

66907

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

BAKIR DİFÜZYONUNUN  $CuGaSe_2$ -GaAs GÜNEŞ PİLLERİNİN  
KARAKTERİSTİKLERİNE ETKİSİ

Emin BACAKSIZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
“ Yüksek Lisans (Fizik) ”  
Ünvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 13.01.1997

Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 03.02.1997

Tezin Danışmanı : Doç.Dr. Mehmet SADIGOV



Jüri Üyesi : Prof.Dr. Mustafa ALTUNBAŞ



Jüri Üyesi : Doç.Dr. Hüseyin CÖMERT



Enstitü Müdürü : Doç.Dr. Asım KADIOĞLU



Ocak 1997

TRABZON

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada, bakır difüzyonunun CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pillerinin kristal yapısına, yüzey morfolojisine ve elektriksel özelliklerine etkisi incelendi. Deneysel çalışmalar, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Katıhal Fiziği ve X-Işını Floresans Laboratuvarlarında yapıldı.

Yüksek lisans çalışmalarımın yürütülmesinde yardımlarını esirgemeyen danışman hocam sayın Doç. Dr. Mehmet Sadıgov'a deneysel çalışmalarına yardım eden sayın Prof. Dr. Tayyar Dzhafarov'a ve Arş.Gör. Mehmet Özkan'a, X-Işını Floresans Laboratuvarı çalışmalarına yardım eden sayın hocam Prof. Dr. Ali İhsan Kopya'ya, tezimin yazılmasında ve düzenlenmesinde yardım eden sayın Dr. Saffet Nezir'e, Arş.Gör. Uğur Çevik'e, Arş.Gör. Süleyman Bolat'a ve katkılarından dolayı tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Trabzon, Ocak 1997

Emin BACAKSIZ

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	II
ÖZET.....	V
SUMMARY.....	VI
ŞEKİL LİSTESİ.....	VII
TABLO LİSTESİ.....	X
SEMBOL LİSTESİ.....	XI
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1 Giriş.....	1
1.2 Güneş Pilleri.....	1
1.2.1 Güneş ışığı.....	1
1.2.2 Güneş Pillerinin Çeşitleri.....	1
1.2.3 p-n Eklemlili Güneş Pillerinin Elektriksel Karakteristikleri.....	6
1.2.4 p-n Eklemlili Güneş Pillerinin Spektral Karakteristikleri.....	10
1.2.5 Heteroeklem Güneş Pilleri.....	15
1.2.6 İnce filmlili güneş pilleri.....	16
1.3. Yarıiletkenlerde Difüzyon.....	18
1.3.1 Difüzyon Kuralları.....	19
1.3.2 Difüzyon Mekanizmaları.....	20
1.3.3 Heteroeklemlilerde Difüzyon.....	21
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	23
2.1 CuGaSe <sub>2</sub> -GaAs Güneş Pillerinin Hazırlanması.....	23
2.2 X-Işınları Kırınım Analizi.....	24
2.3 Akım-Gerilim Karakteristikleri.....	25
2.4 X-Işınları Floresans Analizi.....	26
2.5 Elektron Mikroskobu ve Optik Mikroskobu İncelemeleri.....	29
3. BULGULAR.....	30
3.1 X-Işınları Kırınım Çalışmaları.....	30

3.2 CuGaSe <sub>2</sub> -GaAs Güneş Pillerinin Taramalı Elektron Mikroskobu ve Optik Mikroskobu ile İncelenmesi.....	32
3.3 CuGaSe <sub>2</sub> -GaAs Güneş Pillerinin Akım-Gerilim Karakteristikleri.....	33
3.4 GaAs Altlıkta Bakır Atomlarının ve Deliklerin Konsantrasyonunun Difüzyon Dağılımı.....	42
4. TARTIŞMA .....	44
5. SONUÇLAR.....	46
6. ÖNERİLER.....	47
7. KAYNAKLAR.....	48
8. ÖZGEÇMİŞ.....	50



## ÖZET

CuGaSe<sub>2</sub> ve GaAs yarıiletkenlerinin örgü parametreleri ve termal genişleme katsayıları arasındaki fark çok küçük olduğu için (CuGaSe<sub>2</sub> ve GaAs için sırasıyla  $a_1=5,618\text{Å}$  ve  $a_2=5,653\text{Å}$ ;  $\alpha_1=4\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$  ve  $\alpha_2=5,8\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ ) CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs heteroçiftinin bileşenleri “ideal” heteroeklemin bileşenlerine çok yakındır. Üstelik CuGaSe<sub>2</sub>, yasak enerji aralığı  $E_g=1,68\text{ eV}$  olan direk geçişli ve yüksek soğurma katsayılarına sahip ( $10^4\text{-}10^5\text{cm}^{-1}$ ) bir yarıiletken olduğu için, CuGaSe<sub>2</sub> esaslı güneş pili hazırlamaya uygundur.

CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pilleri vakum ortamında nGaAs altlığın üzerine CuGaSe<sub>2</sub> ince filminin buharlaştırılması ile elde edilir. CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pillerinin kristal yapısı ve fotoelektriksel karakteristikleri x-ışınları kırınımı, taramalı elektron mikroskobu ve fotoelektrik ölçümleri ile incelendi. CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pillerinin, %6,1 verime,  $J_{sc}=28\text{ mA/cm}^2$  kısa devre akım yoğunluğuna ve  $V_{oc}=0,52\text{ V}$  açık devre gerilimine sahip olduğu gösterildi.

GaAs altlıkta, bakır konsantrasyonunun dağılımı x-ışınları floresans tekniği kullanılarak ölçüldü. CuGaSe<sub>2</sub> ince filminin GaAs altlık üzerinde çökmesi boyunca, akseptör tipli bakırın altlığa difüzyonu sonucunda GaAs içinde p-n ekleminin oluştuğu gözlemlendi. Böylece iki seri pCuGaSe<sub>2</sub>-pGaAs-nGaAs hetero-homo eklemi elde edildi.

Anahtar Kelimeler: CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs, Güneş Pili, Heteroeklem, p-n Eklemi, Difüzyon, Kısa Devre Akımı, Açık Devre Gerilimi,

## SUMMARY

### The Effect of the Copper diffusion on the Characteristics of CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs Solar Cells

The components of CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs heteropair are very close to components of “ideal” heterojunctions since differences in the lattice parameters ( $a$ ) and the thermal expansion coefficients ( $\alpha$ ) of CuGaSe<sub>2</sub> and GaAs semiconductors are very small ( $a_1=5.618$  Å and  $a_2=5.653$  Å;  $\alpha_1= 4.10^{-6}$  K<sup>-1</sup> and  $\alpha_2 = 5.8.10^{-6}$  K<sup>-1</sup> for CuGaSe<sub>2</sub> and GaAs respectively). Besides, the forbidden energy gap of CuGaSe<sub>2</sub> ( $E_g = 1.68$  eV) is direct and allows to prepare the CuGaSe<sub>2</sub>-based solar cells with the high efficiency.

CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs solar cells were fabricated by vacuum deposition of pCuGaSe<sub>2</sub> thin films on nGaAs substrates. The crystalline structure and photoelectrical characteristics of CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs cells were investigated by x-ray diffraction, scanning electron microscopy and photoelectrical measurements. The CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs solar cells were shown to have the efficiency  $\eta = \%6.1$ , the short-circuit current density  $J_{sc} = 28$  mA/cm<sup>2</sup> and the open-circuit voltage  $V_{oc} = 0.52$  V.

The copper concentration distribution in GaAs substrates were measured by using x-ray fluorescence technique. It was established that during deposition of CuGaSe<sub>2</sub> film, p-n homojunction was formed in GaAs due to diffusion of the acceptor Cu from the film into substrate. Thus the two-junction pCuGaSe<sub>2</sub>-pGaAs-nGaAs hetero-homo structure was formed by deposition of CuGaSe<sub>2</sub> films on GaAs substrates.

Key Words : CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs, Solar Cell, Heterojunction, p-n Junction, Diffusion, Short-Circuit Current, Open-Circuit Voltage

## ŞEKİL LİSTESİ

- Şekil 1. Güneş spektral aydınlanması ile ilgili dört eğri.....3
- Şekil 2. (a) Güneş ışığı altında bir p-n eklemli güneş pilinin enerji band diyagramı.  
(b) Bir güneş pili için ideal devre.....4
- Şekil 3. Bir silisyum p-n eklemli güneş pilinin şematik gösterimi.....5
- Şekil 4. Aydınlanma altında Schottky engelli bir güneş pilinin enerji band diyagramı.....6
- Şekil 5. (a) Aydınlanma altında bir güneş pilinin akım-gerilim karakteristiği  
(b) Şekil (a)'daki dikdörtgensel bölgede elde edilmiş olan yük asıllığı grafiği.....8
- Şekil 6.  $C=1$  ve  $C=1000$  K'de ideal güneş pili veriminin gösterimi.....9
- Şekil 7. (a) Uzun ve kısa dalga boylu ışık için yarıiletken yüzeyden mesafenin  
fonksiyonu olarak elektron -delik çiftlerinin üretim oranları.  
(b) Güneş pili boyutları ve azınlık taşıyıcılarının difüzyon uzunlukları.  
(c) Güneş pilinin keskin katkılı kesitinin gösterimi.....11
- Şekil 8. (a) Bir Si n-p güneş pilinin hesaplanan iç spektral cevabı. Gösterilen her üç bölge  
ayrı ayrı spektral cevaba katkıda bulunur.  
(b) Bir Si n-p güneş pilinin hesaplanan iç spektral cevabının farklı yüzey  
rekombinasyon hızlarına göre değişimi.....14
- Şekil 9. Termal dengedeki bir n-p heteroeklemin enerji band diyagramı.....16
- Şekil 10. CdS-CuInSe<sub>2</sub> güneş pillerinde tane yarıçapının kısa devre akımına bağlılığı....17
- Şekil 11. Güneş fotovoltaik dönüşümü için, ilgilenilen bölgede I-III-VI<sub>2</sub> ve II-IV-V<sub>2</sub>  
yarıiletkenlerinin enerji aralığı.....18
- Şekil 12. Arayer mekanizmasıyla, arayer atom difüzyonunun yüzey merkezli kübik  
örgüde (100) düzleminin gösterimi.....21
- Şekil 13. Sıkı paket küreler düzlemi.....21
- Şekil 14. CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs heteroeklem ve omik kontakların (1 ve 2) şematik gösterimi....25
- Şekil 15. Akım-gerilim karakteristiği ölçü sistemi.....25

Şekil 16. CuGaSe <sub>2</sub> -GaAs heteroeklemin p-n eklemleri ve omik kontaklarının (1,2,3,4) şematik olarak gösterimi.....	26
Şekil 17. X-ışınları floresans analiz sisteminin geometrisi.....	27
Şekil 18. X-ışınları floresans deney sisteminin blok diyagramı.....	28
Şekil 19. CuGaSe <sub>2</sub> -GaAs heteroekleminin X-ışınları kırınım deseni.....	30
Şekil 20. GaAs altlıktan CuGaSe <sub>2</sub> ince filmi çıkarıldıktan sonra elde edilen X-ışınları kırınım deseni.....	31
Şekil 21. CuGaSe <sub>2</sub> -GaAs heteroeklemin yüzey mikrografları (a) CuGaSe <sub>2</sub> ince filmi (ölçek olarak 1cm=1µm kullanıldı) (b) GaAs altlık (ölçek olarak 1cm=10µm kullanıldı).....	32
Şekil 22. CuGaSe <sub>2</sub> -GaAs güneş pilinin akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi (1-4 kontakları arasındaki).....	34
Şekil 23. CuGaSe <sub>2</sub> -GaAs güneş pilinin aydınlıkta (P=100 mW/cm <sup>2</sup> ) akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi.....	34
Şekil 24. CuGaSe <sub>2</sub> -GaAs güneş pilinin kısa devre akımının (I <sub>sc</sub> ) ve açık devre geriliminin (V <sub>oc</sub> ) ışık şiddeti ile değişimi.....	35
Şekil 25. CuGaSe <sub>2</sub> -GaAs güneş pilinin 1-4 kontakları arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi.....	36
Şekil 26. CuGaSe <sub>2</sub> -GaAs güneş pilinin aydınlıkta (P=100 mW/cm <sup>2</sup> ) 1-4 kontakları arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi.....	36
Şekil 27. CuGaSe <sub>2</sub> -GaAs güneş pilinin 1-3 kontakları arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi.....	38
Şekil 28. CuGaSe <sub>2</sub> -GaAs güneş pilinin aydınlıkta (P=100 mW/cm <sup>2</sup> ) 1-3 kontakları arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi.....	38
Şekil 29. CuGaSe <sub>2</sub> -GaAs güneş pilinin 1-2 kontakları arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi.....	39
Şekil 30. CuGaSe <sub>2</sub> -GaAs güneş pilinin aydınlıkta (P=100 mW/cm <sup>2</sup> ) 1-2 kontakları arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi.....	39
Şekil 31. CuGaSe <sub>2</sub> -GaAs güneş pilinin 2-4 kontakları arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi.....	40
Şekil 32. CuGaSe <sub>2</sub> -GaAs güneş pilinin 3-4 kontakları arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi.....	40



Şekil 33. GaAs altlıkta Cu konsantrasyonunun difüzyon dağılımı (-teorik <i>erfc</i> fonksiyonudur).....	43
Şekil 34. GaAs altlıkta bakırın (Cu) ve deliklerin (p) konsantrasyon dağılımları (deliklerin konsantrasyon dağılımı bakır iyonlarının aktivasyon enerjisi $\Delta E_a=0,30$ eV için hesaplandı).....	43
Şekil 35. pCuGaSe <sub>2</sub> -pGaAs-nGaAs güneş pilinin enerji band diyagramı.....	45



## TABLO LİSTESİ

Tablo 1. CuGaSe <sub>2</sub> -GaAs güneş pillerinin parametreleri.....	33
Tablo 2. pCuGaSe <sub>2</sub> ve nGaAs yarıiletkenlerin parametreleri.....	44



## SEMBOL LİSTESİ

$E$	: Enerji
$E_g$	: Yasak enerji aralığı
$m$	: Kütle
$c$	: Işık hızı
$\lambda$	: Dalga boyu
$\nu$	: Frekans
$I_L$	: Işınla oluşan akım
$I_s$	: Diyotun doyma akımı
$R_L$	: Direnç
$h$	: Plank sabiti
$q$	: Elektronun yükü
$\phi_B$	: Engel potansiyeli
$V$	: Uygulanan gerilim
$\beta$	: Diyodun ideallik faktörü
$N_c$	: İletim bandının durum yoğunluğu
$N_v$	: Valans bandının durum yoğunluğu
$N_A$	: Alıcıların durum yoğunluğu
$N_D$	: Vericilerin durum yoğunluğu
$\tau_n$	: Elektronların yaşam süresi
$\tau_p$	: Deliklerin yaşam süresi
$D_n$	: Elektronların difüzyon katsayısı
$D_p$	: Deliklerin difüzyon katsayısı
$D$	: Atomların difüzyon katsayısı
$A$	: Aygıtın alanı
$k$	: Boltzmann sabiti
$T$	: Sıcaklık

- $I_{sc}$  : Kısa devre akımı  
 $V_{oc}$  : Açık devre gerilimi  
FF : Doldurma faktörü  
 $\eta$  : Verim  
P : Güç  
 $G(\lambda, x)$  : Elektron delik çiftleri üretim oranı  
 $\alpha(\lambda)$  : Soğurma sabiti  
 $F(\lambda)$  : Birim band genişliği başına, birim alana birim saniyede düşen fotonların sayısı  
n : Elektronların yoğunluğu  
p : Deliklerin yoğunluğu  
J : Akım yoğunluğu  
 $\epsilon$  : Elektrik alanı  
 $\mu$  : Mobilite  
W : p-n eklem genişliği  
 $S_p$  : Deliklerin rekombinasyon hızı  
L : Difüzyon uzunluğu  
N : Konsantrasyon  
 $\xi$  : Uygunsuzluk parametresi  
 $\chi$  : elektron çekiçliliği

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1 Giriş

Güneş pilleri, günümüzde uydu ve uzay araçlarının uzun süreli enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında önemli yer tutar. Bu aygıtlar aynı zamanda küçük ölçüde yeryüzü uygulamalarında da başarılı olarak kullanılmaktadır. Yeryüzünde kullanılan enerji kaynakları hızla tükenmekte, diğer yandan bu kaynaklara olan ihtiyaç gün geçtikçe daha büyük oranda artmaktadır. Bundan dolayı, özellikle uzun ömürlü doğal bir kaynak olan Güneş, alternatif bir enerji kaynağı olarak kullanılmalıdır.

Güneş pili vasıtasıyla Güneş'te depolanmış çok büyük bir enerji, yüksek çevrilme verimi ile doğrudan elektrik akımına dönüştürülebilir. Güneş pili, düşük maliyet ile elde edilmesine rağmen sürekli güç sağlar ve bilinen akaryakıtların sebep olduğu hava kirliliğini de önler. Son zamanlarda düz panelli güneş pilleri, ince filmlili düzenekler, toplayıcı sistemler ve düşük maliyetli enerji elde etme yolları hakkında yapılan araştırmalar artmaktadır. Önümüzdeki yıllarda, küçük güneş güç modüler ünitelerin maliyeti ve güneş-güç santralleri, güneş enerjisinin büyük ölçüde kullanımı için ekonomik olarak uygun olacaktır.

Güneş pili ilk defa 1954 yılında silisyum p-n kavşağına bir katkı maddesinin difüzyon yapılmasıyla Chapin, Fuller ve Pearson [1] tarafından bulundu. Daha sonra CdS güneş pili, Raynolds ve arkadaşları [2] tarafından geliştirildi. Günümüzde güneş pilleri, tek kristal, polikristal, amorf ince film yapılarının ve değişik aygıt konfigürasyonlarının kullanılmasıyla diğer bir çok yarıiletken yapılmaktadır. Hovel [3], güneş pilinin karakteristik davranışlarını geniş bir şekilde açıkladı. Backus ise [4], 1974 yılından önceki güneş pili ile ilgili çalışmalarını derledi. Pulfrey [5] ve Johnston [6] fotovoltaj güç jeneratörünü yeniden inceledi ve Bachmann [7] da güneş pillerinin önemli karakteristiklerini araştırdı.

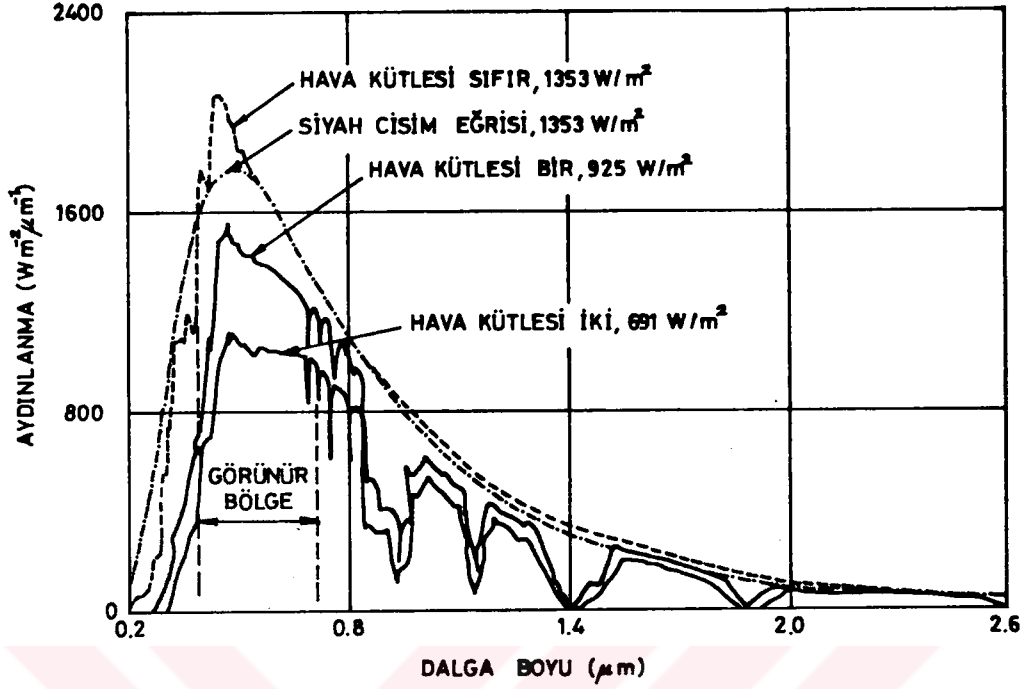
## 1.2 Güneş Pilleri

### 1.2.1 Güneş Işığı

Güneşten çıkan ışık enerjisi bir nükleer fizyon reaksiyon sonucu elde edilir. Saniyede yaklaşık  $6 \times 10^{11}$  kg  $H_2$  molekülü,  $4 \times 10^3$  kg'lık net kütle kaybı ile Einstein enerji bağıntısı ( $E=mc^2$ ) gereği  $4 \times 10^{20}$  J' luk bir enerji ile He'a dönüşür. Bu enerji aslında elektromagnetik ışıkta olduğu gibi mor ötesi, kızıl ötesi ve radyo spektral bölgelerde ( $0,2\mu m$  de  $3\mu m$ ) soğurulur. Güneş'in toplam kütlelerinin, günümüzde yaklaşık olarak  $2 \times 10^{30}$  kg ve hemen hemen sabit bir ışık enerji çıkışıyla kararlı yaşam süresinin 10 milyar yılın üzerinde olduğu tahmin edilmektedir.

Güneş-yeryüzü arasındaki ortalama uzaklıktaki uzayda Güneş ışığının şiddeti,  $1353 \text{ W/m}^2$  olup bu değer, güneş sabiti olarak tanımlanır. Güneş ışığı yeryüzüne ulaşmadan önce kırmızı ötesi (Infrared) bölgede su buharında soğurulur, mor ötesi (Ultraviolet) bölgede ozon tabakasında soğurulur ve daha sonra da havadaki tozlar tarafından saçılmaya uğradıktan sonra ışınım şiddeti zayıflayarak yeryüzüne ulaşır. Yeryüzüne ulaşan güneş ışığının atmosferdeki etkilenme derecesi hava kütlesi ile tanımlanır. Güneş ve zenit ( $\sec\theta$ ) arasındaki açının secanti, hava kütlesi olarak adlandırılır ve bu, Güneş direkt olarak tepede olduğu zaman minimum yol uzunluğu ile ilgili olarak atmosferik yol uzunluğunu ölçer.

Şekil.1 ile güneş spektral aydınlamalarıyla ilgili dört eğri gösterilmektedir (birim dalga boyu başına birim alandaki güç) [8]. Dünya atmosferinin dışındaki güneş spektrumunu tanımlayan üsteki eğri bir hava kütlesi sıfır durumudur. Bu duruma, grafikte noktalı çizgiler ile gösterilen, 5800 K sıcaklığındaki bir siyah cisim ile yaklaşılabılır. AM0 spektrumu uydu ve uzay araçları uygulamaları için kullanılabilir. Güneş, zenit açısında bulunduğu zaman AM1 spektrumu yeryüzeyindeki güneş ışığını gösterir ve gelen güç yaklaşık olarak  $925 \text{ W/m}^2$  dir. AM2 spektrumu  $\theta=60^\circ$  içindir ve gelen güç yaklaşık olarak  $691 \text{ W/m}^2$  dir.



Şekil 1. Güneş spektral aydınlanması ile ilgili dört eğri.

Hava kütlesi 1,5 durumu (güneş ufku üzerinde  $45^\circ$  de iken) dünyadaki uygulamalar için yeterli enerji ağırlık ortalamasını gösterir.

Fotonun enerjisi cinsinden aşağıdaki ifade kullanılarak dalga boyu bulunur:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{1.24}{h\nu(\text{eV})} \mu\text{m}. \quad (1)$$

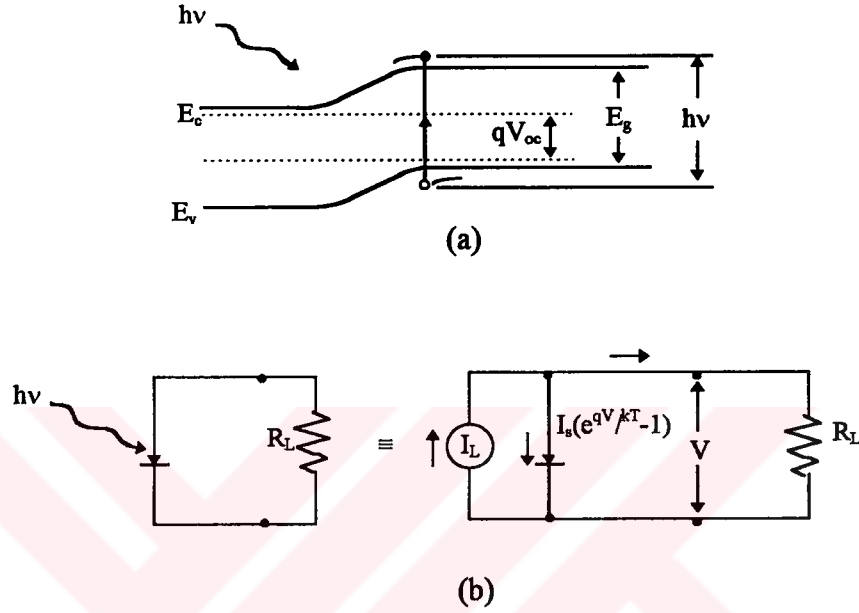
Burada  $\lambda$  dalga boyu,  $\nu$  frekans ve  $c$  ışık hızıdır. AM1,5 durumu için toplam gelen güç  $844 \text{ W/m}^2$  dir.

### 1.2.2 Güneş Pillerinin Çeşitleri

Güneş pilleri üç çeşittir: p-n eklem, heteroeklem ve Schottky engelli güneş pilleri.

Güneş pilleri genel olarak (örneğin bir p-n eklem) tek bir  $E_g$  yasak enerji aralığına sahiptirler. Pil, güneş spektrumu ile izah edildiği zaman, enerjisi  $E_g$ 'den az olan bir fotonun enerjisi, pil çıkış gücüne katkıda bulunmaz. Enerjisi  $E_g$ 'den büyük olan bir foton, pilin çıkış gücüne bir  $E_g$  enerjisi kadar katkıda bulunur ve  $E_g$ 'nin üzerinde olanlar ise ısı olarak harcanır. İdeal bir pil dönüşüm verimini üretmek için güneş ışığı altında bir p-n eklemine

enerji band diyagramı Şekil 2a'daki gibidir.. Güneş pilinin, ideal I-V karakteristiğine sahip olduğu farz edilir. Sabit bir akım kaynağının eklem ile paralel olduğu eşdeğer devre Şekil 2b'de gösterilmiştir.  $I_L$ , taşıyıcıların güneş ışığı tarafından uyarılması sonucu oluşan akım,  $I_s$  diyotun doyma akımıdır.  $R_L$  ise yük direncidir.

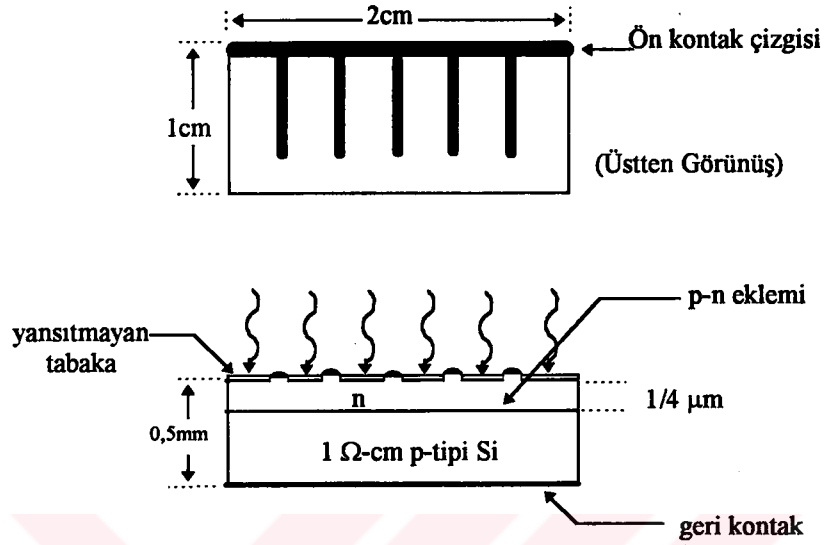


Şekil 2. (a) Güneş ışığı altında bir p-n eklemli güneş pilinin enerji band diyagramı.  
(b) Bir güneş pili için ideal devre.

Bu çalışmada öncelikle, bütün güneş pilleri için bir referans aygıt olarak hizmet eden silisyum p-n eklemli güneş pilleri ile ilgilenilecektir. Uydular ve uzay araçları için, düz plakalı silisyum güneş pilleri uzun vadeli güç sağlamada çok önemlidir. Burada esas konu, pil dönüşüm verimi ve güvenilirliğidir. Yeryüzü uygulamalarında, düz plakalı ve toplayıcı güneş pili sistemleri araştırılmaktadır. Güneş pillerinin, verimliliğine ve dayanıklılığına ek olarak maliyetinin de düşük olması önemlidir. Neticede güneş pili enerjisi, diğer enerji kaynakları ile yarışabilecek seviyededir.

Dünyadaki düz plakalı sistemlerde, pilin üretim maliyetinin mümkün olduğu kadar düşük ve aynı zamanda pilin dönüşüm veriminin de en az %10 mertebesinde olması gerekmektedir. Toplayıcı sistem için temel yaklaşım, yüksek güneş ışığı altında pilin verimini yükseltmek ve sistemin her yönden maliyetini düşürmeye çalışmaktır. Şekil 3'de güneş pilinin şematik bir gösterimi verilmiştir.

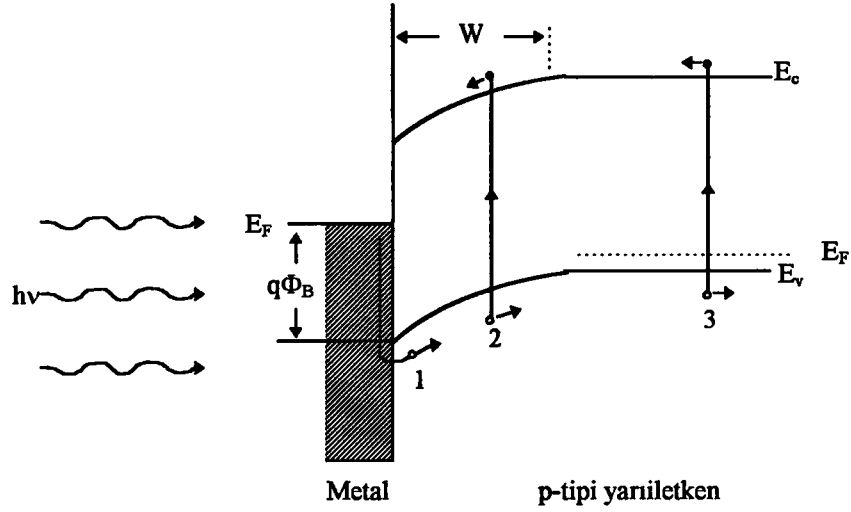




Şekil 3. Bir silisyum p-n eklemli güneş pilinin şematik gösterimi.

Heteroeklem güneş pilleri, enerji band genişlikleri farklı olan iki yarıiletken arasında oluşan eklemidir.

Metal ve yarıiletken arasında oluşan enerji engelli kontaklara Schottky engelli kontaklar denir. Schottky engelli güneş pillerinin ışıklandırma altındaki şematik enerji diyagramı Şekil 4’de gösterilmiştir. Yeterli miktarda ışığın yarıiletkene ulaşmasına müsaade etmek için, metalin yeterli derecede ince olması gerekmektedir. Burada üç tane fotoakım bileşeni vardır: (i)  $h\nu > q\Phi_B$  (engel yüksekliği) enerjili ışık, metal içerisinde soğurular ve yarıiletken içinde engel üzerindeki delikleri uyarır (Şekil 4’de 1 no’lu durumda). Bu fotoelektrik yöntem engel yüksekliğinin ölçümünde kullanılır. (ii) Yarıiletkene giren kısa dalga boylu ışık genelde arınmış bölgede soğurular (Şekil 4’de 2 no’lu durumda). (iii) Uzun dalga boylu ışık nötral bölgede soğurular ve p-n eklemine olduğu gibi elektron-boşluk çiftleri oluşturur. Elektronların ve boşlukların ayrılması için arınmış bölgeye difüz etmesi gerekmektedir (Şekil 4’de 3 no’lu durumda). Güneş pili uygulamalarında metalden yarıiletkene taşıyıcı uyarılmasının toplam akıma katkısı %1’ den daha azdır ve bundan dolayı ihmal edilebilir.



Şekil 4. Aydınlanma altında Schottky engelli bir güneş pillinin enerji band diyagramı.

Schottky engelli güneş pillerinin içerdiği yararlar şöyledir: (1) Yüksek sıcaklıkta difüzyon olmadığı için düşük sıcaklık yönteminin kullanılması, (2) polikristal ve ince film güneş pilleri ile iyi uyum sağlamaları, (3) yüzeye yakın kısımlarda yüksek elektrik alanı yüzünden yüksek ışık direncinin olması ve (4) yüksek çıkış akımı ve iyi spektral duyarlılığa sahip olmalarıdır. Çünkü, yarıiletken yüzeyin sağ tarafındaki arınma bölgesinin varlığı, düşük ömürlü olayları ve yüzeye yakın yerlerde yüksek rekombinasyon hızını azaltabilir [9].

### 1.2.3 p-n Eklemlili Güneş Pillerinin Elektriksel Karakteristikleri

p-n eklem güneş pillerinin ışıktaki I-V karakteristikleri

$$I = I_s \left( e^{\frac{qV}{\beta kT}} - 1 \right) - I_L \quad (2)$$

ve

$$J_s = \frac{I_s}{A} = qN_c N_v \left( \frac{1}{N_A} \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} + \frac{1}{N_D} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right) e^{-E_g/kT} \quad (3)$$

bağıntıları ile verilir. Burada,  $I_s$  doyma akımı,  $J_s$  doyma akım yoğunluğu,  $I_L$  ışınla oluşan akım,  $q$  elektronların yükü,  $V$  uygulanan gerilim,  $\beta$  diyodun ideallik faktörü ( $1 \leq \beta \leq 3$ ),  $N_c$  iletim bandının durum yoğunluğu,  $N_v$  valans bandının durum yoğunluğu,  $N_A$  alıcı durum yoğunluğu,  $N_D$  verici durum yoğunluğu,  $\tau_n$  ve  $\tau_p$  elektronların ve deliklerin yaşam süresi,

$D_n$  ve  $D_p$  elektronların ve deliklerin difüzyon katsayısı ve  $A$  ise aygıtın alanıdır. Denklem (2)'nin grafik ile gösterimi  $I_L=100$  mA,  $I_S=1$  nA,  $A= 4$  cm<sup>2</sup> ve  $T=300$  K için Şekil 5(a)'da verilmiştir [10]. Eğri, dördüncü çeyrek bölge içinden geçer. Bundan dolayı güç düzeneğten elde edilebilir. Uygun bir yük seçimi ile  $I_{sc}V_{oc}$  çarpımının % 80'e yakını elde edilebilir ( $I_{sc}$  kısa devre akımı,  $V_{oc}$  açık devre gerilimi; taralı alan maksimum güç bölgesidir). I-V eğrisi, Şekil 5(a)'daki taralı alanın akım eksenine göre simetrisi alınarak Şekil 5(b)'de daha genel olarak gösterilmektedir. Şekil 5(b)'deki taralı dikdörtgenel yapıda sırasıyla  $I_m$  ve  $V_m$  bulunarak maksimum güç çıkış verimi  $P_m=I_mV_m$  tanımlanabilir.

Denklem 2'den açık devre voltajı için ( $I=0$ )

$$V_{oc} = \frac{\beta kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_S} + 1\right) \approx \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_S}\right) \quad (4)$$

ifadesi elde edilir. Burada verilen bir  $I_L$  için açık devre voltajı, doyma akımı  $I_S$ 'nin azalması ile logaritmik olarak artar. Çıkış gücü ise:

$$P = IV = I_S V \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_L V. \quad (5)$$

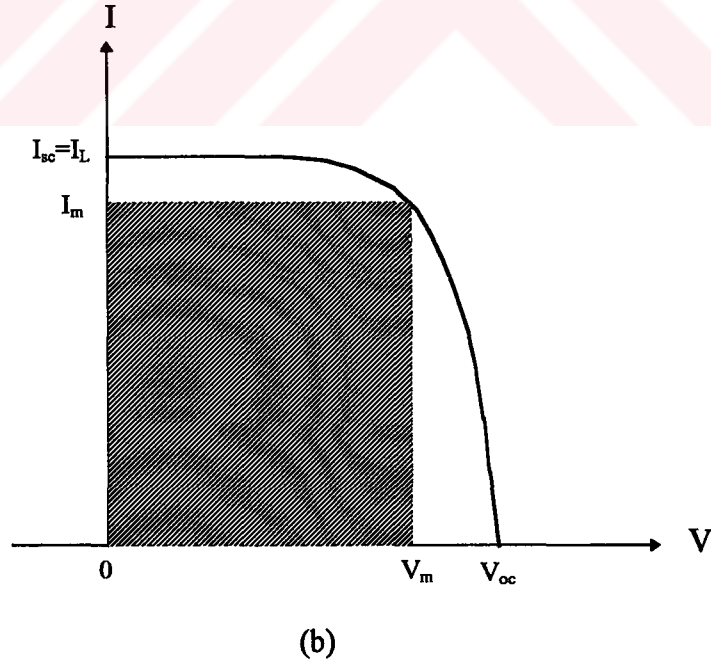
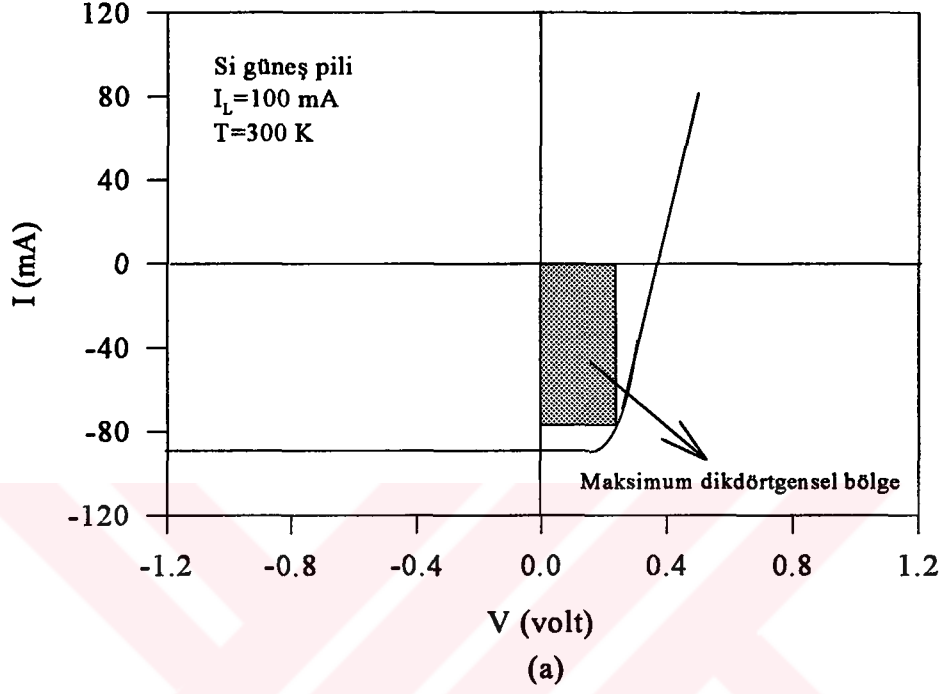
$\frac{dP}{dV} = 0$  olduğu zaman maksimum güç için durum

$$I_m = I_S \beta' V_m e^{\beta' V_m} \cong I_L \left( 1 - \frac{1}{\beta' V_m} \right) \quad (6)$$

$$V_m = \frac{1}{\beta'} \ln\left(\frac{I_L / I_S + 1}{1 + \beta' V_m}\right) \cong V_{oc} - \frac{1}{\beta'} \ln(1 + \beta' V_m) \quad (7)$$

olarak elde edilebilir. Burada  $\beta' \equiv q / kT$ 'dir. Maksimum güç çıkışı  $P_m$  şu şekilde tanımlanır:

$$P_m = I_m V_m \cong I_L \left( V_{oc} - \frac{1}{\beta'} \ln(1 + \beta' V_m) - \frac{1}{\beta'} \right) = I_L (E_m / q) \quad (8)$$

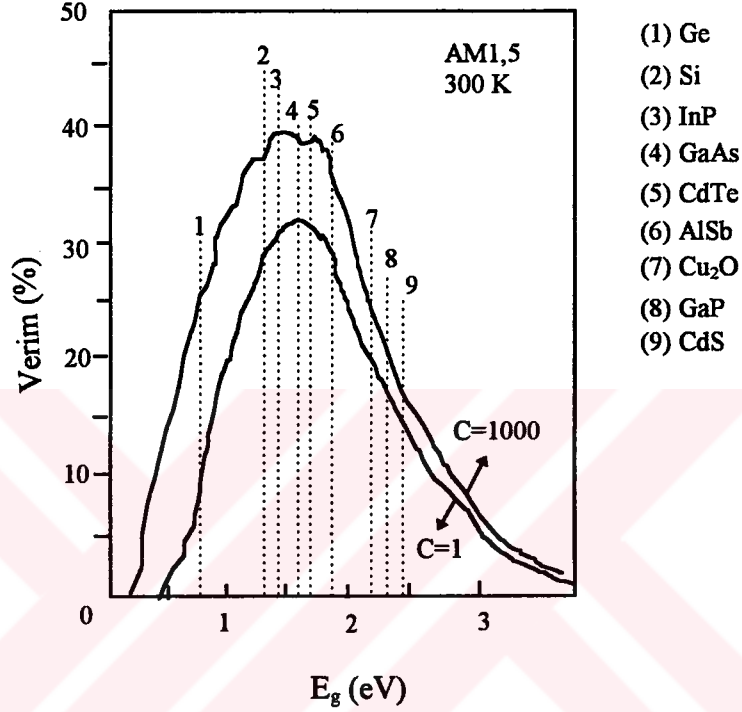


Şekil 5. (a) Aydınlanma altında bir güneş pilinin akım-voltaj karakteristiği.  
 (b) Şekil (a)'daki maksimum dikdörtgensel bölgede elde edilmiş olan yük asıllığı grafiği [10].

burada

$$E_m \equiv q \left[ V_{OC} - \frac{1}{\beta'} \ln(1 + \beta' V_m) - \frac{1}{\beta'} \right] \quad (9)$$

Bu enerji, maksimum güç noktasında yükü taşıyan foton başına enerjiye tekabül eder.



Şekil 6. C=1 ve C=1000 için 300 K'de ideal güneş pili veriminin gösterimi [11].

Bir yarıiletken için doyma akım yoğunluğu  $J_s$ , denklem (3)'den çıkartılabilir. 300 K'de Si için  $J_s$ 'nin en küçük değeri yaklaşık  $10^{-15}$  A/cm<sup>2</sup>'dir. AM1,5 şartı altında kısa devre akım yoğunluğu  $J_L$

$$J_L(E_g) = q \int_{h\nu=E_g}^{\infty} \left( \frac{dn_{ph}}{dh\nu} \right) d(h\nu) \quad (10)$$

ile verilir. Burada  $\nu$  frekanstır.

$J_s$  ve  $J_L$ 'den birisi bilindiğinde, diğeri teorik (4), (7) ve (9) eşitliklerinden elde edilebilir. Çünkü  $J_s$  gibi  $E_m$  de malzemenin özelliklerine bağlıdır (örneğin  $\tau$ , D ve doping seviyeleri). Yüksek verim, malzemenin özelliklerinin en iyi olarak seçilmesine yani  $J_s$ 'nin minimum olmasına bağlıdır. İdeal pilin verimi, maksimum çıkış gücünün, gelen güç P'ye oranıdır.

$$\eta = \frac{P_m}{P} = \frac{I_L(E_m/q)}{P} = \frac{\left[ V_m^2 I_s (q/kT) \exp\left(\frac{qV_m}{kT}\right) \right]}{P} \quad (11)$$

Maksimum verim III-V bileşikli yarıiletkenlerin materyal parametre karakteristiklerinin kullanılmasıyla  $E_g=1,35$  eV için %31 olarak bulunur.

İdeal güneş pil verimi, 300 K'de enerji band aralığının fonksiyonu olarak Şekil 6'da gösterilmiştir [11]. C=1 ile numaralanmış eğri, güneşin AM1,5 durumu altında çizilmiştir, C=1000 ile gösterilen eğri ise güneşin bin katı ışık şiddeti altında ölçülmüştür.

FF doldurma faktörünü

$$FF \equiv \frac{I_m V_m}{I_L V_{oc}} \quad (12)$$

olarak tanımlayabiliriz. Buradan

$$\eta = \frac{I_m V_m}{P} = \frac{FF \cdot I_L V_{oc}}{P} \quad (13)$$

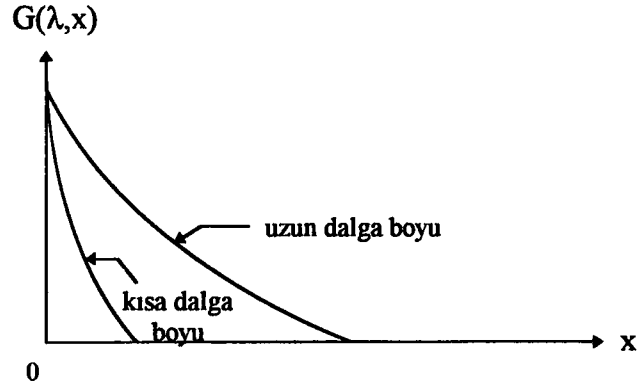
şeklinde yazabiliriz.

#### 1.2.4 p-n Eklem Güneş Pillerinin Spektral Karakteristikleri

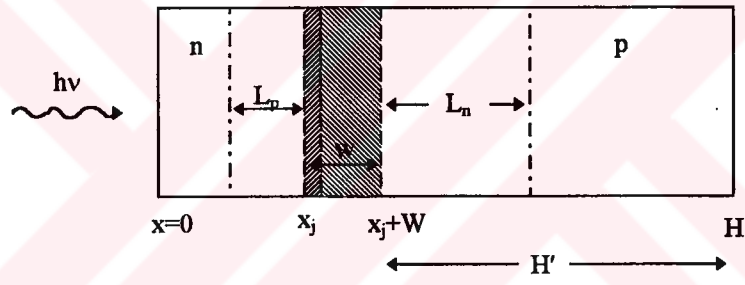
Dalga boyu  $\lambda$  olan monokromatik ışık, güneş pilinin ön yüzeyine düştüğü zaman, fotoakım ve spektral cevap, (yani her bir dalga boyunda bir fotona denk gelen taşıyıcıların sayısı) aşağıdaki şekilde türetilebilir. Yarıiletken yüzeyden bir  $x$  mesafesindeki elektron-delik çiftlerinin üretim oranı Şekil 7a'da gösterilmiştir ve bu aşağıdaki şekilde verilir:

$$G(\lambda, x) = \alpha(\lambda)F(\lambda)[1 - R(\lambda)]\exp[-\alpha(\lambda)x] . \quad (14)$$

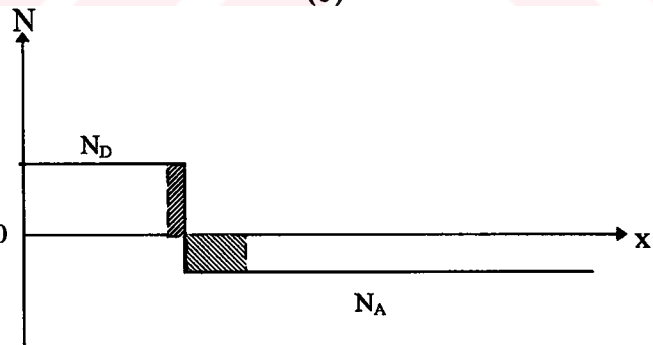
Burada  $\alpha(\lambda)$  soğurulma sabiti,  $F(\lambda)$  birim band genişliği başına birim alana birim saniyede düşen fotonların (foton/cm<sup>2</sup>xsn) sayısıdır ve  $R(\lambda)$  yüzeyden yansıyan fotonların kesridir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 7. (a) Uzun ve kısa dalga boylu ışık için yarıiletken yüzeyden mesafenin fonksiyonu olarak elektron-delik çiftlerinin üretim oranları. (b) Güneş pili boyutları ve azınlık taşıyıcılarının difüzyon uzunlukları. (c) Güneş pilinin keskin katkılı kesitinin gösterimi.

Düşük girme (Low-injection) durumu altında, tek boyutlu, kararlı durum süreklilik eşitliği p-tipi yarıiletkenlerdeki elektronlar için

$$G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} + \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} = 0 \quad (15)$$

ile, n-tipi yarıiletkendeki delikler için ise

$$G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} - \frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} = 0 \quad (16)$$

şeklinde verilir. Akım yoğunluğu aşağıdaki formüller ile

$$J_n = q\mu_n n_p \varepsilon + qD_n \frac{dn_p}{dx} \quad (17)$$

$$J_p = q\mu_p p_n \varepsilon - qD_p \frac{dp_n}{dx} \quad (18)$$

tanımlanır.

Bazen fotoakım üretimi arınma bölgesinin içinde de meydana gelir. Bu bölgede elektrik alanı genellikle yüksektir ve fotoüretilmiş taşıyıcılar tekrar birleşmeden önce arınma bölgesi çıkış yönlerinde hızlandırılırlar. Birim bant genişliğindeki fotoakım yoğunluğu, soğurulan foton sayısının yükü çarpımına eşittir:

$$J_{dr} = qF(1-R)\exp(-\alpha x_j)[1 - \exp(-\alpha W)] \quad (19)$$

Verilen bir dalga boyunda toplam fotoakım

$$J(\lambda) = J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{dr}(\lambda) \quad (20)$$

ile tanımlanır.

Spektral cevap (SR), dış spektral cevap için denklem (20)'nin  $qF$ 'ye, iç spektral cevap için ise  $qF(1-R)$ 'ye bölümü ile ifade edilir. Bu durum, içten gözlenen cevap için aşağıdaki şekilde tanımlanır:

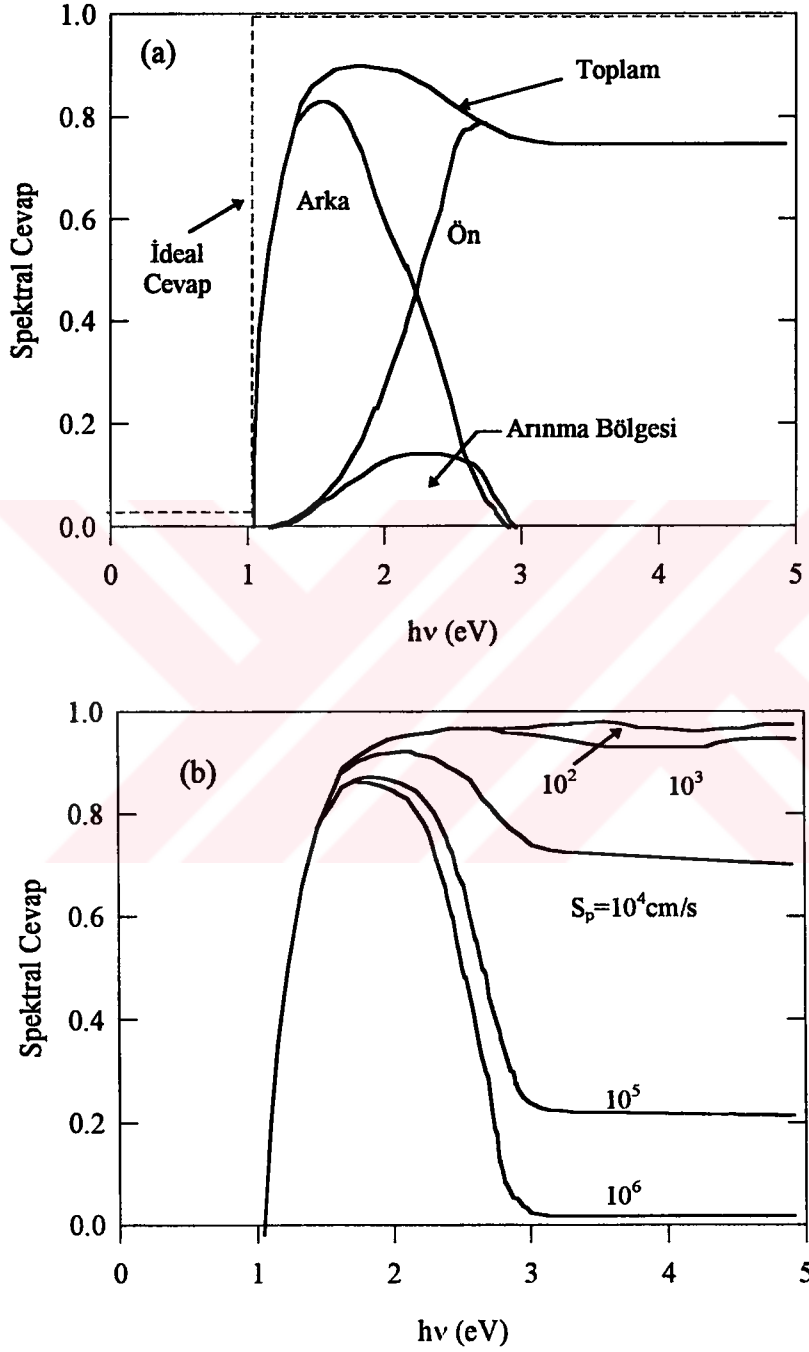
$$SR(\lambda) = \frac{1}{qF(\lambda)[1-R]} [J_p(\lambda) + J_n(\lambda) + J_{dr}(\lambda)] \quad (21)$$

$E_g$  enerji aralıklı bir yarıiletken için ideal iç spektral cevap,  $h\nu \geq E_g$  fotonlar için 1'e ve  $h\nu < E_g$  için sifıra eşit olan bir basamak fonksiyonudur (Şekil 8(a)'da noktalı çizgiler). Bir silisyum n-p güneş pili için hesaplanan gerçek iç spektral cevap, Şekil 8(a)'da



görülmektedir ki, yüksek foton enerjilerinde esas itibari ile idealleşmiş basamak fonksiyonundan ayrılır. Şekil 8(a), her üç bölgenin kendilerine özgü katkılarını da göstermektedir. Aygıt parametreleri  $N_D=5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_A=1,5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $\tau_p=0,4 \text{ } \mu\text{s}$ ,  $\tau_n=10 \text{ } \mu\text{s}$ ,  $x_j=0,4 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $H=450 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $S_p(\text{ön})=10^4 \text{ cm/sn}$  (deliklerin yüzeyde rekombinasyon hızı) ve  $S_p(\text{geri})=\infty$ 'dir. Düşük foton enerjilerinde çoğu taşıyıcılar, silisyum'da soğurma katsayılarının düşük olması nedeniyle temel bölgede, foton enerjisi 2,5 eV'dan daha fazla olduğu zaman ise ön bölgede üretilirler. Yüksek enerjili fotonlar için 3,5 eV'un üzerinde  $\alpha$ ,  $10^6 \text{ cm}^{-1}$ 'den daha büyük olur ve spektral cevap tamamen ön yüzeyden elde edilir.  $S_p$  oldukça büyük kabul edilebildiği için, ön bölgedeki yüzey tekrar birleşmeleri (rekombinasyon) ideal cevapta büyük bir değişikliğe sebep olur.  $\alpha L_p > 1$  ( $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$  difüzyon uzunluğu) ve  $\alpha x_j \gg 1$  olduğu zaman spektral cevap bir asimtotik değere ulaşır:

$$SR = \frac{1 + \frac{S_p}{\alpha D_p}}{\left(\frac{S_p L_p}{D_p}\right) \sinh\left(\frac{x_j}{L_p}\right) + \cosh\left(\frac{x_j}{L_p}\right)} \quad (22)$$



Şekil 8. (a) Bir Si n-p güneş pilinin hesaplanan iç spektral cevabı. Gösterilen her üç bölge ayrı ayrı spektral cevaba katkıda bulunur. (b) Bir Si n-p güneş pilinin hesaplanan iç spektral cevabının farklı yüzey rekombinasyon hızlarına göre gösterimi.

Yüzey rekombinasyon hızı  $S_p$  bilhassa yüksek foton enerjilerinde spektral cevap üzerinde esaslı bir etkiye sahiptir. Bu etki, Şekil 8(a)'daki parametreler kullanılarak Şekil 8(b) de gösterilmektedir.  $S_p$  arttığında spektral cevabın şiddetli olarak azaldığı görülmektedir. Denklem 22 ile verilmiş bir  $S_p$  için spektral cevabın difüzyon uzunluğu  $L_p$ 'nin artması ile iyileşebileceği görülmektedir. Genel olarak, SR'nin kullanışlı dalga boyu aralığını artırmak için,  $L_n$  ve  $L_p$ 'nin her ikisi de artırılmalı veya  $S_n$  ve  $S_p$ 'nin her ikisi de azaltılmalıdır.

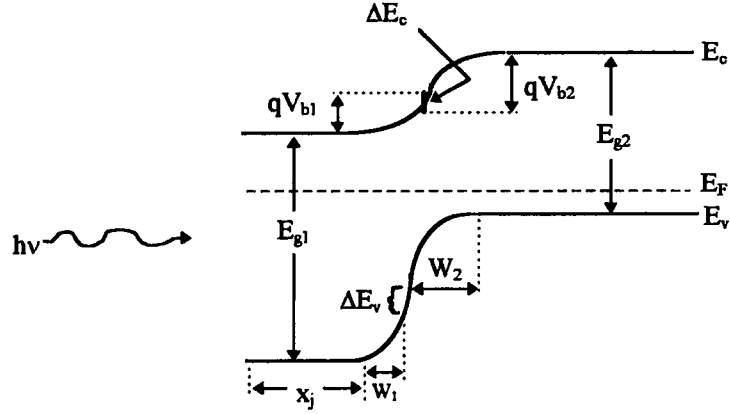
Spektral cevap bilinirse, toplam fotoakım yoğunluğu güneş spektral dağılımı  $F(\lambda)$ 'dan, Şekil 1'de gösterildiği gibi, elde edilebilir ve bu aşağıdaki eşitlik ile verilir:

$$J_L = q \int_0^{\lambda_m} F(\lambda)[1 - R(\lambda)]SR(\lambda)d(\lambda). \quad (23)$$

Burada  $\lambda_m$  yarıiletkenin band genişliğine uygun en uzun dalga boyudur. Büyük  $J_L$  elde etmek için,  $R(\lambda)$  azaltılmalı ve  $0 < \lambda < \lambda_m$  dalga boyu aralığında  $SR(\lambda)$  artırılmalıdır.

### 1.2.5 Heteroeklem Güneş Pilleri

Heteroeklemler, farklı enerji band aralıklarına sahip iki yarıiletken arasında şekillenen eklemlerdir. Termal dengede tipik bir n-p heteroeklem band diyagramı Şekil 9'da gösterilmektedir.  $E_{g1}$ 'den daha küçük fakat  $E_{g2}$ 'den daha büyük enerjili bir enerjiye sahip bir foton, bir pencere gibi davranan ilk yarıiletkenden geçecek ve ikinci yarıiletken tarafından soğurulacaktır. Eklemin difüzyon uzunluğu içinde ve arınma bölgesinde oluşan taşıyıcılar, bir n-p homoeeklem güneş piline benzer olarak toplanacaktır.  $E_{g1}$ 'den büyük enerjili foton, birinci yarıiletken tarafından soğurulacak ve eklemden bir difüzyon uzunluğu mesafesi içinde veya arınma bölgesinde üretilen taşıyıcılar da toplanacaktır.



Şekil 9. Termal dengedeki bir n-p heteroekleminin enerji-band diyagramı.

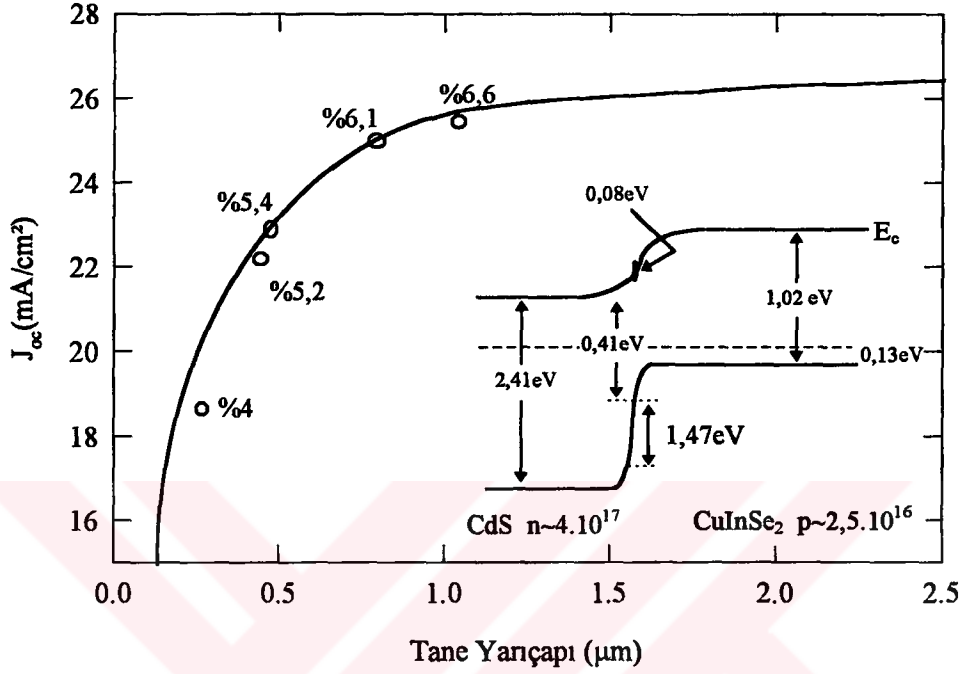
Heteroeklem güneş pillerinin yararları şu şekilde sıralanabilir [12]:

(1) Eğer  $E_{g1}$  ikinci yarıiletkenlerin arınma bölgesinde soğurulan yüksek enerjili fotonlar için yeteri kadar büyükse, kısa dalga boylu spektral cevabı artırır. (2) Eğer ilk yarıiletkene, kendi ışık geçiş karakteristiklerini etkilemeksizin yoğun bir şekilde doping yapılmış ise düşük direnç serilerini içerir. (3) Eğer ilk yarıiletken, yüksek band aralığına ilave olarak ince ise yüksek ışık toleransına sahiptir. Aslında heteroeklem fotoakımların açıklanması, homoeklem foto akımların açıklanmasına benzemektedir [3].

### 1.2.6 İnce Film Güneş Pilleri

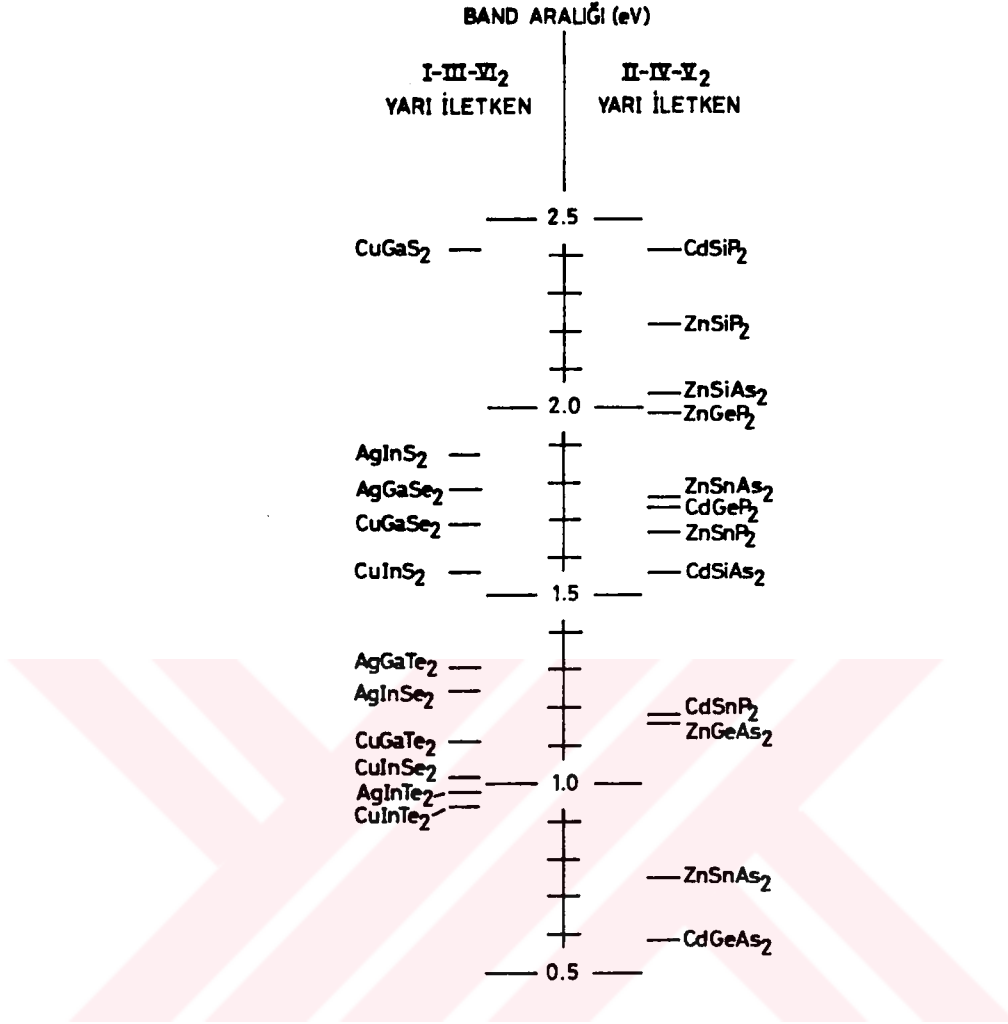
İnce film güneş pillerinde aktif yarıiletken tabakalar, cam, plastik, seramik, metal, grafit, metalurjik silisyum gibi elektriksel olarak aktif veya kimyasal pasif altlıklar üzerine çökertilen polikristal veya amorf filmlerdir. CdS, Si, GaAs, InP, CdTe gibi ince filmler, püskürtme ve buharlaştırma yöntemleri gibi değişik metotlar ile altlıklar üzerine çökertilir. Eğer yarıiletken kalınlığı soğurma sabitinin tersinden daha büyük ise ışığın çoğu soğurulacak; eğer difüzyon kalınlığı filmin kalınlığından daha büyük ise fotoüretilmiş taşıyıcıların çoğu toplanılabilecektir.

İnce film güneş piline bir örnek, CuInSe<sub>2</sub>/CdS heteroeklemidir ve band diyagramı Şekil 10 ile gösterilmektedir. Kısa devre akımı ve verim, tanelerin büyüklüğüne bağlıdır. Tane yarıçapları 0,3  $\mu\text{m}$ 'den 1 $\mu\text{m}$ 'a çıkarıldığı zaman, verim % 4 den % 6,6'ya yükselir [13]. Üçlü bileşiklerin çoğu, düşük maliyetli güneş pilleri uygulamaları için daha uygundur.



Şekil 10. CdS-CuInSe<sub>2</sub> güneş pillerinde tane yarıçapının kısa devre akımına bağlılığı.

İnce film güneş pillerinin yararı düşük işletme masrafı olan metaller ve yöntemler kullanılması ile düşük maliyetli olarak elde edilebilmeleridir. İnce film güneş pillerinin dezavantajları ise verimlerinin düşük ve uzun süre dayanıksız olmalarıdır. Düşük verime, kısmen yabancı altlıklar üzerinde büyütülmüş zayıf vasıflı yarıiletken metaller ve tane sınırı etkileri sebep olur. Yarıiletkeni saran kimyasal reaksiyonlar ise kararlı probleme sebep olur. (örneğin O<sub>2</sub> ve su buharı )



Şekil 11. Güneş fotovoltaik dönüşümü için, ilgilenilen bölgede I-III-VI<sub>2</sub> ve II-IV-V<sub>2</sub> yarıiletkenlerinin enerji aralığı.

Şekil 11, güneş fotovoltaik dönüşümü için ilgili enerji aralığına sahip bazı I-III-VI<sub>2</sub> grubu ve II-IV-V<sub>2</sub> grubu yarıiletkenlerin sıralanışını göstermektedir[14].

### 1.3 Yarıiletkenlerde Difüzyon

Sıcaklık yükseldikçe atomların ısı titreşimleri artar ve bazı atomlar, içinde bulunduğu ortamda bir konumdan diğer konuma atlayarak yer değiştirir. Atomal yayılım veya difüzyon denen bu olayda, önce atomun çevre atomlar ile bağları kopar. Bu atom, daha sonra atomlar arası boşluklara geçerek, yeni konumunda çevre atomlar ile bağ kurar [15]. Bütün bunlar için gerekli aktivasyon enerjisi, difüzyon sisteminin bir özelliğidir ve deneysel olarak ölçülebilir.

### 1.3.1 Difüzyon Kuralları

#### I. Fick Kuralı:

Eğer homojen olmayan tek-fazlı bir alaşım tavlânırsa, madde konsantrasyon gradyentinin azalacağı bir yönde hareket edecektir. Numune uzun süre tavlânırsa homojen hale geçecek ve maddenin net akısı duracaktır. Bu şekildeki bir sistemin akı denklemini elde etmek için, akının geçtiği alan ile konsantrasyon gradyentinin geçtiği alanı orantılı almak uygundur. Örneğin, x-ekseni, konsantrasyon gradyentine paralel alınır ise J akı bileşeni bu gradyent boyunca aşağıdaki şekilde verilir:

$$J = -D \frac{\partial N}{\partial x} \quad (24)$$

Burada D difüzyon sabitidir. Bu denklem Fick'in birinci kuralı adını alır ve numunenin homojen olduğu durumda akının sıfıra gittiğini gösteren bir denel gerçeğe yaklaşır.

#### II. Fick Kuralı:

Denklem (24), konsantrasyon ve konsantrasyon gradyenti herhangi bir noktada zamanla değişmesi sebebiyle  $t=0$  için geçerlidir. Konsantrasyonun zamanla değişme hızı akı gradyenti ile orantılıdır. Bu ifade süreklilik denklemi olarak adlandırılır ve aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} \quad (25)$$

Denklem (24)'ü denklem (25)'den yerine yazılırsa

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial N}{\partial x} \right) \quad (26)$$

denklemi elde edilir. Bu denklem, II. Fick kuralı olarak adlandırılır.

Denklem (25), üç boyutlu vektör uzayında

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \nabla J \quad (27)$$

şeklinde gösterilir. Bu denklem, maddenin korunumlu olduğu sistemlerde geçerlidir.

Eğer D, konumun bir fonksiyonu değil ise denklem (26)

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (28)$$

olur. Konsantrasyon, basit birkaç başlangıç ve sınır şartları ile zamanın ve konumun fonksiyonu olarak, (yani  $N(x,t)$ ), tayin edilebilir. Genelde  $D$  sabiti için, denklem (28)'in çözümü iki biçimde ifade edilir. Difüzyon uzunluğu, başlangıç homojensizlik boyutundan daha kısa olduğunda  $N(x,t)$  hata fonksiyonu ile basit bir şekilde ifade edilebilir.

II. Fick kuralının çözümleri başlangıç ve sınır şartlarına bağlıdır. Yarı sonsuz katıya sabit konsantrasyonlu kaynaktan difüzyon

$$N(0,t) = N_0 \quad (29)$$

$$N(x,0) = 0$$

bağıntıları ile verilir. II. Fick denkleminin çözümü

$$N(x,t) = N_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (30)$$

şeklindedir [16]. Burada  $N_0$ , numunenin yüzeyindeki ( $x=0$ ) sabit konsantrasyondur.

Burada  $\operatorname{erf}(z)$  Gauss hata fonksiyonudur ve aşağıdaki şekilde verilir:

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz. \quad (31)$$

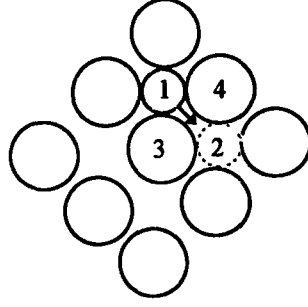
### 1.3.2 Difüzyon Mekanizmaları

Yarıiletkenlerde atomların difüzyonu esas itibarı ile iki mekanizma ile oluşur: (1) Arayer Mekanizması, (2) Boşluk Mekanizması

**(1) Arayer Mekanizması:** Örgü atomlarının hiçbirisi sürekli hareket etmemesine rağmen arayer atomları en yakın komşu arayer atlayabilir. Bu şekildeki difüzyon mekanizmasına arayer mekanizması denir. Bir atom, arayer mekanizmasına göre, örgü içinde bir arayer konumundan diğer bir arayer konuma atlayarak difüzyon eder.

Atlama olmadan önceki bir atomun hareketini göz önüne alalım. Şekil 12'de yüzey merkezli kübik örgünün içerisinde küresel paketlenmiş (100) düzlemindeki arayer atomlarını göstermektedir.

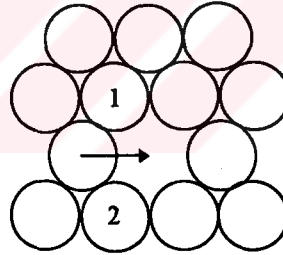




Şekil 12. Arayer mekanizmasıyla, arayer atom difüzyonunun yüzey merkezli kübik örgüde (100) düzleminde gösterimi.

**(2) Boşluk Mekanizması:** Bütün kristallerde bazı örgü atomlarının yerleri boştur. Bu boş yerler boşluklar olarak adlandırılırlar. Herhangi bir anda atomlar en yakın komşu boş yerlere atlayabilirler. Bu şekildeki difüzyon mekanizmasına boşluk mekanizması denir.

Şekil 13, yüzey merkezli kübik örgüde bir boşluk ile komşu atomun hareketini engelleyen sıkıştırmanın yapısını göstermektedir.



Şekil 13. Sıkı paket küreler düzlemi.

Eğer bozulmamış örgü, yarıçapı  $d$  olan sıkı paket kürelerden oluşmuş ise (1 ve 2 numaralı atomlar) sıkıştırılmış atomlar arasındaki mesafe  $0,73d$  olur. Bu nedenle bir atomun hareketi için gerekli bozulma küçüktür [17].

### 1.3.3 Heteroeklemlerde Difüzyon

İki yarıiletken den oluşan heteroeklem hazırlandığında katkı ve esas atomlar bir yarıiletken den diğer yarıiletkene difüz edebilir. Bu nedenle heteroeklemin yapısı, elektriksel ve fotoelektriksel özellikleri değişir [18]. Epitaksiyal ve buharlaştırma yöntemleri ile heteroeklem hazırlandığında katkı atomları, büyütülen film den altlığa veya altlıktan ince filme girme mekanizması ile oluşur [18]. Bu mekanizmalar şu şekilde sıralanabilir:

- (1) Atomların film den altlığa ve tersi olarak altlıktan filme direk difüzyonu,
  - (2) Atomların altlıktan gaz haline geçmesi (buharlaşması) ve sonra büyütülen filme difüzyon etmesi,
  - (3) Atomların film den gaz haline geçmesi (buharlaşması) ve sonra altlığa difüzyon etmesi,
- Heteroeklemler buharlaştırma mekanizması ile yapıldığı zaman birinci mekanizma daha önemlidir.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 2.1 CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs Güneş Pillerinin Hazırlanması

pCuGaSe<sub>2</sub>-nGaAs heteroeklem güneş pilleri, n-tipi GaAs altlık üzerine CuGaSe<sub>2</sub> polikristalinin vakum ortamında ( $\sim 10^{-4}$  torr) termal buharlaştırılması ile elde edilir. Altlık olarak, yüzeyi (111) düzlemi doğrultusuna yönelmiş n-tipi ( $n=1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ) 200  $\mu\text{m}$  kalınlığında GaAs kullanıldı. [111] doğrultusuna yönelmiş GaAs yüzeyinin üzerinde [112] doğrultusuna yönelmiş CuGaSe<sub>2</sub> filminin bulunduğu tahmin edilmektedir. GaAs altlığın (111) düzlemi yüzeyindeki atomların dizilişi ile CuGaSe<sub>2</sub> polikristalinin (112) düzlemi yüzeyindeki atomların dizilişi aynıdır. Kristal örgü sabitlerinin uygunsuzluk parametresinin çok küçük (% 0.61) olmasından dolayı, ( $\xi = \frac{\Delta a}{a}$ ,  $\Delta a = a_1 - a_2$ ,  $\bar{a} = \frac{a_1 + a_2}{2}$ , burada  $\xi$  uygunsuzluk parametresi,  $a_1$  ve  $a_2$  sırasıyla GaAs ve CuGaSe<sub>2</sub>'nin kristal örgü parametreleridir.) bu heteroeklemin, ideal heteroekleme yakın olması beklenmektedir. CuGaSe<sub>2</sub> polikristal malzemesi Cu, Ga, Se elementlerinin stokiometrik oranda karıştırılarak, havası boşaltılmış bir kuvars ampul içinde eritilmesi ile elde edilir. Ampulün sıcaklığı 1375 K'e kadar yükseltildi ve bu sıcaklıkta 48 saat tavlandıktan sonra fırın kapatıldı. Bu yöntem ile elde edilmiş olan CuGaSe<sub>2</sub> polikristal tozu Mo potaya konularak sıcaklığı hızla 1570 K'e yükseltildi. Bunun sebebi buharlaşan CuGaSe<sub>2</sub> polikristalinin bileşenlerine ayrılmadan buharlaşmasını sağlamaktır. Sonuçta altlık üzerine buharlaşan CuGaSe<sub>2</sub> polikristalinin stokiometrik oranı ile buharlaşmadan önceki stokiometrik oranının yakın olması beklenmektedir. Buharlaşma süresince altlığın sıcaklığı 770 K'de tutuldu. CuGaSe<sub>2</sub> filmin (yaklaşık 1  $\mu\text{m}$  kalınlığında) GaAs altlığın (111) düzlemi yüzeyine buharlaştırılması yöntemi ile CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pilleri üretildi.

CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pillerinin X-ışınları kırınımı, elektron ve optik mikroskobu incelemeleri, X-ışınları floresans analizleri yapıldı ve akım gerilim karakteristikleri (karanlık ve aydınlık ortamlarda) ölçüldü.

## 2.2 X-Işınları Kırınım Analizi

X-ışını kırınım (XRD) ölçümleri, Rigaku D/Max-III C difraktometrede 40 kV, 30 mA'de;  $\text{CuK}_\alpha$  ( $\lambda=1,5418 \text{ \AA}$ ) ışınımı kullanılarak elde edildi. Ölçümler, oda sıcaklığında,  $3^\circ < 2\theta < 70^\circ$  aralığı boyunca 0,02 derecelik adımlar ile yapıldı.

Numuneler üzerinde iki farklı ölçüm yapıldı. GaAs yarıiletken altlık üzerine  $\text{CuGaSe}_2$  polikristal buharlaştırılarak elde edilen filmin x-ışını kırınım deseni ölçüldü. Daha sonra GaAs altlık üzerine buharlaştırılan  $\text{CuGaSe}_2$  polikristali elmas pasta ile çıkarıldı ve çıkarılan GaAs yüzeyde x-ışını kırınım çalışması yapıldı.

Kalkopirit yapılı  $\text{CuGaSe}_2$  polikristalinin örgü parametrelerini ( $a, c$ ) hesaplayabilmek için,  $d$  düzlemler arası mesafe olmak üzere

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (32)$$

formülü kullanıldı. Burada ( $h, k, l$ ) yüzeyin Miller indisleridir. Kalkopirit yapılı  $\text{CuGaSe}_2$  polikristalinde  $c$ ,  $2a$ 'ya eşittir. Bu ifadeyi göz önüne alırsak denklem (32)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{4a^2} \quad (33)$$

şeklinde yazılır.  $\text{CuGaSe}_2$  polikristalinin en şiddetli (112) piki için

$$\frac{1}{d^2} = \frac{2}{a^2} + \frac{4}{4a^2} \quad (34)$$

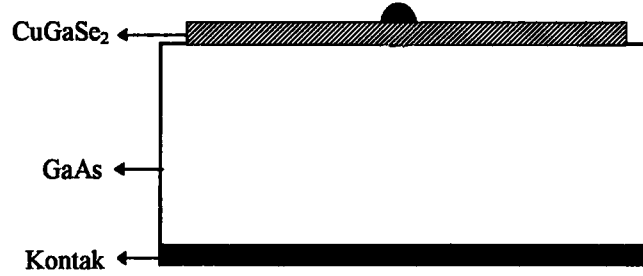
ifadesi elde edilir. X-ışını kırınım ölçülerinden örgü parametreleri ( $a, c$ ) bulunur. Kristal yapısı kübik olan GaAs altlığın örgü parametresi  $a$  aşağıdaki denklem ile ifade edilir:

$$a = \sqrt{3}d \quad (35)$$

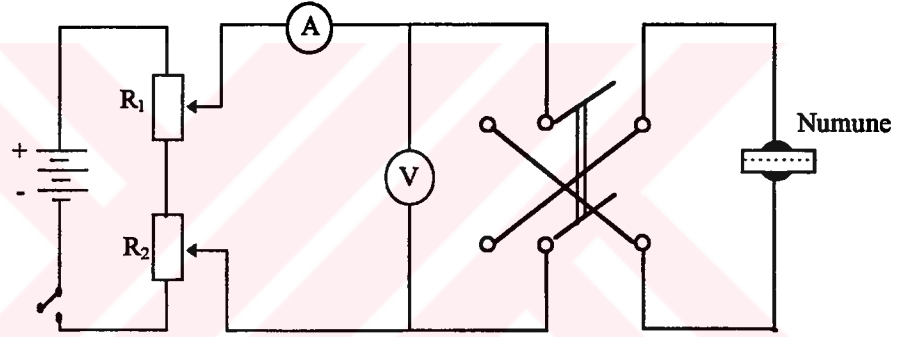
Örgü parametreleri  $\pm 0,004 \text{ \AA}$  hata ile ölçüldü.

## 2.3 Akım-Gerilim Karakteristikleri

Bir yüzeyi In ile, diğer yüzeyi ise  $\text{CuGaSe}_2$  polikristal film ile kaplanmış olan GaAs altlığın Şekil 14 görüldüğü gibi,  $\text{CuGaSe}_2$  polikristal film ile kaplanmış yüzeyine In kontaklar yapılarak, 1 ile 2 no'lu kontaklar arasındaki akım-gerilim karakteristikleri, karanlık ve  $P=100 \text{ mW/cm}^2$  ışık şiddetindeki aydınlık ortamda ölçüldü. Akım-gerilim ölçü sisteminin devre şeması Şekil 15 ile gösterilmektedir.



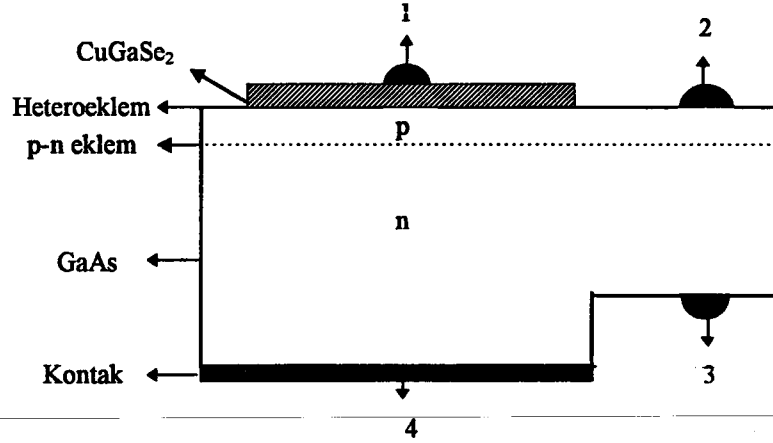
Şekil 14. CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs heteroeklem ve omik kontakların şematik gösterimi.



Şekil 15. Akım-gerilim karakteristiği ölçü devresi.

CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs heteroeklemin akım-gerilim karakteristikleri hakkında bilgi edinebilmek ve GaAs altlıkta oluşan gizli p-n ekleminin etkisini ayırt etmek için Şekil 16'da gösterildiği gibi kontaklar yapıldı.

CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs heteroeklemin 1 ve 4 no'lu kontaklarının dışında, GaAs altlığın üst yüzeyine 2 no'lu kontak ile In'la kaplı olan alt yüzeyinin bir kenarında zımpara ile tabakalar çıkarılarak 3 no'lu kontak yapıldı. Bu şekilde hazırlanan CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs heteroeklemin 1-4, 1-3, 1-2, 2-4 ve 3-4 kontakları arasında akım-gerilim karakteristikleri karanlık ve aydınlık ( $P = 100 \text{ mW/cm}^2$ ) ortamlarda ölçüldü.



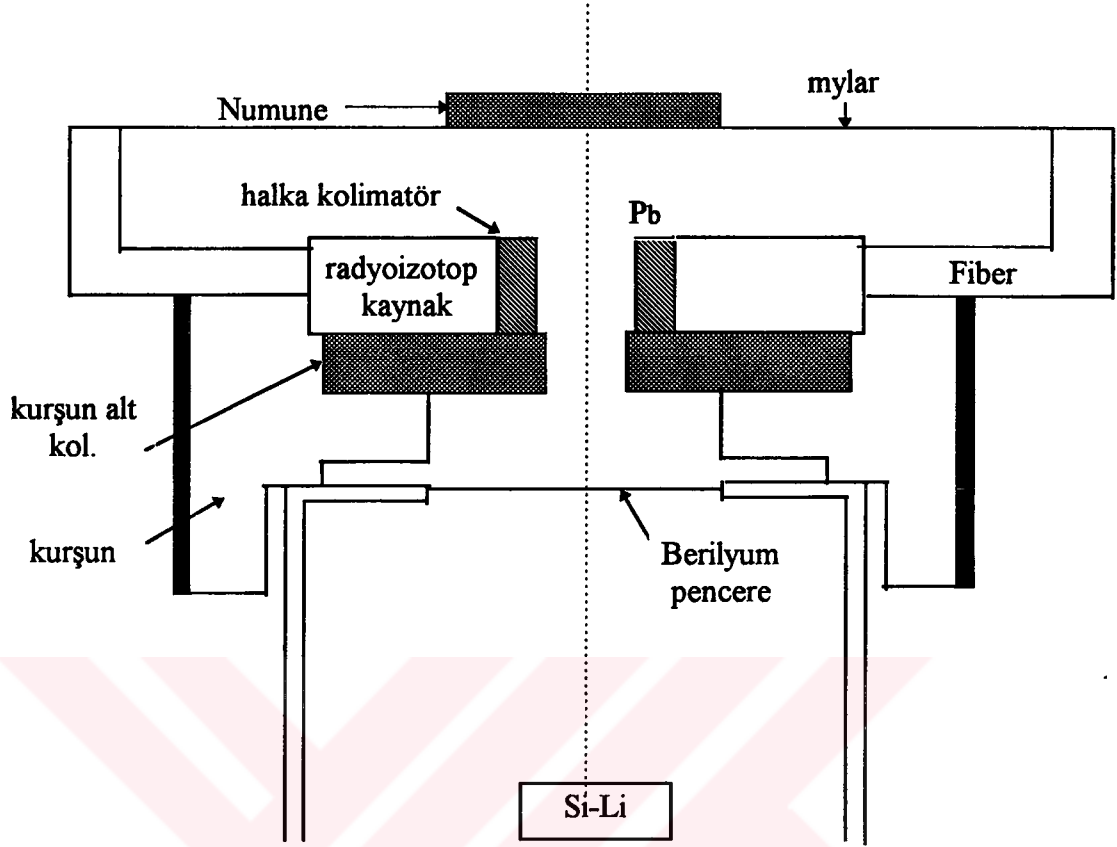
Şekil 16.  $\text{CuGaSe}_2$ -GaAs heteroeklemin p-n eklemleri ve omik kontaklarının (1,2,3,4) şematik olarak gösterimi.

Sabit bir nokta ışık kaynağı ve ray üzerinde hareket edebilen kızak üzerine  $\text{CuGaSe}_2$ -GaAs heteroeklemi yerleştirilerek, ışık şiddetinin değişimi ile pilin akım- gerilim karakteristikleri incelendi.

#### 2.4 X-Işınları Floresans Analizi

X-ışınları floresans tekniği, yayınlanan karakteristik x-ışınının dalga boyu veya enerjisinin ölçülmesiyle, element hakkında bilgi verir. Bu metod önce, yayınlanmış karakteristik çizginin enerjisinin veya dalga boyunun ölçülmesiyle verilen bir elementin, nitel analizin tayininin yapılmasını sağlar ve sonra bu çizginin şiddetinin ölçülmesiyle de elementel konsantrasyon tayin edilebilir (kantitatif) [19].

Bu çalışmada kullanılan deney sisteminde, Şekil 17'de de görüldüğü gibi, Si(Li) sayacını istenmeyen dış radyasyondan korumak için kurşun kolimatör kullanıldı. Numuneyi uyardırma, kaynaktan direkt olarak dedektöre gelebilecek radyasyonu önlemek için kurşun bir kolimatör içerisine yerleştirilmiş olan halka kaynak kullanıldı.

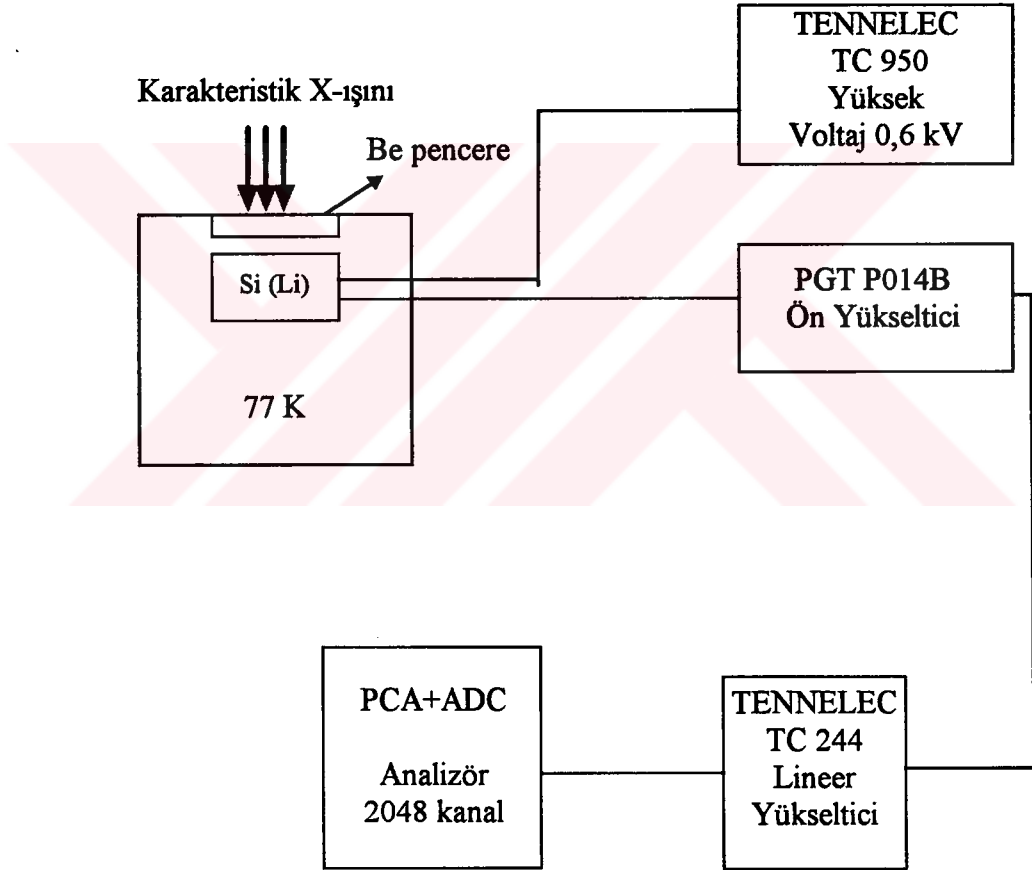


Şekil 17. X-ışınları floresans analiz sisteminin geometrisi.

Karakteristik x-ışınlarını ve numuneden saçılmış radyasyonu saymak için 5,9 keV'de yarı maksimumdaki tam genişliği (FWHM) 156 eV olan bir Si(Li) sayacı kullanıldı. Si(Li)'den çıkan pulslar önce ön yükselticiden ve daha sonra lineer yükselticiden geçirilerek çok kanallı (8192 kanallı) puls yükseklik analizöründe (MCA) kaydedildi. Şekil 17'de deney sisteminin blok diyagramı görülmektedir. Sayma işlemlerinde MCA'nın 2048 kanalı kullanıldı. Cu atomlarını uyarmak için koherent enerjisi 59,5 keV olan Am-241 halka kaynağı kullanıldı.

CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs heteroeklem üretimi (CuGaSe<sub>2</sub> polikristalinin GaAs altlık üzerine buharlaşma ve tavlama süresi içinde) esnasında, polikristal malzeminin yapısında olan Cu atomları GaAs altlığa difüz edebilir. GaAs altlıkta Cu atomlarının konsantrasyon dağılımını ölçmek için X-ışını floresans metodu kullanıldı. GaAs altlığın kalınlığı boyunca Cu atomlarının konsantrasyonunu analiz etmek için, önce GaAs altlık üzerinden CuGaSe<sub>2</sub> ince filmi elmas pasta kullanılarak çıkarıldı.

Sonra GaAs altlığın yüzeyinden ince filmler (2-5 $\mu$ m) çıkarıldı. Her film çıkarmadan önce ve sonra numuneden çıkan karakteristik x-ışınları sistemde sayılarak 8,04 keV'de CuK $\alpha$  pikinin şiddetinde meydana gelen değişim ölçüldü. Her sayımda CuK $\alpha$  pikinin net alanı, zamana bölünerek normalizasyon yapıldı. Bakır pikinin şiddetinin sayısından bakır atomlarının (bakır konsantrasyonuna) sayısına geçmek için, GaAs altlığın üzerine saf Cu buharlaştırılarak kalibrasyon yapıldı. Daha sonra numune içindeki Cu konsantrasyonunun kalınlıkla dağılımının hesabına geçildi



Şekil 18.X-ışınları floresans deney sisteminin blok diyagramı.



## 2.5 Elektron Mikroskobu ve Optik Mikroskobu İncelemeleri

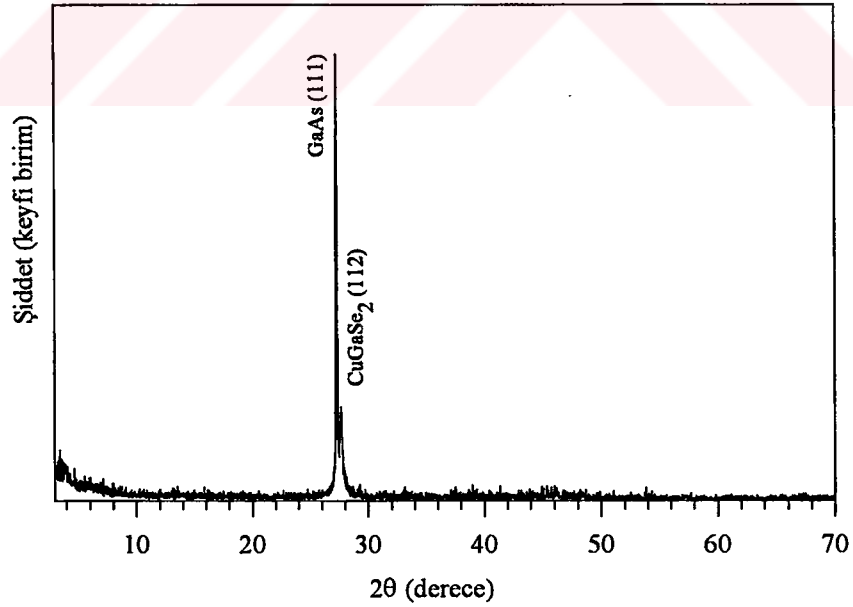
Metalografik inceleme iki farklı şekilde yapıldı: (i) GaAs yarıiletken altlığın CuGaSe<sub>2</sub> polikristal ile kaplanmış yüzeyinde, (ii) CuGaSe<sub>2</sub> polikristali elmas pasta ile tamamen çıkarılarak metalografik analizler yapıldı. Bu işlemler tamamlandıktan sonra numunelerin yüzeyleri alkol ile temizlenerek yüzey analizi JEOL JSM 6400 model Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) yardımıyla elde edildi. Ölçek olarak 1cm=1µm ve 1cm=10µm alındı.

GaAs altlık 1HF; 2H<sub>2</sub>O; 3HNO<sub>3</sub> çözeltisinin içinde dağlanarak, dislokasyon yoğunluğu VICKERS PHOTOPLAN marka Optik Mikroskobu ile tesbit edildi.

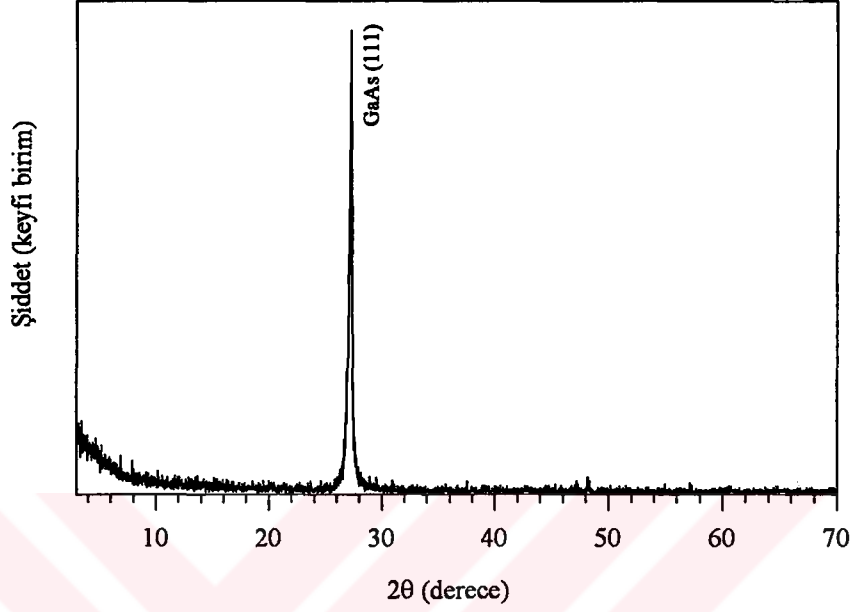
### 3.BULGULAR

#### 3.1 X-Işını Kırınım Çalışmaları

Hazırlanmış olan  $\text{CuGaSe}_2\text{-GaAs}$  heteroeklemin X-ışınları kırınım deseni, Şekil 19'da görülmektedir. Şekilde, GaAs altlığın  $2\theta = 27,3^\circ$  de (111) piki ve  $2\theta = 27,6^\circ$  de  $\text{CuGaSe}_2$  ince filminin (112) piki görülmektedir. GaAs altlıktan  $\text{CuGaSe}_2$  ince filmi çıkarıldıktan sonra elde edilen X-ışınları kırınım deseni ise Şekil 20'de verilmektedir. Burada sadece  $2\theta = 27,3^\circ$  de GaAs altlığın (111) pikine rastlandı. X-ışını kırınım deseninde  $\text{CuGaSe}_2$  ince filmi için hesaplanan örgü parametreleri  $a = 5,618 \text{ \AA}$ ,  $c = 11,26 \text{ \AA}$  ve GaAs altlık için ise  $a = 5,653 \text{ \AA}$  olarak bulundu.



Şekil 19.  $\text{CuGaSe}_2\text{-GaAs}$  heteroekleminin X-ışınları kırınım deseni.

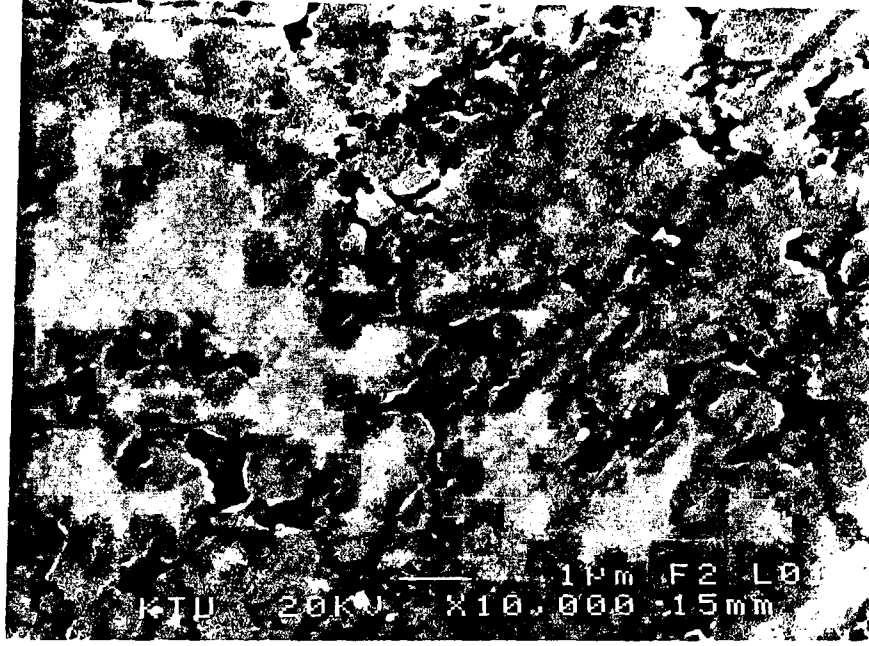


Şekil 20. GaAs altlıktan CuGaSe<sub>2</sub> ince filmi çıkarıldıktan sonra elde edilen X-ışınları kırınım deseni.

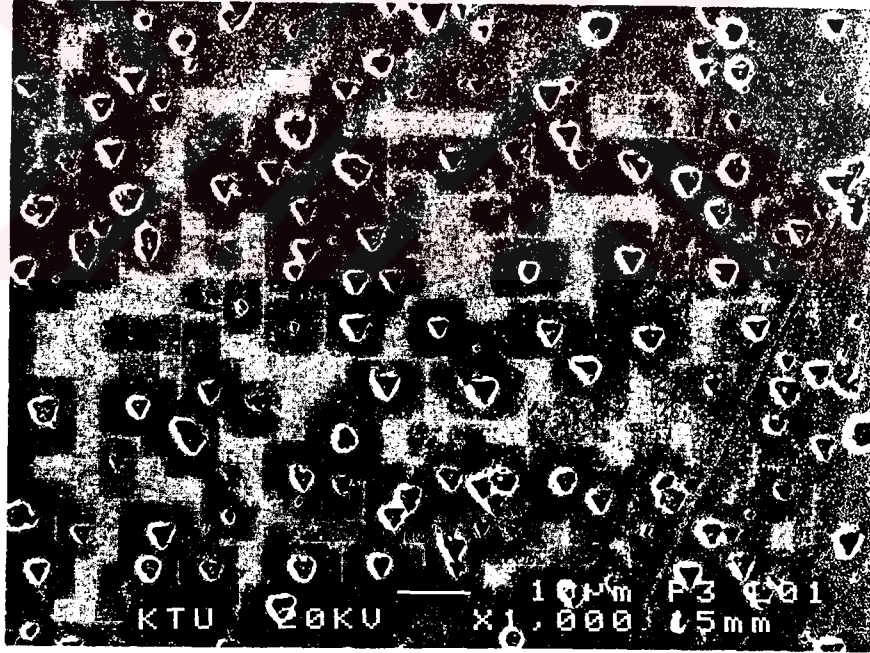
### 3.2 CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs Güneş Pillerinin Optik Mikroskobu ve Taramalı Elektron Mikroskobu ile İncelenmesi

GaAs altlığın (111) düzlemi yüzeyindeki dislokasyon yoğunluğunu bulmak için, numune 1HF; 2H<sub>2</sub>O; 3HNO<sub>3</sub> çözeltisi içine atılarak dağlandı ve dislokasyon yoğunluğu optik mikroskobu kullanılarak  $N_D=3 \times 10^2 \text{ cm}^{-2}$  bulundu.

Elektron mikroskobu analizi, CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs heteroekleminde CuGaSe<sub>2</sub> filmi çıkarılmadan önce ve çıkarıldıktan sonra yapıldı. Şekil 21, CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs heteroeklemin, taramalı elektron mikroskobu yardımıyla elde edilen yüzey mikrograflarını göstermektedir. Şekil 21(a)'da CuGaSe<sub>2</sub> ince filminin sıkı polikristalik yapısı ve boyları 2-8 µm arasında değişen taneler görülmektedir. Şekil 21(b)'de ise GaAs altlığın (111) düzlemi yüzeyinde üçgen şeklinde kusurlar görülmektedir. Bu kusurlar, GaAs altlığın yüzeyindeki kristalleşme merkezleridir ve kristalleşme merkezi çevresinde CuGaSe<sub>2</sub> polikristal film büyütülür. Şekil 21(b)'den bulunan kristalleşme merkezlerinin yoğunluğu  $N_K= 1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$  dir.



(a)



(b)

Şekil 21. CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs heteroeklemin yüzey mikrografları  
(a) CuGaSe<sub>2</sub> ince filmi (ölçek 1cm=1μm)  
(b) GaAs altlık (ölçek 1cm=10μm)

### 3.3 CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs Güneş Pillerinin Akım-Gerilim Karakteristikleri

CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pilleri, buharlaştırma yöntemi kullanılarak hazırlandı. Bir güneş pilinin (ideal pil), karanlık ve aydınlık ortamlarda (P=100 mW/cm<sup>2</sup> ışık şiddeti altında) ölçülen J-V karakteristik eğrisi (1-4 kontakları arasındaki) Şekil 22'de gösterilmektedir. Heteroeklem tipi hazırlanan CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pilleri büyük ölçüde doğrultucu karaktere sahiptir. İdeallik ve doğrultma katsayıları, güneş pillerinin karanlık ortamda geçirme yönündeki akımın

$$I_g = I_0 e^{\frac{eV}{\beta kT}} \quad (36)$$

ve ters yöndeki akımın

$$I \approx I_0 \quad (37)$$

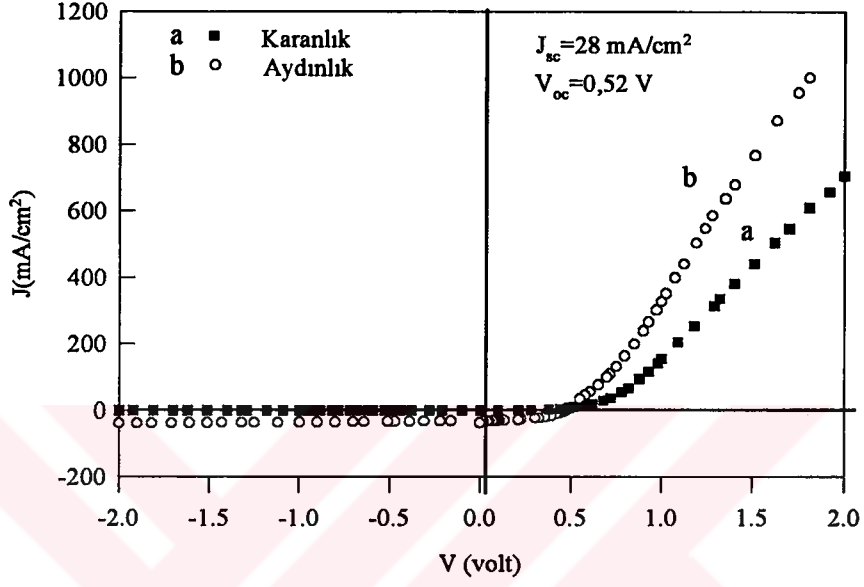
ifadeleri ile hesaplanır (sabit gerilimde).

Karanlık ortamdaki karakteristik eğride, gerilim 1 Volt olduğu zaman eklem doğrultma katsayısı (yani geçirme yönündeki akımın ters yöndeki akıma oranı) çok yükselir (değeri yaklaşık olarak 10<sup>6</sup> dır). Karanlık ortamda ölçülen akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi kullanılarak (36) eşitliğindeki ideallik faktörü  $\beta = 2$  olarak hesaplandı.  $\beta = 2$  olması, CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pilinden geçen akım, emisyon ve rekombinasyon mekanizması ile açıklanır.

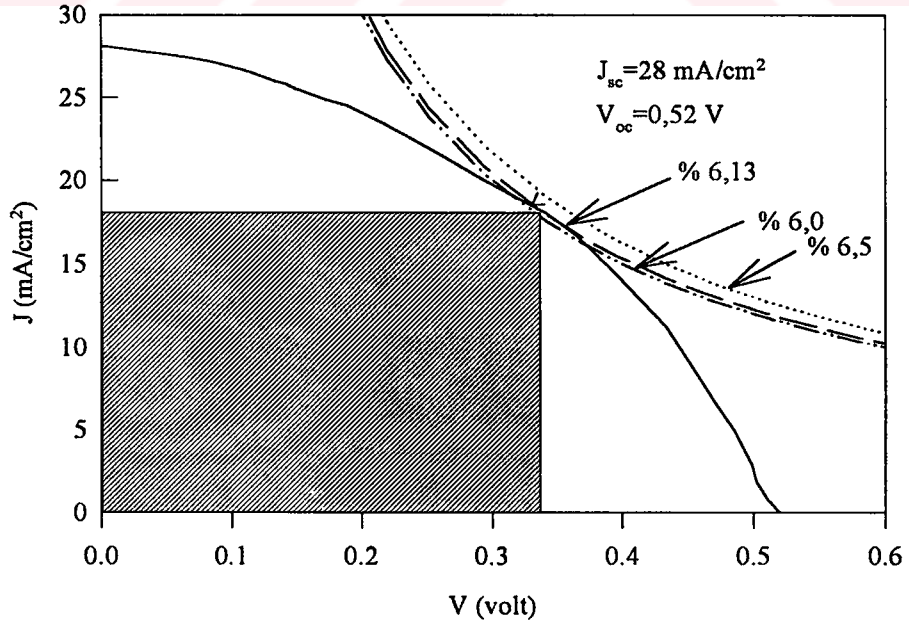
Şekil 23'den görüldüğü gibi CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pili yüksek parametrelere sahiptir (ideal pil). Şekil'de, eklem aydınlık ortamdaki yük bağımlılığı ve eşit verimlilik eğrileri gösterilmektedir. CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pilinin aydınlık ortamdaki fotoelektriksel parametreleri kısa devre akım yoğunluğu  $J_{sc}=28\text{mA/cm}^2$ , açık devre gerilimim  $V_{oc}=0,52$  Volt, doldurma faktörü  $FF=0,42$  ve verimin  $\eta=\% 6,1$  olarak bulundu (Tablo1).

Tablo 1. CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pillerinin parametreleri.

Kontak No:	Doğrultma katsayısı ( $\kappa$ )	İdeallik faktörü ( $\beta$ )	$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (Volt)
İdeal pil (1-4)	$9,9 \times 10^5$	2,0	28	0,52
(1-2)	$2,9 \times 10^2$	2,6	24,5	0,38
(1-3)	$2,4 \times 10^4$	2,5	25,9	0,38
(1-4)	$3,0 \times 10^4$	2,0	29,4	0,38
(2-4)	$6,4 \times 10^3$	2,2	3	0,24

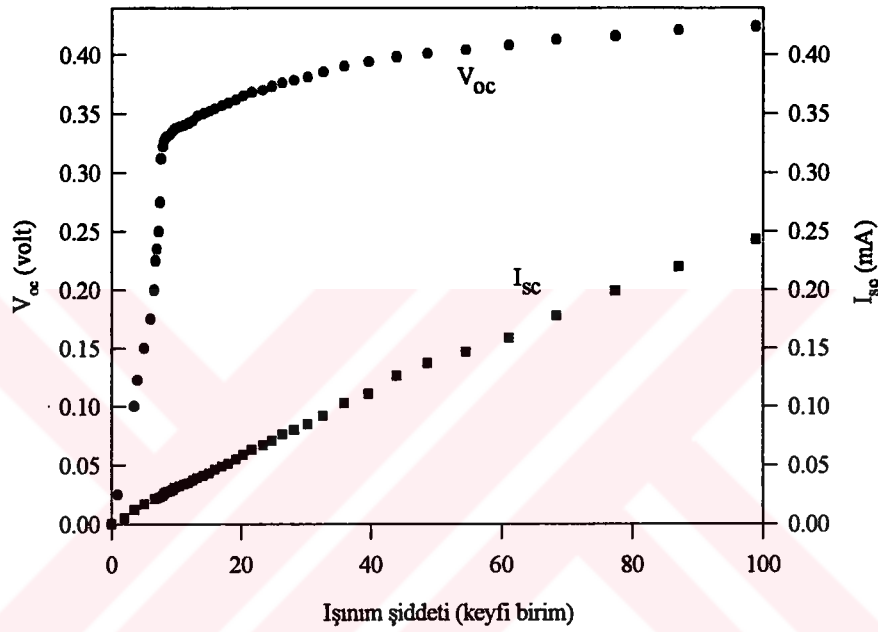


Şekil 22.  $\text{CuGaSe}_2\text{-GaAs}$  güneş pilinin akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi.



Şekil 23.  $\text{CuGaSe}_2\text{-GaAs}$  güneş pilinin aydınlıkta ( $P = 100 \text{ mW/cm}^2$ ) akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi.

Şekil 24'de  $\text{CuGaSe}_2\text{-GaAs}$  güneş pilinin kısa devre fotoakımının ve açık devre geriliminin ışık şiddeti ile değişimi gösterilmektedir. Kısa devre fotoakımı, ışık şiddeti arttıkça lineer olarak artar. Açık devre gerilimi ışık şiddeti arttıkça logaritmik olarak değişmektedir.

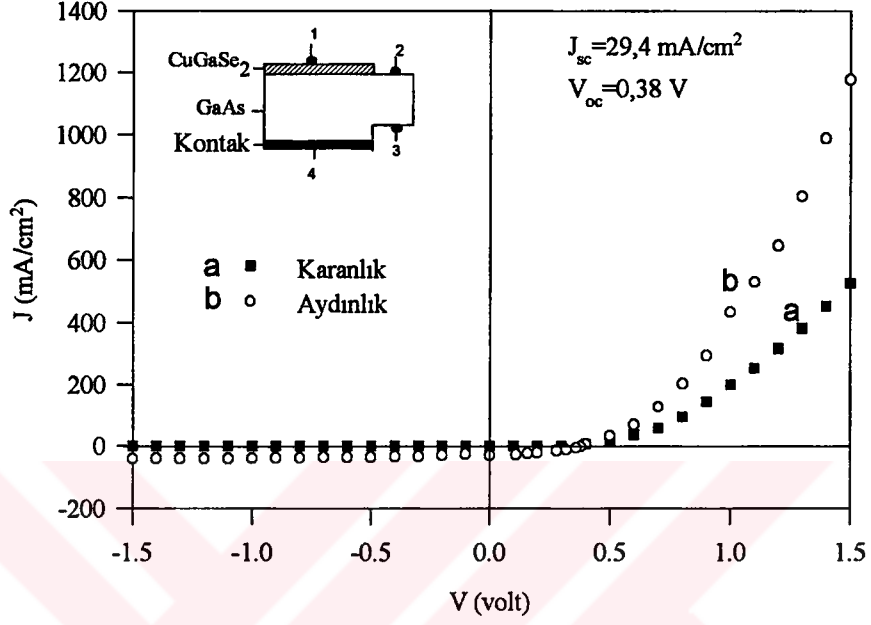


Şekil 24.  $\text{CuGaSe}_2\text{-GaAs}$  güneş pilinin kısa devre akımının ( $I_{sc}$ ) ve açık devre geriliminin ( $V_{oc}$ ) ışık şiddeti ile değişimi.

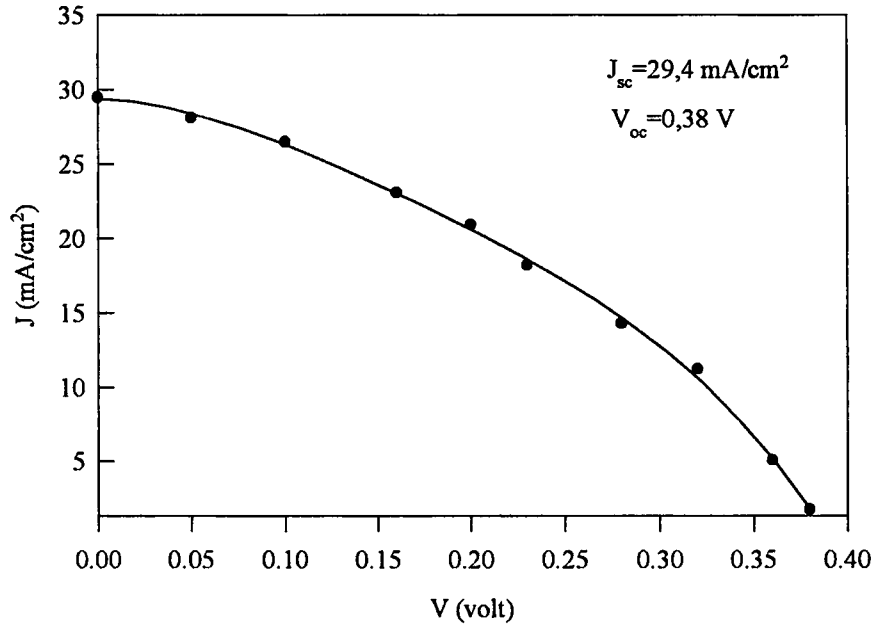
Bakır atomları, GaAs altlıkta yüksek difüzyon katsayısı ( $D \approx 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $T=500^\circ\text{C}$ ) ile karakterize edilirler. Bu nedenle  $\text{CuGaSe}_2$  ince filmi GaAs altlık yüzeyine buharlaştırıldığı zaman, bakır atomları  $\text{CuGaSe}_2$  ince filmde GaAs altlığın içine doğru hareket edebilir ve sonuçta GaAs'de gizli bir p-n eklemi oluşabilir. Bu tahmini incelemek için, buharlaştırma yöntemi ile hazırlanmış  $\text{CuGaSe}_2\text{-GaAs}$  heteroeklemine Şekil 16'da görüldüğü gibi dört omik kontak yapıldı. 1-2, 1-3, 1-4 ve 2-4 kontakları arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri, karanlık ve aydınlık ( $P=100\text{mW}/\text{cm}^2$  ışık şiddetinde) ortamlarda ölçüldü.

Bir diğer  $\text{CuGaSe}_2\text{-GaAs}$  güneş pilinin 1-4 kontakları arasındaki karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi Şekil 25'de görülmektedir. Aydınlık ortam için akım yoğunluğu-gerilim eğrisinin dördüncü bölgesi ise

Şekil 26'da görülmektedir. CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pilinin fotoelektriksel parametreleri  $J_{sc}=29,4 \text{ mA/cm}^2$



Şekil 25. CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pilinin 1-4 kontaktları arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi.



Şekil 26. CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pilinin aydınlıkta ( $P=100 \text{ mW/cm}^2$ ) 1-4 kontaktları arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi.



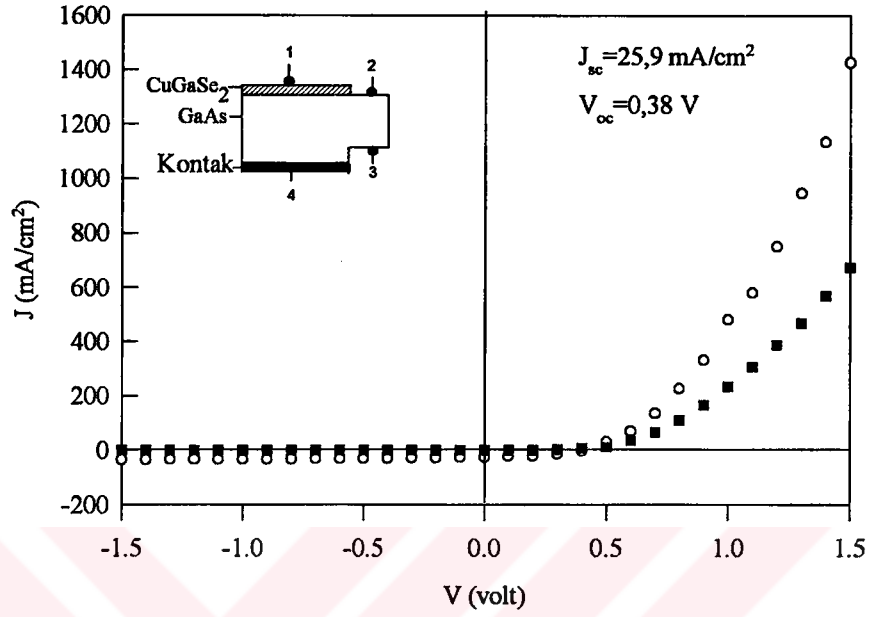
ve  $V_{oc}=0,38$  Volt olarak ölçüldü (Tablo 1). Karanlık ortamda ölçülen akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisinde ideallik faktörü  $\beta=2$  ve doğrultma katsayısı  $\kappa=3 \times 10^6$  olarak hesaplandı. CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pilinin 1-4 kontakları arasındaki fotoelektriksel parametrelerinin, doğrultma katsayısının yeterince büyük ve ideallik faktörünün ( $\beta$ ) iki olmasından pilin kalitesi iyi olduğu anlaşılmaktadır.

CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs heteroeklemin 1-3 kontakları arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrileri karanlık ve aydınlık ortamlar için Şekil 27'de gösterilmektedir. Bu kontaklar arasındaki heteroeklemin fotoelektriksel parametreleri,  $J_{sc}=25,9$  mA/cm<sup>2</sup> ve  $V_{oc}=0,38$  Volt olarak ölçüldü. 1-3 kontakları arasındaki ideallik faktörünün ( $\beta=2,5$ ), 1-4 kontakları arasındaki ideallik faktöründen ( $\beta=2,0$ ) bir miktar daha büyük olduğu görülmektedir (Tablo 1). Bu güneş pilinin, aydınlık ortam için, fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi (dördüncü bölge) Şekil 28'de gösterilmektedir. Şekil 26 ile Şekil 28'deki fotoelektriksel parametreler kıyaslandığında, 1-4 kontakları arasındaki fotoakım yoğunluğu ( $J_{sc}=29,4$  mA/cm<sup>2</sup>) 1-3 kontakları arasındaki fotoakım yoğunluğundan ( $J_{sc}=25,9$  mA/cm<sup>2</sup>) daha büyüktür. Fakat, açık devre gerilimleri yaklaşık olarak aynıdır.

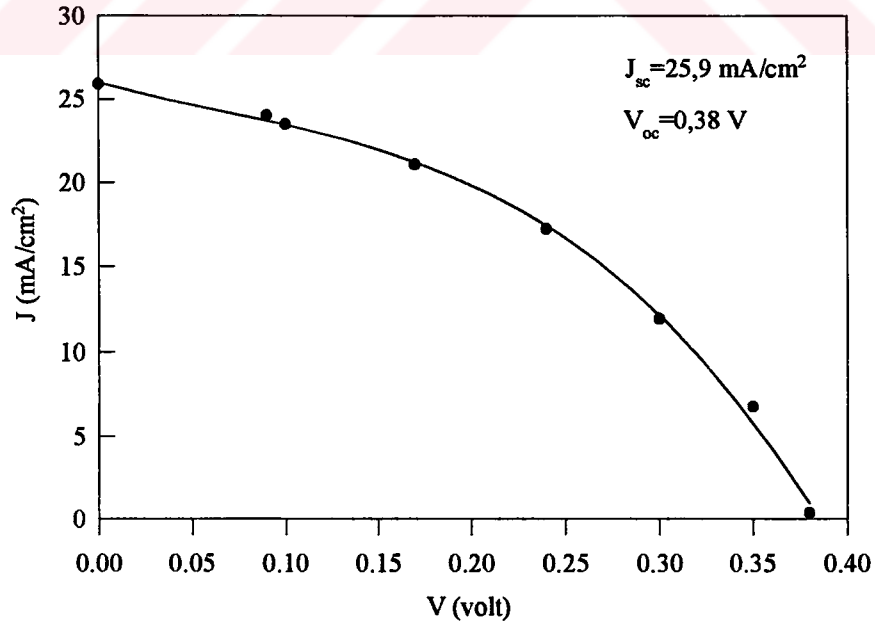
Şekil 29 ve Şekil 30'da, CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pilinin 1-2 kontakları arasındaki fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrilerini göstermektedir. 1-2 kontakları arasındaki karakteristik sadece CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs heteroeklemin etkisini gösterir. 1-2 kontakları arasındaki parametreler ile 1-3 ve 1-4 kontakları arasındaki parametreler karşılaştırıldığında, akım yoğunluğunun ( $J_{sc}=24,5$  mA/cm<sup>2</sup>) ve doğrultma katsayısının ( $\kappa=2,9 \times 10^2$ ) azaldığı görülmektedir. Fakat ideallik faktörü ( $\beta=2,6$ ) artar.

2-4 kontakları arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi Şekil 31 ile gösterildi. Bu kontaklar arasında yeteri kadar büyüklükte doğrultma ( $6,4 \times 10^3$ ) görülmektedir (Tablo 1). Bu sonuç, GaAs altlıkta gizli bir p-n eklemi oluştuğunu göstermektedir.

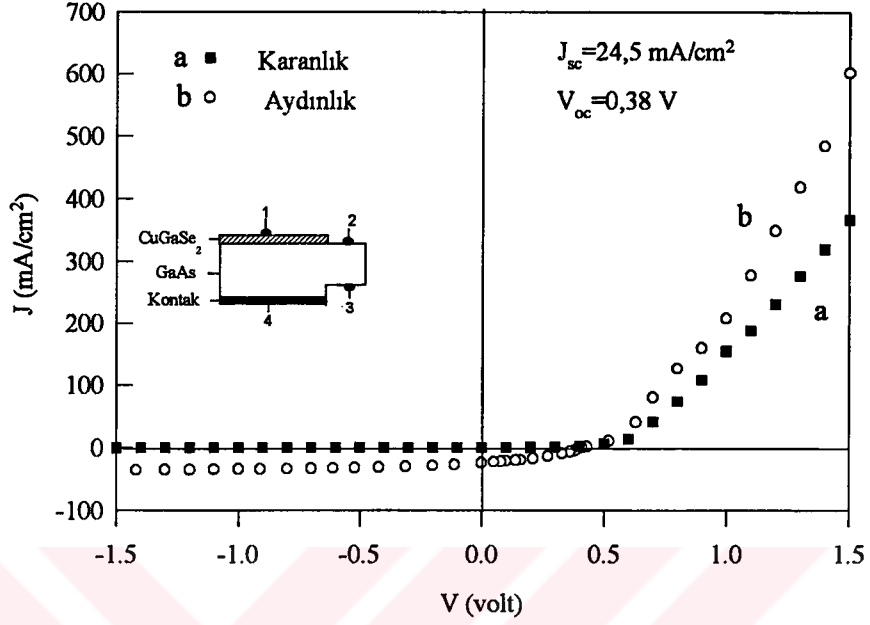
CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pilinin 3-4 kontakları arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrileri ise Şekil 32'de görülmektedir. Bu kontaklar arasında doğrultma ve ışığa duyarlılık çok küçüktür. Bu sonuç 3-4 kontakları arasında eklem olmadığını ifade eder. Yani GaAs altlığın alt yüzeyi yanında gizli bir p-n eklemi oluşmamıştır. CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pilinin 1-4, 1-2, 1-3 ve 2-4 kontakları arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrilerinin parametreleri Tablo 1 ile verildi. Bu tablodan da görüldüğü gibi, 1-4 kontakları arasındaki akım yoğunluğu, 1-3 ve 1-2 kontakları arasındaki akım



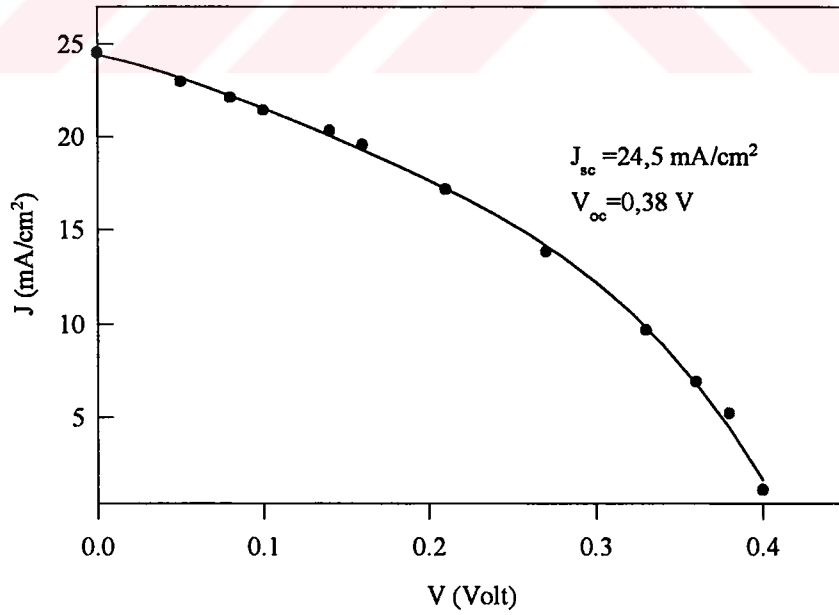
Şekil 27.  $\text{CuGaSe}_2$ - $\text{GaAs}$  güneş pilinin 1-3 kontaktları arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi.



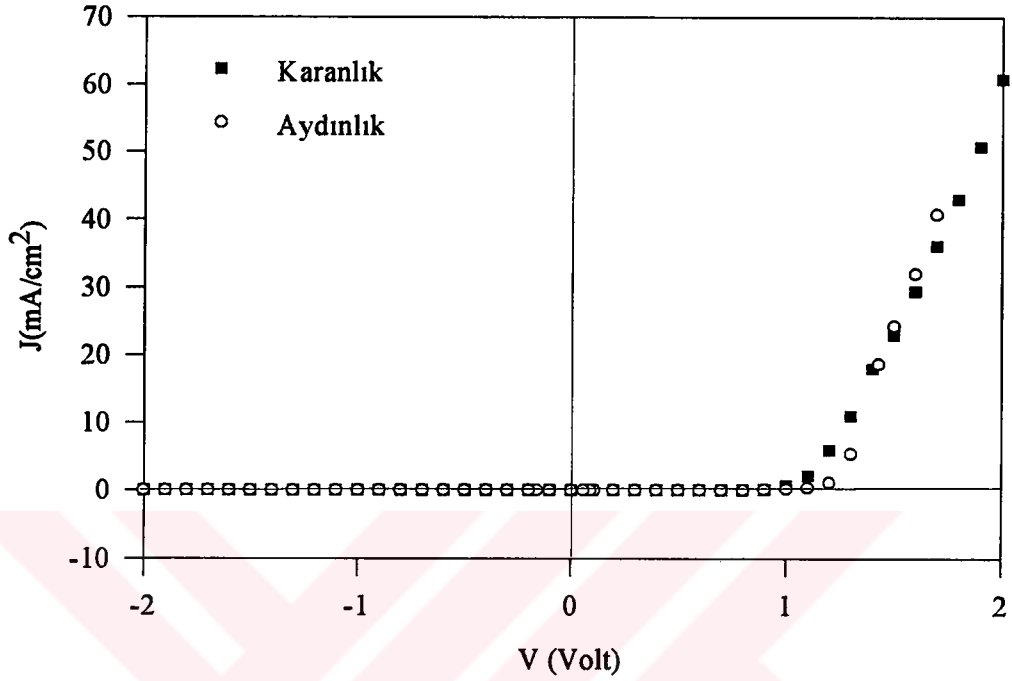
Şekil 28.  $\text{CuGaSe}_2$ - $\text{GaAs}$  güneş pilinin aydınlıkta ( $P=100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ) 1-3 kontaktları arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi.



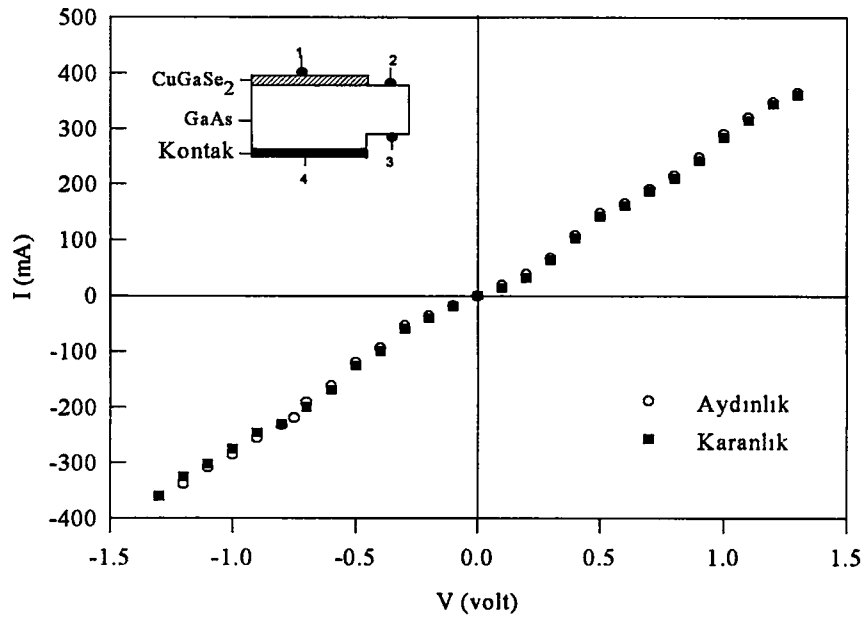
Şekil 29.  $\text{CuGaSe}_2$ - $\text{GaAs}$  güneş pilinin 1-2 kontaktarı arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi.



Şekil 30.  $\text{CuGaSe}_2$ - $\text{GaAs}$  güneş pilinin aydınlıkta ( $P=100 \text{ mW/cm}^2$ ) 1-2 kontaktarı arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi.



Şekil 31. CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pilinin 2-4 kontaktları arasındaki akım-gerilim karakteristik eğrisi.



Şekil 32. CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pilinin 3-4 kontaktları arasındaki akım yoğunluğu-gerilim karakteristik eğrisi.

yoğunluğundan daha büyüktür. 1-4 kontakları arasındaki J-V karakteristik ölçülerine, CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs heteroeklemi ve GaAs altlıkta seri bir şekilde yerleşen gizli p-n eklemi etkisini göstermektedir.

Yukarda sözü edilen güneş pillerinin J-V karakteristikleri ölçümlerinden şu sonuç çıkarılmaktadır. Pilin yapılması esnasında, pCuGaSe<sub>2</sub>-pGaAs heteroeklemi ve GaAs altlıkta seri p-n eklemi oluşmaktadır.

### 3.4 GaAs Altlıkta Bakır Atomlarının ve Deliklerin Konsantrasyonunun Difüzyon Dağılımı

Daha önce açıklandığı gibi Cu atomları, CuGaSe<sub>2</sub> filmin GaAs altlığın yüzeyine buharlaştırılması ve tavlama esnasında n-tipli GaAs altlık içine difüz ederler. Bakır, GaAs yarıiletken için akseptör katkı olmasından dolayı, difüzyon bölgesinin elektriksel özelliklerini değiştirebilir ve p-n eklemi oluşturabilir.

Bakır atomlarının GaAs altlıkta konsantrasyon dağılımı X-ışınları floresans yöntemiyle incelendi. CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs heteroeklemi hazırlandıktan sonra, GaAs altlığın üzerinden CuGaSe<sub>2</sub> polikristali çıkarıldı ve GaAs altlığın kalınlığı boyunca bakır atomlarının dağılımı XRF yöntemiyle ölçüldü. Şekil 33'de GaAs altlıkta bakır atomlarının konsantrasyonunun difüzyon dağılımı gösterilmektedir. CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs heteroekleminin üretilmesi ve tavlama (T=500°C, t=5 dakika) esnasında bakır atomları GaAs altlık içine yaklaşık olarak d ≈150 µm'ye kadar difüz edebilir. Şekil 33'de görüldüğü gibi bakır atomlarının dağılımı erfc-fonksiyonu ile uyum içindedir. Bakır atomlarının konsantrasyonu teorik olarak aşağıdaki eşitlik kullanılarak elde edildi:

$$N = N_0 \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (38)$$

Şekil 33'de görüldüğü gibi, deneysel olarak bulunan konsantrasyon eğrisi, teorik erfc-fonksiyonu (D=6x10<sup>-8</sup> cm<sup>2</sup>/sn) ile elde edilen eğriyle uyum içindedir.

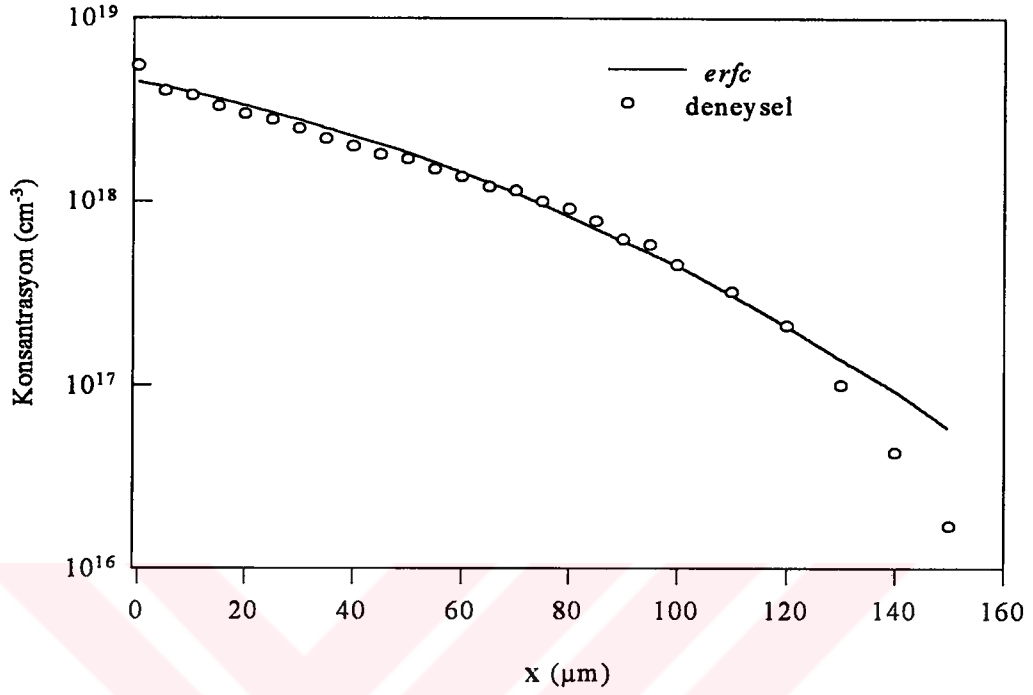
Bakır atomları GaAs altlığın yasak enerji bölgesinde birkaç enerji durumu oluşturur (ΔE<sub>a</sub>=E<sub>v</sub>+0,14eV, E<sub>v</sub>+0,20eV, E<sub>v</sub>+0,30eV, E<sub>v</sub>+0,35eV ve E<sub>v</sub>+0,40). Bakır atomları ile oluşan GaAs altlıktaki deliklerin konsantrasyonu aşağıdaki formül ile ifade edilir:

$$p = \sqrt{N_A N_V} \exp(-\Delta E_a/2kT) \quad (39)$$

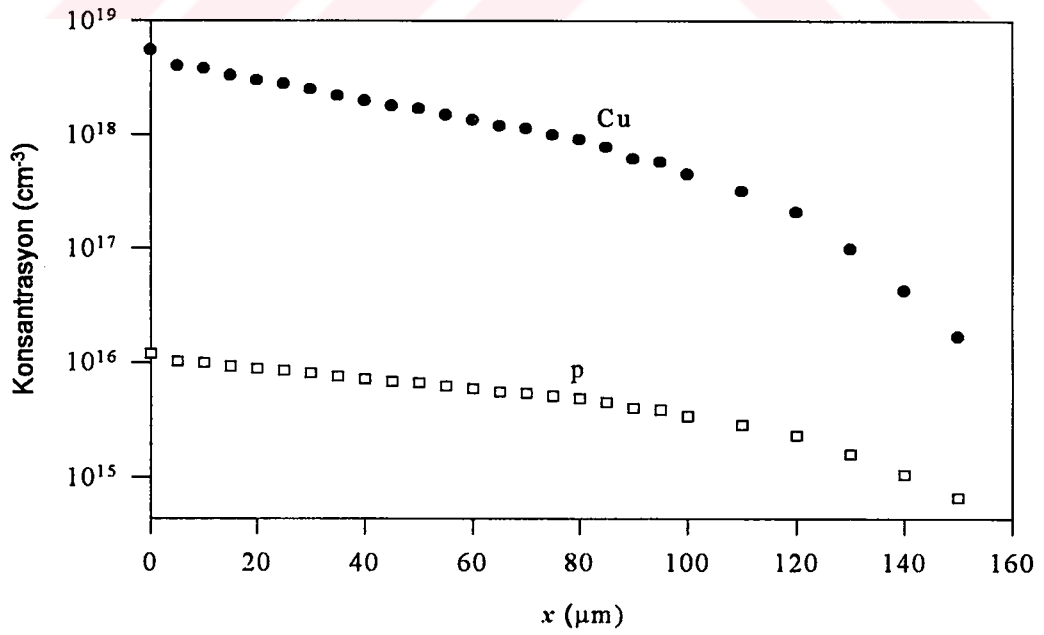
Burada  $N_A$  akseptör (bakır) iyonlarının konsantrasyonu,  $N_V$  GaAs altlığın valans bandı durum yoğunluğu ve  $\Delta E_a$  bakır atomunun iyonlaşma aktivasyon enerjisidir.

Şekil 34'de GaAs altlıktaki bakır iyonlarının ve deliklerin (iyonlaşma enerjisi  $\Delta E_a=0,30$  eV için) konsantrasyon dağılımı verilmektedir. Şekil 34'den görüldüğü gibi GaAs altlıkta  $x \approx 1-2$   $\mu\text{m}$  kalınlığında bir p-n eklemi oluşmaktadır. Bu sonuç, termoelektromotor kuvvet ölçümleriyle doğrulandı. Buna göre GaAs altlığın yüzeyinde, ince filmli p-tipi bölge oluşur. Sonuç olarak, pCuGaSe<sub>2</sub>-pGaAs heteroeklemi ve altlıkta p-n eklemi oluşmaktadır.





Şekil 33. GaAs altlıkta Cu konsantrasyonun difüzyon dağılımı (- teorik erfc fonksiyonudur).



Şekil 34. GaAs altlıkta bakırın (Cu) ve deliklerin (p) konsantrasyon dağılımları (deliklerin konsantrasyon dağılımları bakır iyonlarının aktivasyon enerjisi  $\Delta E_a=0,30$  eV için hesaplandı).

#### 4. TARTIŞMA

Şekil 34’de görüldüğü gibi bakır atomları CuGaSe<sub>2</sub> filminden n-tipli GaAs altlığı (yaklaşık d ≈150 µm kalınlığa) difüzyon ederler. GaAs altlığın (p≥10<sup>16</sup>cm<sup>3</sup>) yaklaşık olarak x ≈1-2 µm kalınlığında p-n eklemi oluşur. Bundan dolayı GaAs altlık içinde seri halde pCuGaSe<sub>2</sub>-pGaAs-nGaAs hetero-homo eklemleri oluşur. Bu güneş pilinin en yüksek fotoelektriksel parametreleri, 1-4 kontakları arasında ölçüldü (Tablo 1). Bunun nedeni, 4 no’lu kontağın, GaAs altlığı CuGaSe<sub>2</sub> buharlaştırılmadan önce yapılması, buharlaştırılma esnasında tavlama ve 4 no’lu kontağın alanının 2 ve 3 no’lu kontağın alanından daha büyük olmasıdır. Bu nedenle 4 no’lu kontağın tavlama sonucu davranışı, omik kontak davranışına daha yakın olmaktadır. 1-4 ve 1-3 kontakları arasındaki fotoelektriksel parametrelerin birbirlerine yaklaşık eşit olması, bakır atomlarının GaAs altlığın alt yüzeyinde pilin fotoelektriksel özelliklerine etkisinin çok küçük olmasından dolayıdır.

pCuGaSe<sub>2</sub>-pGaAs-nGaAs güneş pilinin band diyagramını göstermek için CuGaSe<sub>2</sub> ve GaAs yarıiletkenlerinin Tablo 2’deki parametreleri kullanıldı [20].

Tablo 2. pCuGaSe<sub>2</sub> ve nGaAs parametreleri

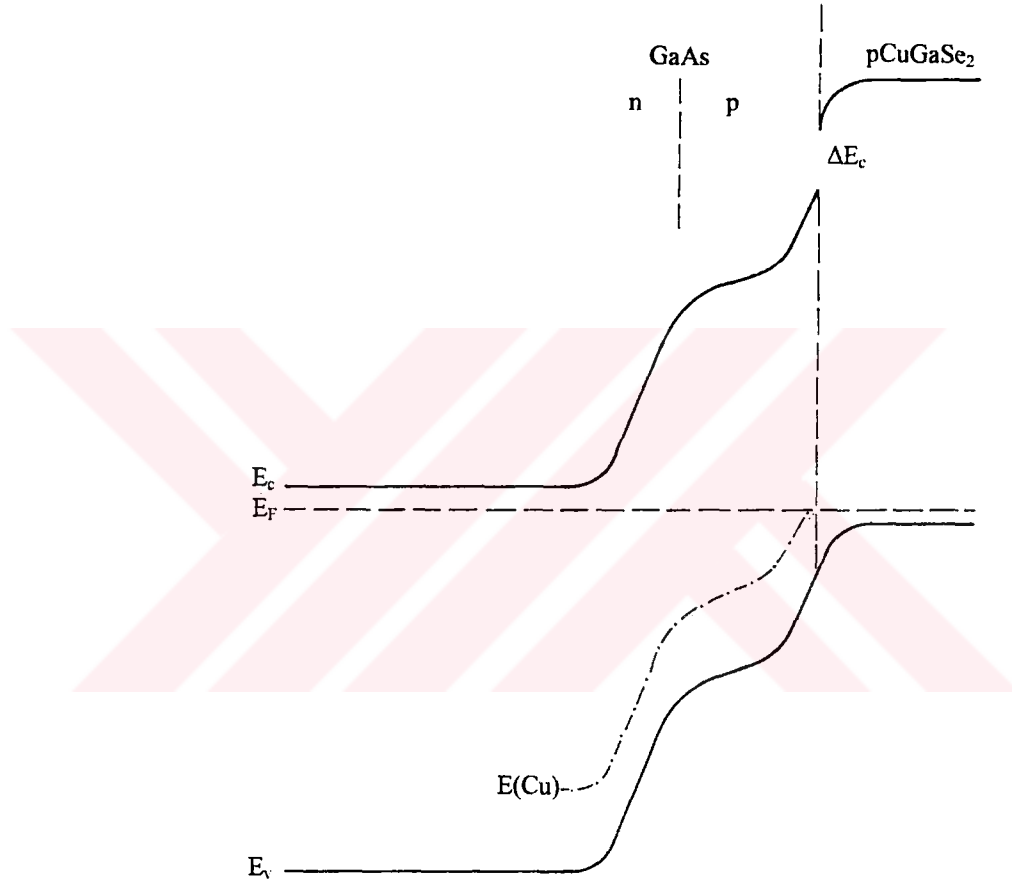
Yarıiletken	E <sub>g</sub> (eV)	χ (eV)	n,p (cm <sup>-3</sup> )
CuGaSe <sub>2</sub>	1,68	3,8	1x10 <sup>18</sup>
GaAs	1,43	4,07	1x10 <sup>16</sup>

Burada E<sub>g</sub> yarıiletkenin yasak band aralığı, χ elektron çekiçliliği, n ve p elektronların ve deliklerin konsantrasyonudur. pCuGaSe<sub>2</sub>-pGaAs-nGaAs güneş pilinin enerji band diyagramı yapılırken, heteroeklemin ideal olduğu, yani, CuGaSe<sub>2</sub> ve GaAs sınırında yüzey durum yük yoğunluğunun olmadığı tahmin edildi.

pCuGaSe<sub>2</sub>-pGaAs-nGaAs güneş pilinin enerji band diyagramı Şekil 35’de verilmektedir. Burada E<sub>c</sub> iletim bandın enerjisi, E<sub>v</sub> valans bandın enerjisi, E<sub>F</sub> Fermi enerjisi



düzeyi ve  $E(\text{Cu})$  bakırın akseptör enerjisidir. Şekildeki band diyagramından da görüldüğü gibi  $\text{pCuGaSe}_2$ - $\text{pGaAs}$  heteroeklemin ve  $\text{pGaAs}$ - $\text{nGaAs}$  eklemin elektrik alanları aynı doğrultudadır. Elektrik alanlarının aynı doğrultuya yönelmesi, fotoelektriksel parametreleri (kısa devre akım yoğunluğu  $J_{\text{sc}}$  ve açık devre gerilimi  $V_{\text{oc}}$ ) yükseltir (Tablo 1). Fotoakım,  $\text{GaAs}$  altlıkta  $\text{CuGaSe}_2$  ince filmine doğru yönelmiştir.



Şekil 35.  $\text{pCuGaSe}_2$ - $\text{pGaAs}$ - $\text{nGaAs}$  güneş pilinin enerji-band diyagramı.

## 5. SONUÇLAR

CuGaSe<sub>2</sub> ince filmini GaAs altlığın yüzeyine buharlaştırma yöntemiyle “ideal” heteroekleme yakın CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pilleri (uygunsuzluk parametresi %0,61) hazırlandı. X-ışınları kırınım yöntemiyle CuGaSe<sub>2</sub> ve GaAs yarıiletkenlerin kristal yapısı incelendi. Kalkopirit yapılı CuGaSe<sub>2</sub> polikristalin örgü parametreleri a=5,61 Å ve c=11,26 Å olarak bulundu. Tek kristal yapılı GaAs altlık için örgü parametresi a=5,65 Å ve sınır heteroeklem bölgesinde GaAs altlığın (111) düzlemi yüzeyinde dislokasyon yoğunluğu  $N_D=3 \times 10^2 \text{ cm}^{-2}$  ve kristalleşme merkezi yoğunluğu  $N_K=1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$  olarak bulundu. CuGaSe<sub>2</sub> ince filmlerin sıkı polikristal yapılı ve tane boyutlarının 2-8 µm civarında olduğu SEM analizleri ile görüldü.

CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs heteroekleminin elektriksel ve fotoelektriksel parametreleri ölçüldü. Doğrultma katsayısı  $\kappa \approx 10^6$  ve ideallik faktörü  $\beta=2$  olarak bulundu.

CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pilleri yüksek fotoelektriksel parametrelere sahip olup; kısa devre akım yoğunluğu  $J_{sc}=28 \text{ mA/cm}^2$ , açık devre gerilimi  $V_{oc}=0,52 \text{ Volt}$  ve verim  $\eta=0,6,1$  olarak ölçüldü.

Bakır atomlarının konsantrasyonunun GaAs altlıkta difüzyon dağılımı, X-ışınları floresans yöntemiyle incelendi ve bakırın GaAs altlıkta difüzyon katsayısı  $T=500^\circ\text{C}$  için  $D=6 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sn}$  olarak bulundu. CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs güneş pilinin üretilmesi esnasında akseptör bakır atomları, GaAs altlığa difüz eder ve CuGaSe<sub>2</sub>-GaAs heteroekleminden başka GaAs altlıkta seri bir pGaAs-nGaAs homoeklemi oluşturur.

pCuGaSe<sub>2</sub>-pGaAs-nGaAs güneş pillerinin enerji band diyagramları yapıldı.

## 6. ÖNERİLER

Güneş pilleri, günümüzde uydu ve uzay araçlarının uzun süreli güç (akaryakıt) ihtiyaçlarını karşılamada önemli yer tutar. Güneş ışınımı, güneş pilleri vasıtasıyla ve fotovoltaik yolla elektriksel enerjiye dönüştürülür. Güneş pilleriyle ilgili çalışmalarda esas amaç, verimini yükseltmek ve üretim maliyetini düşürmeye çalışmaktır.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, öncelikle üretim teknikleri üzerinde durulabilir. Örneğin; Buharlaştırma ve Püskürtme gibi. Pilin fotoelektriksel parametreleri, farklı üretim teknikleri kullanılarak iyileştirilebilir. Güneş pilleri hakkında daha genel bilgiler elde etmek için, bu çalışmaya ek olarak spektral fotoduyarlılık ölçümleri ve kapasite-gerilim (C-V) karakteristik ölçümleri yapılabilir.

Güneş pili elde edebilmenin bir başka yolu, GaAs altlık üzerine  $\text{CuGaSe}_2$  buharlaştırmanın yanında camın üzerine  $\text{CuGaSe}_2$ 'yi buharlaştırmaktır. Böylece, cam, GaAs altlıktan daha ucuza elde edilebildiği için güneş pilinin maliyeti düşürülebilir.

## 7. KAYNAKLAR

1. Chapin, D.M., Fuller., C.S. ve Pearson, G.L., A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power, J.Appl.Phys, 25, (1954) 676.
2. Raynolds, D.C., Leies, G., Antes, L.L. ve Marburger, R.E., Photovoltaic Effect in Cadmium, Phys.Rew, 96, (1954) 533.
3. Hovel, H.J., Solar cells, in Willardson, R.K. ve Beer, A.C., Eds., Semiconductors and Semimetal, Vol. 11, Academic, New York, 1975, Photovoltaic Materials and Devices for Terrestrial Applications, IEEE Tech. Dig. Int. Electron Device Meet, 1979, p.3.
4. Backus, C.E.,Ed., Solar Cells, IEEE Press, New York, 1976.
5. Pulfrey, D.L., Photovoltaic Power Generation, Van Nostrand Reinhold., New York, 1978.
6. Johnston, W.D. Jr., Solar Voltaic Cells, Dekker New York, 1980.
7. Bachmann, K.J., Material Aspects of Solar Cells in E. Kaldis, Ed., Current Topics in Material Science, Vol.3, North-Holland, Amsterdam, 1979.
8. Thekaekara, M.P., Data on Incident Solar Energy, Suppl. Proc. 20th Annu. Meet. Inst. Environ. Sci, 1974, p.21.
9. Sze, S.M., Physics of Semiconductor Devices, New York, 1969.
10. Prince, M.P., Silicon Solar Energy Converters, J. Appl.Phys, 26, (1955) 534.
11. Principal Conclusions of the American Physical Society Study Group on Solar Photovoltaic Energy Conversion, American Physical Society, New York, 1979.
12. Feucht, D.L., Heterojunction in Photovoltaic Devices, J. Vac. Sci. Technol, 14, (1977) 57.
13. Kazmerski, L.L., Ireland, P.J., White, F.R. ve Cooper, R.B., The Performance of Copper-Ternary Based Thin Film Solar Cells, Conf. Rec. 13th IEEE J.Photovoltaic Spec. Conf, IEEE, New York, 1978, p.185.
14. Wagner, S. ve Bridenbaugh, P.M., Multicomponent Tetrahedral Compounds for Solar Cells, J.Cryst. Growth, 39, (1977) 151.

15. Abdullaev, G.B. ve Dzhafarov, T.D., Atomic Diffusion in Semiconductor Structures, Harwood, New York, 1987.
16. Dzhafarov, T.D., Radiation-Stimulated Diffusion in Semiconductor, Moscow, Emergoatomizad, 1992.
17. Shewmon, Paul.G., Diffusion in Solids, New York, 1963.
18. Dzhafarov, T.D., Phys.Stat. Sol. (a) 42, (1977) 11.
19. Çevik, Uğur., Doğu Karadeniz Tip Tortularının x-ışını floresans yöntemi ile incelenmesi, K.T.Ü. Fen Bilimler Enstitüsü, Trabzon, 1994
20. Dzhafarov, T.D., Sadıgov, M.S. ve Gafarov, S.F., Preprint of Institute of Physics, Baku, N 320, (1989) 15.



## **8.ÖZGEÇMİŞ**

Kahramanmaraş'ın Elbistan ilçesine bağlı Kullar köyünde 1971 yılında doğdu. İlkokulu kendi köyünde, Ortaokul ve Liseyi Muş'ta Devlet Parasız Yatılı Okulunda okudu. Lisans öğrenimini Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde tamamladı. Halen aynı Bölümde Yüksek Lisans öğrenimine devam etmekte olup İngilizce bilmektedir.

