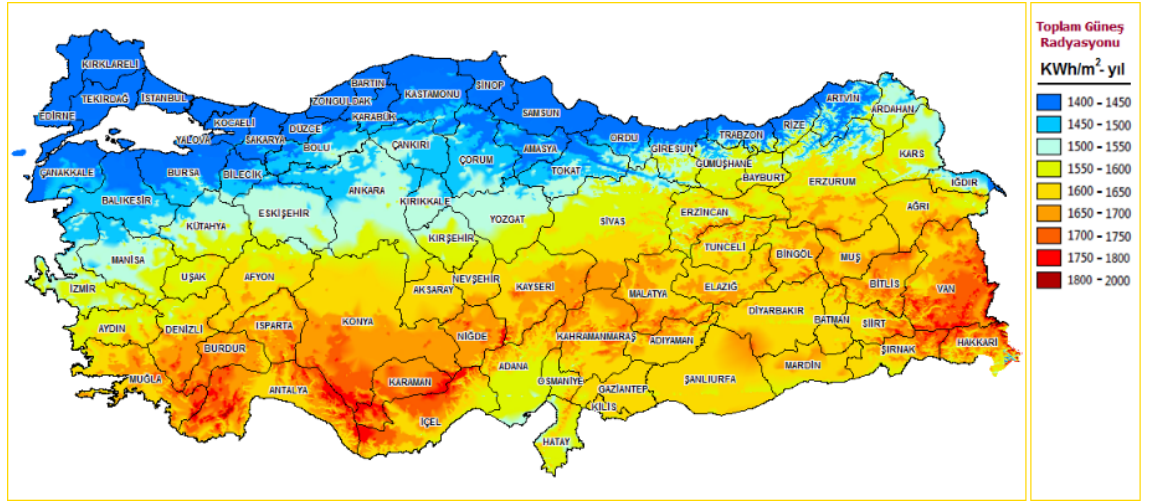
kWh/m²) olduğu tespit edilmiştir. Aylara göre Türkiye güneş enerji potansiyeli ve güneşlenme süresi değerleri ise Çizelge-2.1.'de verilmiştir (www.eie.gov. tr).

Türkiye'nin en fazla güneş enerjisi alan bölgesi Güney Doğu Anadolu Bölgesi olup, bunu Akdeniz Bölgesi izlemektedir. Güneş enerjisi potansiyeli ve güneşlenme süresi değerlerinin bölgelere göre dağılımı da Çizelge2.2'de verilmiştir.

Çizelge2.2. Türkiye'nin Yıllık Ortalama Toplam Güneş Enerjisi Potansiyelinin Bölgelere Göre Dağılımı (www.eie.gov. tr)

BÖLGE	TOPLAM GÜNEŞ ENERJİSİ (kWh/m²-yıl)	GÜNEŞLENME SÜRESİ (Saat/yıl)
Güney Doğu Anadolu	1460	2993
Akdeniz	1390	2956
Doğu Anadolu	1365	2664
İç Anadolu	1314	2628
Ege	1304	2738
Marmara	1168	2409
Karadeniz	1120	1971

Bu değerlerin, Türkiye'nin gerçek potansiyelinden daha az olduğu, daha sonra yapılan çalışmalar ile anlaşılmıştır. 1992 yılından bu yana EİE ve DMI, güneş enerjisi değerlerinin daha sağlıklı olarak ölçülmesi amacıyla enerji amaçlı güneş enerjisi ölçümleri almaktadırlar. Devam etmekte olan ölçüm çalışmalarının sonucunda, Türkiye güneş enerjisi potansiyelinin eski değerlerden %20–25 daha fazla çıkması beklenmektedir.



Şekil 2.2. Türkiye'nin Güneş Enerjisi Haritası

Türkiye'nin güneş ışınlarını alma potansiyeli Şekil.2.2'de gösterilmiştir. Bu haritaya göre güney bölgelerimizin güneş alma açısı kuzey bölgelerimize göre daha fazla olduğu görülmektedir.

2.2 Yarıiletkenler

Katı maddeler elektriksel özelliklerine göre yalıtkanlar, iletkenler ve yarıiletkenler olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Yarıiletken, adında da anlaşılacağı gibi, iletkenlik düzeyi yalıtkan ile iletken arasında olan madde demektir. Yarıiletkenler üzerine yapılan çalışmalar 19. yüzyılın ilk yarısında başlamış olmasına rağmen bu malzemeler ilk olarak 1940'larda transistörün keşfi ile ilgi çekmiştir.

Yalıtkanların, yarıiletkenlerin ve iletkenlerin oda sıcaklığındaki elektriksel öz dirençleri:

Yalıtkanlar: $\geq 10^{10} \Omega\text{cm}$

Yarıiletkenler: $10^{10} - 10^{-4} \Omega\text{cm}$

İletkenler: $10^{-4} - 10^{-8} \Omega\text{cm}$

şeklinde verilmektedir. Yarıiletken malzemelerin bu kadar ilgi çekmesinin nedeni katkılama ile veya ısı, ışık ve manyetik alan uygulanarak bu malzemelerin karakteristiklerinin önemli ölçüde değiştirilebilmesidir. Metallerde sıcaklık ve yabancı madde yoğunluğu arttıkça elektriksel öz direnç artmaktadır. Bununla birlikte yarıiletkenlerde sıcaklık ile elektriksel iletkenlik artmaktadır. Bu durum metaller ile yarıiletkenler arasındaki en önemli farktır. Yalıtkan materyaller ise elektriksel öz dirençlerinin oldukça büyük olması nedeniyle elektriği iletmezler. Yarıiletkenlerin direnci sıcaklık mutlak sıfıra ($T=0\text{ K}$ 'e) yaklaşırken oldukça yüksek değerlere ulaşır ve yarıiletkenler yalıtkan özellik gösterir.

Yarıiletken malzemelerde serbest elektronların bulunduğu iletim bandı ile bağlı elektronların bulunduğu valans bandı arasında bir enerji aralığı bulunur. Bu enerji aralığının değeri yalıtkanlara kıyasla küçük, iletken malzemelere kıyasla ise oldukça büyüktür.

2.2.1 Asal yarıiletkenler ve taşıyıcı yoğunluğu

Yarıiletken materyallerde elektriksel iletim, iletim bandındaki elektronlar ve valans bandındaki holler tarafından sağlanır. Bununla birlikte, yarı iletkenlere yapılan uygun katkılar elektriksel iletkenliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Böylece yarıiletkenler katkı durumuna göre asal ve katkılı yarıiletkenler olmak üzere iki grupta incelenirler. Bir yarıiletkenin safsızlığı iletim bandındaki elektron yoğunluğu ve valans bandındaki hol yoğunluğu ile belirlenir.

Herhangi bir etki ile valans bandından iletim bandına geçen elektronların yoğunluğu (n), valans bandındaki elektron boşluğu olarak bilinen hol yoğunluğuna (p) eşit ise ($n=p$), bu tip yarıiletkenler asal yarıiletkenler olarak adlandırılırlar.

Isıl uyarma yoluyla oluşturulan elektronların ve hollerin sayısı artan sıcaklık ile artış gösterecektir. Bu durumda oluşan elektronlar ve holler genellikle asal yük taşıyıcıları ve bu taşıyıcılar nedeniyle oluşan iletkenlik ise asal iletkenlik olarak bilinir. Asal bir

yarıiletkende elektron konsantrasyonu daima hol konsantrasyonuna eşit ve çarpımları sabit olmalıdır. Çünkü bir elektronun ısı hareketi sadece bir tane hol oluşturur.

$$n = p \quad (2.4)$$

$$n.p = n_i^2(T) \quad (2.5)$$

Eşitlik (2.5)'de hol ve elektron yoğunlukları çarpımı sadece sıcaklığın bir fonksiyonudur. n_i asal yarıiletkenler için taşıyıcı yük yoğunluğudur.

Bir yarıiletkenin elektriksel iletkenliğini belirlemede serbest yük taşıyıcılarının (elektronlar ve holler) yoğunluğunu bilmek oldukça önemlidir. Taşıyıcıların yoğunluğunu belirlemede, Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right)} \quad (2.6)$$

kullanılır. Burada, E_f Fermi enerji seviyesi, k Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklıktır.

Fermi enerji seviyesi (E_f), bir katıda mutlak sıfır ($T=0$ K) sıcaklığında elektronların bulunabileceği en yüksek enerji seviyesi olarak tanımlanır ve yasak enerji aralığında bulunur. $T=0$ K'de Fermi enerji seviyesinden daha büyük enerji seviyesinde bir elektronun bulunma olasılığı sıfırdır ve bu olasılık (2.6) eşitliği ile verilen Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu ile belirlenir. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu, T sıcaklığındaki bir sistemde bir E enerjisi seviyesinin bir elektron tarafından işgal edilme olasılığını vermektedir. $f(E)$ fonksiyonu, $(E - E_f) \gg kT$ olması durumunda Maxwell-Boltzmann dağılım fonksiyonuna dönüşür. Böylece denklem (2.6)

$$f(E) = \exp - \left(\frac{E - E_f}{kT} \right) \quad (2.7)$$

şeklinde olacaktır. Yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluğunu belirlemek için bu eşitlik kullanılmaktadır. İletim bandındaki elektron yoğunluğu n ,

$$n = \int_{E_{C_2}}^{E_{C_1}} f(E) g_c(E) dE = \frac{8\sqrt{2}\pi}{h^3} m_e^{*3/2} e^{\frac{E_f}{kT}} \int_{E_C}^{\infty} \sqrt{E - E_C} e^{\frac{E}{kT}} dE \quad (2.8)$$

ifadesi ile verilir. Bu eşitlikte, $g_c(E)$ iletim bandındaki elektron durum yoğunluğu, $g_c(E)dE$ ise elektronların E ile $E+dE$ enerji aralığında durumların sayısıdır ve E_{C_1} ve E_{C_2} sırasıyla iletim bandının alt ve üst enerji değerleridir. Böylece iletim bandındaki elektron yoğunluğu n ,

$$n = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_C - E_f}{kT}} = N_C e^{-\frac{E_C - E_f}{kT}} \quad (2.9)$$

ifadesi ile verilir (McKelvey 1966; Omar 1975). Bu ifadede, N_C iletim bandındaki etkin durum yoğunluğu, h Planck sabiti ve m_e^* ise elektronun etkin kütlesidir. Valans bandındaki hol yoğunluğu ise,

$$p = \int_{E_{V_1}}^{E_{V_2}} [1 - f(E)] g_v(E) dE = \frac{8\sqrt{2}\pi}{h^3} m_e^{*3/2} e^{-\frac{E_f}{kT}} \int_{-\infty}^{E_V} \sqrt{E_V - E} e^{\frac{E}{kT}} dE \quad (2.10)$$

eşitliği ile hesaplanır. Bu bağıntıda, $g_v(E)$ valans bandındaki hol durum yoğunluğu, $g_v(E)dE$ holler için E ile $E+dE$ enerji aralığında durumların sayısı ve E_{V_1} ve E_{V_2} ise valans bandın üst ve alt enerji değerleridir. Böylece, valans bandındaki hollerin yoğunluğu p ,

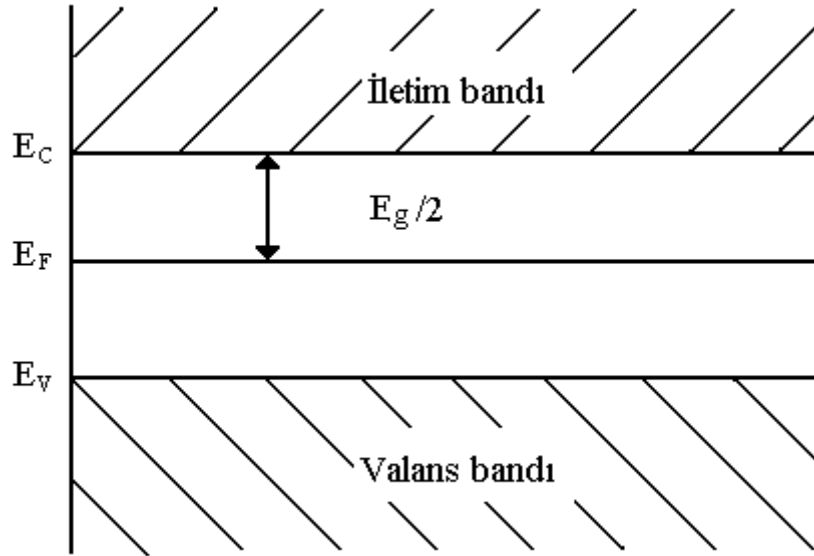
$$p = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)^{3/2} e^{-\frac{E_f - E_V}{kT}} = N_V e^{-\frac{E_f - E_V}{kT}} \quad (2.11)$$

ifadesi ile verilir (McKelvey 1966; Omar 1975). Burada, N_V valans bandındaki etkin durum yoğunluğu, h Planck sabiti ve m_h^* ise holün etkin kütlesidir.

Denklem (2.5)'de bulduğumuz elektron ve hol yoğunlukları yerine yazıldığında, asal yoğunluk $n_i(T)$,

$$n_i(T) = 2 \left[\frac{2\pi(m_e^*m_h^*)^{1/2}kT}{h^2} \right]^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (2.12)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadeden anlaşılacağı gibi, taşıyıcı yoğunluğu taşıyıcıların etkin kütlelerine, yasak enerji aralığına ve sıcaklığa bağlıdır. Verilen bir yarıiletkende etkin kütleler ve yasak enerji aralığı sabit olduğuna göre, toplam taşıyıcı yoğunluğu n_i sadece sıcaklığın bir fonksiyonu olacaktır.



Şekil 2.3. Asal yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi

Asal yarıiletkenlerde elektron ve hol yoğunlukları birbirlerine eşit olduğuna göre, (2.9) ve (2.11) denklemleri (2.4) denkleminde yerine yazıldığında, Fermi enerji seviyesi,

$$E_f = \frac{1}{2}E_g + \frac{3}{4}kT \ln(m_h^*/m_e^*) \quad (2.13)$$

şeklinde elde edilir. Eşitliğin sağ tarafındaki logaritmik terim ihmal edildiğinde, yani elektron ve hol etkin kütleleri eşit kabul edildiğinde, (2.13) eşitliği (2.14) denklemindeki gibi olur ve

$$E_f = \frac{1}{2}E_g = \frac{1}{2}(E_C - E_V) \quad (2.14)$$

asal yarıiletkenler için Fermi enerji seviyesi şekil 2.3’de görüldüğü gibi yasak enerji aralığının tam ortasında yer alır.

2.2.2 Yarıiletkenlerde bant geçişleri

Yarıiletkenlerde bant geçişleri, valans bandından iletkenlik bandına elektronların geçiş durumlarına göre doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki gruba ayrılır. Yasak enerji aralığı ve bant geçiş tiplerinin belirlenmesinde en iyi sonuçları veren yöntem optik soğurmadır.

2.2.2.a Doğrudan bant geçişleri

Doğrudan bant yapılı yarıiletkenlerde, iletkenlik bant kenarının en alt noktası ile valans bandının üst kenarı enerji-momentum uzayında $k=0$ değerinde bulunmaktadır. Doğrudan bant yapısı şematik olarak Şekil 2.4.a’da verilmiştir. Doğrudan bant yapılı yarıiletkenlerde bir valans elektronu, enerjisi yasak enerji aralığının değerine eşit veya daha büyük olan bir fotonu ($h\nu \geq E_g$) soğurması durumunda iletkenlik bandına geçer. Bu geçişte elektronlar dalga vektörlerini değiştirmezler ve $k=0$ ’da momentum korunur.

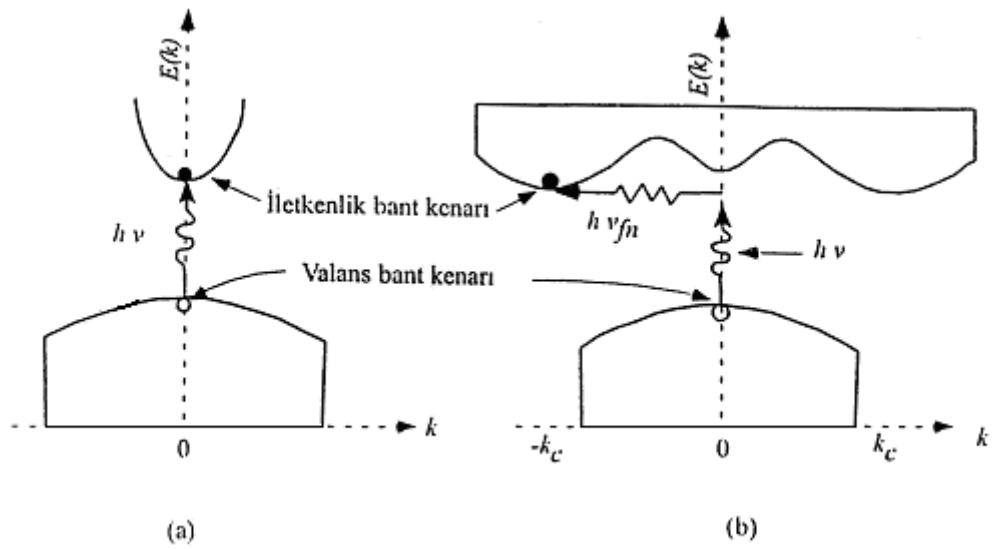
Bu,

$$\hbar k_e + \hbar k_h = 0 \quad (2.15)$$

olur. Burada $\hbar k_e$ ve $\hbar k_h$ elektronların ve deliklerin kristal içerisindeki sahip oldukları kristal momentumlarıdır. Doğrudan geçişte frekansı ν olan bir fotonun enerjisi,

$$h\nu = E_e - E_h \geq E_c - E_v \quad (2.16)$$

şeklinde verilir. Burada E_e ve E_h sırasıyla elektronların ve boşlukların iletkenlik ve valans bandları içerisinde herhangi bir konumdaki enerjileri, E_c ve E_v ise $k=0$ 'da sırasıyla iletkenlik bandının alt ve valans bandının üst enerji seviyeleridir. Doğrudan band geçişlerde enerji korunmaktadır.



Şekil 2.4. Yarıiletkenlerde (a) doğrudan, (b) dolaylı band geçişleri

2.2.2.b Dolaylı band geçişleri

Dolaylı band geçişi Si ve Ge gibi yarıiletkenlerde görülür ve iletkenlik bandının minimumu ile valans bandının maksimumu enerji-momentum uzayında aynı k değerinde olmadığı durumda gerçekleşir. Bu durumda valans bandından iletim bandına bir elektronun momentumunu koruyarak geçiş yapabilmesi için bir fononun soğurulması veya salınması gerekir. Bu durumda momentum korunumu,

$$\hbar k = \hbar k_c \pm \hbar k_q = 0 \quad (2.17)$$

şeklinde verilir (Kittel 1986). Burada k_q fotonun dalga vektörü, k_c ise k uzayında valans bandının maksimumu ile iletim bandının minimumu arasındaki farktır. Dolaylı geçişte fononun enerjisi,

$$h\nu = E_g \pm h\nu_{fn} \quad (2.18)$$

şeklinde yazılabilir. Burada $h\nu_{fn}$ fononun enerjisi olup artı (+) işaretli durumda fonon salınmakta, eksi (-) işaretli durumda ise fonon soğurulmaktadır (Şekil 2.4.b).

2.2.3 Katkılı yarıiletkenler

Katkılı yarıiletkenler sadece tek bir taşıyıcı tipinin (ya elektronlar yada holler) elektriksel iletimi sağladığı yarıiletkenlerdir. Katkılama yapılan yarıiletkenlerin elektriksel özelliklerinde önemli ölçüde değişim gözlenir. Katkılama işlemi, uygun katkı atomlarının yarıiletken içerisine çeşitli teknikler ile katılmasıyla yapılır. Katkılama işlemi sayesinde istenilen özelliklere sahip bir yarıiletken elde edilir.

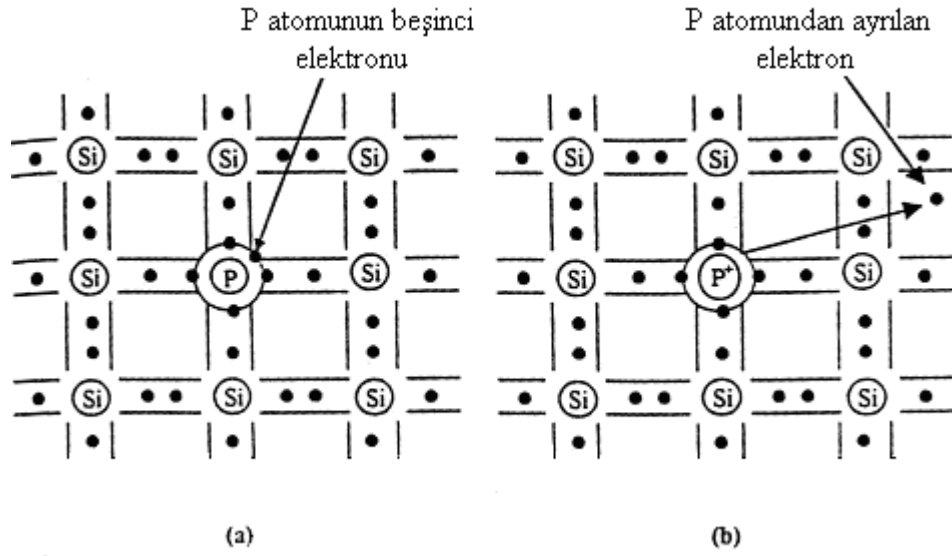
Bir yarıiletken materyale katkılanan safsızlık (impurity) atomları istenilen özelliğe göre ya elektron verici (donor) yada elektron alıcı (akseptör) olarak işlev görürler. Katkılama işlemi ile yarıiletkenler n-tipi veya p-tipi özellik gösterirler (Arabacı 2001).

2.2.3.a n-tipi Yarıiletkenler

n-tipi yarıiletkenlerde elektriksel iletkenliğe katkıda bulunan çoğunluk taşıyıcılar elektronlardır. Başka bir deyişle, serbest elektron yoğunluğu hol yoğunluğundan daha büyüktür. Yarıiletken, donor (elektron verici) atomları ile katılanmıştır.

Şekil 2.5'te gösterilen silisyum kristal örgüsü için iki boyutlu kovalent bağ modeli ele alalım. Eğer bir V-A gurubu elementlerinden bir katkı atomu, örneğin fosfor (P), IV-A

gurubunda bulunan bir silisyum atomu ile yer değiştirir ise, silisyum örgüsünde tetrahedral kovalent bağ için gerekli olan dört elektronun dışında bir elektron daha bulunacaktır. Bu ekstra elektron pozitif olarak yüklenmiş fosfor çekirdeğine zayıf bir şekilde bağlıdır. Bu elektronun bağlanma enerjisi, bir iletim elektronunun saf silisyumun 1,1 eV'luk enerji aralığına geçmesi için gerekli olan enerjinin yaklaşık



Şekil 2.5. (a) P atomu katkılanan n-tipi Si kristali ve (b) iletim elektronunun oluşumu (Smith 1990)

olarak %5'idir. Yani bu elektron fosfor atomundan kolaylıkla ayrılabilir. Elektrik alan uygulanması durumunda ise, bu ekstra elektron iletim için gerekli olan serbest bir elektron haline gelir. Fosfor atomu pozitif bir yük kazanarak iyonlaşır.

P, As ve Sb gibi V-A grubu katkı atomları silisyuma ya da germanyuma katkılıandıklarında elektriksel iletim için kolayca iyonlaşmış elektronlar sağlarlar. Bu nedenle V-A grubu katkı atomları donör katkı atomları olarak adlandırılır.

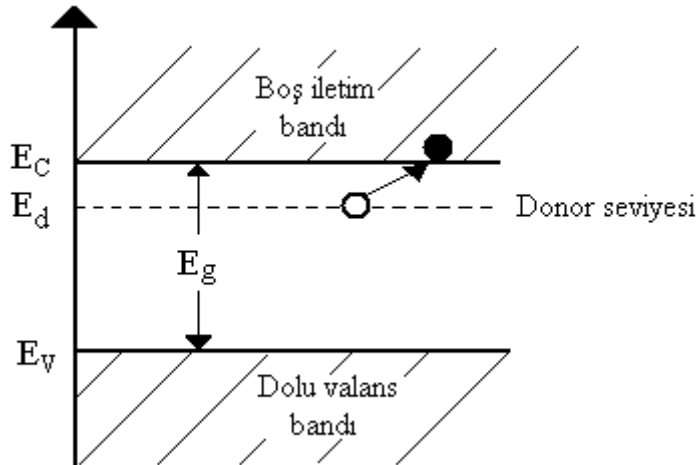
Şekil 2.6'da P atomu katkılanan n-tipi Si kristalinin enerji bant diyagramı görülmektedir. Katkı atomunun ekstra elektronu boş iletim bandının çok az aşağısında yasak enerji aralığında bir enerji seviyesinde bulunur. Böyle bir enerji seviyesi, bir

donor katkı atomu sağladığı için donör seviyesi olarak adlandırılır. Bu durumda küçük enerji değerlerinde donör atomları kolayca iyonlaşarak iletim bandına geçebilirler ve elektriksel iletkenliğe katkıda bulunurlar. Katkı atomlarının neden olduğu elektriksel iletim katkılı iletkenlik adını alır. Donör enerji seviyesi E_d ,

$$E_d = \left(\frac{1}{\epsilon_r}\right)^2 \left(\frac{m_e^*}{m_e}\right) E_H \quad (2.19)$$

bağıntısı ile verilir. Bu denklemde, ϵ_r yarıiletkenin bağıl dielektrik sabiti, m_e ve m_e^* sırasıyla elektronun kütlesi ve elektronun etkin kütlesi ve E_H ise 13.6 eV olmak üzere hidrojen atomu için iyonlaşma enerjisidir.

n-tipi yarıiletkenlerde donör atomunun iyonlaşması sonucu donör enerji seviyesinden iletim bandına geçen elektronlara karşılık valans bandında holler oluşmaz. Bu nedenle bu tip yarıiletkenlerde elektron yoğunluğu donör yoğunluğuna bağlıdır ve çoğunluk taşıyıcıları (n_n) elektronlar ve azınlık taşıyıcıları (p_n) ise hollerdir. Diğer bir deyişle, elektronların elektriksel iletkenliğe katkısı hollerden daha fazladır.

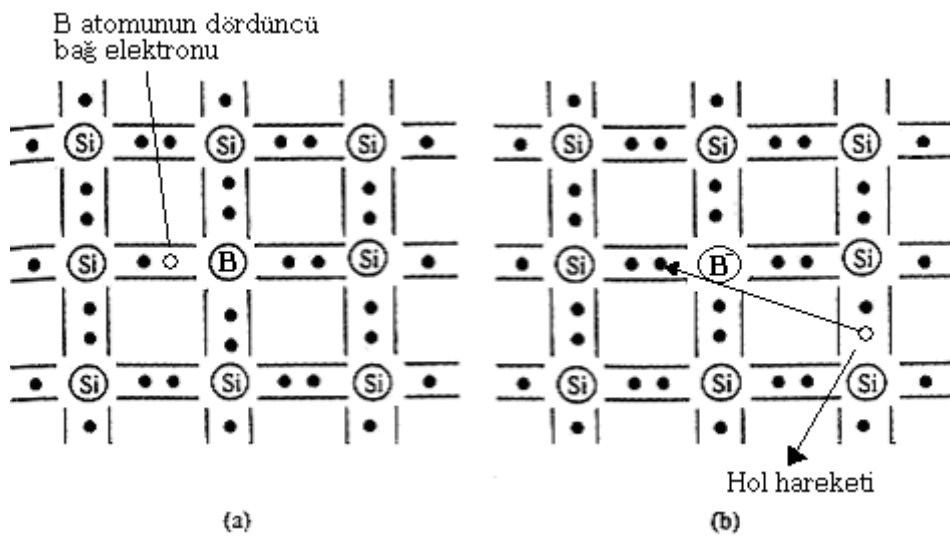


Şekil 2.6. n-tipi bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı (Smith 1990)

2.2.3.b p-tipi yarıiletkenler

Periyodik tablonun IV. grup elementlerinden olan Si veya Ge kristaline bu kez de In, Ga, Al, B gibi III. grup elementlerinden herhangi birisi katkılanır ise katkılama yapılan yarıiletken p-tipi özellik gösterir. p-tipi yarıiletkenlerde ise n-tipi yarıiletkenlerin aksine çoğunluk yük taşıyıcılar hollerdir. Hol yoğunluğu elektron yoğunluğundan daha büyüktür. Bu nedenle bu tip yarıiletkenlerde katkı atomları akseptörler yani, elektron alıcı atomlardır.

Şekil 2.7’da gösterilen Si örgüsü içerisine periyodik tablonun III. Grup elementlerinden B’un katkılanmasını ele alalım. Bu durumda bağ orbitallerinden birisinin bir elektronu eksik olacaktır ve bu bağı başka bir Si-Si bağından bir elektron doldurabilir. Böylece kovalent bağ yapısında ekstra bir hol oluşur ve B atomu iyonize olur. Bor atomuna bir elektron transferi için gerekli olan enerji 0.045 eV’tur. Bu enerji, Si kristalinde valans bandından iletim bandına bir elektronun geçmesi için gerekli olan 1.1 eV’luk enerjiden oldukça küçüktür. Elektrik alan varlığına B atomunun iyonlaşması ile oluşturulan hol pozitif yük taşıyıcısı olarak davranır ve Si örgüsü içerisinde hareket edebilir.



Şekil 2.7. (a) B atomu katkılanan p-tipi Si kristali ve (b) hol hareketi (Smith 1990)

Bu durumda akseptör (elektron alıcı) B atomu ile katkılanan Si kristali p-tipi yarıiletken özellik gösterir. Akseptör atomlarının yarıiletken içerisinde bulundukları enerji seviyesi akseptör enerji seviyesi olarak adlandırılır.

Şekil 2.8'den görüldüğü gibi akseptör enerji seviyesi E_a , yasak enerji aralığı içinde valans bandın üst sınırına daha yakın olarak yer alır. Akseptör enerji seviyesi E_a ,

$$E_a = \left(\frac{1}{\epsilon_r}\right)^2 \left(\frac{m_h^*}{m_h}\right) E_H \quad (2.20)$$

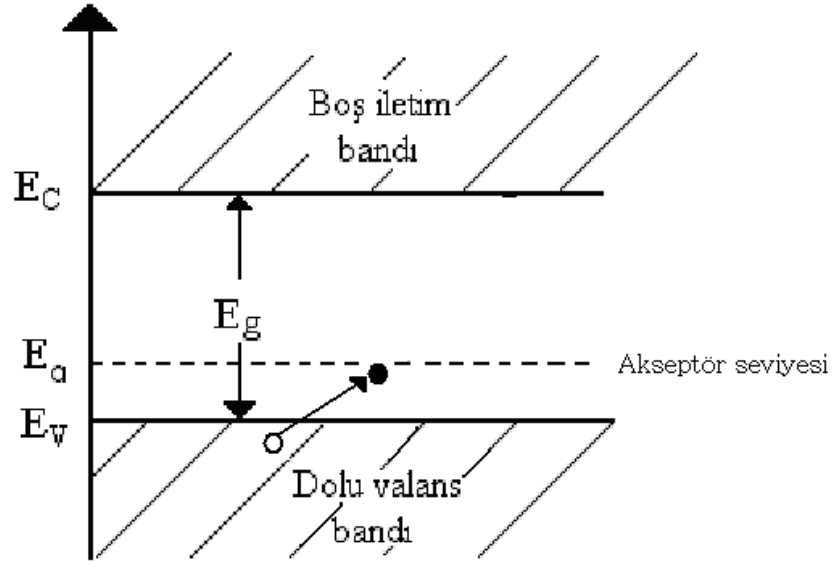
bağıntısı ile verilir. Burada, m_h hol kütlesi ve m_h^* ise hol etkin kütlesidir.

p-tipi yarıiletkenlerde, çoğunluk taşıyıcıları (p_p) hollerin yoğunluğu akseptör yoğunluğuna bağlıdır ve elektriksel iletkenliğe hollerin katkısı azınlık taşıyıcıları (n_p) olan elektronlardan daha fazladır.

Katkılı yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesinin yeri asal yarıiletkenlerdeki durumundan daha farklıdır. Katkılı yarıiletkenlerde Fermi enerjisinin yeri yasak enerji aralığında, katkı atomlarının cinsine ve yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Katkılı yarıiletken Fermi enerji seviyesi E_F ,

$$E_f = E_{fi} + kT \sinh^{-1} \left(\frac{N_D - N_A}{2n_i} \right) \quad (2.21)$$

ifadesi ile verilir. Denklemden, E_{Fi} asal yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi, N_D ve N_A ise sırasıyla donör ve akseptör yoğunluklarıdır. Bu ifadeye göre katkılı yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi, $(N_D - N_A)$ farkına bağlı olarak n-tipi yarıiletkenlerde iletim bandına ve p-tipi yarıiletkenlerde valans bandına doğru kayma gösterir.



Şekil 2.8. p-tipi bir yarıiletkenin enerji-bant diyagramı (Smith 1990)

Katkılı yarıiletkenlerde aynı yarıiletken materyal için n-tipi veya p-tipi durumuna göre taşıyıcı yoğunlukları,

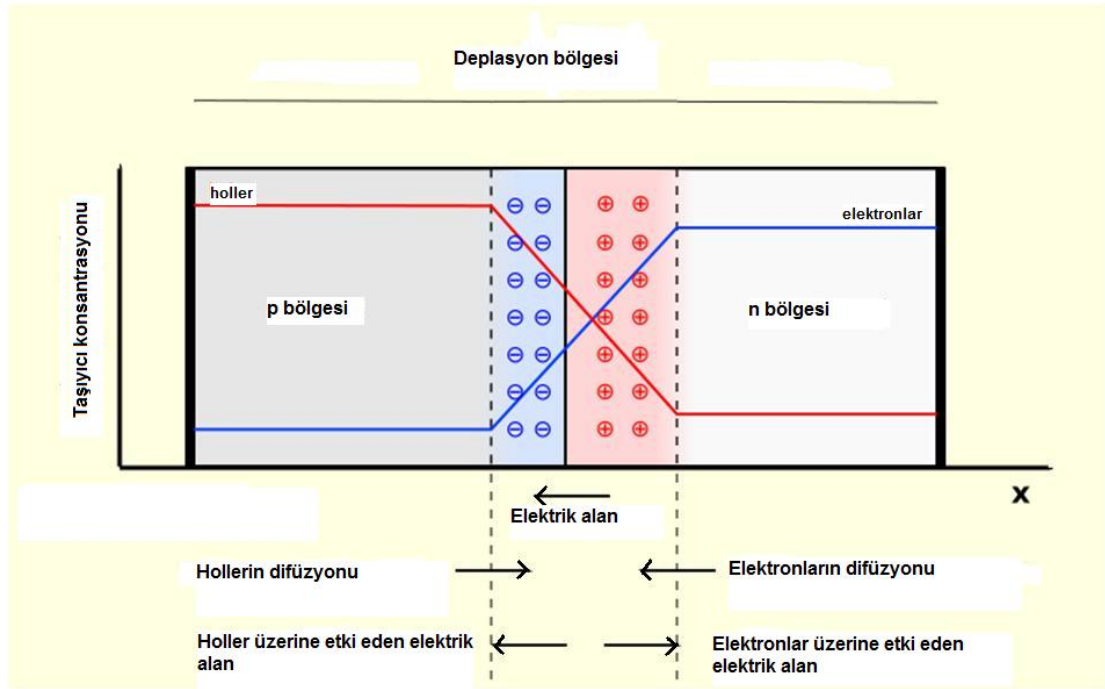
$$n_n p_n = n_p p_p = n_i^2(T) \quad (2.22)$$

ifadesi ile verilir. Bu denklem göre belirli bir sıcaklıkta elektron ve hol yoğunluklarının çarpımı sabit, fakat toplamaları farklı olacaktır. Uygun katkılarla ile taşıyıcı sayıları birbirlerine göre değiştirilebilir (Yıldırım 2005).

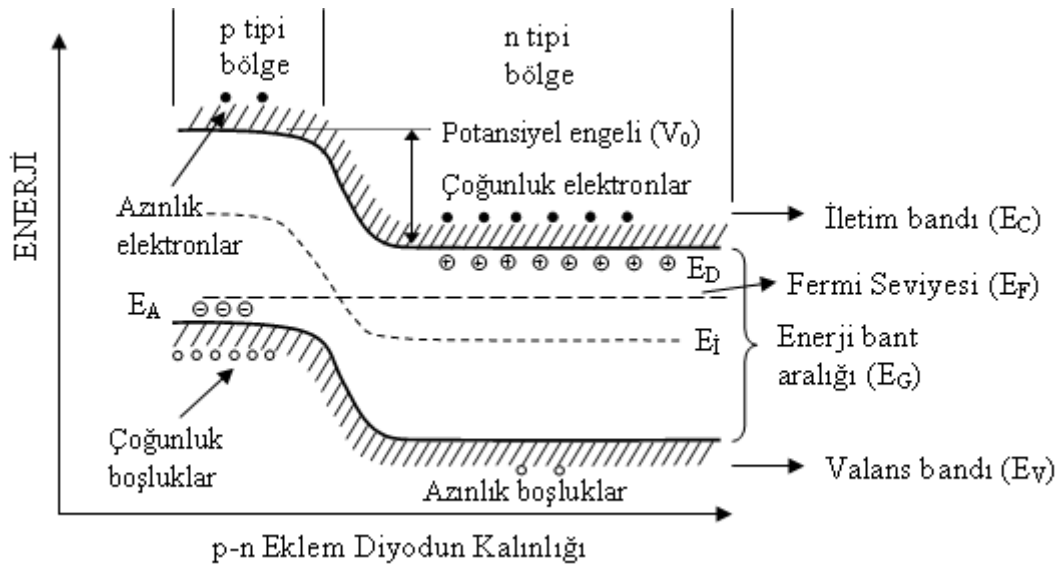
2.3. P-N eklemi

p- tipi ve n- tipi iki yarıiletken atomik boyutta üst üste geldiği zaman şekil(2.9)'da görüldüğü gibi p-tipinde çoğunluk taşıyıcı olan holler n tarafına n-tipinde çoğunluk taşıyıcı olan elektronlar p tarafına doğru bir geçiş yapar. Birleşme kısmında deplasyon bölgesi adı verilen bir bölge oluşur. Bu bölgede karşılıklı geçişten dolayı bir elektrik alan oluşur. Bu elektrik alan hareket halindeki elektron ve holleri deplasyon bölgesinin dışına doğru sürükler. Bu geçiş sistem termal dengeye ulaşmaya kadar devam eder.

Denge durumunda, Fermi seviyeleri her iki bölgede aynı seviyeye gelir ve V_0 potansiyel engeline sahip bir p-n eklemi oluşmuş olur(Şekil 2.10).



Şekil 2.9. p-n eklemi



Şekil 2.10. p-n eklemi

2.4. Fotovoltaik Etki

Fotovoltaik (photovoltaic) terimi, ışıktan gerilim üretilmesi anlamına gelir ve genellikle “PV” ile gösterilir.

Fotovoltaik etki, ışık bir yarıiletkenin p-n eklemünde potansiyel engelinde meydana gelen düşmeye karşılık gerilim üretmesi anlamına gelir. Fotonların enerjisi, yarıiletkenin valans bandındaki elektronlara aktarılır. Fotovoltaik olay gözlenebilmesi için üç şart vardır.

1) Gelen fotonun enerjisine bağılı olarak elektrtron-hol çiftleri oluşmalıdır. Bu olayın olabilmesi için gelen fotonun enerjisinin yarıiletkenin yasak enerji aralığından büyük olmalıdır. E (gelen fotonun enerjisi) ile E_g (yarıiletkenin yasak enerji aralığı) arasında

$$E = \frac{hc}{\lambda} > E_g \quad hc = 1,24 \text{ eV}\mu\text{m} \quad (2.23)$$

bağıntısı olmalıdır. Burada h; Planck sabiti, c; ışık hızı, λ ; gelen fotonun dalgaboyudur.

2) Üretilen azınlık taşıyıcılar eklemdaki elektrik alana ulaşabilmeli ve elektrik alan etkisi ile birbirinden ayrılmalıdır.

3) Elektrik alan ile birbirinden ayrılan azınlık taşıyıcılar, difüzyonla yollarına devam edebilmeli ve yük üzerinden akım akıtabilmelidir.

Yukarıda belirtilen birinci ve üçüncü şartlar akım üretimi, ikinci şart ise voltaj üretimi için gerekmektedir.

Yalıtılmış yarıiletkende uyarılan elektron, esas olarak valans bandındaki holle birleşir ve fazla enerjisini foton (fotoemisyon) ya da fononlar (ısı) olarak yayınlar. Bundan dolayı kullanılabilir düzeyde bir elektrik enerjisi elde edilemez ve fotovoltaik pilin verimi düşük olur. Foton enerjisini kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürebilmek için fotovoltaik sistemde bir yük ayırıcı sistemin bulunması gerekir (Serway 1996).

3.MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Güneş Pilleri

Güneş pilleri fotovoltaiik ilkeye dayalı olarak çalışırlar. Basit bir anlatım olarak n-tipi ve p-tipi katkılanmış iki yarıiletkenin üst üste gelmesiyle güneş pili oluşturulur. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin birleşme noktasında deplasyon bölgesi oluşur ve bu bölgede elektron hol çiftleri oluşur. Oluşan bu çiftler hareketsizdir. Deplasyon bölgesine ışık düştüğü zaman elektron- hol çiftleri birbirinden ayrılır ve deplasyon bölgesindeki elektrik alan sayesinde bu bölgeden süpürölürler. Süpürölün elektron ve holler n ve p bölgesindeki metal kontaklar ile bir dış devreye aktarıldığı zaman bir elektrik akımına sebep olurlar.

3.1.1 Güneş pillerinin tarihsel gelişimi

Güneş pilleri, üzerine düsen güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştüren aygıtlardır. Bu aygıtlara fotovoltaiik hücreler de denilmektedir. İlk fotovoltaiik etki, 1839 yılında Becquerel tarafından gözlenmiştir. Becquerel, bir elektrolit çözelti içerisindeki elektrot üzerine ışığın düşmesi durumunda bir foto gerilimin oluştuğunu gözlemiştir. 1873 yılında, Selenyum (Se)'un fotoiletkenlik özelliği gösterdiği Smith tarafından ortaya çıkarılmış ve 1877 yılında ise Adams ve Day bir katı haldeki selenyumda da benzer bir fotovoltaiik etki gözlemlemiştir (Chopra and Das 1983).

Modern güneş pili 1954'de Amerika Birleşik Devletleri'nde Bell Laboratuarları'nda pn eklem diyot ile yapılmıştır. Bir yıl içerisinde Si pn eklem ile %6 verime ulaşmışlardır (Chapin *et al.*1954). Aynı yıl Birleşik Devletler'de Wright Petterson Air Force Base'de bir grup, heteroeklem ince film güneş pili $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ ile %6 verime ulaşmışlardır. Bir yıl sonra yine Birleşik Devletler'de RCA Laboratuarları'nda % 6 verimle GaAs pn eklemli güneş pili yapılmıştır (Jenny *et al.*1956). 1960'da pn eklem güneş pilinde teorik olarak yasak enerji aralığı güneş spektrumu, sıcaklık, termodinamik ve verim ile ilgili ilişkiler

Prince (1955), Laferski (1956), Rappaport ve Wysoski (1960), Shockley (Nobel ödülü) ve Queisser (1961) tarafından geliştirilmiştir.

CdTe ince filmlerinin verimi genellikle %6 idi (Cusano 1963). Bu sırada Birleşik Devletler uzay programı Si güneş pillerini uydulara enerji sağlamak için kullanıyorlardı. Li ile katkılanmış Si radyasyon etkileri, radyasyon tolerans aygıtları çalışmak için kullanılıyordu. PV için uzay ilk uygulama yeri idi (Wysocki 1963).

1970' de Sovyetler Birliği'nde Ioffe Enstitüsünden Alferov (Nobel ödülü) bir grup heteroface GaAlAs/GaAs (Alferov 1970) güneş pili geliştirdiler ve GaAs aygıtlarının ana problemini çözdüler ve yeni aygıtların yapım yoluna dikkat çektiler. GaAs piller yüksek verimlilikleri ve dış uzaydaki iyonize radyasyona olan direnci ile dikkat çekiyorlardı.

1973 yılı güneş pillerinin gelişimi açısından bir odak noktası olmuştur. Bu yılda meydana gelen “violet cell” Si piller son teknoloji Si güneş pillerinden geliştirilen kısa dalga boyu verimde %30 luk bir artışa sebep olmuştur (Lindmayer and Allsion 1973).

GaAs'ın heterostructure piller IBM tarafından Amerika Birleşik Devletleri'nde verimi %13 e kadar geliştirildi (Hovel and Woodall 1973).

İlk CuInSe₂ güneş pili p-tipi CuInSe₂ üzerine n-tipi CdS buharlaştırılarak yapıldı (Shockley and Queisser 1961).

Güneş pillerinin yeryüzünde de elektriksel güç sistemi olarak kullanılabilmesine yönelik araştırma ve geliştirme çabaları 1954'lerde başlamış olmasına karşın, gerçek anlamda ilgi 1973 yılındaki “1. petrol bunalımını izleyen yıllarda olmuştur. Amerika'da, Avrupa'da, Japonya'da büyük bütçeli ve geniş kapsamlı araştırma ve geliştirme projeleri başlatılmıştır. Bir yandan uzay çalışmalarında kendini ispatlamış silisyum kristaline dayalı güneş pillerinin verimliliğini artırma çabaları ve diğer yandan alternatif

olmak üzere çok daha az yarı iletken malzemeye gerek duyulan ve bu sebeple daha ucuza üretilebilecek ince film güneş pilleri üzerindeki çalışmalara hız verilmiştir.

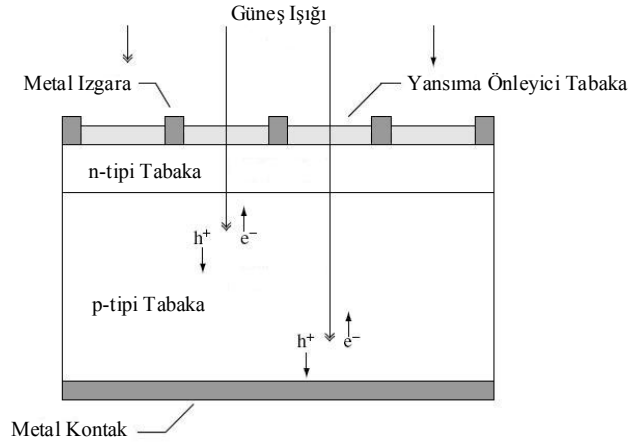
Güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirmenin, basit, çevre dostu olan fotovoltaik sistemlerin araştırılması ve geliştirilmesi, maliyetinin düşürülerek yaygınlaştırılması misyonu uzun yıllar üniversitelerin yüklendiği ve yürüttüğü bir görev olmuş ve bu nedenle kamuoyunda hep laboratuarda kalan bir çalışma olarak kalmıştır. Ancak son yirmi yılda dünya genelinde çevre konusunda duyarlılığın artmasına bağlı olarak kamuoyundan gelen baskı, çok uluslu büyük şirketleri fosile dayalı olmayan yeni ve yenilenebilir enerji kaynakları konusunda çalışmalar yapmaya zorlamışlardır. Büyük şirketlerin devreye girmesiyle fotovoltaik piller konusundaki teknolojik gelişmeler ve güç sistemlerine artan talep ve buna bağlı olarak büyüyen üretim kapasitesi, maliyetlerin hızla düşmesini de beraberinde getirmiştir. Yakın geçmişe kadar alışla gelmiş elektrik enerjisi üretim yöntemleri ile karşılaştığında çok pahalı olarak değerlendirilen fotovoltaik güç sistemleri, artık yakın gelecekte güç üretimine katkı sağlayabilecek sistemler olarak değerlendirilmektedir. Özellikle elektrik enerjisi üretiminde hesaba katılmayan ve görünmeyen maliyet olarak değerlendirilebilecek “sosyal maliyet” göz

önüne alındığında, fotovoltaik sistemler fosile dayalı sistemlerden daha ekonomik olarak değerlendirilebilir.

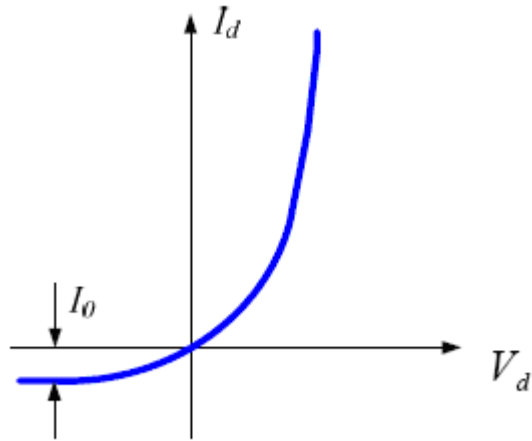
3.1.2 Güneş pillerinin yapısı ve çalışması

Güneş pilleri fotovoltaik ilkeye dayalı olarak çalıştığı daha önce belirtilmişti.

Şekilde görüldüğü gibi oluşan elektron hol çiftleri uygun kontaklar yardımıyla elektrik akımını sağlamaktadır. İdeal bir güneş pilinde akım-gerilim karakteristiği karanlıkta diyot akım-gerilim karakteristiği ile aynıdır.



Şekil 3.1. Tek eklemli fotovoltaik pilin yapısı

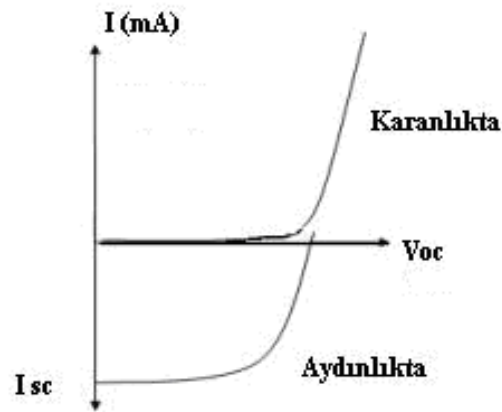


Şekil 3.2. Diyot akım- gerilim grafiği

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{qV_d}{kT}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

Burada, I_0 ışık olmadığı zaman diyodun sızma akımının yoğunluğunu, q elektrik yükünü (1.602×10^{-19} C), V uygulanan gerilimi, n idealite faktörünü, k Boltzman Sabitini (1.380×10^{-23} Joule/K), T sıcaklığı I_L ise ışıktan oluşan akımı ifade etmektedir.

Güneş pili ışık aldığı durumda I-V grafiği ise aşağıdaki şekildeki gibi olur.

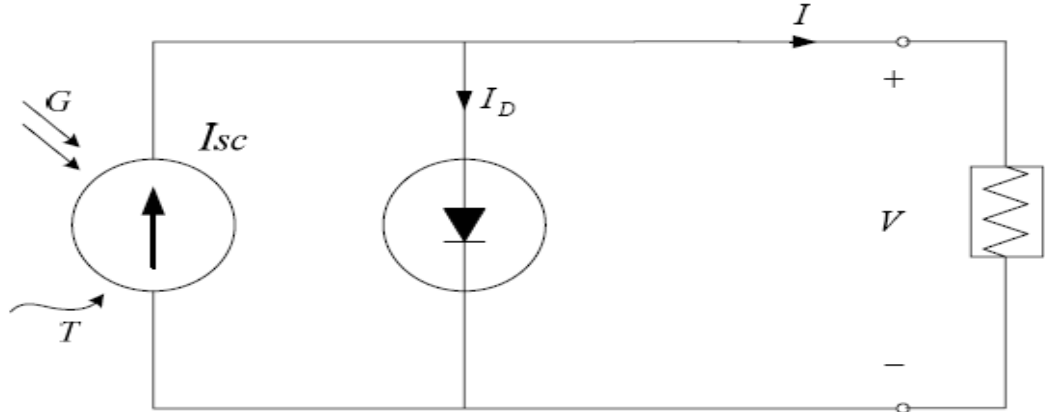


Şekil 3.3. Güneş pili akım- gerilim grafiği

Bu durumda Akım- Gerilim ilişkisi:

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{qV_d}{NkT}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

şeklinde olur. Burada I_L ışıktan oluşan akımdır. Güneş pilinin eşdeğer şeması ise Şekil 3.4’de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.4. Güneş pili eşdeğer şeması

3.1.2.a Kısa devre akımı I_{sc}

Gerilim sıfır olduğu zaman elde edilen azami akımdır. İdeal olarak $V=0$ olursa $I_{sc} = I_L$ olmaktadır. Burada I_{sc} 'nin mevcut güneş ışınımı ile doğru orantılıdır.

$$I_{sc} \propto e g_{op} (w + L_e + L_h) \quad (3.3)$$

e elektronun yükü, g_{op} ışık altında taşıyıcı üretim hızı, w güneş pilinin kalınlığı, L_e ve L_h oluşan elektron ve hollerin rekombinasyona uğramadan alabilecekleri gidebilecekleri mesafedir (difüzyon uzunluğu).

$$L_e = \sqrt{D_e \tau_e} \quad L_h = \sqrt{D_h \tau_h} \quad (3.4)$$

D_e ve D_h elektron ve holler için difüzyon katsayısıdır. Taşıyıcıların hareket kabiliyeti olarak tanımlanan mobilite (μ) ile difüzyon(D) katsayısı arasında Einstein bağıntısı

$$\frac{D_{e/h}}{\mu_{e/h}} = \frac{kT}{e} \quad (3.5)$$

denklemleri ile verilir ve elektronların ve hollerin ömür süreleri arasında

$$\frac{1}{\tau_{e/h}} = \frac{1}{\tau_{e/h,rad}} + \frac{1}{\tau_{e/h,SHR}} + \frac{1}{\tau_{e/h,Auger}} \quad (3.6)$$

bağıntısı vardır. Burada

$\tau_{e/h,rad}$; ışımalı rekombinasyon ömür süresi

$\tau_{e/h,SHR}$; ışınmasız Shockly Read Hall (SHR) rekombinasyon ömür süresi

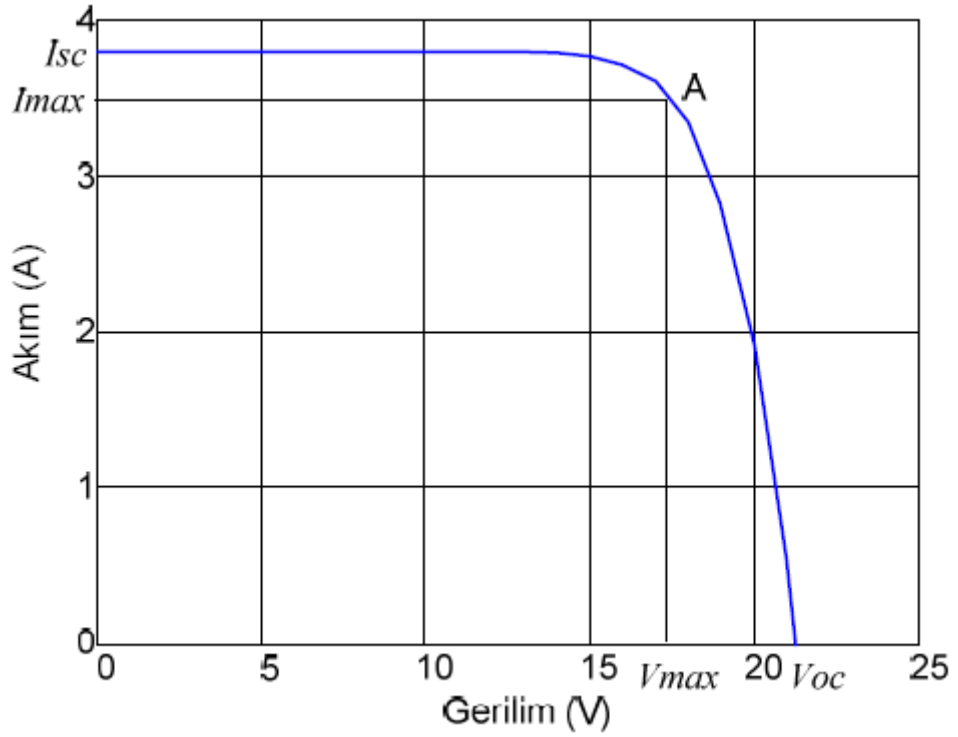
$\tau_{e/h,Auger}$; Auger rekombinasyon ömür süresidir.

3.2.2.b Açık devre gerilimi V_{oc}

Akımın sıfır olduğu zaman elde edilen azami gerilimdir. Artan güneş ışınlamına bağlı olarak V_{oc} logaritmik olarak artmaktadır. $I=0$ olduğu zaman;

$$V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (3.7)$$

I-V grafiği üzerindeki her nokta, akım ve gerilimin çarpımı, gücü vermektedir. Güneş pilleri “azami güç noktasına” göre de karakteristik özelliğe sahiptirler. Azami gerilim noktası V_{mp} ile azami akım noktasının I_{mp} çarpımı, ulaşılacak azami değeri vermektedir. Azami çıkış gücü, grafiksel olarak I-V grafiğinin altına sığabilen en büyük kare olarak gösterilebilir.



Şekil 3.5. Güneş pili akım-gerilim grafiği

3.1.2.c Dolum faktörü (FF)

Bağlantının kalitesinin ve pilin seri dirençlerinin ölçümüdür. Tanım olarak azami gücün, kısa devre akımı ile açık devre geriliminin çarpımına oranı olarak belirtilir.

$$FF = \frac{I_{max} * V_{max}}{I_{sc} * V_{oc}} \quad (3.8)$$

olarak tanımlanır. Dolum oranı açık devre gerilimine bağlı bir fonksiyondur ve deneysel denklemlerle hesaplanabilir.

$$FF = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0,72)}{V_{oc} + 1} \quad (3.9)$$

Elde edilecek güç de açık devre gerilimi V_{oc} , kısa devre akımı I_{sc} ve dolum faktörünün (FF) çarpımına eşittir.

$$P_m = V_{oc} I_{sc} FF \quad (3.10)$$

3.1.2.d Verim(η)

Fotovoltaik pillerde verim önemli bir parametre olup

$$\eta = \frac{I_{max} * V_{max}}{P_f} \quad (3.11)$$

P_f ; Gelen fotonun güç yoğunluğu

3.8 denklemi 3.11 denkleminde yerine yazılırsa

$$\eta = \frac{I_{sc} * V_{oc} * FF}{P_f} \quad (3.12)$$

Siyah-cisim, AM0 ve AM1 ışımaları için P_f değerleri 3.1 çizelgesindeki gibidir.

Çizelge3.1 Farklı ışıma spektrumları için güneşten gelen ışıma miktarı

İşıma Spektrumu	$P_f(mW/cm^2)$
Siyah-cisim	157,9
AM0	135,3
AM1	107,0

3.1.2.e Güneş pillerinde verimi etkileyen faktörler:

- 1) Yüzeydeki yansıma kayıpları; pilin yüzeyine gelen bazı fotonlar yüzeyden yansiyarak verim kaybına neden olurlar.
- 2) Fotonların tamamının soğurulamaması; gelen fotonların enerjisi yasak enerji aralığından daha düşük olursa bu fotonlar ya güneş pilini saydam olarak geçerler ya da güneş pilinin ısınmasına sebep olurlar. Yasak enerji aralığı ne kadar büyük olursa enerji kaybı o kadar çok olur.
- 3) Foton enerjisinin kısmi kullanımı; elektron-hol çifti oluşturan birçok foton bu işlem için gerekli olan enerjiden daha fazla enerjiye sahiptir. Bu fazla enerji ısınma gibi olaylarda kullanılır. Bu anlamda yüksek yasak enerji aralığı düşük kayıp demektir. 2. ve 3. Faktörleri birleştirdiğimizde, 0,9 eV' luk yasak enerji aralığı taşıyıcı üretiminde maksimum kullanımı verir. Bu da toplam enerjinin yaklaşık %46'sına denk gelir.
- 4) Rekombinasyon kayıpları; sadece rekombinasyondan önce ekleme ulaşan elektron ve holler akıma katıda bulunur. Diğerleri ısınmaya sebep olur ve kullanılamazlar. Toplam verime etki eden faktörler:
 - a) Yarıiletinin soğurma karakteristiği
 - b) Eklem uzunluğu
 - c) Deplasyon bölgesi genişliği
 - d) Yüzeyde birleşen elektron ve hol oranı(yüzey rekombinasyon hızı)
 - e) Azınlık taşıyıcıların difüzyon uzunluğu; bir elektronun p bölgesinde ve bir holun n bölgesinde rekombinasyona uğramadan aldığı mesafe
 - f) Yapı içindeki elektrik alanın oluşumu ve gücü, yüzeyde ve esas bölgelerde kirlilik konsantrasyonu, oluşan azınlık taşıyıcıların eklem içerisinde hızlanmasına sebep olur.
- 5) Gerilim faktörü; açık devre gerilimi her zaman aşağıdaki nedenlerden dolayı yasak enerji aralığından düşük olmalıdır.
 - a) Engel yükselliği p ve n bölgelerindeki fermi enerjisi seviyelerinin farkından ortaya çıkar. Bu fermi seviyeleri safsızlık konsantrasyonunun ve sıcaklığın bir fonksiyonur ve yasak enerji aralığının içerisinde bulunur.

b) Eğer gerilim engel yüksekliğine eşit ise son derece yüksek injektion seviyelerinde gerçekleşir bu durumda direk güneş ışığı soğurulmasıyla ulaşılamaz bir durumdur.

$I_0 \exp(-E_g/kt)$ ile orantılıdır ve yasak enerji aralığındaki artış açık devre gerilimini artırır. Fakat eğer yasak enerji aralığı maksimum taşıyıcı oluşumu ile artarsa akım üretimi azalır. Bu nedenle I_{sc} ve V_{oc} 'yi maksimum yapan bir yasak enerji aralığı vardır. Yeryüzüne direk gelen güneş ışığı için teoriksel olarak ideal yasak enerji aralığı 1,40 eV'dur.

6) Eğim faktörü; akım/gerilim grafiğinin şekli eklem karakteristiğine bağlıdır. Seri direnç bile maksimum güç her zaman oluşan I_{sc} ve V_{oc} den daha azdır. Eklemin kalitesi V_{oc} gibi I_{sc} 'ye de bağlıdır.

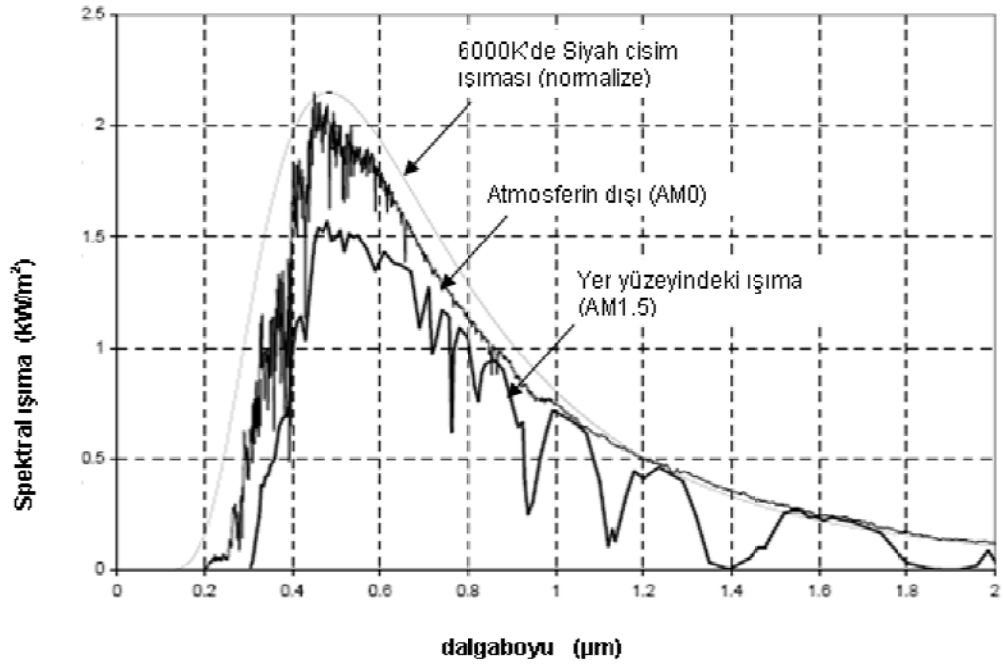
7) Seri direnç kaybı: pildeki güç kaybı voltaj akım grafiğinin düzleşmesine neden olur. Bu yüzey tabakasının iyi grid geometrisi kontağı, omik kontaklar ve düşük levha direnci ile minimanize edilir. Eklem kalitesinin etkisinin bir ölçüsü ve seri direnç performansta Dolum Faktör ile verilir.

3.2 Güneş Pillerinde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

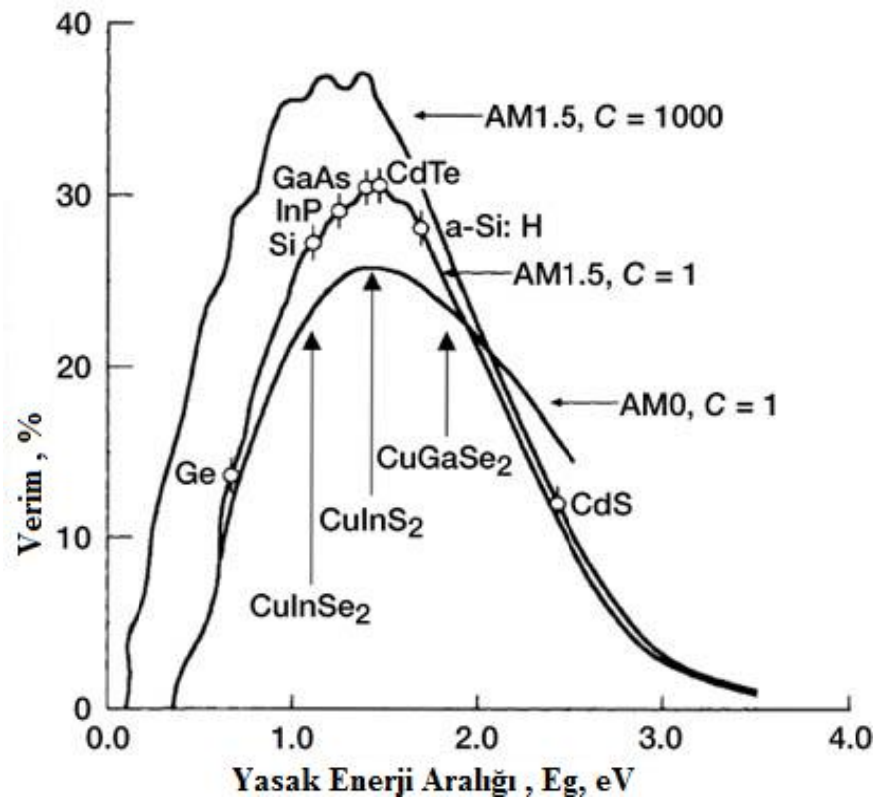
3.2.1. Yasak enerji aralığı

Güneş ışınlamında enerji taşıma birimleri olarak tanımladığımız fotoların enerjisi, yasak enerji aralığında eşit ya da ondan büyük ise, valans bandındaki bir elektrona enerjisini aktararak onu iletim bandına çıkarır. Güneş spektrumunda enerji 2.5eV (dalga boyu 0,5 μ m) değerinden daha büyük olan bölgedeki güneş ışınları çok az olduğundan, bu tür malzemede fotovoltaiik çevrimde soğurucu tabaka olarak kullanılmaya uygun değildir.

Şekilde atmosferi geçerek dünyamıza ulaşan güneş ışınlarının dalga boyları gösterilmiştir. Şekil 3.7'ye göre ideal bir güneş pilinin yasak enerji aralığı 1,4-1,6 eV aralığında olmalıdır.



Şekil 3.6. Güneşin spektral ışıması.



Şekil 3.7. Yarı iletken bant aralığı- verim

3.2.2. Soğurma katsayısı (α)

Bir yarıiletken üzerine foton gönderildiğinde; atomların elektronları ile fotonların etkileşmesi sonucu soğurma (absorption), geçirgenlik, yansıma ve kırılma gibi bazı optik olaylar meydana gelir (Askeland 1998).

Soğurma bir malzemenin içerisindeki elektriksel yüklerin malzeme üzerine düşürülen elektromanyetik dalgalarla etkileşmesi sonucunda ortaya çıkan enerji kaybı olarak tanımlanmaktadır (Omar 1993). Bu enerji kaybı materyalin atomları tarafından kullanılır. t kalınlığında herhangi bir materyal, elektromanyetik dalga ile etkileştiğinde, soğurma

$$I = I_0 e^{-\alpha t} \quad (3.13)$$

eşitliği ile verilir. Burada, I_0 ; malzeme üzerine gönderilen elektromagnetik dalganın şiddetini, I ; t kalınlığındaki materyalden geçen elektromagnetik dalganın şiddetini ve α ; soğurma katsayısını ifade etmektedir. α ,

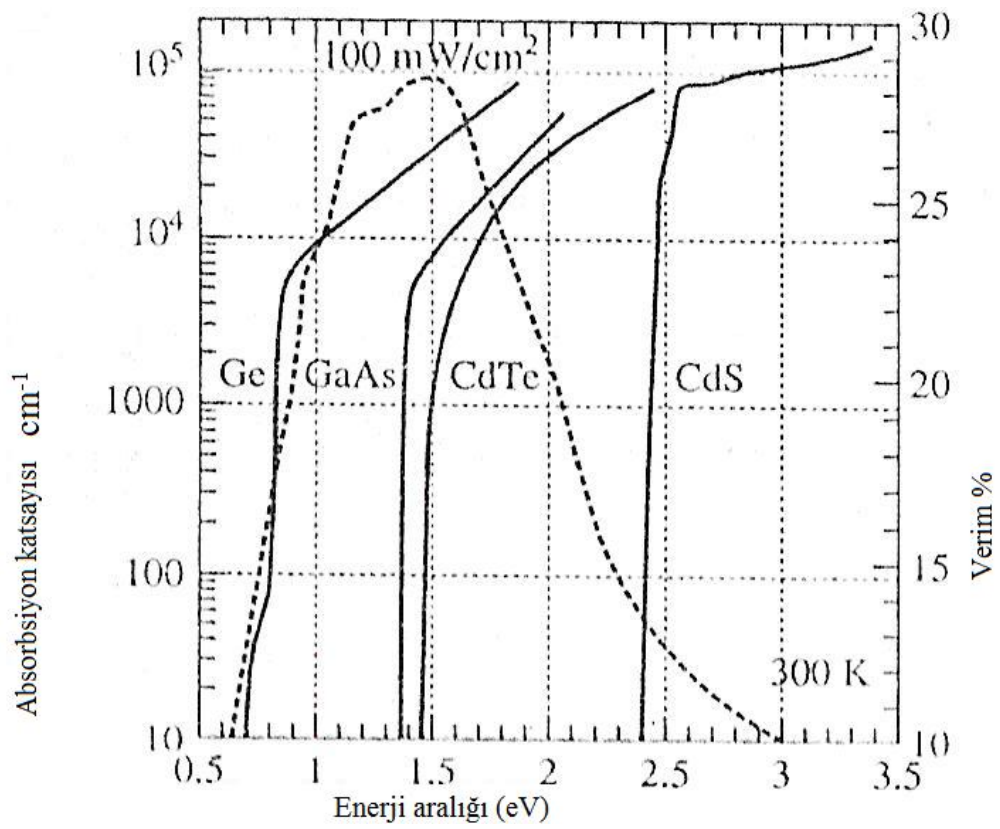
$$A = \log_{10}(I_0/I) \quad (3.14)$$

$$\alpha = 2.303 A/t \quad (3.15)$$

eşitlikleri ile bulunur. A soğurganlık olup, soğurma katsayısı α , elektromagnetik dalganın dalgaboyuna, malzemenin yoğunluğuna ve malzemenin yasak enerji aralığına bağlı olarak değişir (Nadeem and Ahmed 2000). Bir numuneden yayınlanan bir karakteristik ısının dalgaboyu bu materyale özgü bir özellik olduğu gibi, soğurma sınırının dalgaboyu da soğurucu numunenin bir karakteristiğidir. Değerlik ve iletim bantları arasındaki geçişler soğurma kenarına yol açar ve direkt geçişler için yasak enerji aralığının altında soğurma olayı beklenmez (Natsume and Sakata 2000). Soğurma olayında, yarıiletken malzeme üzerine gelen bir foton enerjisi, yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit veya ondan daha büyük olduğunda, yarıiletkenin değerlik bandındaki bir

elektron bu fotonu soğurur ve elektron değerlik bandından iletim bandına geçer. Bu geçişin ardından elektron ardında bir boşluk bırakır, böylece elektron boşluk çifti oluşturulur.

Güneş ışığının malzeme içinde birim uzunluk başına soğurulma miktarı büyük ise güneş ışınları daha kısa mesafede soğurulacak ve daha az malzeme kullanılacaktır.



Şekil 3.8. Yarı iletken bant aralığı- soğurma katsayısı

3.2.3. Azınlık taşıyıcıların ömür süresi

Taşıyıcıların ömür süresi p- n eklem bölgesinde oluşan elektron- hol çiftlerinin yeniden birleşmesi için geçen süre olarak tanımlanır. Bu süre güneş pili veriminde oldukça etkilidir. Çünkü kontak noktalarına ulaşmadan tekrar birleşen çiftlerin akıma hiçbir etkisi yoktur.

3.2.4. Örgü sabiti

Tek alttaş üzerinde farklı yarıiletken katmanların direkt olarak büyütüldüğü çok eklemlı güneş pillerinde; optik geçirgenliğin ve maksimum akım iletkenliğinin sağlanması için bütün katmanların kristal yapılarının uyumlu olması gerekmektedir. Örgü sabiti bir kristal yapıdaki atomların birbirine olan uzaklığını tanımlar. Katmanlar arasındaki örgü uyumsuzluğu, katmanların kristal yapılarında bozulmalara ve güneş pilinin veriminde önemli oranda bir azalmaya sebep olmaktadır. NREL, %0.01 oranındaki bir örgü uyumsuzluğunun bile güneş pili tarafından üretilen akımı azalttığını göstermiştir (Begotti *et al.* 2004). Örgü sabitleri birbirine yakın malzemelerin türevleri kullanılarak yüksek verimli çok eklemlı güneş pilleri üretilmektedir (Kim *et al.* 2004). Bazı yarıiletken bileşimlerin örgü uyumlarını sağlamak ve verimin azaltmamasını önlemek için, yapı içersine çok düşük oranlarda grup-III atomu katkılanarak bu katmanlar örgü uyumlu hale getirilebilir (Varriano *et al.* 1992).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Güneş Pillerinde Kullanılan Malzemeler

Yüzyıllar önce soy metallerin ince filmleri cam ve seramik üzerine dekorasyon olarak kullanılmış olması, 1940'lı yıllardan itibaren yarıiletken teknolojisi üzerine olan ilgiyi günümüze kadar devam ettirmiştir. Özellikle son yıllarda bu alanla ilgili teknolojik ve bilimsel araştırmalarda önemli bir yer tutan yarıiletken ince film bilimi bütün dünya genelinde temel bir araştırma alanı olarak gelişmiştir. İnce filmler, farklı üretim teknikleri kullanılarak kaplanacak malzemenin atomlarının ya da moleküllerinin, bir taban üzerine ince bir tabaka halinde oluşturulan ve kalınlıkları tipik olarak 1 µm civarında olan yarıiletken malzemelerdir (Bilgin 2003).

4.1.1 Tek kristal Si

Yasak enerji aralığı 1,12 eV dur. İndirekt bant yapısına sahip olmasından dolayı 3,40 eV dan düşük enerjili fotonlar soğurulamıyor. Bu da ideal bir güneş pili olmasını engelliyor. Buna rağmen ince filmler için önemli bir taban malzemedir. Düşük ya da yüksek sıcaklıklarda büyütülebilir. Yüksek sıcaklıklarda c- Si ve bulk Si özellikleri birbirine benzer. 30 µm kalınlığında olması optiksel amaçlı kullanmak için yeterlidir.

Tek kristal Silisyum bloklardan üretilen güneş pillerinde laboratuvar şartlarında %24, ticari modüller de ise %15 'in üzerinde verim elde edilmektedir. Dökme silisyum bloklardan dilimlenerek elde edilen polikristal silisyum güneş pilleri ise daha ucuza üretilmekte, ancak verimleri daha düşük olmaktadır. Polikristal Silisyum güneş pillerinin verimi, laboratuvar şartlarında %18, ticari modüllerde ise %14 civarındadır. Doğada en çok bulunan elementlerden biri olduğu için günümüzde hala popülerliğini korumaktadır.

4.1.2. Amorf Si

Kristal silisyuma göre güneş pillerinde daha az kullanılır. Çünkü yüksek bağ uzunluğu vardır. Taşıyıcıların rekombinasyonu ile fermi seviyesi kontrol edilebilir. Hidrojen ile katkılayarak içerisindeki bağ yoğunluğu etkisizleştirilebilir (veya daha az). Kristal silisyuma göre özellikleri güneş pili için daha uygundur. Dop edilmesi daha kolay, homoecklem cihaz yapımında uygun ve dalgaboyu optiksel soğurma için uygundur.

1980' li yıllarda kristal silisyum daha caziptir. Çünkü kristal silisyum ile karşılaştırıldığında düşük verim ve uygunluk problemleri a-Si:H güneş pillerini kısıtlamıştır.

Hidrojenlenmiş amorf silisyum (a-Si:H) ilk olarak, 1955 yılında Sterling tarafından incelenmiş; fakat hidrojenin rolü üzerinde durulmamıştır. a-Si:H, amorf silisyumdan (a-Si 'dan) farklı bir çok özelliğe sahiptir. Fotoiletkenlik, a-Si filmlerde ihmal edilebilir olduğu halde, a-Si:H filmlerde büyük bir fotoiletkenlik olayı gözlenmektedir. Güneş pilleri için de önemli olan fotoiletkenliktir. 1977 yılında, Wronski ve Carlson tarafından ilk defa a-Si:H güneş pili yapılmış ve verimi %5.5 bulunmuştur (Köse 1986).

4.1.3. GaAs

Yasak enerji aralığı 1.42eV'dur. Çok eklemli güneş pillerinde verim %30 a ulaşmıştır. Direk bant yapısına sahip olmaları bir avantaj olsada üretim maliyeti yüksek olduğu için yeteri kadar kullanım alanı olmamıştır.

1973 yılı bir odak noktası olmuştur. Bu yılda meydana gelen “violet cell” Si piller son teknoloji Si güneş pillerinden geliştirilen kısa dalga boyu verimde %30 luk bir artışa sebep olmuştur (Dimroth *et al.* 2001) . Geleneksel p-n eklem güneş pillerinde GaAs tek güneş ışması altında %25 civarında verim sağlayan optimal bir bant aralığına (1.40 eV) sahiptir. Günümüzde üretilen iki tabakalı ve üç tabakalı yapılarda; GaInP (1.90 eV), GaAs (1.40 eV) ve Ge (0.70 eV) kullanılmaktadır (Dimroth *et al.* 2001). Daha ilerideki

çalışmalarda ise AlGaInP (2.20 eV), AlGaAs (1.60 eV), GaInP (1.70 eV), GaInAs (1.20 eV), GaInNAs (1.0-1.10 eV) kullanılması hedeflenmektedir (Dimroth *et al.* 2001). Ayrıca örgü uyumlu GaInP (1.80-1.90 eV) ve InGaAsP (1.20-1.30 eV) katmanlarından oluşan pillerin yüksek verime ulaşması beklenmektedir.

Üretilen ilk AlGaAs/GaAs iki eklemlı güneş pilinden yüksek verim elde edilemedi (Hutchby *et al.* 1985). Bunun sebebi, AlGaAs içindeki oksijen safsızlıklarına bağlandı (Ando *et al.* 1987). Çift hetero-eklemlı tünel diyot kullanılarak üretilen AlGaAs/GaAs iki eklemlı yapı ile %20,2 verim elde edildi (Yamaguchi *et al.* 1987). 1990'da, üst katmandaki hücre için InGaP önerildi (Olson *et al.* 1990) ve InGaP/GaAs yapılı iki eklemlı pillerde %30'un üzerinde verim sağlandı (Takamoto *et al.* 1997). InP tabanlı InGaAsP yapıları kullanılarak yüksek verimli yapılar üretildi (Schimper *et al.* 2006). İki eklemlı güneş pillerinin yanı sıra üç ve daha fazla eklemlı yapılar üzerine çalışmalar devam etmektedir; son olarak üretilen InGaP/GaAs/Ge 3E yapı ile yüksek ışık konsantrasyonu altında, %41,1 verim elde edildi (Takamoto 2009).

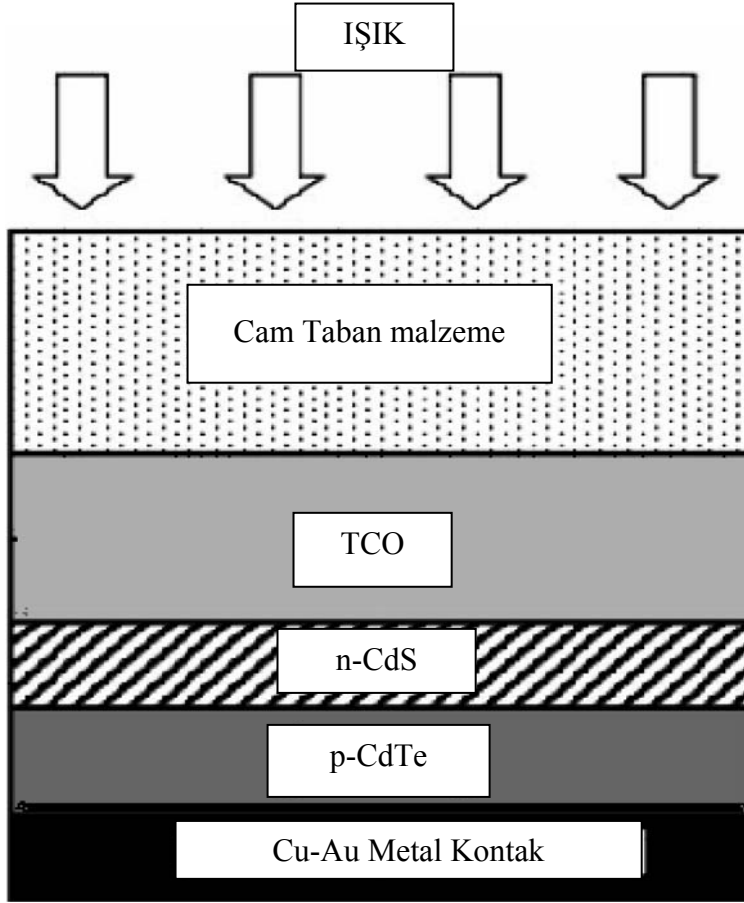
4.1.4. CdTe / CdS

Tipik bir superstrate CdTe/CdS yapısı Şekil 4.1' de gösterildiğı gibi 4 tabakadan oluşur.

- 1) Işığđ geçiren ve ön kontak olan oksit(TOC) tabakası
- 2) Pencere tabaka olarak adlandırılan CdS ince film
- 3) Soğurucu tabaka olan CdTe ince film
- 4) Son olarak CdTe tabakası üzerine arka kontak.

TOC kullanılmasının sebepleri:

- 1) Yüksek geçirgenlik; 400-860nm arasında ilgili bölgede %85 den daha iyidir.
- 2) Düşük direnç göstermesi $2 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$
- 3) Diğer tabakalara göre maksimum sıcaklıkta daha iyi uyum sağlar. Bu TOC 'dan film tabakasına difüzyonun gerçekleşmemesi anlamına gelir.

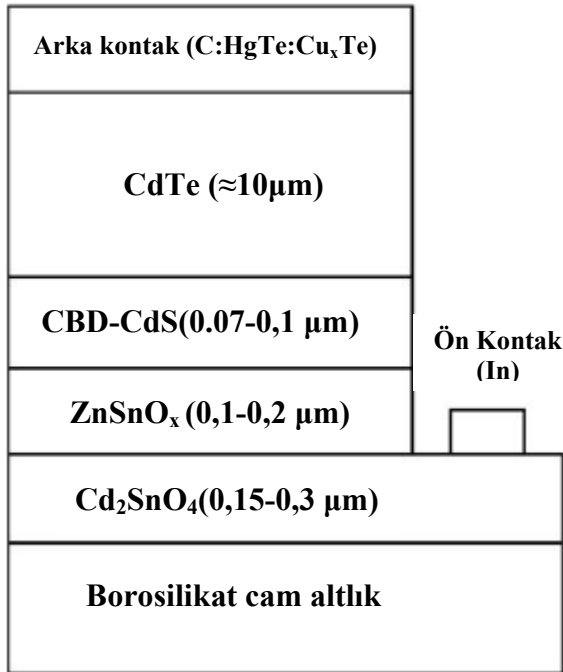


Şekil 4.1. Superstrate CdTe/CdS güneş pili yapısı (Arturo 2005)

Çizelge 4.1 En çok kullanılan saydam iletken oksitler (TOC) ve koruyucu tabakaların özellikleri

Materyal	Direnç (Ωcm)	Geçirgenlik(%)
SnO_2	8×10^{-4}	80
$\text{In}_2\text{O}_3:\text{Sn}$	2×10^{-4}	80
$\text{In}_2\text{O}_3:\text{Ga}$	2×10^{-4}	85
$\text{In}_2\text{O}_3:\text{F}$	$2,5 \times 10^{-4}$	85
Cd_2SnO_4	2×10^{-4}	85
Zn_2SnO_4	10^{-2}	90
$\text{ZnO}:\text{In}$	8×10^{-4}	85

Yasak enerji aralığı 1.5 eV' dur. Yüksek soğurma katsayısına sahiptir. Çoğunlukla CdS ile heteroeklem diyot üretilir. Teorik olarak verimi %29,5 olarak hesaplanmıştır. İlk ince film güneş pili olarak CdS yapısına benzer p-Cu₂Te/ n-CdTe heterojunction güneş pili %6 verimlilikle Cusana (1963) tarafından yapıldı. 1982 yılında Kodak laboratuvarında %10 olan verim sınırı n-CdS/ p-CdTe heterojunction yapı ile aşıldı (Tyan 1982). CdS' ün yasak enerji aralığı 2,40 eV dur. CdS burada pencere olarak kullanılır. n-tipi CdS p-tipi CdTe üzerine buharlaştırılarak yapılan ilk güneş pili Müller ve arkadaşları tarafından 1960 da yapıldı verimi %5 in altındaydı (Muller 1964,Dutten1958). 1977 de Mitchell ve arkadaşları verimi %7,9 a çıkardılar (Mitchell *et al.* 1977). En yüksek verim kimyasal banyo çökeltmesi yöntemi kullanarak fosfor ile dop edilmiş tek kristal p-tipi CdTe üzerine 0.5µm kalınlığında CdS eklenerek oluşturulan pilden elde edilmiştir ve verimi %11,7 olmuştur (Yamaguchi *et al.*1977). Florida Üniversitesinde National Renewable Laboratuvarı'nda verimi %16 ya çıkardılar (Ferekides *et al.* 1993). CdS/CdTe güneş pillerinde yüksek verim elde etmek için çalışmalar olmuştur. Bu



Şekil 4.2. En yüksek verim elde edilen CdTe/CdS güneş pili yapısı (Arturo 2005)

çalışmalar sonucunda USA'de NREL 'de Wu önderliğindeki araştırmacılar bu tür güneş pilleri için en yüksek verimi elde etmişlerdir(Wu *et al.*2001). Şekil 4.2' de bu güneş

pilinin yapısı ve kalınlığı gösterilmiştir. 10µm CdTe tabaka, çok ince 0,1 µm kalınlığında CdS tabaka kullanmışlardır. p-tipi CdTe'a çok iyi omik kontak yapmak için grafit kontak Cu içermektedir. Bu araştırma sonucuna göre $V_{oc}=845\text{mV}$, $J_{sc}=25,88\text{mA/cm}^2$, $n=\%16,5$ ve $FF=\%75,5$ olarak bulunmuştur.

4.1.5. Cu(In,Ga)(Se,S)₂ (CIGS)

CIGS güneş pilleri ince film teknolojisi kullanılarak yapılan ve en yüksek verime sahip olan güneş pilleri yapısıdır. Soğurma katsayısı yüksektir ve yasak enerji aralığı ayarlanabilir, bu özelliği CIGS güneş pillerini diğerlerinden ayıran en önemli avantajıdır. Ga elementinin yapıya katkılanmasıyla verimliliği artırılabilir. Ancak yarıiletkeni oluşturan element sayısı arttıkça malzemenin özelliklerinin denetimi de bir o kadar zor olmaktadır. CIGS güneş pillerinde ilk yıllarda taban malzeme olarak cam kullanılmış ama günümüzde ki çalışmalarda metal levha (Kessler and Rudman2004, Satoh *et al.*2000, Herz *et al.*, 2002) ve polimerler(Başol *et al.*1996, Tiwari *et al.*1999, Hanket *et al.*2002, Birkmire *et al.* 2005, Ishizuka *et al.* 2008, Gecys *et al.* 2009, Zhang *et al.*2009) taban malzeme olarak kullanılmaktadır.

CIGS güneş pilleri GaAs'a göre radyasyona olan dayanıklılığı(Guillemoles 2002) ve hem enerji depolamada hem de enerji iletimindeki esnekliği(Ishizuka *et al.*2008) uzay uygulamalarında ilgi çekmiştir.

CuInSe₂ in tarihi 1970 lerin başında Bell Laboratuvarında yapılan çalışmalarla başlamasına rağmen karakterizasyonu ve sentezi 1953 yılında Hahn tarafından yapıldı (Hahn *et al.* 1953) ve diğer üçlü malzemelerle birlikte birçok grup tarafından karakterize edildi (Shay *et al.* 1974). İlk CuInSe₂ güneş pili p-tipi CuInSe₂ üzerine n-tipi CdS buharlaştırılarak yapıldı (Wagner *et al.* 1974). Güneş pillerinin verimi açık ve güneşli bir günde New Jersey' de %12 olarak bulundu (Shay *et al.*1975). Bu çalışmaya kadar CuInSe₂ tek kristal üzerinde az çalışıldı. Çünkü yüksek kalitede kristal büyütmek zordu(Meakin 1985). Tek kristal yerine doğal avantajları nedeniyle ince film güneş

pillerine ilgi odaklandı. İlk ince film $\text{CuInSe}_2/\text{CdS}$ aygıtı CuInSe_2 tozları Se ile birlikte buharlaştırılarak filmler Kazmerski tarafından fabrikasyon edildi (Kazmerski *et al.* 1976). Oysa Boeing tarafından CuInSe_2 ince filmleri en yüksek verimlilikleri %9,4 olarak bulunduğu ilgi çekmeye başladılar (Mickelsen *et al.* 1981). Boeing' in yaptığı çalışmalar günümüzün yüksek verimli güneş pillerinin yapımına önemli katkıda bulundu:

In yerine Ga elementi konularak CuInSe_2 nin yasak enerji aralığı 1.02 eV' dan 1,1 ile 1,2 eV arasına çıkarılabileceği gösterildi(Chen *et al.* 1987).

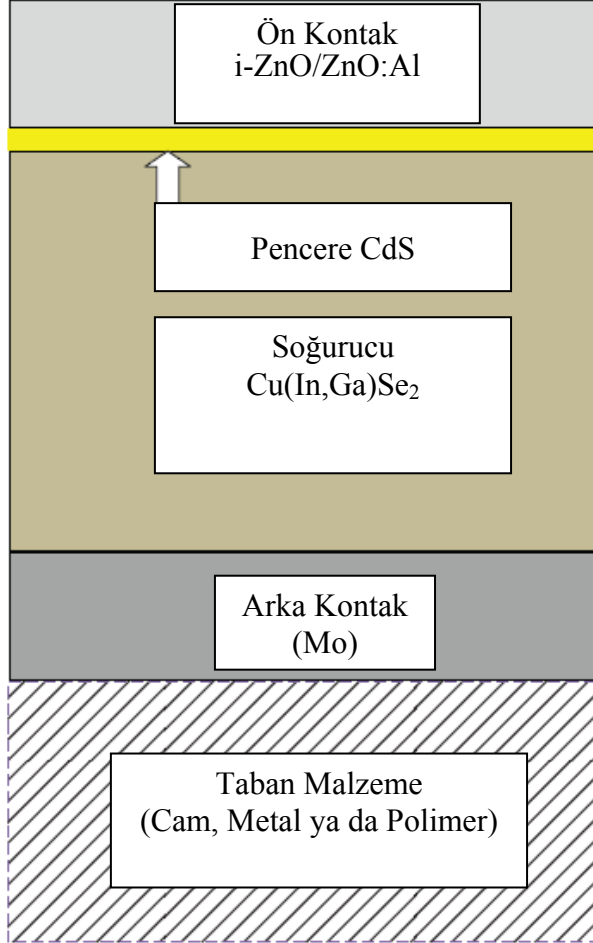
1-2 μm kalınlığında az dop edilmiş $(\text{CdZn})\text{S}$ katmanı ile $\leq 50\text{nm}$ daha ince dop edilmemiş CdS ve iletken ZnO akım taşıyan katman ile yer değiştirerek güneş pilinin akımını artırdığını gösterdi (Potter 1986).

Soda kireç camı seramik veya borosilikat cam tabaka ile yer değişti. Bu değişim hem düşük maliyeti getirdi hemde CuInSe_2 ile daha iyi sağlayan bir yapı oluştu.

Emici fabrikasyon süreçleri geliştirilmesi sonucu band aralığı ayarlanabilir oldu ve bu durum çalışma akım ve voltajının iyileştirilmesini sağladı(Tarrant *et al.* 1993; Gabor *et al.* 1996).

CuInSe_2 ' nin elektriksel ve optiksel özellikleri, direk bant yapısı ve doğal p-tipi olması sebebiyle güneş pillerinde kullanılan ideal malzemedir. Yüksek verimli CuInSe_2 tabanlı güneş pilleri dünya üzerinde en az 10 grup tarafından fabrikasyon edilmektedir. Bu gruplar farklı teknolojiler uygulayarak aynı $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ yapıda güneş pili üretmişler ve arka kontak olarak Mo kullanmışlardır. Yaygın olarak üretilen CIGS güneş pilinin yapısını Şekil 4.3' de görebiliriz. Uygun işlem koşulları ve malzeme uygunluğundan dolayı bu yapıdan en yüksek verimi elde edebiliriz. Pilin hazırlanması arka kontak yapılması ile başlar, bu olay genellikle cam üzerine Mo kontak yapılır ve bunu p-tipi CIGS soğurucu tabaka takip eder. Daha sonra CdS veya ince n-tipi pencere malzeme, katkısız ZnO, n-tipi saydam iletken (genellikle ZnO veya In_2O_3 ile dop edilmiş) metal

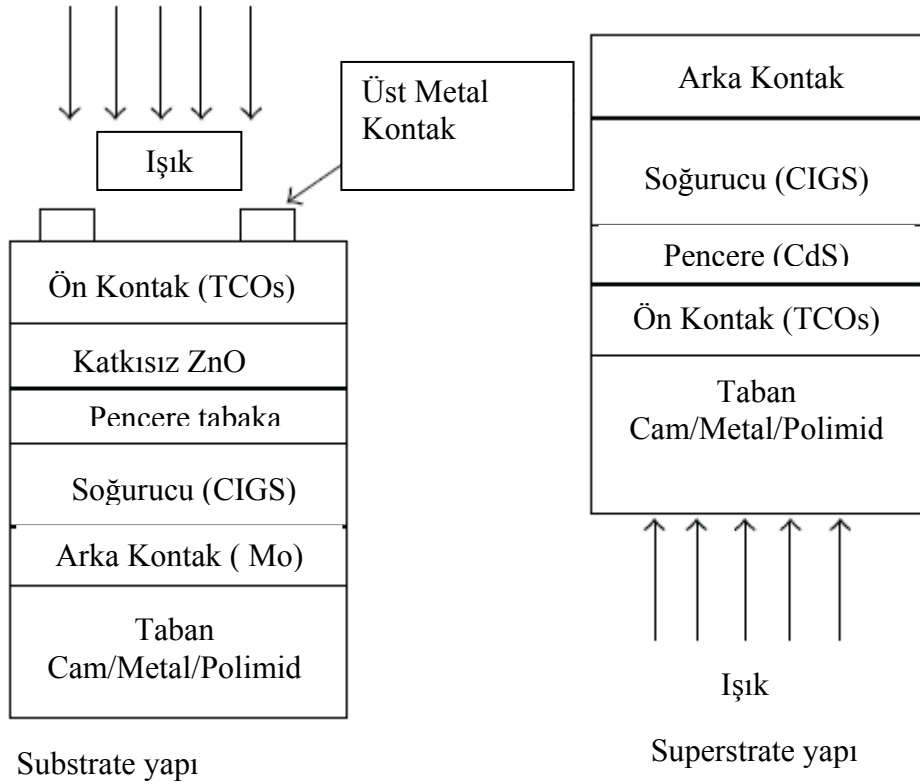
grid ve antirefleks tabaka ile devam eder. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda verim %19,7 olarak bulunmuştur (Contreras *et al.* 2005)



Şekil 4.3. CuInSe güneş pili yapısı(Udai 2010)

Taban malzeme konfigrasyonunda kullanılan cam superstrate konfigürasyonda büyütülen piller için gerekli değildir (Şekil 4.4). CIS tabanlı superstrate güneş pilleri Duchenin ve arkadaşları tarafından incelenmiştir (Duchemin *et al.* 1988), fakat verim %5'i geçmemiştir. CdS/CIGS superstrate pillerde düşük verimin ana sebebi CdS soğurucu tabaka depozisyonu için gereken yüksek sıcaklık sırasında Cd'un, CIS(veya CIGS) tabaka içerisine istenmeyen difüzyonudur (Nakada *et al.* 1994). Bu problemin üstesinden gelmek için kararlı buffer materyal , electrodeposition, düşük taban sıcaklığında buharlaştırma ve screen printing gibi düşük sıcaklık depozisyon işlemleri

incelenmiştir. Nakada ve Mise(2001) CdS ile katkısız ZnO'nun yerini değiştirerek ve CIGS depozisyonu sırasında Na_xSe buharlaştırarak yeni bir buluş elde ettiler. Bileşimin soğurucu tabakaya eklenmesi ile verimi %12,8' e geliştirdiler.



Şekil 4.4. CuInSe güneş pili yapısı (Udai 2010)

4.1.6. Organik yarıiletkenler

Organik yarıiletkenler 0.50 eV' luk bağlayıcı bir enerji ile foton soğurarak elektron-hol çifti oluşmasını sağlar. Fakat sadece az bir kısmı ışığı soğurur. Çünkü yasak enerji aralığı 2.0 eV dan daha yüksektir. Kalınlığı 100nm den daha ince olmalıdır.

Pochettino (1906), Volmer (1913) anthracene denilen organik bileşikle çalışırken foto iletkenliği gözlemlemişlerdir. Bu olay foto iletkenliğe sahip ilk organik bileşiğin incelenmesidir. 1960'ların başında pek çok boyanın, methilen mavi gibi, yarı iletken

olma özelliğine sahip olduğu keşfedildi (Bube 1960). Daha sonra bu boyalardan bazılarının yarı iletken özelliğe sahip olduğu ortaya çıktı. Bu boyalar sonraki çalışmalarda güneş pillerinde kullanılmaya başlandı.

Organik molekül içeren malzemelerle yapılan güneş pillerine organik güneş pilli denir. Bu malzemelerin ucuz olması, kolay işlenebilirliği ve görünebilir bölgeye kadar uzanabilen soğurma aralığının olması sebepleri ile bu malzemelerin güneş pillerinde verimli bir şekilde kullanılması umut vaat etmektedir. Bu malzemeler istendiğinde birkaç nanometre kalınlığında kaplanabilmektedir.

Organik güneş pilleri eksitonik güneş pilleri olarak da adlandırılmaktadır. Çünkü güneş pilli tarafından absorbe edilen ışık elektron-boşluk çifti olan eksitonları oluşturmaktadır. Düşük dielektrik sabitleri ve moleküller arası zayıf bağlar nedeniyle ışık absorpsiyonuyla eksitonlar oluşturulur (Hoppe *et al.* 2004).

Organik malzemelerin yük transfer edici özelliği çok iyi değildir. Bu sebepten dolayı organik tabanlı güneş pilleri hala istenilen verime ulaşabilmiş değildir. Bu sorunu aşmak için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bunun için ilk çalışma C60 denilen n-tipi yarı iletken malzemenin kullanılmasıdır (Sarıçiftçi *et al.* 1992). Geçen yıllar içerisinde bulk heterojunction denilen aynı çözelti içerisinde p-tipi konjuge polimerler ile fullerene denilen n-tipi malzemeler bir arada kullanılarak fotovoltaiik cihazlar yapılmıştır (van Duren *et al.* 2004; Wienk *et al.* 2006). Bu cihazların bir tanesi şeffaf ve yük seçici olan iki elektrot arasına aktif katman sandviç şeklinde sıkıştırılarak yapıldı. Bu cihazlardan poly(3-hexylthiophene)(P3HT) ve fullerene türevi (PCBM) ile yapılanlarının güç dönüşüm verimliliği %4-5 civarında olmuştur (Reyes-Reyes *et al.* 2005).

Organik malzemelere anorganik malzemeler eklenerek hem dayanıklılık artırılır hem de verimlilik artırılır. CdSe nano parçacıklar poly[2-methoxy-5-(2'-ethylhexyloxy)-1,4-phenylene vinylene](MEH-PPV) ile karışımında monokromatik olarak kuantum verimliliği %12 ye çıkmıştır (Greenham and Peng 1996, Greenham and Peng 1997). Kadmiyum dışında kurşun da organik güneş pilli yapımında kullanılan

malzemelerdendir. PbS ve MEH-PPV yapılı güneş pili 1V gibi yüksek bir açık devre voltajı gösterirken verim % 0.7 de kalmıştır (Watt *et al.* 2005). Hibrit pillerde en çok kullanılan yapılar TiO_2 ve ZnO dur. Bu malzemeler çok farklı şekilde ve kolayca üretilmektedir. Son yapılan çalışmalarda anorganik yarıiletken tabakalar kullanılarak yük geçişi kolaylaştırılmaya çalışılmaktadır. ITO/ZnO/PCBM:P3HT/vanadyum oksit/Ag şeklinde yapılan pil ile verim %3.9 a yükselmiştir (Takanezawa *et al.* 2008). Bu anorganik malzemeler dışında CuInS_2 (Arici *et al.* 2002), CuInSe_2 (Arici *et al.* 2004) HgTe (Güneş *et al.* 2006), InP (Pientka *et al.* 2004) gibi diğer malzemeler de polimer güneş pilleri yapımında kullanılmıştır. Fakat bu çalışmaların hiçbirinde güç dönüşüm verimliği %1 in üzerine çıkamamıştır.

4.1.7. Boya bazlı güneş pilleri

Boya bazlı güneş pillerinin ilk örneğini Gratzel ve arkadaşları(1991) yapmıştır . Boya bazlı pillerde bugün en yüksek verim 11.04% olarak elde edilmiştir. Güneş ışığı pili aydınlattığı zaman boya molekülleri fotonlar tarafından uyarılır. Uyarılan molekülden elektron çok hızlı bir şekilde yarı iletken elektrotun iletkenlik bandına enjekte olurlar. Buradan nano kristal yapı boyunca ilerleyip saydam elektroda ulaşır dış devreye geçerler. Elektron kaybeden boya daha sonra elektrolit tarafından verilen elektronla orijinal durumuna döner. Bu durumdan dolayı boya bazlı güneş pillerinde net yük sıfırdır ve kimyasal bir değişim olmaz.

Boya bazlı pillerde çoğunlukla rutheniyum bazlı boyalar kullanılmaktadır. Ayrıca sıklıkla 4-tert-butilpridin (TBP) ve N-metilbenzimidazole (NMBI) denilen maddeler elektrolit çözeltisinin içerisinde kullanılır. Bu malzemeler elektronların rekombine olma olasılığını azaltıp belirgin bir şekilde enerji dönüşümünün verimliliğini ve doyum faktörünü arttırmıştır (Green *et al.* 2007).

4.1.8. Hibrid güneş pilleri

Poli[2-metoksi-5-(2-etil-heksiloksi)-1,4-fenilvinil] (MEH-PPV), poli (3-hehyl thiophene) (P3HT) gibi konjüge polimerler yüksek boşluk mobilitesine düşük elektron mobilitesine sahiptirler (Antoniadus et al.). Fotovoltaik sistemlerin performansları ise azınlık yük taşıyıcılarının mobiliteleri tarafından sınırlandırılmaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak amacıyla, konjüge polimerler içerisine elektron akseptör karakterde ve elektronlara iletim yolu olabilecek n-tipi nanoparçacıkların uygun oranlarda katılması gerekmektedir. En iyi sonuç konjüge polimerler içerisine C₆₀ (ShaheenSE *et al.*2001) ve CdSe, CdS, (Alivisatos 1996, Huynh *et al.* 2002) nanoparçacıkları katılarak elde edilmiştir.

Literatürde ilk konjüge polimer: nanokristal hibrid güneş hücresi çalışmasını Greenham ve arkadaşları 1996'da rapor etmiştir. (Greenham *et al.*1996) Rapor edilen ilk güneş hücresi MEH-PPV içerisinde dağıtılmış CdSe QD'lerden oluşmaktadır, dönüşüm verimi %0,6'dır. Bu çalışmadan sonra birkaç grup dönüşüm verimi %1,8'e varan verimler rapor etmiştir. (Sun *et al.*2003; Liu *et al.* 2004). Yarıiletken nanoparçacıklar söz konusu olduğunda, verim nano-parçacıkların morfolojisi ile doğrudan ilişkilidir. Greenham ve arkadaşları, yarıiletken QD'ların morfolojisinin yük transfer kinetikleri ve hibrid güneş hücresinin verimi üzerine etkisinin görmek amacıyla 2003 yılında MEH-PPV:CdSe hibrid sisteminde küresel nanoparçacık yerine dallanmış CdSe nanoparçacıklar kullanmıştır. Söz konusu sistemin enerji dönüşüm verimi %1,8 olarak rapor edilmiştir (Sun *et al.*2003)

Alivisatos ve arkadaşlarının 2009 yılında rapor ettikleri çalışmada ikili QD yarıiletken yerine üçlü yarıiletken sistemi sentezlenerek güneş hücresi uygulaması yapılmıştır. Solvotermal yöntemle sentezlen PbS_{1-x}Se_x QD'ların HR-TEM analizleri parçacık boyutunu 7 nm olarak belirlemiştir. QD nanoparçacıkların yüzeyi oleik asit yüzey aktif maddesi ile kaplanmıştır. PbS_{1-x}Se_x QD'lar ITO yüzeyine hekzandaki çözeltisinde daldırarak kaplama yöntemi ile kaplanarak 1,3-benzenedithiol çift tabaka güneş hücresi üretilmiş ve %3 elde edilmiştir (Ma *et al.* 2009).

SONUÇLAR ve ÖNERİLER:

Dünyada ortaya çıkan enerji ihtiyacına bağlı olarak, alternatif enerji kaynakları arasında en yüksek enerjiye sahip olan güneşten faydalanma gereği doğmuştur. Yaklaşık olarak 2050 yılında fosil yakıtların tükeneceği göz önünde bulundurulursa güneşten enerji elde etmek oldukça önem kazanmaktadır. Bu çalışmada birçok alanda enerjisinden faydalanan güneşin, elektrik enerjisi üretmek için kullanılan güneş pilleri ele alınmıştır.

Günümüzde fotovoltaik pazarı hızla artmakta ve çok sayıda güneş pili üretim teknolojisi mevcuttur. Ancak güneşin enerji var olan enerji potansiyeli göz önüne alındığında günümüz uygulamalarından elde edilen enerji miktarı çok düşüktür. Yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen elektrik enerjisinin yaklaşık % 1'lik bölümü PV ler tarafından elde edilmektedir. Fosil yakıtlarının etkin olduğu enerji pazarında güneş teknolojilerinin maliyeti ve elde edilen enerji miktarının fosil yakıtlara göre az olması güneş pillerinin pazardaki yerini etkilemektedir. Bu rekabeti arttırmak için bilimsel ve teknolojik olarak en büyük hedef verimin artırılması ve maliyetinin azaltılmasıdır.

2007 yılı sonunda toplam fotovoltaik pazarda 2006 yılına göre %62'lik bir büyümeyle 2826MW'lık enerji elde edilmiştir. Benzer şekilde 2006 yılında ince film güneş pilleri ile elde edilen enerji miktarı 181MW'tan 2007 yılında 400 MW'a çıkarak PV pazarının %12 'lik kısmını oluşturmuştur.

Birinci nesil güneş pillerinde tek kristal silisyum ile çalışmalara başlanmış ve bu çalışmalar sonucunda %6 verimden %24 verime kadar ulaşılmıştır. Polikristal silisyum güneş pillerinde ise %18'lik bir verime ulaşılmıştır.

İkinci nesil güneş pillerinde çalışmalar sonucunda daha çok aşama kaydedilmiştir. Gelişen teknolojiye paralel olarak ince film teknolojisi de büyük ölçüde gelişmiştir. Yasak enerji aralıklarının ayarlanabilir olması sebebiyle güneş enerjisinden daha fazla

yararlanılarak verim artışı sağlanmıştır. Gelecekte yapılması planlanan çalışmalar sonucunda silisyum güneş pillerinin pazarda ki yerini almaları beklenmektedir.

Üçüncü nesil güneş pilleri güneş pilleri teknolojisinde çok yeni olmasına rağmen düşük maliyetli olmasından dolayı son yıllardaki çalışmaların birçoğu bu güneş pilleri üzerinde yoğunlaşmıştır. Güneş pillerinin verimi %1 ile başlamasına rağmen kısa sürede %10 luk verimlere ulaşılmıştır.

Kuantum kuyulu ve çok eklemlili güneş pillerinde verim değerleri yüksek olmasına rağmen maliyet göz önünde bulundurulduğunda henüz ticari anlamda bir aşama kaydedememişlerdir.

Yapılan bu çalışmada güneş pili üretiminde dikkat edilmesi gereken hususlar ve yaygın olan güneş pili malzemeleri incelenmiştir. Araştırmalar sonucunda güneş pili malzemesi seçiminde yasak enerji aralığı, yarıiletkenin bant yapısı, akıma katkı sağlayan azınlık taşıyıcıların yaşama zamanı, soğurma katsayısı en önemli faktörler olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca güneş pilinin maliyetini azaltmakta kullanım alanlarına uygulama da önemli bir faktördür.

Bir zamanlar laboratuvar çalışmaları ve uzay uygulamalarıyla kullanım alanı kısıtlı olan güneş pilleri günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Bu uygulama alanları içerisinde en çok aydınlatma sistemleri göze çarpmaktadır. Sokak aydınlatması, trafik ikaz sistemlerinin enerji ihtiyacının karşılamada, su pompalarının çalışması için gerekli olan enerjiyi karşılamada, evlerde ve binalarda elektrik enerjisi üretiminde v.s gibi uygulamalarını görmekteyiz.

Ülkemizde genellikle sinyalizasyon, Telekom istasyonları, orman genel müdürlüğü yangın gözetleme istasyonları, deniz feneri ve otoyol aydınlatılmasında kullanılmaktadır.

Gelecekte elektrik üretiminin büyük bir çoğunluğu güneş pilleri üzerinden sağlanması amaçlanmaktadır. Ülkemizde de güneş pili ve fotovoltaiik sistemlerin geliştirilmesi için hem devlet hem de özel girişimciler tarafından desteklenmesi sağlanmalıdır.

KAYNAKLAR

- Alferov ZhI, Fiz. Tekh. Poluprovodn. 4, 2378 (1970).
- Alivisatos A.P., Science, 271, 5251. (1996) 933-937.
- Ando H., C. Amano, H. Sugiura, , M. Yamaguchi, A. Salates, Nonradiative e-h recombination of mid-gap trap in AlGaAs by MBE, Jpn. J. Appl. Phys. 26, (1987).
- Antoniadus H, Abkowitz MA and Hsieh BR 1994 Appl. Phys. Lett. 65 2030.
- Arici E., H. Hoppe, F. Schäffler, D. Meissner, M.A. Malik, N.S. Sariciftci Appl Phys A 79(2004) 59.
- Arici E., N.S. Sariciftci, D. Meissner Mol Cryst Liq Cryst 385 (2002) 129.
- Arturo Morales-Acevedo "Thin film CdS/CdTe solar cells: Research perspectives" Solar Energy Vol.80 pp. 675-681(2006)
- Askeland, D.R. 1998, Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri, (Çev. M. Erdogan), Cilt 2, Nobel Yayın Dağıtım Ltd. Sti., Ankara, 712 s.
- Barham K. W. J., Duggan G., " A new approach to high-efficiency multi-band-gap solar cells", Journal of Applied Physics, 67(7): 3490-3493 (1990).
- Başol B. M., V. K. Kapur, C. R. Leidholm, A. Halani, and K. Gledhill, "Flexible and light weight copper indium diselenide solar cells on polyimide substrates," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 43, no. 1, pp. 93-98, 1996.
- Begotti M., M. Longo, R. Magnanini, A. Parisini, L. Tarricone, C. Bocchi, F. Germini, L. Lazzarini, L. Nasi, M. Geddo "Effect of the growth sequence on the properties of InGaP/GaAs/InGaP quantum wells grown by LP-MOVPE from group-V metalorganic sources" Applied Surface Science 222 (2004) 423-431
- Bilgin V. 2003, ZnO filmlerinin elektrik, optik, yapısal ve yüzeyel özellikleri üzerine kalay katkısının etkisi , Doktora tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 165 s.
- Birkmire R., E. Eser, S. Fields, and W. Shafarman, "Cu(InGa)Se₂ solar cells on a flexible polymer web," Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 13, no. 2, pp. 141-148, 2005.
- Bube R. H., Photoconductivity of Solids, Wiley, New York (1960).
- Bushnell D.B., Ekins-Daukes N.J., Mazzer M., Connolly J.P., Barnham K.W.J., Roberts J.S., Clark J., Hill G., Forbes I., "Strainbalanced GaAsP/InGaAs quantum well solar cells", Applied Physics Letters, 75: 4195-4197 (1999).
- Chapin D, Fuller C, Pearson G, J. Appl Phys 25, 676, 677 (1954).
- Chen W. , Proc. 19th IEEE Photovoltaic Specialist Conf., 1445-1447 (1987).
- Chopra K.L., S.R. Das, Thin Film Solar Cells, Plenum Pres, New York, (1983).
- Cusano D, Solid State Electron 6, 217-232 (1963).
- Cusano DA, Solid-State Electronics 6 (1963) p. 217.
- Dimroth F. , Next generation GaInP/GaInAs/Ge multi-junction space solar cells, Proc. 17th Photo-voltaic European Conference, (2001).
- Duchemin S, V. Chen, J. C. Yoyotte, J. Bougnot, and M. Savelli, "Backwall CdS(n)-CuInSe₂(p) sprayed solar cells," in Proceedings of the 8th European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 1038-1042, Florence, Italy, 1988.

- Engin R., 1995, Güneş Pilleri, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi Fizik Bölümü Yayınları No:3, 151s.
- Ferekides C. , Proc. 23rd IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Louisville, USA (1993) p. 389
- Fischer H., Pschunder W., “Investigation of photon and thermal induced changes in silicon solar cells”, Proceedings of the 10th IEEE PV Specialists Conference, Palo Alto, CA, USA, 405-411 (1973).
- Florida Solars Energy Center, 1987.
- Gabor A. , Sol. Energy Mater. Sol. Cells 4, 247–260 (1996).
- Gecys P., G. Raciukaitis, M. Gedvilas, and A. Selskis, “Laser structuring of thin-film solar cells on polymers,” EPJ Applied Physics, vol. 46, no. 1, Article ID 12508, 2009.
- Greenham N.C., X. Peng, A.P. Alivisatos Phys Rev B 54 (1996) 17628.
- Greenham N.C., X.Peng, A.P.Alivisatos, PHYSICAL REVIEW B 54, 24 (1996) 17628-17637.
- Greenham N.C., X. Peng, A.P. Alivisatos Synth. Met. 84 (1997) 545.
- Green M.A., Emery K., King D.L., Igari S., Warta W., “Solar cell efficiency tables (version 23)”, Progress in Photovoltaics, 13: 55-62 (2003).
- Green M. A., K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta Prog. in Photo. 16, 1 (2007).
- Guillemoles J. F., “The puzzle of Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) solar cells stability,” Thin Solid Films, vol. 403-404, pp. 405–409, 2002.
- Güneş S., H. Neugebauer, N.S. Sariciftci, J. Roither, M. Kovalenko, G Pillwein, W. Heiss Adv Funct Mater 16 (2006) 1095.
- Hahn H , Z. Anorg. Allg. Chem. 271, 153–170 (1953).
- Herz K, F. Kessler, R. Wächter et al., “Dielectric barriers for flexible CIGS solar modules,” Thin Solid Films, vol. 403-404, pp. 384–389, 2002.
- Honsberg C.B., “Approaches for Ultra High Efficiency Solar Cells”, School of Electrical and Computer Engineering, University of Delaware, Newark, DE, 19711, 1-3 (2005).
- Hoppe H., N. S. Sariciftci, J. Mater. Res., 19, 1924 (2004).
- Hovel H, Woodall J, Proc. 10 th IEEE Photovoltaic Specialist Conf., 25-30 (1973)
- <http://www.youthforhab.org.tr/tr/yayinlar/enerji/gunespilleri/giris.html>
- <http://www.eie.gov.tr/turkce/gunes/pvilke.html>
- <http://www.eie.gov.tr/turkce/gunes/veri.html>
- <http://www.sunpowerltd.com/pages/tr/activities/solar.asp>
- Hanket G. M., U. P. Singh, E. Eser, W. N. Shafarman, and R. W. Birkmire, “Pilot-scale manufacture of Cu(InGa)Se₂ films on a flexible polymer substrate,” in Proceedings of the 29th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 567–569, May 2002.
- Huynh WU, Dittmer JJ and Alivisatos AP, Science, 295 (2002) 2425.
- Hutchby J.A., R.J. Markunas, S.M. Bedair, A review of multijunction concentrator solar cells, 18th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Las Vegas, USA, (1985).
- Ishizuka S., A. Yamada, P. Fons, and S. Niki, “Flexible Cu(In,Ga)Se₂ solar cells fabricated using alkali-silicate glass thin layers as an alkali source material,” Journal of Renewable Sustainable Energy, vol. 1, Article ID 013102, 8 pages, 2008.

- Ishizuka S., H. Hommoto, N. Kido, K. Hashimoto, A. Yamada, and S. Niki, "Efficiency enhancement of Cu(In,Ga)Se₂ solar cells fabricated on flexible polyimide substrates using alkali-silicate glass thin layers," *Applied Physics Express*, vol. 1, no. 9, Article ID 092303, pp. 1–3, 2008.
- Jenny D, Loferski J, Rappaport P, *Phys Rev.* 101, 1208, 1209 (1956).
- Kavcar, N., 2001, *Uygulamalı Fizik II Ders Notları*, Dokuz Eylül Üniversitesi Buca Eğitim Fakültesi Fizik Eğitimi Bölümü, 130s., (yayımlanmamış).
- Kazmerski L, White F, Morgan G, *Appl. Phys. Lett.* 29, 268, 269 (1976).
- Kessler F. and Rudmann D., "Technological aspects of flexible CIGS solar cells and modules," *Solar Energy*, vol. 77, no. 6, pp. 685–695, 2004.
- Kim M. J., H. S. Lee, J. Y. Lee "Effect of thermal annealing on the surface, optical, and structural properties of p-type ZnSe thin films grown on GaAs (100) substrates" *J. Mat. Sci.* 39 (2004) 323– 327.
- Köse, S., 1986, *Yarıiletken Günes Pilleri ve Verimlilikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 78s.
- Lindmayer J, Allsion J, *COMSAT Tech. Rev.* 3, 1-22 (1973)
- Liu J, Tanaka T, Sivula K, Alivisatos AP and Frechet J M J, *J.Am.Chem.Soc.* 126 (2004) 6551.
- Loferski J, *J.Appl Phys* 27, 777-784 (1956).
- Luque A., Martí A., "Fullspectrum: A new PV wave of more efficient use of solar spectrum", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 87(4): 467-479 (2005).
- Meakin J, *Proc. SPIE Conf.* 543: Photovoltaics, 108–118 (1985).
- Meissner D., "Plastic Solar Cells", *Photon*, 2: 34-37 (1999).
- Mickelsen R, Chen W, *Proc. 15th IEEE Photovoltaic Specialist Conf.*, 800–804 (1981).
- Nadeem M.Y., Ahmed W. 2000, *Optical Properties of ZnS Thin Films*, *Turk J. Phy.* 24: 651-659.
- Nakada T., N. Okano, Y. Tanaka, H. Fukuda, and A. Kunioka, "Superstrate-type CuInSe₂ with chemically deposited CdS window layers," in *Proceedings of the IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, pp. 95–98, Hawaii, USA, 1994.
- T. Nakada and T.Mise, "High-efficiency superstrate type cigs thin film solar cells with graded bandgap absorber layers," in *Proceedings of the 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, pp. 1027–1030, Munich, Germany, 2001.
- Natsume Y., Sakata H. 2000, *Zinc oxide films prepared by sol-gel spin coating*, *Thin Solid Films*, 372: 30–36.
- O'regan B., M Gratzel *Nature* 353, 737-740, (1991).
- Olson, J.M, Kurtz, S.R., Kibbler, K.E., A 27.3% efficient Ga_{0.5}In_{0.5}P/GaAs tandem solar cell. *Appl. Phys. Lett.* 56,(1990).
- Omar M.A. 1993, *Elementary Solid State Physics: Principles and Applications*, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 669 s.
- Oral, M., 1979, *Günes Pilleri*, İzmir İlker Matbaası, 59s.
- Park Kyung-hee, En-mei Jin, Hal-bon Gu, Soon-do Yoon, Eun-mi Han, and Je-jung Yun, 204% enhanced efficiency of ZrO₂ nanofibers doped dye-sensitized solar cells, *Appl. Phys. Lett.*, 97 023302 (2010)
- Pientka M., V. Dyakonov, D. Meissner, A. Rogach, D. Talapin, H Weller, L Lutsen, D. Vanderzande *Nanotechnology* 15 (2004) 163.

- Pochettino A., Acad. Lincei Rend. 15, 355 (1906).
- Potter R, Sol. Cells 16, 521–527 (1986).
- Price M, J.Appl Phys 26, 534-540 (1955).
- Reyes-Reyes M., K. Kim and D. L. Carrolla, Appl. Phys. Lett., 87 (2005) 083506.
- Sarıçiftçi N.S., L. Smilowitz, A. J. Heeger, F. Wudl Science 258 (1992) 1474-1476.
- Satoh T, Y. Hashimoto, S. Shimakawa, S. Hayashi, and T. Negami, “Cigs solar cells on flexible stainless steel substrates,” in Proceedings of the Conference Record of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p. 567, 2000.
- Schön J., Ch. Kloc, B. Batlogg, “Doped pentacene for efficient photovoltaic devices”, 16th International Photovoltaic Solar Energy Conference, Glasgow, 43 (2000).
- Suntola T., “Thin Film Solar Cells”, Proceedings of the 11th EC Photovoltaic Solar Energy Conference, Montreux, Switzerland, 977- 980 (1992).
- Oktik, S., 2001, Güneş Elektrik Dönüşümleri Fotovoltaik Güneş Gözeleri ve Güç Sistemleri, Ankara Temiz enerji Vakfı Yayınları, 40s.
- Saitoh T., Wang X., Hashigami H., Abe T., Igarashi T., Glunz S.W., Wettling W., Ebong A., Damiani B.M., Rohatgi A., Yamasaki I., Nunoi T., Sawai H., Ohtuka H., Yazawa Y., Warabisako T., Zhao J., Green M.A., “Light degradation and control of low-resistivity of Cz-Si solar cells - an international joint research”, Technical Digest of the 11th International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Sapporo, Japan, 553–556 (1999).
- Schimper H.-J., Z. Kollonitsch, K. Möller, U. Seidel, U. Bloeck, K. Schwarzburg, F. Willig, T. Hannappel,” Material studies regarding InP-based high-efficiency solar cells “J. Cryst. Growth 287 (2006).
- Serway, R. A., 1996, Fen ve Mühendislik için Fizik (Modern Fizik 1. cilti), (Çeviri Editörü: Kemal Çolakoglu), Palme Yayıncılık, Cilt:3, 344s.
- Shaheen S.E., Brabec C.J., Sarıçiftçi N.S., Padinger F., Fromherz T. and Hummelen J.C. Appl.Phys.Lett. 78 (2001) 841.
- Shay J, Wagner S, Kasper H, Appl. Phys. Lett. 27, 89–90 (1975).
- Shay J, Wernick J, Ternary Chalcopyrite Semiconductors: Growth, Electronic Properties, and Application, Pergamon Press, Oxford (1974).
- Shockley W, Queisser H, J. Appl Phys 32, 510-519 (1961).
- Sökmen, K., 2003, Gökyüzüne Merhaba, <http://www.catamaranvega.com/astro>
- Sun B., E. Marx, N. C. Greenham, NANO LETTERS, 3, 7 (2003) 961 963.
- Tarrant D, Ermer J, Proc. 23rd IEEE Photovoltaic Specialist Conf., 372–375 (1993).
- Takamoto T. , Two-terminal monolithic In_{0.5}Ga_{0.5}P/GaAs tandem solar cells with a high conversion efficiency of over 30%. Jpn. J. Appl. Phys. vol 36,(1997).
- Takamoto T., Status of Multijunction Solar Cells and Future Development, CS MANTECH Conference, May 18th-21st, Tampa, Florida, USA, (2009).
- Takanezawa K., K. Tajima, K. Hashimoto Appl. Phys. Lett. 93 (2008) 063308.
- Tercan M.B., 2000, Güneş Pili Karakterizasyon Yöntemleri, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 129s.
- Tiwari A. N., M. Krejci, F.-J. Haug, and H. Zogg, “12.8% efficiency Cu(In,Ga)Se₂ solar cell on a flexible polymer sheet,” Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 7, no. 5, pp. 393–397, 1999.
- Trupke T., Green M.A., Würfel P., “Improving solar cell efficiencies by up-conversion of sub-band-gap light”, Journal of Applied Physics, 92(7): 4117-22 (2002).

- Trupke T., Green M.A., Wurfel P., "Improving solar cell efficiencies by down-conversion", *Journal of Applied Physics*, 92(3): 1668-1674 (2002).
- Tyan Y, Perez-Albuern EA, Proc. 16th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., San Diego (1982) p. 794.
- Udai P. Singh and Surya P. Patra "Progress in Polycrystalline Thin-Film Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells" Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy Vol. 2010, 19 pages
- Ültanır, M.Ö., 1996, Güneş Enerjisi, Bilim ve Teknik Dergisi, 340, 50-56s.
- Van Duren J.K.J., X. Yang, J. Loos, C.W.T. Bulle-Lieuwma, A.B. Sieval, J.C. Hummelen, R.A.J. Janssen *Advanced Functional Materials*, 14 (2004) 425-434.
- Varriano, J. A., Koch, M. W., Johnson, G. G., Wicks, G. W., "GaInP and AlInP grown by elemental source molecular beam epitaxy", *J. Electronic Materials*, 21: 195-198 (1992).
- Ma W., J. M. Luther, H. Zheng, Y. Wu, and A. P. Alivisatos, *NANO LETTERS*, 9,4 (2009) 1699-1703.
- Volmer M., *Ann. Physik* 40, 775 (1913).
- Wagner S, Shay J, Migliorato P, Kasper H, *Appl. Phys. Lett.* 25, 434, 435 (1974).
- Watt A.A.R., D. Blake, J.H. Warner, E.A. Thomsen, E.L. Tavenner, H. Rubinsztein-Dunlop, P. Meredith *J. Phys. D Appl. Phys.* 38 (2005) .
- Wienk M, M. G. R. Turbiez, M. P. Struijk, M. Fonrodona, R. A. J. Janssen *Appl. Phys. Lett.* 88, (2006) 153511.
- Wysocki J, Rappaport P, *J. Appl. Phys.* 31, 571-578 (1960).
- Wysocki J, *Appl. Phys. Lett.* 9, 44-46 (1966).
- Yamaguchi M., C. Amano, H. Sugiura, A. Yamamoto, High efficiency AlGaAs-GaAs tandem solar cell with tunnel junction, 19th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, USA, (1987).
- Zhang L., Q. He, W.-L. Jiang, C.-J. Li, and Y. Sun, "Flexible Cu(In, Ga)Se₂ thin-film solar cells on polyimide substrate by low-temperature deposition process," *Chinese Physics Letters*, vol. 25, no. 2, pp. 734-736, 2008.
- Zulehner W., "Status and future of silicon crystal growth", *Materials Science and Engineering B*, 4 : 1-10 (1989).

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Erzurum’da doğan Zafer ŞİMŞEK ilk ve orta öğrenimini Erzurum’da tamamladı. 2002 yılında Atatürk Üniversitesi Kazım Karabekir Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği Bölümü’ne girdi ve 2007 yılında mezun oldu. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim dalı Katıhal Fiziği Bilim Dalı’nda yüksek lisans yapmaya başladı. Şu an yüksek lisans öğrenimine devam etmektedir.