

95056

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

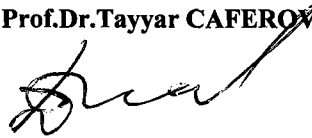
**CuInSe₂-GaAs EKLEMLERİN ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİ**

Banu SÜNGÜ

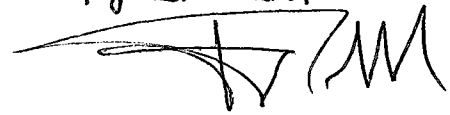
**F.B.E.Fizik Anabilim Dalında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof.Dr.Tayyar CAFEROV



Prof. Dr. Durul ŞEN



İSTANBUL, 2000



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ŞEKİL LİSTESİ	iv
ÇİZELGE LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1 Giriş	1
1.2 Güneş Işınları	2
1.3 GaAs ve CIS Yarıiletkenlerin Özellikleri	3
1.3.1 GaAs kristal yapısı ve özellikleri	3
1.3.2 CIS kristal yapısı ve özellikleri.....	5
1.4 Cu(InGa)Se ₂ -GaAs Heteroeklemler	7
1.5 Na'un CIS ve CIGS Güneş Pillerinin Özelliklerine Etkisi	10
1.6 p-n Eklemler	13
1.7 Heteroeklemler	17
1.8 Eklemlerin Elektrik Özellikleri	20
1.9 Eklemlerin Fotovoltaik Karakteristikleri	21
1.10 Eklemlerin Kapasitans Özellikleri	25
1.11 Heteroeklemlerde Difüzyon Olayları	26
1.11.1 Yarıiletkenlerde difüzyon	26
1.11.2 Difüzyon mekanizmaları	27
1.11.3 Difüzyon kuralları	28
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	31
2.1 CIS-GaAs Heteroeklemlerin Hazırlanması	31
2.2 CIS Filmlerinin Difüzyon Yöntemiyle Katkılanması	32
2.3 Tavlama Deneylerinin Yapılması	33
2.4 CIS-GaAs Yapıların X-Işınları Kırınım Analizi	33
2.5 Bakır Difüzyonunun GaAs Altlıkta İncelenmesi	34
2.6 Omik Kontakların Yapılması	34
2.7 GaAs ve CIS İletkenlik Tipinin İncelenmesi	36
2.8 Öz direnç ve Yük Taşıyıcıların Konsantrasyon Ölçümleri	37
2.9 Optik Geçirgenlik Ölçümleri	41
2.10 Akım-Gerilim Karakteristiklerinin Ölçümleri	44
2.11 Pillerin Fotovoltaik Parametrelerinin İncelenmesi	44
2.12 Kapasitans-Gerilim Karakteristiklerinin Karakteristikleri	45
2.13 Pillerin Fotoduyarlılığının Spektral Dağılım Ölçümleri	45

3.	BULGULAR	46
3.1	GaAs ve CIS Yarıiletkenlerin Elektrik Parametreleri	46
3.2	GaAs Altlıklarının Optik Soğurma Spektrumları	46
3.3	CIS-GaAs Heteroeklemlerin X-ışınları Kırınım Desenlerinin İncelenmesi.....	48
3.4	CIS-GaAs Eklemlerin Akım-Gerilim ve Kapasitans-Gerilim Karakteristikleri.....	49
3.5	CIS-GaAs Heteroeklemlerin Fotoduyarlılık Spektrumları	52
3.6	Bakırın CIS Filminden GaAs Altlığı Difüzyonu.....	52
3.7	CIS Film Kalınlığının CIS-GaAs Pillerinin Elektrik ve Fotovoltaik Özelliklerine Etkisi.....	55
3.8	Termal Tavlamanın CIS-GaAs Heteroeklemlerin Karakteristiklerine Etkisi.....	57
3.9	Na Difüzyonunun CIS İnce Filmlerinin ve CIS-GaAs Heteroeklemlerin Elektrik ve Fotovoltaik Özelliklerine Etkisi.....	60
4.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	64
	KAYNAKLAR	67
	ÖZGEÇMİŞ	70

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1	Atmosferin üzerinde Güneş enerjisi spektrumu3
Şekil 1.2	GaAs kristal yapısı3
Şekil 1.3	GaAs kristal düzlemleri (a) {100}, (b) {110}, (c) {111}4
Şekil 1.4	CIS kalkopirit yapısı6
Şekil 1.5	CuInSe ₂ , CuGaSe ₂ ve GaAs optik soğurma spektrumları7
Şekil 1.6	(001) çinkobilende altlık üzerine CuInSe ₂ kristalinin beş farklı büyütülme durumu8
Şekil 1.7	Özden Ge kristal yapısı13
Şekil 1.8	n-tipi Ge kristal yapısı14
Şekil 1.9	n-tipi yarıiletkenin enerji band diyagramı14
Şekil 1.10	p-tipi Ge kristali15
Şekil 1.11	p-tipi yarıiletkenin enerji band diyagramı15
Şekil 1.12	n-ve p-tipi yarıiletkenin temas durumu16
Şekil 1.13	p-n eklem enerji band diyagramı17
Şekil 1.14	a) n- ve p-tipi yarıiletkenlerin ve b) heteroeklemin enerji band diyagramları18
Şekil 1.15	Farklı örgü sabitlerine sahip yapılar arasındaki dislokasyonlar19
Şekil 1.16	Diyodun (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta akım-gerilim karakteristiği21
Şekil 1.17	p-n ekleme fotonlarla uyarılmış elektron-delik çiftlerinin oluşması21
Şekil 1.18	Fotovoltaik pilin eşdeğer devresi22
Şekil 1.19	Tipik bir güneş pilinin a) üstten ve b) yandan şematik gösterimi24
Şekil 2.20	Çinkonun GaAs'da dissosiyatif mekanizması28
Şekil 2.1	Elektron-demeti buharlaştırma setinin şematik gösterimi32
Şekil 2.2	Difraktometrenin diyagramı33
Şekil 2.3	Yaklaşık omik kontakların akım-gerilim karakteristiği35
Şekil 2.4	CIS-GaAs heteroeklemin gösterimi36
Şekil 2.5	TEMK yöntemiyle a) n-tipi, b) p-tipi yarıiletkenin iletkenlik tipi ölçüm devresi37
Şekil 2.6	Örneklerde kontakların yerleşimi38
Şekil 2.7	Van der Pauw ölçüm devresi a) R ₁ b) R ₂ dirençlerinin bulunması38
Şekil 2.8	Van der Pauw yöntemi için düzeltme fonksiyonunun R ₁ / R ₂ 'ye göre değişimi39
Şekil 2.9	Van der Pauw yöntemiyle Hall ölçümü39
Şekil 2.10	Paralel yüzeyli filmin içinde ışınların yansımasının gösterimi42
Şekil 2.11	Cam altlık üzerine kaplanmış NaCl ince filmin interferans geçirgenlik spektrumu43
Şekil 2.12	Akım-gerilim karakteristiğinin ölçüm devresi44
Şekil 2.13	Fotoduyarlılığın spektral ölçüm devresi45
Şekil 3.1	Temiz GaAs örneğin optik geçirgenlik spektrumu47
Şekil 3.2	Temiz GaAs örneğin optik soğurma spektrumu47
Şekil 3.3	CIS-GaAs pillerinin x-ışını kırınım desenleri48
Şekil 3.4	CIS-GaAs heteroekleminin tavlama öncesi akım-gerilim karakteristikleri: (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta49

Şekil 3.5	CIS-GaAs heteroekleminin (film kalınlığı 1 μm) fotoakım yoğunluğu-gerilim eğrisi.....	50
Şekil 3. 6	CIS-GaAs heteroeklemin (film kalınlığı 0,5 μm) fotoakım yoğunluğu gerilim değişimi.....	50
Şekil 3.7	CIS-GaAs heteroeklemin kapasitans-gerilim karakteristiği ($f=3\text{MHz}$).....	51
Şekil 3.8	CIS-GaAs heteroeklemin fotoduyarlılık spektral dağılımı.....	52
Şekil 3.9	Bakırın GaAs altlıkta konsantrasyon dağılımı ($T=520^\circ\text{C}$).....	53
Şekil 3.10	GaAs'daki delik konsantrasyonunun kalınlıkla değişimi.....	54
Şekil 3.11	CIS-GaAs heteroeklemin fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri: (1) film çıkarmadan önce, (2) 1.çıkarma, (3) 2.çıkarma,(4) 3.çıkarma, (5) 4.çıkarma (film yok).....	55
Şekil 3.12	CIS-GaAs heteroekleminin fotoduyarlılığının spektral dağılımları: (a) film çıkarmadan önce, (b) CIS filminden 0,5 μm 'lik (b) tabaka çıkarmadan sonra.....	56
Şekil 3.13	Şekil 3.13 CIS-GaAs heteroekleminin karanlıkta akım-gerilim karakteristiğinin 220°C 'da tavlama işlemleriyle değişimi (0) tavlamadan önce, (1) 1.tavlama, (2) 2.tavlama, (3) 3.tavlama, (4) 4.tavalama	57
Şekil 3.14	CIS-GaAs eklemlerin seri direncinin (220°C 'da) tavlama süresiyle değişimi.....	58
Şekil 3. 15	CIS-GaAs heteroekleminin (220°C 'da) tavlama süresiyle açık devre gerilim değişimi.....	58
Şekil 3. 16	CIS-GaAs heteroekleminin (220°C 'da) tavlama süresiyle kısa devre akımı değişimi.....	59
Şekil 3. 17	CIS-GaAs heteroekleminin (220°C 'da) tavlama süresiyle engel kalınlığının başlangıç değerine oranının zamanla değişimi.....	59
Şekil 3. 18	Kontrol eklemin akım-gerilim karakteristiği: (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta.....	60
Şekil 3. 19	Na katkılanmış eklemin akım-gerilim karakteristiği: (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta.....	61
Şekil 3.20	CIS-GaAs pillerinin fotoakım yoğunluğu-gerilim değişimi: (1) kontrol eklem, (2) Na katkılanmış eklem.....	61
Şekil 3. 21	CIS-GaAs eklemlerin fotoduyarlılık spektrumları: (1) kontrol eklem, (2)Na katkılanmış eklem.....	62
Şekil 4.1	pCIS-pGaAs-nGaAs ideal hetero-homoekleminin enerji band diyagramı.....	66

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1	Güneş ışınlarının dalgaboyuna göre sınıflandırılması2
Çizelge 1.2	Oda sıcaklığında (300 K) GaAs yarıiletkenine ait bazı özellikler4
Çizelge 1.3	CIS yarıiletken kristalinin bazı özellikleri6
Çizelge 3.1	Tavlandıktan ve seri olarak film çıkarıldıktan sonra örneğin elektriksel özellikleri.....56
Çizelge 3.2	Na katkılanmış ve katkılanmamış CIS-GaAs heteroeklemlerin parametreleri.....62
Çizelge 4.1	pCIS, pGaAs ve nGaAs Parametreleri (300 K).....65



ÖNSÖZ

Tezimin konusunu belirleyip sabırla beni çalıştıran, bilgilerinden ve deneyimlerinden her aşamada faydalandığım değerli hocam Sayın Prof.Dr. Tayyar CAFEROV'a, bizlere uygun bir çalışma ortamı sağlayan dekanımız Sayın Prof.Dr. Durul ÖREN'e ve bölüm başkanımız Sayın Prof.Dr. Emel ÇINGİ'ya çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım sırasında bilgileriyle bana yardımcı olan Sayın Doç.Dr. Mehmet SADIGOV'a, tezimin yazımıyla ilgili yardımlarında dolayı Y.Doç.Dr. Merih SERİN'e, Arş.Gör.Dr. Ercüment AKAT'a ve Arş Gör. Zeynep GÜVEN'e, hem deneysel çalışmalarım da hem de tezimin yazımında her zaman yardımcı olan arkadaşlarım Arş.Gör. S.Serkis YEŞİLKAYA'ya ve Arş.Gör. Murat ÇALIŞKAN'a, ayrıca her zaman bana güvenen ve destek olan aileme en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Banu SÜNGÜ

Haziran, 2000

ÖZET

CIS-GaAs eklemler, CIS filmlerin n-tipi GaAs altlıkların yüzeyine tek kaynaktan vakumda buharlaştırma yöntemiyle hazırlandı. X-ışınları kırınım, x-ışınları floresans, elektron ve optik mikroskopi yöntemleriyle CIS filmlerin ve CIS-GaAs eklemlerinin kristal yapısı, kompozisyonu ve yüzey morfolojisi incelendi. Kalkopirit yapıya sahip olan polikristal CIS filmlerinin örgü parametreleri $a=b=5,786 \text{ Å}$; $c=11,572 \text{ Å}$ ve (111) GaAs için $a=5,66 \text{ Å}$ olarak bulundu. CIS filmlerin (111) GaAs altlıkların yüzeyinde (112) yönünde büyüdüğü gözlemlendi.

CIS-GaAs pillerin akım-gerilim karakteristikleri, fotoduyarlılık spektrumları ve kapasitans-gerilim karakteristikleri incelendi. Pillerin ışığa duyarlılığı $\lambda=0,35\text{-}1,0 \text{ µm}$ aralığında ve fotovoltaiik parametreleri, açık devre gerilimi $V_{oc}=467 \text{ mV}$ ve kısa devre akım yoğunluğu $J_{sc}=8,9 \text{ mA/cm}^2$ olarak bulundu.

X-ışınları floresans yöntemiyle, bakır atomlarının CIS filminden GaAs altlığı difüzyonu incelendi ve bakırın GaAs altlıktaki difüzyon katsayısı $D= 1.2 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ (520°C için) gözlemlendi. Termal elektro-motor kuvveti yöntemiyle GaAs altlıkta yaklaşık $x=8 \text{ µm}$ derinlikte p-n homoeklemin varlığı tespit edildi. Başka bir yoldan, GaAs'da akseptör tipli bakır atomlarıyla oluşan delik konsantrasyon dağılımı hesaplandı ve benzer şekilde p-n homoeklemin yaklaşık $x=8 \text{ µm}$ derinlikte varlığı tespit edildi.

Na difüzyonunun CIS filmlerinin elektrik özelliklerine ve CIS-GaAs pillerin fotovoltaiik parametrelerine etkisi araştırıldı. Na atomlarının difüzyonu sonucunda CIS filmlerde delik konsantrasyonu yaklaşık 100 kat arttı, CIS-GaAs pillerinin fotovoltaiik parametrelerinde önemli ölçüde ($V_{oc}= 370 \text{ mV}$ 'dan 470 mV 'a, $J_{sc}=0,8 \text{ mA/cm}^2$ 'den $5,5 \text{ mA/cm}^2$ 'ye kadar) artış görüldü.

İdeal pCIS-pGaAs-nGaAs hetero-homoeklemin enerji band diyagramı çizildi ve bu çalışmada elde edilen bazı sonuçlar enerji band diyagramı ile yorumlandı.

ABSTRACT

CIS-GaAs heterojunctions were prepared by evaporation in vacuum CIS films onto the n-type GaAs substrate from a single source. The crystal structure, composition and surface morphology on CIS-GaAs heterojunctions and CIS films were examined by x-ray diffraction, x-ray fluorescence, electron and optic microscopy methods. The lattice parameters of polycrystal CIS films having a chalcopyrite structure are found to be $a=b=5.786 \text{ \AA}$; $c=11.572 \text{ \AA}$ and that of (111) GaAs as $a=5.66 \text{ \AA}$. It was observed that CIS films were grown on the (111) GaAs substrate in the direction (112).

The current-voltage characteristics, photosensitivity spectra and capacitance-voltage characteristics of CIS-GaAs cells were investigated. The photosensitivity of the cells were found to be in the range $\lambda=0.35\text{-}1.0 \text{ }\mu\text{m}$ and the photovoltaic parameters, namely, the open circuit voltage V_{oc} and the short circuit photocurrent density J_{sc} were calculated respectively as $V_{oc}=467 \text{ mV}$ and $J_{sc}=8.9 \text{ mA/cm}^2$.

The diffusion of copper atoms from CIS film into GaAs substrate was examined by x-ray fluorescence method and the diffusion coefficient of copper was observed to be $D=1.2 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ (at 520°C). That it was shown by both the thermal electro-motive force method and as a result of the calculation of the distribution of concentration of holes arising from acceptor-type copper atoms in GaAs, that the p-n homojunction formed at a depth of around $x=8 \text{ }\mu\text{m}$.

The effects of Na diffusion on the electrical characteristics of CIS films and the photovoltaic parameters of CIS-GaAs cells were investigated. As a result of the diffusion of Na atoms into CIS films, a 100-fold increase in the hole concentration and an improvement in the photovoltaic parameters ($V_{oc}=370\text{-}470 \text{ mV}$, $J_{sc}=0.8 \text{ mA/cm}^2\text{-}5.5 \text{ mA/cm}^2$) were observed.

The ideal pCIS-pGaAs-nGaAs hetero-homojunction energy band diagram was drawn and some conclusions were interpreted on this diagram.

1. GENEL BİLGİLER

1.1 Giriş

CuInSe₂ (CIS) ve CuGaSe₂ (CGS) direkt band geçişli yarıiletkenlerdir (yasak band genişlikleri sırasıyla $E_g \cong 1$ eV ve 1,7 eV) ve yüksek soğurma katsayısına sahiptirler (yaklaşık 10^5 cm⁻¹). Bu enerji aralığı güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren yüksek verimli pil için optimum değere yakındır. Halen CIS-CdS ve CGS-CdS heteroeklemleri yapılmakta ve bunların fotoelektrik özellikleri geniş ölçüde incelenmektedir. Bu güneş pillerinin güneş enerjisini elektrik enerjisine çevirme verimi yaklaşık %10'dur, fakat eklemlerin elde edilmesi oldukça zordur. Bu tür heteroeklemlerin hazırlanması çok aşamalıdır ve CIS ve CGS filmlerin elde edilmesi için üç elementin beraber buharlaştırılması, bu nedenle de CIS film içeren başka heteroeklemlerin yapılması ve incelenmesi gerekir. Bunların içinde CIS-GaAs heteroeklemler özel ilgi çekmektedir. Bu heteroeklemleri oluşturan CIS ve GaAs örgü parametrelerinin uygunsuzluk derecesi yaklaşık %2 dir, aynı uygunsuzluk parametresine güneş pillerinin üretiminde çok kullanılan Cu(In_{0,4} Ga_{0,6})Se₂-CdS heteroeklemler de sahiptir. Bundan başka CIS ve GaAs kristallerinin termal genleşme katsayıları birbirine çok yakındır (sırasıyla CuInSe₂ için a ekseni- $8,32 \times 10^{-6}$ K⁻¹, c ekseni- $7,89 \times 10^{-6}$ K⁻¹; GaAs için $5,73 \times 10^{-6}$ K⁻¹).

Bu çalışmada CIS-GaAs heteroeklemlerinin hazırlanması ve onların elektrik ve fotoelektrik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

1.2 Güneş Işınları

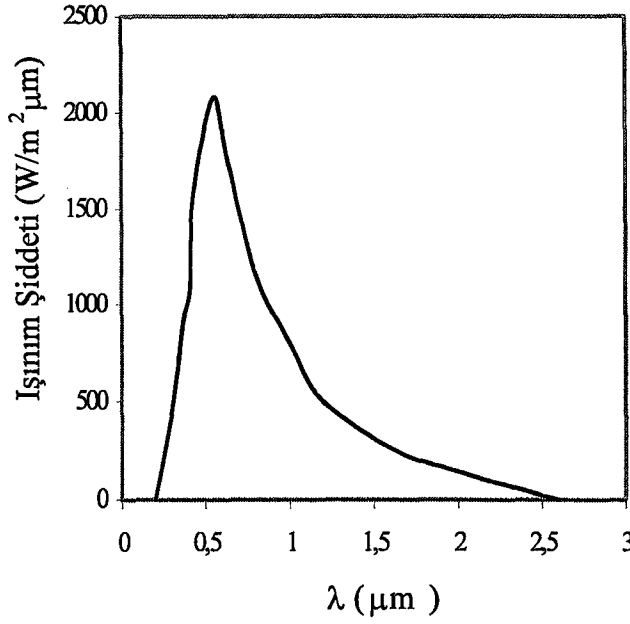
Güneş hidrojen ve helyum gazlarından oluşan orta büyüklükte bir yıldızdır. Sıcaklığı merkeze doğru artar ve merkezde 20 milyon °C'ı bulur. Yüzeyde ise sıcaklık 6.000 °C'dır. Güneşteki bu yüksek sıcaklık nedeniyle elektronlar atomdan ayrılır. Bu nedenle güneşte atom ve molekül değil, serbest elektronlar ve atom çekirdekleri bulunur. Bu karışıma *plazma* denir. Bu sıcaklıkta hafif elementlerin atom çekirdekleri biraraya gelerek daha ağır elementlerin atom çekirdeklerini oluştururlar. Dört hidrojen çekirdeğinin birleşerek bir helyum çekirdeği meydana getirdiği bu birleşme çok yüksek sıcaklıkta olur. Füzyon adı verilen bu olay, yüksek sıcaklıkta ve atom çekirdeği yardımıyla olduğundan *termonükleer reaksiyon* denir (Oral,1979).

Güneşin içi yakıtı hidrojen, ürünü helyum olan çok büyük bir fırın olarak düşünülebilir. Güneşte oluşan helyum miktarı harcanan hidrojen miktarından azdır. Aradaki fark güneşten ışık olarak çıkan (güneş radyasyonu) enerjiyi verir. Bu enerji ise çeşitli dalgalı boyunda ışınlar halinde dünyaya ulaşır.

Güneş termonükleer reaksiyon süreciyle yaklaşık olarak $8,33 \cdot 10^{25}$ kWh'lık enerjiyi sürekli olarak uzaya verir. Uzaya yayılan güneş ışınları yakıcı ve öldürücü olup, dünyanın 22 km yukarısındaki ozon tabakasına gelen enerji miktarı 1353 W/m^2 , dünyaya gelen enerji miktarı 1000 W/m^2 dir. Işınların zararlı olanları ozon tabakası tarafından yutulur. Güneşten çıkıp astronomik uzaklıkları kateden enerjinin dünyaya geliş süresi sekiz dakikadır ve bu enerji elektromanyetik ışıma şeklindedir. Bu ışıma çeşitli dalgalı boyundaki ışıklardan oluşmuştur. Güneş enerjisinin % 99'u $0,38\mu\text{m}$ ile $0,78\mu\text{m}$ arasında dar bir dalgalı boyu aralığındadır. Bu bölgedeki ışınlar görünür ışıklardır. $0,38\mu\text{m}$ 'dan küçük dalgalı boylu ışınlar UV (morötesi) ışınlar; $0,78\mu\text{m}$ dan büyük dalgalı boylu ışınlar kızılaltı ışıklardır (Şekil 1.1, Çizelge 1.1).

Çizelge 1.1 Güneş ışınlarının dalgalı boyuna göre sınıflandırılması

Işınım ismi	Dalga boyu (μm)
Morötesi	0,03-0,38
Görünür bölge	0,38-0,78
Kızılaltı	0,78-200

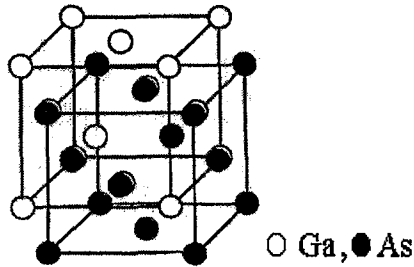


Şekil 1.1 Atmosferin üzerinde güneş enerjisi spektrumu

1.3 GaAs ve CIS Yarıiletkenlerin Özellikleri

1.3.1 GaAs kristal yapısı ve özellikleri

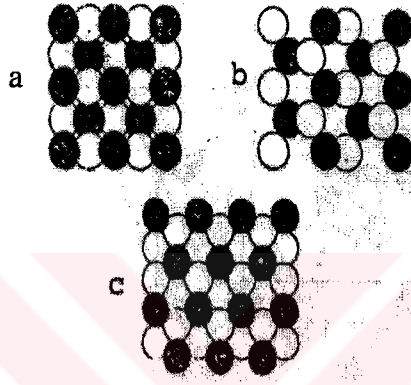
A_3B_5 bileşiği olan GaAs kristali çinko blende yapıya sahiptir. Yapının primitif hücresi A ve B gibi iki farklı atomdan oluşmuştur (Shur,1987). Her atom grubu yüzey merkezli (fcc) yapı oluşturmaktadır. Bu yapılar hacim köşegenlerinin dörtte biri kadar birbirlerinin içine girmişlerdir. Şekil 1.2’de içi boş atomlar Ga, dolu atomlar As atomlarını temsil etmektedir. Çinko blende simetri grubu üç tane iki kat ekseni, sekiz tane üç kat ekseni, dört tane dört kat ekseni ve altı tane simetri düzlemi içerir, ters simetriye sahip değildir.



Şekil 1.2 GaAs kristal yapısı (Shur,1987)

GaAs yapının üç temel kristal düzlemi Şekil 3'te verilmiştir. (100) düzlemindeki her As atomu alt tabakasındaki iki Ga atomuyla bağ yapar, diğer iki bağ boştur. (110) düzlemi aynı sayıda Ga ve As atomu içerir, her atom alt tabakayla bir bağ yapmaktadır. (111) yüzeyindeki atomlar alt tabakadaki Ga atomlarıyla üç bağ yapar, dördüncü bağ boştur.

En yakın komşular arasındaki uzaklık $2.44 \text{ \AA}$ 'dır, bu değer Ga ve As atomlarının atomik yarıçaplarının sırasıyla $1.18 \text{ \AA}$ ve $1.26 \text{ \AA}$ değerlerinin toplamına eşittir. Yapının örgü sabiti ise $5.65 \text{ \AA}$ 'dır.



Şekil 1.3 GaAs kristal düzlemleri (a) {100}, (b) {110}, (c) {111} (Shur,1987)

GaAs'ın direkt band genişliği, güneş ışığının bu malzemeyi geçtikten sonra hemen soğurması anlamına gelir. Bu nedenle malzeme miktarını daha ileri düzeyde azaltma amacıyla sadece birkaç mikron kalınlığındaki katmanlar kullanılır. Çizelge 1.2'de oda sıcaklığında GaAs yarıiletkenine ait özellikler verilmektedir.

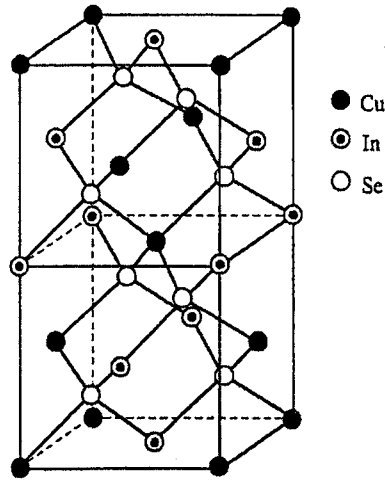
Çizelge 1.2 Oda sıcaklığında (300 K) GaAs yarıiletkenine ait bazı özellikler (Shur, 1987)

Mekanik, Termal ve Dielektrik Özellikler:	Deneyisel Ölçüm Değerleri:
Atom Konsantrasyonu	$4.42 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$
Örgü parametresi	0,565 nm
Elektron afinitesi	4,07 eV
Kristal Yoğunluğu	5.317 g/cm^3
Bulk Modülü (sıkıştırılabilirlik ⁻¹)	$7.55 \times 10^{11} \text{ dyn/cm}^2$
Termal Genleşme Katsayısı	$5.73 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Hacim Genleşme Katsayısı	$1.72 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
Özel Isı Kapasitesi	0.327 J/g K
Etkin Debye Sıcaklığı	360 K

Örgü Termal İletkenliği	0.55 W/cm K
Statik Dielektrik Sabiti	12.85
Kızılaltı Kırılma İndisi	3.299
Direkt Band Genişliği	1.41 eV
Özden Yük Taşıyıcıların Yoğunluğu	$2.25 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$
Özden Elektrik İletkenliği	$3.0 \times 10^{-9} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$
Özden Fermi Enerjisi	0.752 eV
İletkenlik Bandının Parametreleri:	
İletkenlik Bandı Elektron Etkin Kütlesi	$m_{\infty} = 0.0632 m_0$
Durumların Etkin Yoğunluğu	$N_C = 4.21 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
Sürüklenme Mobilitesi (Zayıf katkılı)	$\mu_n = 8000 \text{ cm}^2/\text{V s}$
Hall Mobilitesi (Zayıf katkılı, zayıf alanlı)	$9400 \text{ cm}^2/\text{V s}$
Zayıf Alanda Hall Faktörü	$r_{HO} = (\mu_{HO} / \mu_n) = 1.175$
Valans Bandının Parametreleri:	
Valans Bandı Deliklerin Etkin Kütlesi	$m_h = 0.50 m_0$
Sürüklenme Mobilitesi (Zayıf Katkılı)	$\mu_p = 320 \text{ cm}^2/\text{V s}$
Hall Mobilitesi (Zayıf katkılı, zayıf alanlı)	$400 \text{ cm}^2/\text{V s}$
Zayıf Alanda Hall Faktörü	$r_{HO} = (\mu_{HO} / \mu_p) = 1.25$

1.3.2 CIS kristal yapısı ve özellikleri

I-III-VI₂ bileşiklerinden olan CuInSe₂ (CIS) kristal yapısının birim hücreğini kalkopirit yapı oluşturmaktadır (Özkan,1998). Şekil 1.4'deki kalkopirit yapının örgüsünden görüldüğü gibi her Se atomu bir tetrahedronun merkezinde iki tane bakır ve iki tane indiyum atomu ile çevrilidir. Kalkopirit yapı, cisim köşegeni üzerinden çeyrek uzunluk kadar ötelenmiş iki yüzey merkezli kübik (fcc) örgüden meydana geldiğinden ötürü, elmas ve çinkosülfid yapıya benzemektedir. Birim hücrenin örgü sabitleri, $a=b$ ve $c=2a$ şeklindedir. Çizelge 1.3'de CIS yarıiletkenine ait özellikler verilmektedir.



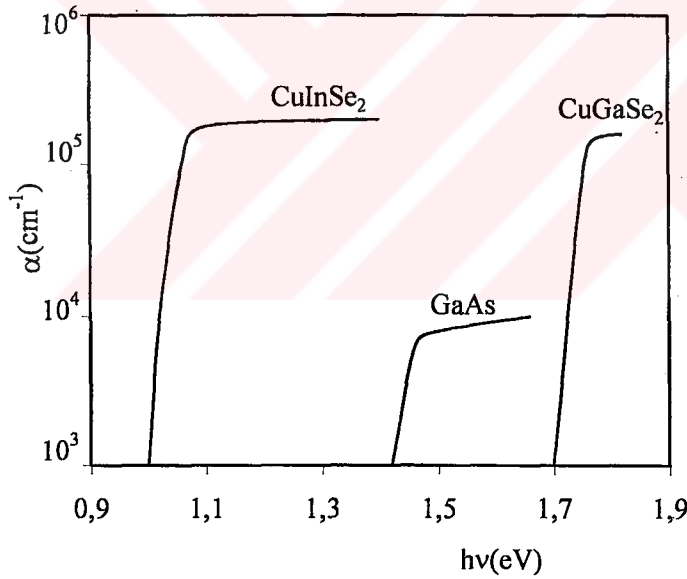
Şekil 1.4 CuInSe₂ (CIS) kalkopirit yapısı (Rocket ve Bikmire, 1991)

Çizelge 1.3 CIS yarıiletken kristalinin bazı özellikleri (Rocket ve Bikmire, 1991)

Moleküler Ağırlık	336.28
Kristal Yoğunluğu	5.77 g /cm ³
Sphalerite Yapıya Geçiş	810 °C
Erime Sıcaklığı	986 °C
Örgü Sabitleri	$a = 0.578$ nm, $a=b$, $c=2a = 1,16$ nm
Elektron afinitesi	4,5eV; 4,3eV
Termal Genleşme Katsayısı (T=273 K)	a ekseni $8.32 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, c ekseni $7.89 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Termal İletkenlik	$0.086 \text{ W cm}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Özgül Isı Kapasitesi	$c_1 = -7.67 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ $c_2 = 4.06 \times 10^{-6} \text{ K}^{-2}$ $c_3 = 4.3 \times 10^{-9} \text{ K}^{-3}$
Debye Sıcaklığı	221.9K
Sıkıştırılabilirlik	$1.4 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$
Dielektrik Sabiti	Yüksek Frekanslı= 13.6 Alçak Frekanslı= 8.1
Özdirenç	Cu'la zengin= $0.001 \text{ } \Omega \text{ cm}$ In'la zengin > 100
Mobilite:	
Elektronlar ($n = 10^{14} - 10^{17} \text{ cm}^{-3}$)	100-1000 (300 K) $\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$
Boşluklar ($p = 8 \times 10^{15} - 6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)	50-180 (300 K) $\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$

Etkin Kütle:	
Elektronlar	0.09 m_0
Boşluklar (ağır)	0.71 m_0
Boşluklar (zayıf)	0.092 m_0
Yasak Band Genişliği (In zenginleşmiş)	1.02 eV
Yasak Bandın Sıcaklıkla Değişim Hızı	$-1,5 \times 10^{-4} \text{ eV K}^{-1}$
Yasak Bandın Basınçla Değişim Hızı	$2.8 \times 10^{-11} \text{ eV Pa}^{-1}$

GaAs ve CIS malzemelerden heteroeklem yapmak elverişlidir. Çünkü bu malzemeler direkt band geçişlidir, örgü parametreleri yakındır (Çizelge 1.2,1.3), uygunsuzluk parametresi $\epsilon \approx 2\%$ 'dir, genleşme katsayıları yakındır (CIS için a ekseni- $8,32 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, c ekseni- $7,89 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; GaAs için $5,73 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) ve optik soğurma katsayıları yüksektir yani fotoduyarlılıkları yüksek malzemelerdir (Şekil 1.5).



Şekil 1.5 CuInSe₂, CuGaSe₂ ve GaAs optik soğurma spektrumları

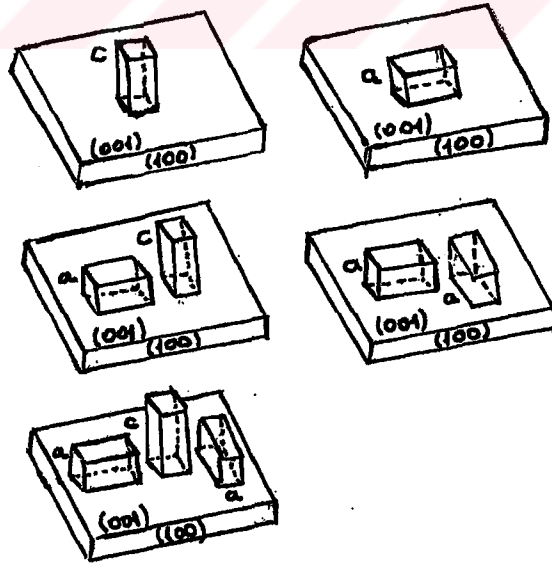
1.4 Cu(InGa)Se₂-GaAs Heteroeklemler

Epitaksiyel CIS ince filmlerin tek kristal GaAs'ın üzerinde büyütülmesi birkaç çalışmada incelenmiştir. Hacimsel p-tipi CuInSe₂ kristalinin yüzeyine SnO₂ film kaplanmış heteroeklem Shirakata vd. (1993) tarafından incelenmiştir. SnO₂ ince filmlerin, altlığın sıcaklığı 400°C'dan fazla olduğunda polikristal, 380°C'dan düşük olduğunda amorf yapıda büyüdüğünü göstermişlerdir. SnO₂-CIS heteroeklemin (SnO₂ amorf yapıda iken) doğrultma ve fotovoltaiik

özellikleri gösterdiğini (açık devre gerilimi $V_{oc}=200$ mV, kısa devre akım yoğunluğu $J_{sc}=0,6$ mA/cm²) görmüşlerdir.

Ohshima (1994) Cu, In ve Se malzemeleri, üç kaynaktan aynı anda (001) GaAs altlığın üzerine vakumda termal yolla buharlaştırarak CIS filmini elde etmiştir. X-ışınları kırınım analiziyle büyütülen filmin epitaksiyel yapısını en az 350°C'a kadar ısıtılmış GaAs altlığın üzerinde göstermişlerdir. Büyütülmüş CIS filmlerin c-ekseninin GaAs altlık yüzeyine dik olduğunu görmüşlerdir. Elde edilen filmlerin fotoluminesans spektrumundaki pik genişliğinin (31 meV) hacimsel CIS kristalinin fotoluminesans pik genişliğine yakın olduğunu göstermişlerdir. Epitaksiyel büyütmeden önce GaAs altlığın yüzeyini selenleştirerek filmlerin kalitesini arttırmışlardır.

Igarashi (1993) halojen taşıyıcı yöntemini kullanarak farklı altlık'lar üzerinde ((001) GaAs, (001) GaP ve (110) GaP epitaksiyel CIS filmlerin büyütülmesini ve filmin ekseninin altlık yüzeyinin eksenine göre durumunu incelemiştir. CIS (001) ekseninin (c-ekseni) GaAs altlığın (001) eksenine, CIS filminin (100) ekseninin (c-ekseni) GaAs altlığın (100) eksenine paralel olduğunu x-ışınları kırınım ölçümleriyle göstermiştir. CIS filmin ve GaAs altlığın eksenlerinin yönelişini, bu yönlerdeki uygunsuzluk parametrelerinin çok düşük olmasıyla açıklamıştır. (Şekil 1.6)



Şekil 1.6 (001) çinkobilende altlık üzerine CuInSe₂ kristalinin beş farklı büyütülme durumu (Igarashi, 1993)

Nikki vd. (1995) moleküler demet epitaksiyel yöntemiyle (MBE- molecular beam epitaxy) üç ayrı kaynaktan (001) GaAs yüzeyine ($T=350-550^{\circ}\text{C}$) CuInSe_2 filmi Cu/In oranına bağlı olarak büyütmüşlerdir. Elde ettikleri filmlerin p-tipi olduğunu ve Cu/In oranının 0,8'den 1,8'e kadar değişmesi durumunda delik konsantrasyonunun 10^{16} cm^{-3} 'den 10^{22} cm^{-3} 'a kadar değiştiğini göstermişlerdir. İndiyum fazla olan filmlerde (Cu/In=0,81; $T=450^{\circ}\text{C}$) geniş fotolimünesans pik, Cu fazla olan filmlerde (Cu/In=1,81) dar fotolimünesans pik görmüşlerdir. Cu/In oranına bağlı lüminesans spektrum değişimini, yazarlar CIS filmlerdeki noktasal kusurlarla yorumlamışlardır.

Shioda vd. (1995) (001) GaAs üzerinde moleküler demet epitaksiyel yöntemiyle elde edilen filmlerden bakırın fazla olduğu durumda Cu_2Se fazının oluştuğunu görmüşlerdir.

Tseng vd. (1995) MBE yöntemiyle elde ettikleri filmlerde 400°C 'da tavlamanın filmin stoikiometrik kompozisyonuna etkisini incelemişlerdir. İndiyumu fazla olan filmlerde 400°C 'da tavlama sonucu film kompozisyonunun değişmediğini, Cu fazla filmlerde ise aynı sıcaklıkta tavlama sonucu ikinci fazın oluştuğunu görmüşlerdir (Cu_5Se_4).

Tavlamanın etkisiyle CIS filmlerin yapısal, elektrik, optik ve ısı iletkenlik özelliklerinin değişimi Magomedov vd. (1997) tarafından incelenmiştir. Ayrıca Au-CuInSe₂ yapıların fotoakım spektral dağılımlarını ölçmüşlerdir.

Schroder vd. (1998) melez püskürtme ve buharlaştırma yöntemiyle GaAs üzerinde büyütülmüş $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ (CIGS) filmlerin mobilite, öz direnç ve yük taşıyıcı konsantrasyonunun sıcaklıkla değişimini farklı Ga/In+Ga ve Cu/In+Ga oranları kullanarak incelemişlerdir. Elde edilen filmlerde delik konsantrasyonunun $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ile $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ arasında değiştiğini, Ga konsantrasyonu arttıkça akseptör konsantrasyonunun da arttığını, oda sıcaklığında mobilitenin $167-311 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ aralığında değiştiğini görmüşlerdir.

Yamaguchi vd. (1998) Cu(InGa)Se_2 ince filmlerin kristalleşmesine tavlamanın etkisini incelemişler ve tavlamaları $200-600^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında Se ortamında yapmışlardır. 400°C 'dan yüksek sıcaklıklarda tavlama ile tek fazlı Cu(InGa)Se_2 kalkopirit yapılı film oluştuğunu, ancak 300°C 'dan düşük sıcaklıklarda tavlamanın iki fazlı CuSe_2 ve Cu_7Se_4 filminin oluşmasına neden olduğunu ayrıca filmlerdeki tanecik boyutunun tavlama sıcaklığı ile arttığını göstermişlerdir.

Fons vd. (1998) x-ışını incelemeleriyle Cu ile zengin olan CIS ince filmlerinde Cu_{2-x}Se fazının varlığını gözlemlemişlerdir. Yaptıkları incelemelerle bu fazın filme mekanik kuvvet uyguladığını ve yüzeyde bozulmalara neden olduğunu bulmuşlardır. Filmin yüzeyinde oluşan bu dalgalanmaları Cu_{2-x}Se katmanının varlığıyla açıklamışlardır.

Böylece yukarıda bahsedilen CIS ile ilgili makalelerde filmlerin GaAs üzerinde büyütülmesi ve elektrik, optik ve yapısal özellikleri incelenmiştir. CIS-GaAs heteroeklemler bilgileri literatürde oldukça azdır. Bu nedenle bu çalışmada CIS-GaAs heteroeklemler incelenmiştir.

1.5 Na'un CIS ve CIGS Güneş Pillerinin Özelliklerine Etkisi

Son yıllarda Na etkisiyle CIS filmlerin veriminin artırılması çalışmalarına literatürde sıkça rastlanmaktadır. Genel olarak Mo kaplı soda-lime camdan filme Na difüzyonu ile filmlerin parametreleri arttırılmaktadır. Heske vd. (1996) Mo kaplı soda-lime cam üzerine hızlı termal buharlaştırmayla Cu, In, Ga ve Se'ni tabakalar halinde kaplayarak CIGS filmleri elde etmişlerdir. Verimi %13'ün üzerinde olan filmlerin x-ışınları ve morötesi fotoelektron spektroskopisi ölçümleriyle Na'un CIGS filmlerin kompozisyonuna ve elektrik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Deneylerden, iki türde Na varolduğunu, bunlardan birinin kaplanan metalik Na olduğunu ve bunun tavlama etkisiyle yüzeye difüz ederek filmin yapısında oluşan SeO_2 bileşiğinin miktarını azalttığını, diğerinin ise oda sıcaklığında zayıf olarak difüz ettiğini ve SeO_2 ile beraber yerleştiğini bulmuşlardır. Ayrıca her iki Na türünün de filmlerin yüzey dipol miktarını azalttığını ve küçük bir band eğimine (-140 meV) neden olduğunu, sonuç olarak Na'un altlıktan ayrılıp, difüz ederek filmlerin elektrik parametrelerini arttırdığını ve daha yüksek verimli güneş pilleri elde edilmesini sağladığını göstermişlerdir.

Nakada vd. (1997) stoikiometrik olmayan CIGS esaslı ince film kaplı güneş pillerinde Na etkisini incelemişlerdir. Mo kaplı SiO_x -sodalime cam üzerine Na_2Se içeren CIGS filmleri aşamalı olarak kaplamışlardır. Na miktarını denetleyerek, geniş alanlı üretimlerde büyük önemi olan ve verimi %10-13,5 arasında değişen, geniş Cu/(In-Ga) oranında (0,51-0,96) arasında değişen ZnO:Al/CdS/CIGS güneş pillerini elde etmişlerdir. Stoikiometrik olmayan bölgelerdeki verimin artışı akseptör yoğunluğunun artması ve iletkenliği p-tipi olan $\text{Cu}(\text{InGa})_3\text{Se}_5$ fazlı filmlerin varlığı ile açıklamışlardır.

Rau vd. (1998) soğurucu madde olan CIGS güneş pillerine Se'nin olduğu kadar Na'da küçük miktarda kontrollü olarak katılmasının verimde artışa yol açtığını açıklamışlardır. Pillerdeki

elektronik kayıp mekanizmalarında bu iki katkının (Na ve Se) etkilerini, sıcaklığa bağlı dc akım-gerilim değişimleri kullanarak araştırmışlardır. Na katılmasının soğurucu maddedeki serbest taşıyıcı yoğunluğunda bir artışa neden olduğunu göstermişlerdir.

Tanaka vd. (1998) CIS filmlerini Radio Frequency püskürtme yöntemiyle (RF Sputtering) elde etmişler ve x-ışını kırınım analiziyle Na/CuInSe₂ oranı %1'in üzerinde olan CuInSe₂ ve Na₂Se karışımıyla elde edilen filmlerin düzenli boşluğa sahip kalkopirit yapıda olduğunu (OVC- ordered vacancy chalcopyrite) ve bunu destekleyecek şekilde CIS filmin örgü parametresinin azaldığını bununla birlikte, malzemenin Na/CuInSe₂ oranının %0'dan %10'a artmasıyla termal band aralığının üstündeki optik soğurma sabitle:inin $3 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ geçtiğini ve optik band genişliğinin 1,02 eV'dan 1,33 eV'a arttığını göstermişlerdir.

Tanaka vd. (1999) CIS ile Na₂Se hedeften RF püskürtme yöntemiyle Indiyum zengin olan filmler (CuIn₃Se₅ ve CuIn₂S_{3.5}) elde ederek, altlık sıcaklığının bu filmlerin özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Hazırlanan bu malzemelerde Na içermeyen filmlerde Cu/In oranı ve enerji aralığı her zaman sabit kaldığını, Na/CuInSe₂ oranı %5 olan filmlerde ise altlık sıcaklığı arttıkça Cu/In oranı azaldığını ve enerji aralığı arttığını gözlemlemişlerdir. Bu sonuçlarla CuIn₃Se₅ filminin büyütülmesine örnek bir model sunmuşlardır.

Braunger vd. (2000) CIGS ince filmlerin büyütülmesine Na'un etkisini incelemişler ve Na etkisini iki gruba ayırmışlardır. Birincisi, örgü kusurlarındaki azalmaya bağlı olarak tanecik boyutlarında artış ve filmlerin güçlü (112) yönlenmeleri; ikincisi ise filmlerin elektrik özelliklerindeki artış (özellikle p-tip iletkenliğin artması). Bunlardan ikincisi üzerinde çalışmışlar, soda-lime altlık camı Na kaynağı olarak, Na içermeyen borosilicate camı da kontrol altlık olarak kullanmışlardır. CIS filmin büyütülmesi sırasında cam altlığın belli bir sıcaklığında Na iyonlarının molibden kontakten geçerek yarıiletken filme difüzyonunu sağlayarak Na etkisini incelemişlerdir. Deneylerden düşük ve yüksek Se basıncında, Se aktivitesinin Na etkisiyle azalıp arttığını; Na'un Na₂Se_x formunda CIGS filmin tanecik sınırlarında yerleştiğini göstermişlerdir. Na ile Se arasındaki yüksek afiniteyi, filmin büyütülmesi sırasında yapılan selenleştirmede Se'nin tutucu rol oynayarak Na₂Se_x bileşiğini oluşturması ve Na içeren soğurucuların oksidasyonundan dolayı CIGS ve Na₂Se_x oksidasyonu ile açıklamışlardır.

Scheer vd. (2000) Na ve O katkılamanın CuInS_2 filmlerin iletkenliğine etkisini incelemişlerdir. Na katkılamanın O konsantrasyonunda büyük artışa neden olduğunu ve bunun filmin iletkenliğini arttırdığını elde etmişlerdir.

Bodeg Ard vd. (2000) CIGS filmlerde Na'un yapısal ve elektrik etkisini incelemişlerdir. Filmlerin x-ışını kırınım analizinde Na içeren filmlerde diğer CIGS filmlere göre (112) pik şiddetinde 100 kat artış olduğunu, ayrıca Na difüzyonunun pilin açık devre gerilimini ve fill faktörünü arttırdığını, buna bağlı olarak pilin veriminde önemli bir artışa neden olduğunu görmüşlerdir.

Heske vd. (2000) Mo kaplı soda-lime cam üzerine hızlı termal buharlaştırmayla Cu, In, Ga ve Se'ni tabakalar halinde kaplayarak CIGS fimleri elde etmişlerdir. Bu filmler üzerine kimyasal çöktürme yöntemiyle (CBD-chemical bath deposition) CdS üst tabaka olarak kaplanmıştır. Fotoelektron spektroskopisi (PES) ve x-ışınları emisyon spektroskopisi (XES) ölçümleriyle Na içeren CIGS soğurucu filmlerin, CdS/CIGS ara yüzeyinde bulunan Na miktarına etkisi olup olmadığını incelemişlerdir. Ara yüzeyde bulunan Na miktarının kendine özgü bir sınırı (self-limitation) olduğunu göstermişlerdir.

Kronik vd. (2000) CIGS filmlerin ara yüzeylerine oksijenleştirmenin kimyasal etkisini incelemişlerdir ve Se kusurlarının etkisinin azaldığını, Cu'n ayrıldığını, bununla beraber, Na ve kimyasal çöktürme (CBD-chemical bath deposition) işlemlerinin iyi oksijenleştirmeyi kötüden ayırdığını görmüşlerdir. Na etkisinin oksijenleşmeyi geliştirdiğini, yani Se kusurlarının etkisizliğini artırıp, Cu ayrılmasını azalttığını söylemişlerdir. Kimyasal çöktürme yöntemiyle (CBD) CdS kaplama işleminin Cd-Cu ara yüzeyindeki donörlerin oluşmasından ve O-Se ara yüzeyindeki akseptörlerin de ayrılmasından kaynaklanan ara yüzey yükünü sabit kıldığını göstermişlerdir.

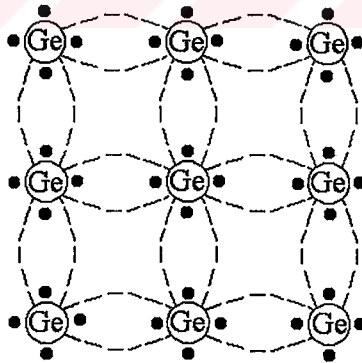
Tanaka vd. (2000) çeşitli Na/ CuInSe_2 oranları içeren CuInSe_2 ve Na_2Se karışımı malzemeler kullanarak RF püskürtme yöntemiyle (RF Sputtering) ince filmler elde etmişler ve Na içeren CIS ince filmlerin özelliklerini incelemişlerdir. Na miktarının arttıkça filmin kompozisyonunun CuInSe_2 fazından $\text{CuInSe}_{3.5}$ kadar değiştiğini, x-ışınları kırınım ölçümleriyle filmlerin kristal yapısının kalkopirit yapıdan kusurlu kalkopirit yapıya dönüştüğünü göstermişlerdir. Filmin optik soğurma kenarının, filmin kompozisyonuna ve yapısal değişikliğine bağlı olarak Na miktarı arttıkça daha yüksek enerjiye sahip olduğunu bulmuşlardır.

1.6 p-n Eklemler

Güneş pillerinin temelini oluşturan p-n eklemden bahsetmeden önce n-tipi ve p-tipi yarıiletken hakkında bilgi verilecektir.

Periyodik cetvelin dördüncü grubunda bulunan atomlar (germanyum, silisyum vb.) dış kabuklarında dört elektrona sahiptirler. Bu atomlarla özden yarıiletken kristal oluştuğunda, her atomun dört valans elektronu komşu atomlarla kovalent bağ yaparak birleşirler ve her kovalent bağda iki elektron bulunur. Mutlak sıfırda kovalent bağlarda elektron eksikliği yoktur (Şekil 1.7). Kararlı durumda kristalde serbest yük taşıyıcıları bulunmamaktadır; yani valans bandı elektronlarla tam olarak dolu, iletkenlik bandı ise boştur. Isı etkisiyle bağdan kopan elektronlar yerlerinde delik bırakarak serbest hale gelirler. Özden yarıiletkenlerde oluşan elektron ve delik sayıları eşittir. Özden yarıiletkenlerin özellikleri, iletkenlikleri ve yasak band genişliği ile karakterize edilmektedir.

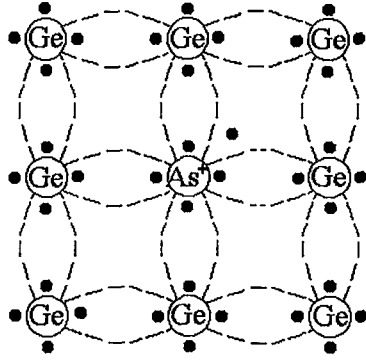
Özden yarıiletkenlerde serbest elektron konsantrasyonu ($n = 10^{13} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) atomların konsantrasyonundan (10^{22} cm^{-3}) çok azdır. Yarıiletkene yapılan dış etkilerle (ışık, elektrik alan, hızlı parçacıklarla bombardman vb.) atomlar iyonlaşır, elektron konsantrasyonunun değişmesi sonucu yarıiletkenin özellikleri de değişmektedir.



Şekil 1.7 Özden Ge kristal yapısı (Oral,1979)

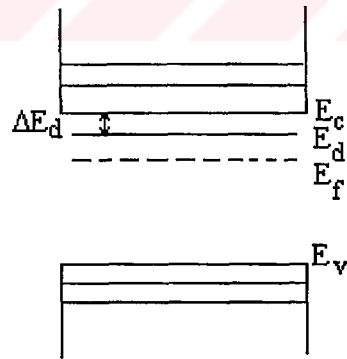
Periyodik cetvelin dördüncü grubunda bulunan germanyuma belirli miktarda uygun bir yabancı madde eklenirse iletkenliğinin tipi değişir. Bu amaçla eklenecek yabancı maddelerden en uygun olanları periyodik cetvelin üçüncü ve beşinci grubunda bulunan atomlardır. Bunlardan beşinci grupta bulunan arsenik, antimon, fosfor gibi atomlar beş valans elektronuna sahiptirler. Germanyum kristalinde örgünün bir düğümüne arsenik atomu eklenirse, arseniğin dış tabakasındaki beş valans elektronu komşu germanyum atomları ile kovalent bağ yaparlar.

Germanyum dört valans elektronlu olduğundan arseniğin beşinci elektronu bu bağa katılamaz ve böylece çekirdeğe zayıf olarak bağlanır (Şekil 1.8).



Şekil 1.8 n-tipi Ge kristal yapısı (Oral,1979)

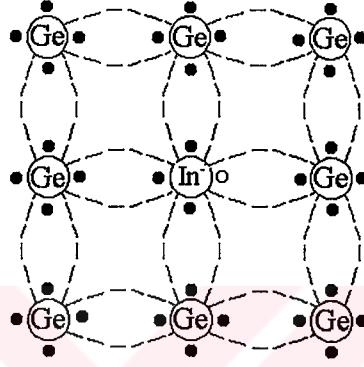
Bu elektronların hepsi oda sıcaklığında iletkenlik bandına ulaşırlar. Böylece beşinci grup elemanlar ilave yük taşıyıcısı sağlarlar. Termik enerjileri yeterli olan birkaç valans bandı elektronu da iletkenlik bandına geçmiş olabilir. Bu durumda iletkenlik bandındaki elektronların sayısı, valans bandındaki deliklerin sayısından daha fazladır. O halde iletkenliğin büyük bir kısmı elektronlarca sağlanmış olur ve arsenik atomu pozitif yüklü iyonla çevrilir. Yarıiletkende elektron veren katkı atomuna *donör (verici)* denir. İletkenliği donör katkısıyla karakterize olan yarıiletkene de *n-tipi yarıiletken* denir.



Şekil 1.9 n-tipi yarıiletkenin enerji band diyagramı

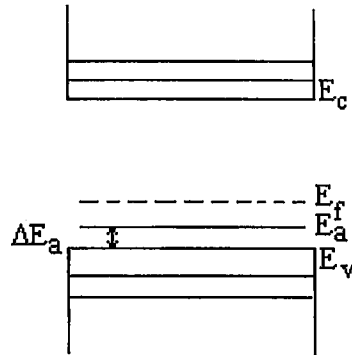
Bir n-tipi yarıiletkende iletkenlik bandındaki elektronların sayısı saf yarıiletkendekinden daha fazladır. n-tipi yarıiletkene ait Fermi düzeyi yukarıya kaymıştır. Donör tipli katkı yarıiletkenin yasak bandında enerji düzeyi oluşturur, buna *donör enerji düzeyi* denir, iletkenlik bandına yakındır ve Fermi düzeyinin üstündedir. Elektronlar donör düzeyinden iletkenlik bandının dibine çıkar. ΔE_d donörlerin iyonlaşma enerjisini temsil etmektedir (Şekil 1.9).

Periyodik cetvelin üçüncü grubunda bulunan bor, alüminyum, indiyum, galyum gibi atomlar üç valans elektronuna sahiptirler. Eğer germanyuma indiyum eklenirse, komşu germanyum atomlarının bağlarından biri dolmaz, bu bağa komşu germanyum atomundan bir elektron geçer ve elektron koparttığı bağda bir delik oluşturur (Şekil 1.10). Bunun sonucunda negatif yüklü indiyum atomu oluşur ve germanyum bağlarıyla hareket eden serbest delik meydana gelir. Bu durumda valans bandındaki delik sayısı, iletkenlik bandındaki elektron sayısından fazladır. Elektron alan katkı atomuna *akseptör (alıcı)* denir. İletkenliği akseptör katkı ile belirlenen yarıiletken *p-tipi yarıiletken* denir.



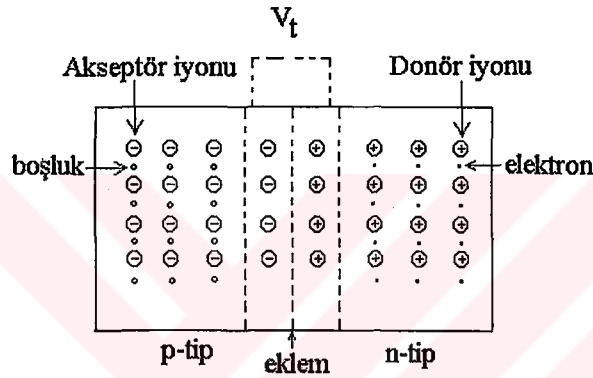
Şekil 1.10 p-tipi Ge kristali (Oral,1979)

Oda sıcaklığında indiyum atomları valans bandına çok yakın bir enerji seviyesi oluşturur, buna *akseptör enerji düzeyi* denir. p-tipi yarıiletken valans bandındaki deliklerin sayısı iletkenlik bandındaki elektronların sayısından daha fazla olduğundan Fermi düzeyi akseptörünkine seviyesine daha yakındır. Katkıların enerji düzeyi valans bandına daha yakındır. ΔE_a akseptörlerin iyonlaşma enerjisi, deliklerin akseptör enerji düzeyinden valans bandının tavanına geçmesine karşılık olan enerjidir (Şekil 1.11).



Şekil 1.11 p-tipi yarıiletkenin enerji band diyagramı

Bir p-n eklemının özellikleri p-tipi ve n-tipi iki yarıiletkenin birbirlerine temas ettirildiği düşünülerek açıklanabilir. Bu durumda temas bölgesinin yakınındaki hareketli yükler yük yoğunluklarının küçük olduğu bölgeye doğru hareket ederler. Yani, n-tipi bölgenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan elektronlar p-tipi bölgeye; p-tipi bölgenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan delikler de n-tipi bölgeye geçerler ve eklemının her iki tarafı iyonlaşır. Eklemının n-tipi bölgesindeki atomlar pozitif, p-tipi bölgesindeki atomlar negatif iyonize olur, böylece yük geçişi tamamlanır (Şekil 1.12). Eklemının her iki tarafında iyonize olmuş atomlar yönü n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye doğru bir elektrik alanı meydana getirir. İyonize olan atomlar kristal yapısı içinde sabit yük merkezleridirler ve bölge serbest yüklerden yoksundur. Bu bölgeye *eklem bölgesi* veya *geçiş bölgesi* denir.



Şekil 1.12 n-ve p-tipi yarıiletkenin temas durumu (Oral,1979)

Eklemde meydana gelen potansiyel farkı, p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye geçecek delikler ve n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye geçecek elektronlar için bir potansiyel duvarı meydana getirir. Eklemdeki bu temas potansiyel farkı, her iki bölgenin çoğunluk yük taşıyıcılarının eklemi aşmalarına bir engel oluşturacak durumda olduğu halde, azınlık yük taşıyıcılarının karşı bölgeye geçişlerini kolaylaştıracak yöndedir. Eklemının bir tarafından diğer tarafına geçen yük taşıyıcılarının oluşturduğu elektrik alan daha fazla yük taşıyıcılarının geçişine engel olacak durumda olduğu zaman eklem dengededir.

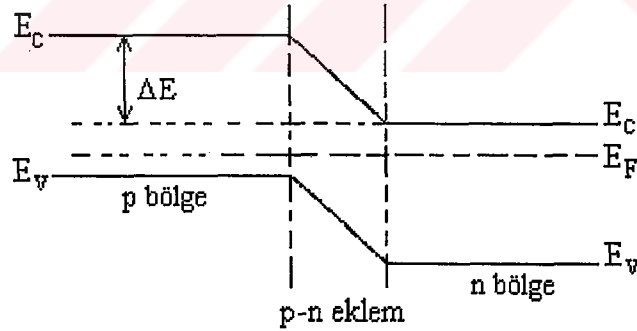
Herhangi bir yol ile eklem yakınında elektron-boşluk çifti meydana getirilirse, eklemde oluşan elektrik alan, p-tipi bölgenin azınlık yük taşıyıcısı olan elektronun n-tipi bölgeye, n-tipi bölgenin azınlık yük taşıyıcısı olan boşluğun da p-tipi bölgeye geçmesini sağlar; eklemdeki elektrik alan, eklem civarında meydana gelmiş olan elektron- delik çiftini ayırır.

Eklemdeki elektrik alan hareketli yüklerin yeniden düzenlenmesi sonucu meydana gelmiştir, maddenin toplam yükü değişmemiştir. Temas potansiyel farkı V_t , p-n ekleminden bir akım

geçmesini sağlayamaz. p-n eklemde bulunan potansiyel farkının bir akım meydana getirmeyeceği şöyle açıklanabilir: eğer p-n eklemdeki temas potansiyel farkı bir gerilim kaynağı olsaydı, bunun yarıiletkende meydana getireceği akım, p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye doğru olurdu. Fakat böyle bir hal çoğunluk yük taşıyıcılarının eklemdeki potansiyel duvarını aşmaları demek olduğundan, daha önce sözü edilen denge haline ters düşer. p-n eklemının kısa devre yapılması, yük taşıyıcılarına enerji sağlamadığından, eklem dengede kalır ve böylece yarıiletkenden akım geçmez.

Böyle bir temas yüzeyinin bulunması durumunda, dengeye ulaşıldığı zaman Fermi seviyesi her iki bölgede aynı olmalıdır. Eğer aynı olmazsa, eklem bir tarafındaki elektronlar, diğer tarafta bulunanlardan daha yüksek enerjiye sahip olurlardı ve her iki taraftaki maddelere ait Fermi düzeyleri aynı oluncaya kadar bir taraftan ötekine elektron geçişi olurdu.

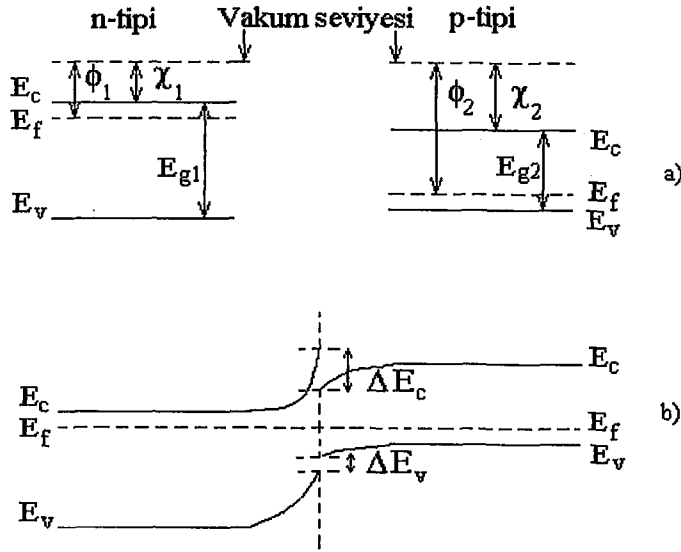
E_F Fermi seviyesi n-tipi yarıiletkende E_{cn} iletkenlik bandına, p-tipi yarıiletkende E_{vp} valans bandına daha yakındır. p-tipi yarıiletkene ait E_{cp} iletkenlik bandı kenarıyla n-tipi yarıiletkene ait iletkenlik bandı kenarının aynı zamanda, n-tipi yarıiletkene ait E_{vn} valans bandı kenarıyla p-tipi yarıiletkene ait valans bandı kenarının aynı seviyede olmayacağı açıktır, bu nedenle bir p-n eklemının enerji band diyagramı Şekil 1.13'deki gibi olur.



Şekil 1.13 p-n eklem enerji band diyagramı

1.7 Heteroeklemler

Homoeklemler katkı tipleri farklı olan aynı yarıiletken malzemeler kullanılarak; heteroeklemler ise farklı enerji band aralıklarına sahip farklı iki yarıiletken malzeme kullanılarak elde edilir. p-tipi dar yasak enerji aralığına sahip yarıiletkenle n-tipi geniş yasak enerji aralığına sahip yarıiletken arasında meydana gelen yapıya *p-n heteroeklemler* denir.

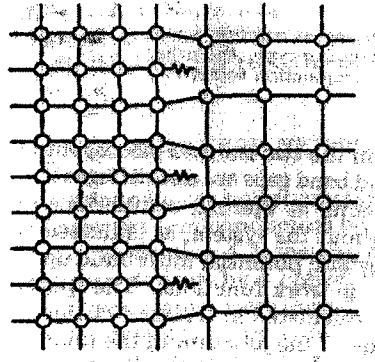


Şekil 1.14 a) n- ve p-tipi yarıiletkenlerin ve b) heteroeklemin enerji band diyagramları (Green,1982)

Farklı iki yarıiletken malzeme farklı enerji aralığına (E_g), termodinamik iş fonksiyonuna (ϕ) ve elektron afinitesine (χ) sahiptir. İş fonksiyonu ve elektron afinitesi elektronu, sırasıyla Fermi ve iletkenlik düzeylerinden vakum düzeyine çıkarmak için gerekli enerjidir (Şekil 1.14). Termodinamik iş fonksiyonu yarıiletkenin katkılanma derecesine bağlı iken elektron afinitesi her zaman sabit olup, katkılama derecesine veya diğer parametrelere bağlı değildir. n-tipi ve p-tipi yarıiletken temasa getirildiğinde yasak enerji aralıklarının farklı olması nedeniyle sınırda bir süreksizlik oluşur. Eğer $\phi_2 > \phi_1$ ise elektronlar n-tipinden p-tipine doğru geçerler, p-tipinde elektron sayısı ve potansiyel enerji artar, işareti ters orantılı olduğundan temas bölgesinde enerji seviyeleri aşağıya doğru bükülür. n-tipinde ise tersine elektron sayısı azaldığından potansiyel enerji azalır, enerji düzeyleri yukarı doğru bükülür. Sistem dengeye ulaştığı zaman eklemin her iki tarafındaki Fermi düzeyi çakışıktır ve vakum düzeyi her yerde band kenarlarına paralel ve süreklidir.

$$\Delta E_c = \chi_2 - \chi_1 \quad (1.1)$$

$$\Delta E_v = E_{g1} - E_{g2} - \Delta E_c \quad (1.2)$$



Şekil 1.15 Farklı örgü sabitlerine sahip yapılar arasındaki dislokasyonlar (Green,1982)

Heteroeklemlerde kullanılan iki yarıiletken arasında örgü sabitlerinin ve termik genleşme katsayılarının kusursuz olarak eşleşmesi pratikte mümkün değildir. Aynı yapıya fakat örgü uzayındaki farklılıktan dolayı örgüde kusurlar oluşur. Bu kusurlar ara yüzey dislokasyonları şeklindedir ve yoğunlukları örgüler arasındaki uygunsuzluk derecesine bağlıdır (Şekil 1.15). Kristal örgüdeki kusurların yasak bantta artışına neden olduğu izinli enerji düzeyleri eklem bölgesindedir ve rekombinasyon merkezi gibi davranırlar. Bu bölgenin dar olmasından dolayı akım, kuantum mekaniksel tünelleme olayına göre, eklem bir tarafından ötekine doğru akar. Bu durum güneş pilinin verimini azaltır. Heteroeklemin özelliklerini idealleştirebilmek için mümkün olduğu kadar örgü yapıları benzer yarıiletkenler kullanılmalıdır.

Bir heteroeklem değişik metodlarla elde edilebilir. Bunlar arasında

- a) İki yarıiletkenin erime noktaları arasındaki fark kullanılarak, eritip tekrar büyütürken yapılan arayüzey-alaşım (interface-alloy) tekniği,
- b) Tek kristal yarıiletken altlığın üzerine tek kristal yarıiletken filmin kristalografik doğrultularının üst üste gelmesi ile yapılan epitaksiyel büyütme tekniği,
- c) Bir malzemenin diğeri üzerine vakum tabakalanması tekniği vb. yöntemler kullanılır.

Bunlardan epitaksiyel büyütme yöntemi son yıllarda çok sık kullanılmakta ve bu yöntemle büyütülmüş filmlere *epitaksiyel filmler* denir. Örneğin, [100] doğrultulu tek kristal GaAs'ın yüzeyinde [100] doğrultulu kristal AlGaAs ince filminin yapılması. Bu yöntemle heteroeklem büyültüldüğünde farklı tipte katkılar ve altlıklar kullanarak p-n, n-p, p-p, n-n heteroeklemler elde edilebilir. Bu yapılara *epitaksiyel heteroeklemler* denir.

Epitaksiyel yöntemle tek kristal heteroeklemlerin büyütülmesi için gereken koşullar şunlardır:

- a) Büyütülen kristalin ve altlığın kristal örgüleri aynı yapıda olmalıdır (kübik- kübik vb.).
- b) Büyütülen filmin ve altlığın örgü parametrelerinin değerleri (a_1, a_2) çok yakın olmalıdır. Örgü parametrelerinin farkları uygunsuzluk parametresi (ε) ile karakterize edilmektedir.

$$\varepsilon = \frac{a_1 - a_2}{\bar{a}} 100 = 2 \frac{(a_1 - a_2)}{(a_1 + a_2)} 100 \quad (1.3)$$

Epitaksiyel yöntemle tek kristalli filmi, tek kristalli altlığın üstünde büyötmek için $\varepsilon \leq \%3$ olmalıdır, aksi takdirde film-altlık sınırında deformasyon ve dislokasyonlar oluşur ve bu nedenle polikristal yapıya sahip filmler büyütölmektedir.

CIS-GaAs yapı için uygunsuzluk parametresi, örgü parametreleri sırasıyla $a_1 = 0,578\text{nm}$ ve $a_2 = 0,565\text{nm}$ olmak üzere (1.3) bağıntısı kullanılarak $\varepsilon \approx \%2$ olarak bulunur, buna göre GaAs altlık üzerinde CuInSe₂ filmi büyötmek uygundur.

- c) Filmin ve altlığın genleşme katsayılarının değerleri çok yakın olmalıdır, $\alpha_1 \approx \alpha_2$

1.8 Eklemlerin Elektriksel Özellikleri

Eğer Bölüm 1.6'da sözü edilen p-n eklemi, p-tipi bölge n-tipi bölgeden daha pozitif olacak şekilde ileri yönde kutuplandırılırsa, farklı yönlerde geçmekte olan elektron ve delik akımları birbirine eklenir; toplam akım p-n ekleminden ileri yönde geçen akımdır. Bu I akımı ideal diyot için aşağıdaki şekilde ifade edilir.

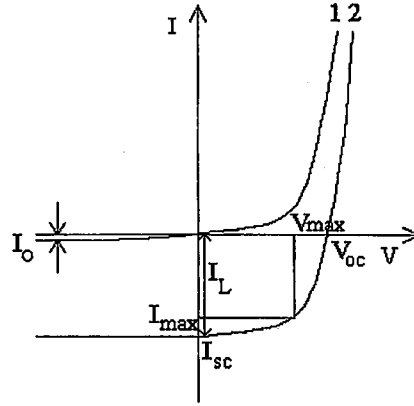
$$I = I_0 (e^{eV/kT} - 1) \quad (1.4)$$

Burada I_0 diyodun ters doyma akımıdır (Şekil 1.16 (1) eğrisi).

Gerçekte diyodun akım-gerilim karakteristiği

$$I = I_0 (e^{eV/AkT} - 1) \quad (1.5)$$

ile verilir. Burada A ideallik faktörüdür ve sıcaklığa, gerilime ve eklemdaki rekombinasyon merkezlerine bağlıdır.

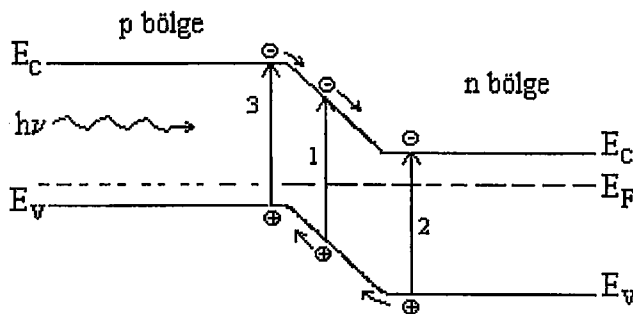


Şekil 1.16 Diyodun (1) karanlıkta ve (2) aydınlıkta akım-gerilim karakteristiği (Green,1982)

1.9 Eklemlerin Fotovoltaik Karakteristikleri

Işığın etkisi altında maddenin optik özelliklerinin değişimi onun band yapısı hakkında bilgi edinmemizi sağlar. Işığın etkisi altında yarıiletkenin elektriksel özelliği de değişir.

Uygun frekansta ışık yarıiletken üzerine düştüğü zaman malzemenin elektriksel iletkenliğinin değişmesine *fotoiletkenlik* denir ve ışığın enerjisi yarıiletkenin yasak band genişliğine eşit veya daha büyük olduğu zaman gözlenebilir. Yeterli enerjiye sahip ($h\nu > E_g$) bir ışık demeti p-n eklemi üzerine düştüğü zaman bir foton, bir serbest elektron veya bir valans elektronu ya da bir boşlukla karşılaşabilir. Bir elektronla karşılaşan foton ona enerjisini verir. Bir foton bir valans elektronu ile karşılaşır ve ona yasak band genişliği E_g 'ye eşit veya ondan daha büyük enerji verirse, valans bandından sökülen elektron arkasında bir boşluk bırakarak iletkenlik bandına geçer. Bu olay p-n ekleminin çeşitli noktalarında meydana gelebilir.



Şekil 1.17 p-n eklemden fotonlarla uyarılmış elektron-delik çiftlerinin oluşması

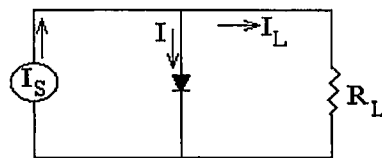
Eğer bir elektron-delik çifti eklem bölgesinde meydana gelirse, burada yüksek bir potansiyel gradyanı vardır, elektrik alanı elektronu n bölgesine deliği de p bölgesine yani; yük taşıyıcılarının çoğunlukta oldukları bölgelere doğru hızlandırır (Şekil 1.17-1). Bu yük hareketi n bölgesinden p bölgesine pozitif yük geçişine denktir, ve n tipi bölge negatif, p tipi bölge pozitif olarak yüklenmektedir.

Elektron-delik çifti n tipi bölgede meydana gelirse, azınlık yük taşıyıcıları olan delikler eklemeye doğru gider ve onu aşarak p tipi bölgeye geçer (Şekil 1.17-2). Bu durumda yine n tipi bölgeden p tipi bölgeye pozitif yük geçişi vardır. Çoğunlukta olan yük taşıyıcılarının hareket yönü pek önemli değildir, çünkü bunların enerjileri potansiyel duvarını aşmak için yeterli değildir.

Elektron-delik çifti p tipi bölgede meydana gelirse, elektron eklemeye doğru hareket eder ve onu aşarak n tipi bölgeye ulaşır (Şekil 1.17-3). Bu durumda yine n tipi bölgeden p tipi bölgeye pozitif bir yük geçişi vardır. Eklemenden daha uzakta meydana gelen elektronlar ve delikler yeniden birleşirler ve elektron-delik çifti kaybolur. Fotonlar tarafından meydana getirilen akımdan yararlanabilmek için önce eklemiden ışık alması sağlanmalı ve sonra elde edilen akım bir dış devreye bağlanmalıdır.

Fotovoltaik güç dönüşümü en iyi, paralel bağlanmış sabit akım kaynaklı ideal bir p-n eklemi ile açıklanabilir (Şekil 1.18). Devrede diyot güneş ışığı tarafından aydınlatılmaktadır. Asıl olarak, kaynağın cinsi önemli değildir. Kaynak, foton kaynağı (güneş enerjisi, γ ışıması, X-ışını, vb), yüksek enerjili parçacık kaynağı (elektron tabancası, β radyoaktif elementler, α parçacıkları, protonlar, nötronlar, vb) veya ideal kaynağın özelliğini değiştirmeden elektron-delik çifti meydana getiren diğer kaynaklar da olabilir.

Foton soğurulması ile meydana gelen yük taşıyıcıları çoğunlukta oldukları bölgelere doğru sürüklenirler. Bu durumda eklemenden bir I_S akımı geçer. Böylece p-tipi bölge pozitif, n-tipi bölge ise negatif olarak yüklenir.



Şekil 1.18 Fotovoltaik pilin eşdeğer devresi (Oral,1979)

I_S akımının geçişi p-n eklemine ileri yönde kutuplanmasına neden olur ve bu durumda eklemdaki potansiyel duvarı alçalır. Eklemde bir dış bağlantısı yoksa bu ileri yöndeki kutuplanmadan dolayı ileri yönde (p den n ye doğru) bir I akımı geçer ve bu da n tipi bölgeyi pozitif olarak yükleyeceğinden çoğunluk yük taşıyıcılarının geçişine engel olan potansiyel duvarı yükselmeye başlar. p den n ye doğru olan bu akım, potansiyel duvarı (temas potansiyel farkı) çoğunluk yük taşıyıcılarının geçişine engel oluşturacak duruma gelinceye kadar devam eder. Yeniden foton soğurulması olur. Eklemde bulunan elektrik alan, meydana gelmiş olan elektron-delik çiftini ayırarak bunların eklemi aşmalarını sağlar. Böylece potansiyel duvarının çökmesi, sonra yükselmesi sürüp gider ve açık devre halinde I_S akımı I akımı ile dengelenmiş olur.

p-n kavşağı dışarıdan bir R_L yük direnci ile birleştirilirse I_S akımının I_L kadarlık kısmı dış devreden akar, böylece p-n eklemi ışık enerjisini elektrik enerjisine çevirmiş olur. I_S akımı

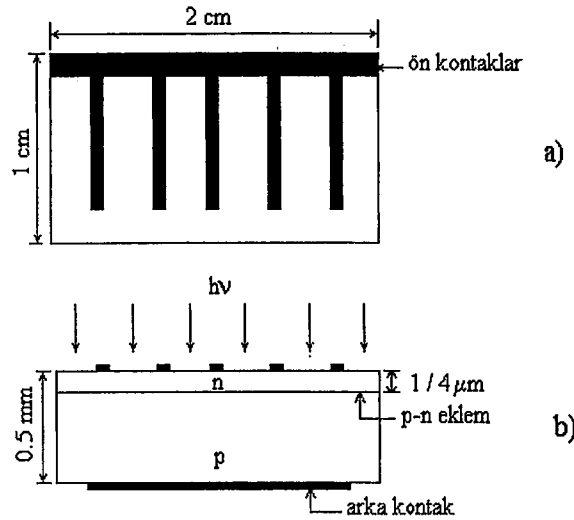
$$I_S = I + I_L \quad (1.6)$$

bağıntısı ile verilir. Burada I_L fotoakım yani ışık etkisiyle oluşan akımdır. İleri yöndeki akımın (1.4) değeri I_S yi veren eşitlikte yerine konulursa

$$I = I_o \left(e^{eV/kT} - 1 \right) - I_L \quad (1.7)$$

bağıntısı elde edilir. Bu durumda devreden geçen akım-gerilim karakteristiği Şekil 1.16'daki (2) eğrisi ile verilir. Buna göre aydınlık eğrisi karanlık eğrisinin şekil değiştirmeden I_L kadar ötelenmesidir. Bu eğride V_{max} maksimum güç noktası gerilimi, I_{max} maksimum güç noktası akımı, V_{oc} açık devre gerilimi, I_{sc} kısa devre akımıdır.

Güneş pili temel olarak güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine çeviren geniş uzay yükü bölgesine sahip bir p-n eklemdir. Yüksek verimli güneş pili ilk olarak 1954 yılında Chapin, Fuller ve Pearson tarafından silikon difüzyonu yapılan p-n eklemi kullanılarak elde edilmiştir. Bugüne kadar güneş pilleri difüze olmuş GaAs pili, Cu_2S -CdS pili, ince film GaAs ve CdS pilleri gibi birçok farklı yarıiletkenlerden yapılmıştır. Şekil 1.19'da görülen güneş pili yüzey üzerine kaplanmış dar bir p-n eklemi, bir ön ohmik kontakt çizgisi, bölmeleri ve tüm arka yüzeyi kaplayan arka ohmik kontakten oluşur. Işık altında güneş pilinin akım-gerilim karakteristiği Şekil 1.16 'de (2) eğrisi ile verilmiştir.



Şekil 1.19 Tipik bir güneş pilinin a) üstten ve b) yandan şematik gösterimi (Sze, 1981)

Güneş pillerini karakterize eden üç parametre vardır. Birincisi (I_{sc}) kısa devre akımı pilin uçları arasındaki direnç sıfır olduğunda okunan akım; ikinci parametre (V_{oc}) kısa devre gerilimi devre açıkken yani direnç sonsuzken okunan gerilimdir, (1.7) denklemi sıfıra eşitlenerek

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (1.8)$$

ile verilir. Üçüncü parametre fill faktörü (doluluk faktörü) FF , Şekil 1.16 (2) eğrisinin dördüncü bölgesine çizilen maksimum alanlı dörtgenden

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (1.9)$$

olarak bulunur. Güneş pilinin verimi η , yani harcanan enerji başına üretilen enerji miktarı

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc}}{P_{in}} FF = \frac{V_m I_m}{P_{in}} \quad (1.10)$$

ile verilir. Burada P_{in} pil üzerine düşen ışığın toplam şiddetidir. Ticari olarak üretilen güneş pillerinden elde edilen verim %12 ile %14 arasında değişir.

Güneş pillerinin avantajlarından bazıları; gürültüsüz çalışmaları, yapıldıkları malzemeler en basit yarıiletken olduklarından kolaylıkla imal edilmeleri, artıklarının olmayışı, çevreyi kirliletmeyişleri, uzun ömürlü oluşları, istenilen yerde istenilen güçte elektrik üretebilmeleridir. Güneş pilleri günümüzde uydu ve uzay araçları için en önemli uzun süreli güç vericilerdir. Ancak güneş pillerinin teknolojisi zor, termal ve hidroelektrik santrallere göre maliyetleri daha yüksektir. İlk olarak uzay programları için geliştirilmeye başlanan güneş pilleri 1955 yılından sonra uzay araçlarında, daha sonraki yıllarda genellikle fazla güç gerektirmeyen ve bilinen diğer yollardan elektrik üretimi zor olan güç merkezlerinden uzak olan yerlerde, örneğin deniz fenerlerinde, orman gözetleme kulelerinde, küçük tip el aletlerinde kullanılmaya başlanmıştır. Güneş pilleri sayesinde elde edilen elektrik direkt olarak kullandığı gibi depolanma yoluyla da kullanılabilir (Batarya).

1.10 Eklemlerin Kapasitans Özellikleri

p-n eklemde eklem bölgesi iki ters yönlü katmandan oluşmaktadır. Yani, bölüm 1.6'da açıklandığı gibi eklem n-tipi bölgesi pozitif, p-tipi bölgesi negatif iyonize atomlar içermektedir. Böylece p-n eklemi, elektriksel kondansatöre benzemektedir. Eklem içinde kondansatörde olduğu gibi n-tipi yarıiletken p-tipi yarıiletken yönlenmiş sabit bir elektrik alan vardır. Bu özellik ile eklem bölgesinin kalınlığı belirlenir. Eklem dışarıdan V gerilimi uygulandığında eklem bölgesinin kalınlığı değişmektedir. Doğru yönde gerilim uygulandığında yani, p-tipi bölgeye pozitif n-tipi bölgeye negatif kutup bağlandığında eklem bölgesinin kalınlığı ve direnci küçülür. Ters yönde gerilim uygulandığında ise eklem bölgesinin kalınlığı ve direnci artmaktadır. Kalınlığın değişimi eklem bölgesinin hacimsel yük değişimine yani kapasitansın değişimine neden olur. C eklem bölgesi kapasitansı, S eklem alanı ve d eklem kalınlığı olmak

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} \quad (1.11)$$

ile verilir. V_t eklem bölgesinin temas potansiyel farkı olmak üzere, eklem bölgesinin kalınlığı

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon \epsilon_0 (V_t - V)}{en}} \quad (1.12)$$

ile ifade edilmektedir. Denge durumunda yani dışarıdan bir gerilim uygulanmadığı zaman (1.12) denklemi (1.11) denkleminde kullanılarak eklem kapasitansı

$$C = S \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 e n}{2 V_i}} \quad (1.13)$$

ekleme dışarıdan bir V gerilimi uygulandığı zaman eklem kapasitansı

$$C = S \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon_0 e n}{2(V_i - V)}} \quad (1.14)$$

olarak ifade edilir. Bu ifadenin karesinin türevi alınırsa

$$n = \frac{2}{\epsilon \epsilon_0 S^2} \frac{dV}{d\left(\frac{1}{C^2}\right)} \quad (1.15)$$

olarak elektron konsantrasyonu ifadesi elde edilir. Formüle göre, p-n eklem kapasitans gerilim karakteristiği ölçülerek, $1/C^2$ -V eğrisinin çizilmesi ile eklem yük taşıyıcılarının konsantrasyonu hesaplanır.

1.11 Heteroeklemlerde Difüzyon Olayları

1.11.1 Yarıiletkenlerde difüzyon

Katılarda atomlar ısının etkisiyle denge konumları etrafında küçük genlikli titreşim yapmaktadırlar. Kristal içinde bulunan atomların herhangi bir anda sahip oldukları enerjiler farklıdır. Çoğu atom ortalama enerji düzeyinde bulunmaktadır. Az sayıda atomun enerjisi ise çok yüksek veya sıfıra çok yakın değerler almaktadır. Atomların titreşim enerji dağılımları

$$N = N_i f \left[\exp \left(- \frac{E - \bar{E}}{kT} \right) \right] \quad (1.16)$$

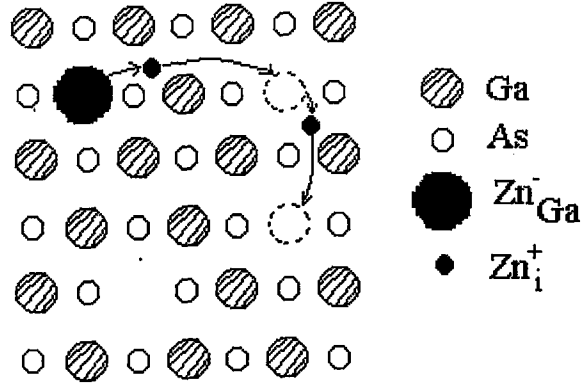
şeklinde verilir. Burada T mutlak sıcaklık, N_i atomların toplam sayısı ve N , E enerjili atomların sayısıdır. Sıcaklık arttıkça yüksek enerjili atomların sayısı da artmaktadır. Eğer kristaldeki atomlararası etkileşmelerin sonucunda herhangi bir atomun enerjisi komşu atomlarla kimyasal bağ kurmaya yeterli ise, atom kristaldeki bir denge konumundan komşu boş denge konumuna (bir vakansiye veya arayer) geçebilir. Geçişten sonra atomun enerjisi kristaldeki ortalama enerjiye kadar küçülür. Zaman geçtikçe, aynı atomun enerjisi yeniden artabilir ve atom yeni denge konumuna atlayabilir. Bu işlem, kristalde çok sayıda tekrarlanabilir. Atomların ısı etkisiyle bir denge konumundan diğerine atlamalarına *difüzyon*, saf malzemede, atomların bir denge konumundan diğerine atlamalarına ise *öz- difüzyon* denir. (örneğin, silisyum atomlarının silisyum kristalde taşınması). Katkı atomlarının malzemede taşınması ise *difüzyon* olarak tanımlanır. (örneğin, bor atomlarının silisyumda difüzyonu). Atomların potansiyel çukurundan çıkıp enerji engelini aşması için gerekli enerjiye *difüzyonun aktivasyon enerjisi* denir. Malzemelerin üretimi ve uygulamaları sırasında görülen tüm işlemler (kristal büyütülmesi, katılaşma, çökeltme, yeniden kristalleşme, faz oluşma, faz geçişi vb.) büyük ölçüde atomların kütle içindeki hareketlerine yani difüzyona bağlıdır.

1.11.2 Difüzyon mekanizmaları

Atomların kristaldeki bir denge konumundan diğerine atlamasıyla oluşan difüzyon mekanizmaları şunlardır:

- a) çift yerdeğiştirmesi
- b) halka yerdeğiştirmesi
- c) arayerle difüzyon
- d) vakansi veya boşluklarla difüzyon
- e) karmaşık veya dissosiyatif mekanizma

Dissosiyatif mekanizma, arayer ve vakansi mekanizmalarının bileşimidir. Atom, örgü düğümünden arayer pozisyonuna geçer, bunlarla hareketinden sonra, yeniden başka bir vakansiye geçer. Örnek olarak çinkonun dissosiyatif mekanizma yöntemiyle GaAs yarıiletkeninde hareketleri Şekil 1.20 'de verilmiştir.



Şekil 1. 20 Çinkonun GaAs'da dissosiyatif mekanizması (Caferov,1998)

1.11.3 Difüzyon kuralları

Bu kurallar ilk kez 1855 yılında Adolf Fick tarafından verilmiştir.

Difüzyonun birinci kuralı:

Homojen katılarda atomların difüzyon akışı J (1 saniyede 1cm^2 den geçen parçacıkların sayısı), konsantrasyon gradyanı $\frac{\partial N}{\partial x}$ (N malzemenin 1cm^3 'ne yerleşen parçacıkların sayısı) ile orantılıdır ve

$$J = -D \frac{dN}{dx} \quad (1.17)$$

denklemleri ile verilir. Burada eksi işareti atomların akışının konsantrasyon gradyanının azaldığı yönde olduğunu ifade eder, D hareket eden parçacıkların difüzyon katsayısıdır ve

$$D = \alpha a^2 \nu \quad (1.18)$$

olarak verilir, atomların kristaldeki hareket hızını ifade eder ve boyutu (cm^2/s)'dir. Burada α kristal örgüsüne bağlı boyutsuz katsayı, a örgü parametresi, ν titreşim frekansıdır.

Difüzyonun ikinci kuralı:

Eğer

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} \quad (1.19)$$

ile verilen süreklilik denklemi difüzyonun birinci kuralına uygulanırsa

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (1.20)$$

denklemi elde edilir ve konsantrasyonun zamanla değişme hızının konsantrasyonun ikinci türevine bağlılığını göstermektedir.

Belirli bir örneğin içinde, koordinat ve zamana bağlı olan $N(x,t)$ konsantrasyon dağılımını çıkarmak, ikinci difüzyon denklemini (1.20) çözmek demektir. Bunun için sabit konsantrasyonlu kaynaktan yarı sonsuz boyutlu ($x=\infty$) örneğin yüzeyinden içine doğru atomların difüzyonu gözönüne alınır. Bu difüzyon için gerekli koşullar

$$\begin{aligned} N(x,0) &= 0 \\ N(0,t) &= N_0 \end{aligned} \quad (1.21)$$

dır. Başlangıç koşulu ((1.21) denklemlerinin birincisi), ilk anda ($t=0$) örneğin içine ($x>0$) difüzyon eden atomların konsantrasyonunun sıfır olduğunu göstermektedir. Sınır koşulu ((1.21) denklemlerinin ikincisi), örneğin yüzeyinde ($x=0$) konsantrasyonunun zamana göre değişmediğini (N_0) ifade etmektedir.

Difüzyonun ikinci kuralı (1.20), sabit konsantrasyonlu kaynaktan difüzyon olayı için aşağıdaki şekilde çözülmektedir.

$$N(x,t) = N_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (1.22)$$

Burada $\text{erf } z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-z^2} dz$ Gauss fonksiyonu veya olasılık integralidir. Difüzyon katsayısının sıcaklıkla üstel değişimi Arrhenius eşitliği ile ifade edilir.

$$D = D_o \exp\left(-\frac{G}{kT}\right) \quad (1.23)$$

Burada D_o atomların titreşim frekansı ν ve örgü parametresi a 'ya bağlı olan üstel fonksiyonun çarpanıdır, G ise difüzyonun aktivasyon enerjisidir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

2.1 CuInSe₂–GaAs Heteroeklemlerin Hazırlanması

CIS-GaAs heteroeklemler, polikristal CIS tozunun vakum yaklaşık 10^{-4} Torr iken (111) yönünde kesilmiş ve parlatılmış GaAs yüzeyine tek kaynaktan buharlaştırmasıyla elde edildi. GaAs örnekler hazırlanırken ilk olarak gereken geometrik formda ve boyutta (yaklaşık 5mmx5mmx200µm) kesildi. Yarıiletken külçe plakalar şeklinde kesilirken yüzey bölgesinde oluşan kusurlu kristal yüzeyleri çıkarmak için cam diskin üzerinde son olarak elmas tozu M5 (3-5 µm) ile zımparalandı. Bu işlem bittikten sonra örnekler elmas parlatıcı macun kullanarak parlatılıp, alkolle temizlendi.

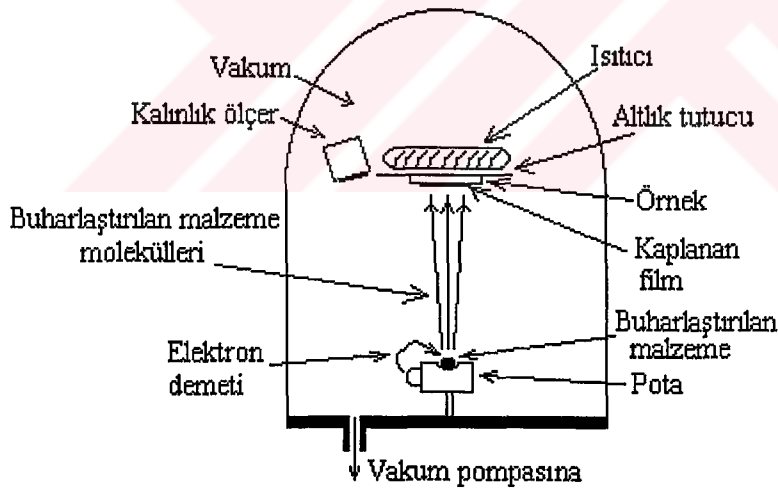
Isınma zamanı CIS bileşenlerine ayrıştığından, hepsinin aynı zamanda ayrışması ve stoikiometrik oranlarının bozulmaması için buharlaştırma işleminin çok hızlı yapılması gerektiğinden sıcaklık hızlı olarak yükseltildi. Isıtıcı olarak molibden pota kullanıldı ve sıcaklığı 1200°C'nin üzerinde tutuldu. Sıcaklığın yüksek tutulmasının nedeni, ısınma zamanında CuInSe₂'nin bileşenlerine ayrılması ve yüksek buharlaşma sıcaklığına sahip olan Cu'ı buharlaştırmak için 1200°C üzerinde sıcaklık gerekmesidir. Isıtıcının sıcaklığı düşük olduğunda Cu buharlaşmadığından elde edilen filmde stoikiometrik oran sağlanamamaktadır.

Elde edilen filmlerin kompozisyonunun x-ışınları floresans yöntemiyle ve yapısının x-ışınları kırınım analiziyle incelemeleri, stoikiometrik CIS filmi elde etmek için GaAs altlığın sıcaklığının da önemli olduğunu göstermektedir. Altlığın sıcaklığı 400°C'den düşük olduğunda CIS filmi ile birlikte In ve Se'nin farklı bileşikler de oluşmaktadır (InSe, InSe₂, In₂Se₃). Altlığın sıcaklığı 550°C'nin üzerinde olduğu zaman da Cu ve Se bileşikler oluştuğundan, stoikiometrik CIS elde edilmesi için altlığın sıcaklığı 500-520° C arasında olmalıdır.

CIS-GaAs heteroeklemlerin elde edilmesi için farklı yönlerde kesilmiş (100), (110), (111) GaAs plakalar kullanıldı. Bu plakalar mekanik ve kimyasal yöntemlerle parlatıldı ve bir yüzeylerine omik kontak, diğer yüzeylerine ise yukarıda anlatılan şekilde film çekildi. Farklı konsantrasyonlara sahip n ve p-tipi GaAs örnekler kullanılarak fotoelektriksel ve yapısal incelemeler yapıldı, en iyi sonuçların yaklaşık $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ konsantrasyonlu n-tipi ve (111) yönlü GaAs üzerinde yapılmış heteroeklemlerden elde edildiği görüldü.

2.2 CIS Filmlerinin Difüzyon Yöntemiyle Na Katkılanması

Bu çalışmada CIS filmlerini Na ile katkılamak için, sıkıştırılmış NaCl tozundan oluşturulmuş tabletler kaynak olarak kullanıldı. İnce NaCl filmi CIS filmlerinin yüzeyine elektron demeti yöntemiyle vakumda buharlaştırıldı (Şekil 2.1). Bunun için toz halindeki saf NaCl tuzu 130 kg/cm²'lik basınçla preslenerek tabletler haline getirildi. Bu tabletlerden 40 mg'lık parça alınarak Şekil 2.1'de gösterilen "Leybold" marka elektron-demeti buharlaştırma setinde potaya yerleştirildi. Sistem basıncı 10⁻⁵ Torr'a düşürüldükten sonra elektron demeti 6kV gerilim altında hızlandırılıp NaCl üzerine düşürülerek, 10 dakikada 2,5 nm/s'lik hızla malzeme oda sıcaklığında buharlaştırıldı. Buharlaştırma yöntemiyle kaplama yapıldıktan hemen sonra örnek vakum ortamda ısıtıcıyla 300°C'da 10 dakika ısıtılarak Na'un CIS filmine difüzyonu sağlandı. Isıtma sırasında örneğin yanına yerleştirilen termopile sıcaklık kontrol edildi. Kaplanan filmin kalınlığı, hem deney setindeki kalınlık ölçerle ("Leybold Inficon" 752-500-G2 Deposition Controller), hem de örneğin yanına yerleştirilen cam plaka kullanılarak Bölüm 2.8'de anlatılan interferans yöntemiyle hesaplandı ve kalınlık sırasıyla 1,12 µm ve 1,54 µm bulundu.



Şekil 2.1 Elektron-demeti buharlaştırma setinin şematik gösterimi

NaCl'daki Cl bileşeninin buhar basıncı Na buhar basıncından daha büyük olduğundan, NaCl-CIS yapının vakumda 300°C'da tavlama süresinde Cl atomlarının buharlaşmasıyla CIS filmine sadece Na atomlarının difüzyon ettiği tahmin edilmektedir.

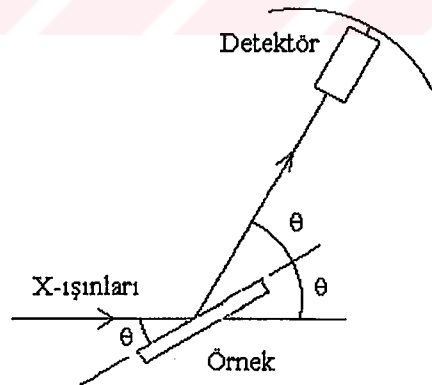
2.3 Tavlama Deneylerinin Yapılması

CIS-GaAs örneklerinin film yüzeylerini temizlemek için, örneklerin GaAs tarafındaki In kontaklar özel kapatıcı ile kapatılıp HCl çözeltisinde birer dakika bekletildikten sonra parlatılarak deney için hazırlandılar. Örnekler 220°C'da karanlıkta seri olarak ikişer dakika tavlandı ve herbir tavlama işleminden sonra akım-gerilim, kapasitans-gerilim ve fotovoltajik karakteristikleri ölçülerek tavlamanın etkisi incelendi.

2.4 CuInSe₂-GaAs Yapıların X-Işınları Kırınım Analizi

CIS-GaAs yapıların x-ışınları kırınım analizinde "RigakuD/Max-III C" difraktometresi kullanıldı*. Şekil 2.2'de basit diyagramı görülen bu difraktometrede CuK_α ışını ($\lambda=1,5418 \text{ Å}$) kullanıldı ve ölçümler $2\theta=3-70^\circ$ aralığında yapıldı. CIS ve GaAs örgü parametrelerini bulmak için (111) GaAs örneği üzerinde büyütülmüş CIS filmin x-ışını kırınım desenleri incelendi.

Örneğin birbirine paralel düzlemlerinden yansıyan ve sonra üst üste gelen ışınların şiddetleri detektör ile ölçüldü. Örnek θ açısı kadar dönerken detektör 2θ kadar dönmektedir. Açıya bağlı olarak yansıyan ışınların şiddeti taranarak x-ışınlarının kırınım desenleri bulundu.



Şekil 2.2 Difraktometrenin diyagramı (Caferov,1998)

* Bu ölçümler Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü Katıhal Laboratuvarında yapılmıştır.

Elde edilen kırınım desenlerinden (hkl) indisleri bulunduğundan sonra a, b, c örgü sabitleri kübik kristal yapısına sahip olan GaAs ve CIS için

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.2)$$

denklemini kullanılarak hesaplandı. Burada d atom düzlemleri arasındaki uzaklıktır, GaAs kristali için a=b=c ve CIS kristali için a=b, c=2a alınmıştır. Bu deneylerde x-ışınları kırınım analizinden elde edilen örgü parametreleri $\pm 0,004 \text{ \AA}$ 'lık duyarlılıkla ölçüldü.

2.5 Bakır Difüzyonunun GaAs Altılığında İncelenmesi

CIS-GaAs eklemlerin GaAs altılığında bakırın konsantrasyon dağılımı x-ışınları floresans (XIF) yöntemiyle incelendi*. Önce GaAs altılığın yüzeyinden kimyasal yöntemle (HCl çözeltisi kullanılarak) CIS filmi alındı. Bakır atomlarının altılıktaki konsantrasyon dağılımı ölçümlerinde, örneğin yüzeyinden her defasında ince filmler (yaklaşık 5 μm kalınlığında) çıkarıldı. Her film çıkarmadan önce ve sonra örnekten yayılan CuK_α karakteristik x-ışını pikinin şiddeti ölçülerek bu ışınların şiddetlerinde meydana gelen değişimler belirlendi. Ölçümler sonucunda örneğin kalınlığına göre, bakır atomlarının konsantrasyonlarının değişim eğrisinden, GaAs altılıktaki bakır atomlarının difüzyon katsayısı (1.22) formülü kullanılarak hesaplandı.

2.6 Omik Kontakların Yapılması

Yarıiletken malzemeler, elektriksel parametrelerin ölçümleri için özel yöntemle hazırlanırlar. Zımparalama ve yıkama işlemleri bittikten sonra örnekler omik kontaklar yapılır (Caferov, 1998). Omik kontakın özellikleri aşağıdaki koşullara uymalıdır:

- a) Kontakların akım-gerilim karakteristiği doğrultucu olmamalıdır, yani kontak direnci akımın yönüne bağlı olmamalıdır.
- b) Kontak direnci akımın değerine bağlı olmamalıdır.
- c) Kontak direnci yarıiletkenin direncinden çok küçük olmalıdır.

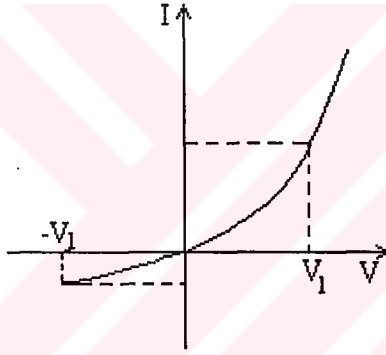
* Bu ölçümler Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü Katıhal Laboratuvarında yapılmıştır.

- d) Kontakta akım geçerken gürültü olmamalıdır.
- e) Kontak malzemesi yarıiletkenle mekanik olarak iyi birleşmelidir.

Kontakta düşen gerilimin kontakta geçen akıma oranı *omik kontak direnci* olarak tanımlanır.

$$R_{ok} = \frac{V}{I} \quad (2.3)$$

Kontak direnci ne kadar az ise kontak o kadar omiktir. Omik direnç kontak alanına bağlıdır. Deneysel çalışmalarda tam doğrusal akım-gerilim karakteristikli kontak yapmak zordur. Kontakta akım-gerilim karakteristiği olmazsa kontakta doğrultma derecesi akımın doğru ve ters yönlereki değerlerinin oranısıyla belirlenmektedir. (Şekil 2.3)



Şekil 2.3 Yaklaşık omik kontakların akım-gerilim karakteristiği (Caferov,1998)

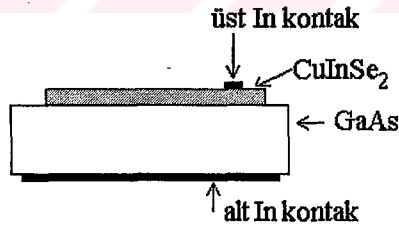
Bu akımların oranı kontakta doğrultma katsayısı olarak tanımlanır. İdeal omik kontakta doğrultma katsayısı 1'dir. Kontak için metalin seçiminde aşağıdaki koşullar sağlanmalıdır:

- a) n-tipi yarıiletken kullanılarak metalin çıkış işi yarıiletkenin çıkış işinden daha küçük olmalı; p-tipi yarıiletken için, metalin çıkış işi yarıiletkeninkinden daha büyük olmalıdır.
- b) n-tipi yarıiletken için kullanılan metal, bu yarıiletkenin donör özelliği göstermeli; p-tipi yarıiletken için kullanılan metal akseptör özelliği göstermelidir.

Kontaklar yapıldıktan sonra elektrik özellikleri incelenmelidir. Bunun için birkaç yöntem kullanılabilir. Metal–yarıiletken kontağın akım gerilim karakteristiği kontağın omikliğinin göstergesidir.

Eritme yöntemiyle yapılmış kontaklar omik karakteristikleri ve mekanik dayanıklılıkları yönünden en iyi kontaklardır. Bu yöntemle kurşun, indiyum, alüminyum, kalay ve altın alaşımları omik malzemeler olarak kullanılmaktadır. n-tipi yarıiletken omik kontak malzemesi gibi kullanılan alaşımın bileşiminde donör katkıları ve p-tipi yarıiletken için kullanılan alaşımlarda akseptör katkıları bulunmaktadır.

Deneylerde ölçümleri yapmak için CIS-GaAs heteroeklemlere her iki taraftan omik kontak yapıldı (Şekil 2.4). İndiyum omik kontak malzemesi olarak kullanıldı. CIS filmin buharlaştırılmasından önce GaAs altlığın bir yüzeyine eritme yöntemiyle omik kontak yapıldı. Daha sonra arka yüzeyine CIS filmi kaplandı (Bölüm 2.1) ve film yüzeyine indiyum omik kontak eritme yöntemiyle yapıldı. Bazı deneylerde ise In-Ga çözeltisi omik kontak malzemesi olarak kullanıldı. Kontakların omikliğini kontrol etmek için GaAs'ın bir yüzeyine iki noktasal omik kontak yapıldı, bu kontakların akım-gerilim karakteristiği incelendi ve akımın gerilimle değişiminin doğrusal (Ohm yasasına göre) olduğu gözlemlendi. Benzer şekilde CIS filmi üzerindeki iki noktasal kontağın omikliği kontrol edildi.



Şekil 2.4 CuInSe₂-GaAs heteroeklemin gösterimi

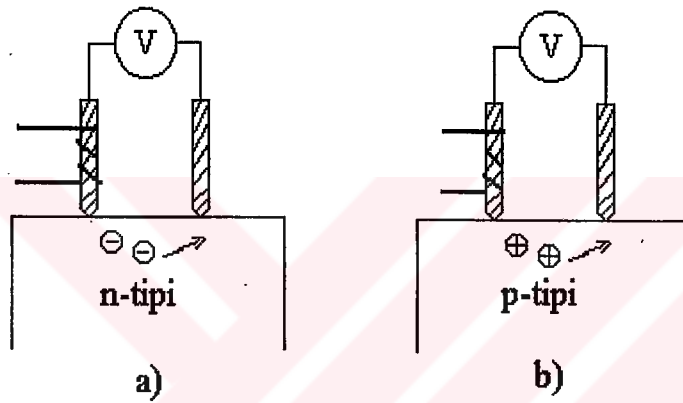
2.7 GaAs ve CuInSe₂'nin İletkenlik Tipinin Ölçülmesi

GaAs örneklerin iletkenlik tiplerini belirlemek için *termal elektro-motor kuvveti (TEMK)* yöntemi kullanıldı. Şekil 2.5 termal elektro-motor kuvveti yöntemiyle yarıiletkenin yük taşıyıcılarının tipini bulmak için kullanılan devreleri göstermektedir. Bu yöntemde kullanılan iki probdan biri (T_1) yaklaşık 200-300°C'ye kadar ısıtılır, ikinci probun sıcaklığı (T_2) oda sıcaklığında tutulur. n-tipi yarıiletken elektronlar daha sıcak probun civarından oda sıcaklığında tutulan probun yönünde hareketlenirler. Sonuçta daha sıcak probun civarındaki yarıiletken bölgesinin elektrik kutbu pozitifdir ve bu işaret devredeki voltmeter ile

kaydedilmektedir. p-tipi yarıiletkenlerde ise tersine, daha sıcak probun elektrik kutbu negatif olmaktadır.

Deneyisel ölçümlerde yarıiletken örneklerin iletkenlik tipini bulmak için öncelikle belirli tipe sahip yarıiletkenin TEMK ölçümü ile devredeki voltmetrenin kalibrasyonu yapılır ve sonra incelenen örneğin tipi belirlenir.

TEMK yöntemiyle düşük öz dirençli katkılı yarıiletkenlerin tipini belirlemek daha uygundur. Özden yarıiletkenlerin iletkenlik tipi daha yüksek mobilitesi olan yük taşıyıcılarının (elektronların) mobilitesi ile belirlenmektedir.



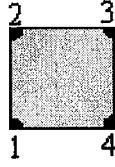
Şekil 2.5 TEMK yöntemiyle a) n-tipi, b) p-tipi yarıiletkenin iletkenlik tipi ölçüm devresi (Caferov,1998)

Bu çalışmada iletkenlik tipi ölçümleri TEMK yöntemiyle yapıldı. Sıcak prob yaklaşık 200°C, soğuk prob oda sıcaklığında tutuldu ve TEMK işaretini ölçmek için “Thurlby 1503 Digital Multimeter” voltmetre kullanıldı. Altlık olarak kullanılan GaAs’ın n-tipi ve CIS filmin p-tipi olduğu görüldü.

2.8 Öz direnç ve Yük Taşıyıcılarının Konsantrasyon Ölçümleri

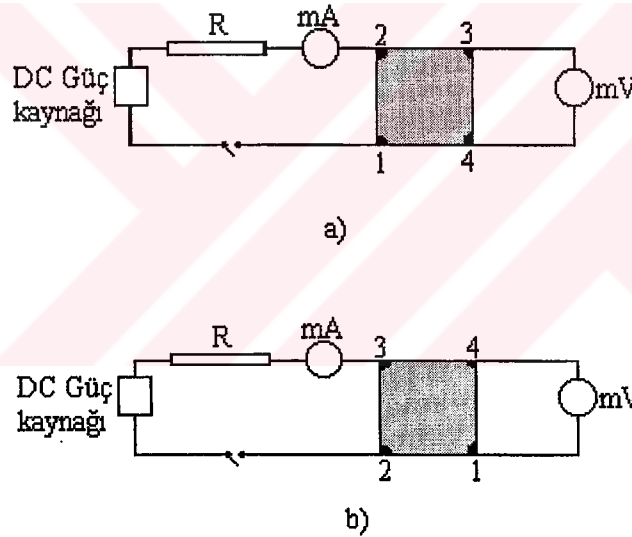
Öz direnç Ölçümleri:

Yarıiletken malzemelerin öz direnç ölçümleri için en çok “iki prob”, “dört prob” ve “Van der Pauw” yöntemleri kullanılmaktadır. Örnekten akım geçerken belirli bir bölgesinde elektrik potansiyel farkı ölçümleri bu yöntemlerin temelidir. Van der Pauw yönteminin kullanıldığı bu çalışmada kare şeklindeki (5,15mmx5,15mm boyutlarında ve d=390µm kalınlığında) GaAs yarıiletkenin köşelerine eşit uzaklıkta küçük alanlı noktasal omik kontaklar yapıldı (Şekil 2.6).



Şekil 2.6 Örneklerde kontaktların yerleşimi

Şekil 2.7’de Van der Pauw yöntemiyle öz direnç ölçümünde kullanılan devre görülmektedir. GaAs’ın öz direnç ölçümlerinde elektrik güç kaynağından akım, önce 1 ve 2 kontaktlarından geçirildi, 3 ve 4 kontaktları arasındaki gerilim voltmetre ile ölçüldü (Şekil 2.7 a). Ohm yasası kullanılarak (denklem (2.3)) $R_1=0,56 \Omega$ hesaplandı. Daha sonra 2 ve 3 kontaktlarından akım geçirildi, 1 ve 4 kontaktları arasındaki gerilim voltmetre ile ölçülerek $R_2= 0,46 \Omega$ hesaplandı (Şekil 2.7 b). Deneyde “Thurlby Thandar PL 320” güç kaynağı, akımı ve gerilimi ölçmek için “Thurlby 1503 Digital Multimeter” kullanıldı.

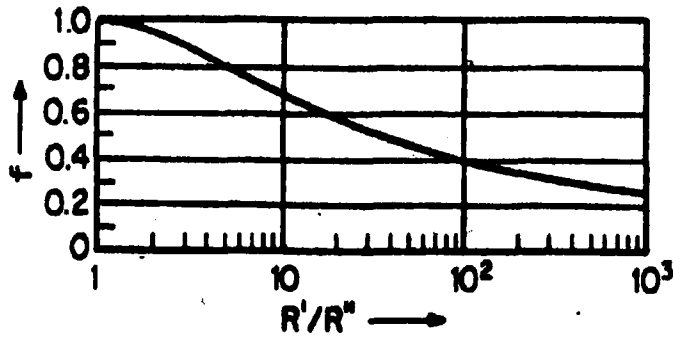


Şekil 2.7 Van der Pauw yöntemiyle ölçüm devresi a) R_1 b) R_2 dirençlerinin bulunması

Dirençin bu iki değeri

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \frac{R_1 + R_2}{2} f\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \quad (2.4)$$

denkleminde kullanılarak d örneğin kalınlığı (cm), R_1 ve R_2 dirençleri (Ω) biriminde alınarak n-tipi GaAs’ın öz direnci $\rho = 0,09 \Omega\text{cm}$ olarak hesaplandı. Bu denklemde $f\left(\frac{R_1}{R_2}\right)$ düzeltme fonksiyonudur, R_1 ve R_2 dirençlerinin oranı ile bağlı olan düzeltme fonksiyonunun grafiği Şekil 2.8’de gösterilmektedir. Bu ölçümlerde f ’nin değeri ($R_1/R_2=1,21$ için) yaklaşık birdir.



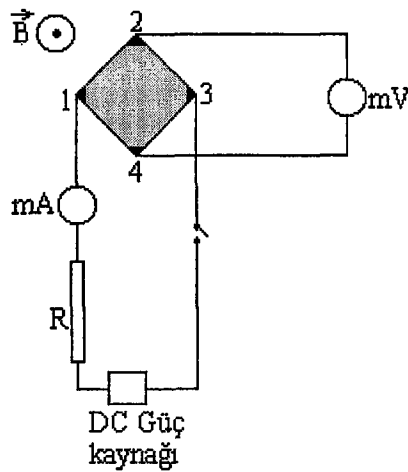
Şekil 2.8 Van der Pauw yöntemi için düzeltme fonksiyonunun R_1/R_2 'ye göre değişimi (Caferov,1998)

Hall ölçümleri

Hall olayından faydalanarak bir yarıiletkenin yük taşıyıcıları konsantrasyonunu bulmak mümkündür. Hall sabiti (R_H), yük taşıyıcılarının konsantrasyonunu (n veya p) ve işaretini belirlemektedir. Hall sabitinin Hall gerilimi ile bağıntısı

$$R_H = 10^8 \frac{V_H d}{IB} \quad (2.5)$$

ile verilir. Burada V_H gerilimi (mV), I akımı (mA), örneğin kalınlığı d (cm) ve manyetik alan B (gauss) birimlerindedir.



Şekil 2.9 Van der Pauw yöntemiyle Hall ölçümü

Şekil 2.9’da Hall ölçümü için kullanılan devre görülmektedir. Kare şeklindeki örneğin 1 ve 3 kontaklarından akım geçirilirken 2 ve 4 kontakları arasında Hall gerilimi ölçüldü. Hall gerilimini hatasız ölçmek için 2 ve 4 kontakları arasında oluşan parazit gerilimlerini ortadan kaldırmak gerekir. 2 ve 4 kontakları örneğin birbirine tam karşı noktalarına yerleşmediği zaman parazit gerilim oluşmaktadır. Örnek homojen değilse yine ek gerilim meydana gelebilir. Yük taşıyıcılarının hareketine bağlı parazit gerilimler de 2 ve 4 kontakları arasında oluşabilir. Parazit gerilimlerinin çoğunluğu elektrik akımının ve manyetik alanın yönüne bağlıdır, bu nedenle akımın ve manyetik alanın yönlerini değiştirmekle Hall gerilimine etki edebilen gerilimleri ortadan kaldırmak mümkündür.

GaAs ölçümlerinde deney düzeneğindeki manyetik alan $\vec{B} = 6400$ gauss olmak üzere iki akım yönü ve iki manyetik alan yönü için toplam dört kez ölçüm yapıldı ve $V_H(I^+, B^+)$, $V_H(I^-, B^+)$, $V_H(I^+, B^-)$, $V_H(I^-, B^-)$ değerleri bulundu. Sonuç olarak 2 ve 4 kontakları arasındaki hatasız Hall gerilimi değeri

$$V_H = [V_H(I^+, B^+) + V_H(I^-, B^+) + V_H(I^+, B^-) + V_H(I^-, B^-)]/4 \quad (2.6)$$

ifadesi ile bulundu ($V_H = 0,985$ mV). Bulunan değer (2.5) denkleminde kullanılarak Hall sabiti $R_H = 400 \text{ cm}^3/\text{c}$ olarak hesaplandı.

p-tipi bir yarıiletken için delik konsantrasyonu

$$p = \frac{1}{R_H e} \quad (2.7)$$

ve n-tipi bir yarıiletken için elektron konsantrasyonu

$$n = -\frac{1}{R_H e} \quad (2.8)$$

ile verilmektedir. Hall sabitinin işareti parçacıkların yüküne bağlıdır, elektronlar için işareti negatif, delikler içinse pozitifdir. n-tipi GaAs örnek için (2.8) denkleminde elde edilen

$$n = -\frac{1}{1,6 \times 10^{-19} R_H} = \frac{6,25 \times 10^{18}}{R_H} \quad (2.9)$$

bağıntısı kullanılarak elektron konsantrasyonu $n = 1,56 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulundu. Özdirenç ve taşıyıcı konsantrasyonu için aşağıdaki ifadeler kullanılarak

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.10)$$

$$\sigma = ne\mu \quad (2.11)$$

yük taşıyıcılarının Hall mobilitesi

$$\mu = \frac{R_H}{\rho} \quad (2.12)$$

ifadesi ile ($\rho = 0,09 \text{ } \Omega\text{cm}$ ve $R_H = 400 \text{ cm}^3/\text{c}$ için) $\mu = 4444 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ olarak bulundu.

2.9 Optik Geçirgenlik Ölçümleri

Optik geçirgenlik (T) ile optik soğurma katsayısı (α) arasındaki bağıntı

$$T = \frac{I}{I_0} = \frac{[(1-R)^2 \exp(-\alpha d)]}{[1-R^2 \exp(-2\alpha d)]} \quad (2.13)$$

ile verilir. Burada I_0 ve I sırasıyla filmin yüzeyine düşen ve filminden çıkan ışının şiddeti, R yansımaya katsayısı (GaAs için $R = 0,297$) ve d örneğin kalınlığıdır. Eğer $\alpha d > 1$ ise

$$T = (1 - R)^2 \exp(-\alpha d) \quad (2.14)$$

olarak yazılabilir. Bu ifadeden soğurma katsayısı

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{(1-R)^2}{T} \quad (2.15)$$

GaAs için $R = 0,297$ olduğundan $(1-R)^2 = 0,49$ olur ve (2.15) denklemi

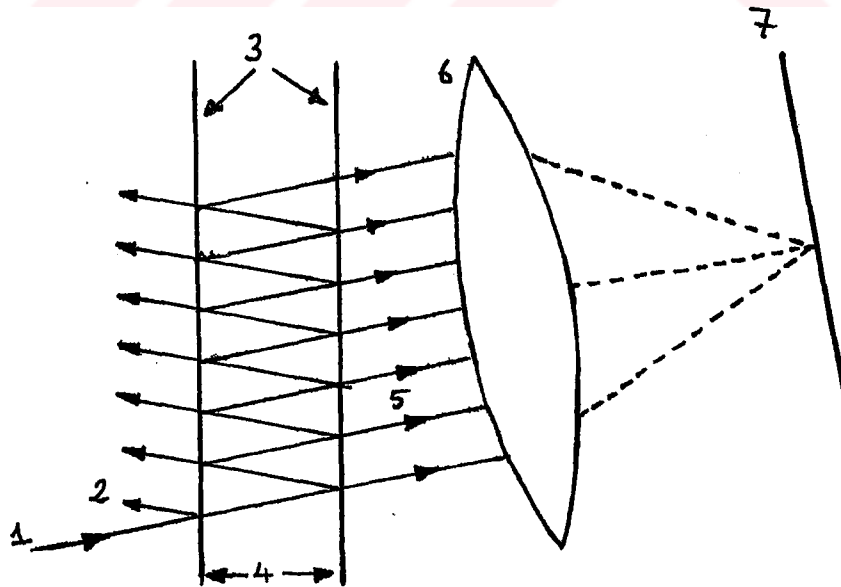
$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{0,49}{T} \quad (2.16)$$

olarak yazılabilir. Soğurma katsayısı-dalga boyu ($\alpha \cdot \lambda$) ya da soğurma katsayısı-fotonların enerjisi ($\alpha \cdot E$) eğrileri kullanılarak yarıiletkenin yasak band genişliğini bulmak mümkündür. Işığın dalga boyu (λ) ile fotonların enerjisi (E) arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir.

$$E(\text{eV}) = \frac{1,24}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (2.17)$$

Bu çalışmada optik spektrum ölçümleri, GaAs'ın yasak band genişliğini ve CIS, NaCl filmlerinin kalınlığını bulmak için kullanıldı. İlk olarak GaAs'ın optik spektrumunu incelemek için, kare şeklinde (5,15mmx5,15mm) ve kalınlığı 0,039 cm olan GaAs örnek her iki yüzeyi parlatılarak optik ölçümler için hazırlandı.

Örnek maskeye yerleştirilerek kısa dalgaboylarındaki ($\lambda=500-1000$ nm) optik geçirgenlik spektrumu "Perkin Elmer Lambda 2S" spektrometresi kullanılarak ölçüldü. Film kalınlığını bulmak için ince filmin iki paralel yüzeyinde yansıyan ışınların interferansı kullanılmıştır. İki yüzeyi birbirine paralel olan ince filmin içinde, ışınların çok sayılı yansımaları ve üst üste gelmeleri Şekil 2. 10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Paralel yüzeyli filmin içinde ışınların yansımasının gösterimi: 1- yüzeye düşen ışın, 2- yüzeyden yansıyan ışın, 3- filmin yüzeyleri, 4- filmin kalınlığı, 5- filmde çıkan ışınlar, 6- mercek, 7- interferans olayının gerçekleştiği lokal düzlem (Caferov,2000)

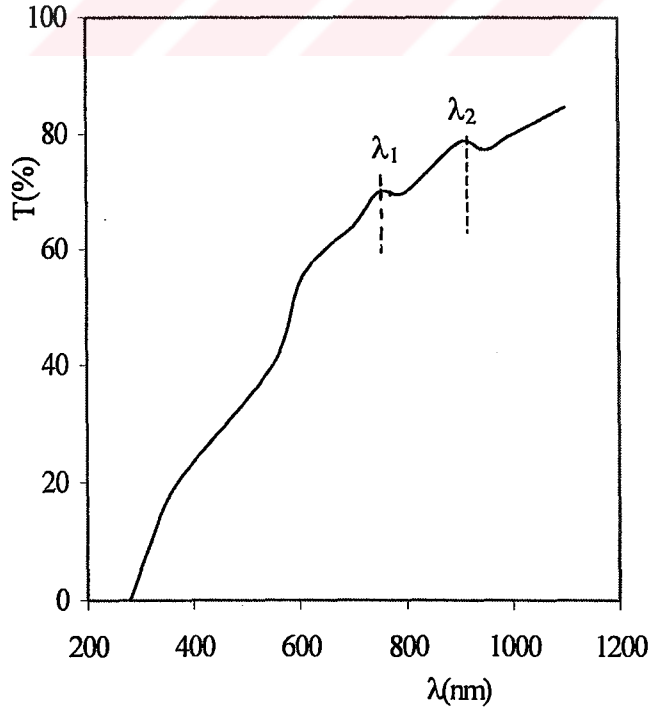
Filmin iki paralel yüzeyi arasında çok sayılı yansımalar meydana geldiği takdirde, filmin optik geçirgenliği (2.13) denklemi ile ifade edilir. Filmin yansıma katsayısı R ile kırılma indisi n arasındaki bağıntı

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (2.18)$$

ile verilir. Çok sayıdaki yansımadan sonra ince filmde çıkan ışınların interferans koşulu

$$\frac{1}{2nd} = \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \quad (2.19)$$

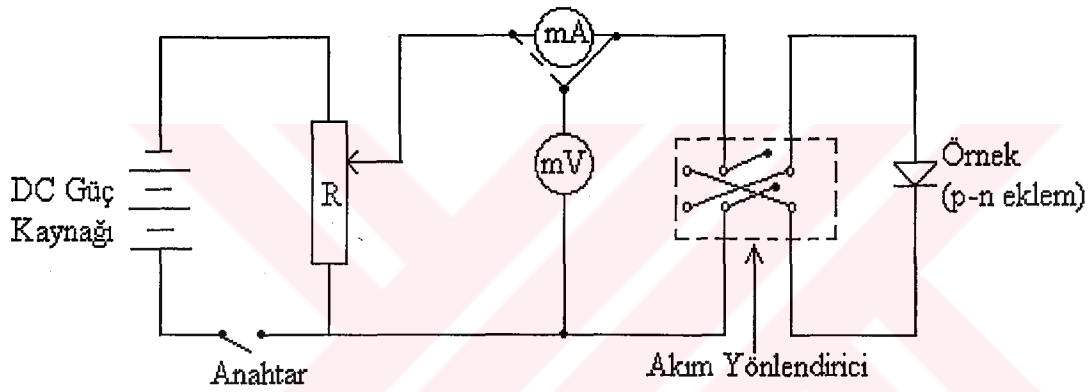
olarak ifade edilir. Burada λ_1 ve λ_2 filmin optik geçirgenlik interferans spektrumundaki iki komşu maksimum (veya minimum) noktanın dalga boyları, d filmin kalınlığıdır. Bölüm 2.2’de anlatılan cam altlığın üzerine NaCl ince film kaplandıktan sonra Şekil 2.11’de verilen geçirgenlik spektrumundaki iki komşu maksimum dalga boyları sırasıyla $\lambda_1=750$ nm ve $\lambda_2=890$ nm alınarak (2.19) denklemi yardımıyla ve NaCl kırılma indisi $n=1,54$ (Lide,1992) kullanılarak filmin kalınlığı $d=1,54$ μm olarak hesaplandı.



Şekil 2.11 Cam altlık üzerine kaplanmış NaCl ince filmin interferans geçirgenlik spektrumu

2.10 Akım-Gerilim Karakteristiklerinin Ölçümleri

Elde edilen CIS-GaAs yapıların elektriksel ölçümlerinde alt ve üst yüzeylere In kontak (Bölüm 2.6) yapıldıktan sonra örnek bakır bir tabaka üzerine oturtuldu ve üst kontak üzerine sabit bir fosfor bronz metali ile bastırıldı. Bu iki kontak arasındaki akım-gerilim karakteristikleri oda sıcaklığında, karanlıkta ve 50Watt'lık tungsten lamba ile (örneğin üzerine düşen ışık şiddeti yaklaşık $P=100\text{mW/cm}^2$) aydınlıkta ölçüldü. Akım-gerilim karakteristiklerinin elde edilmesinde kullanılan devrenin şeması Şekil 2.12'de gösterilmektedir. Bu deneylerde akım ve gerilim ölçeri olarak yine "Thurlby 1503 Digital Multimeter" ler kullanıldı.



Şekil 2.12 Akım-gerilim karakteristiğinin ölçüm devresi

2.11 Pillerin Fotovoltaik Parametrelerinin Belirlenmesi

Ölçülen akım-gerilim karakteristiklerinden Bölüm 1.8'de verildiği gibi Şekil 1.16'daki (2) aydınlık eğrisinin gerilim eksenini kestiği nokta pilin açık devre gerilimi V_{oc} ,

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_L}{I_o} + 1 \right) \quad (2.20)$$

akım eksenini kestiği nokta kısa devre akımı I_{sc} parametresini vermektedir. Eğri altında kalan dördüncü bölgede çizilen maksimum alandan fill faktörü FF

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.21)$$

pile düşen ışık şiddetinin gücü P olmak üzere pilin verimi η

$$\eta = \frac{V_{oc} I_{sc}}{P} FF = \frac{V_m I_m}{P} \quad (2.22)$$

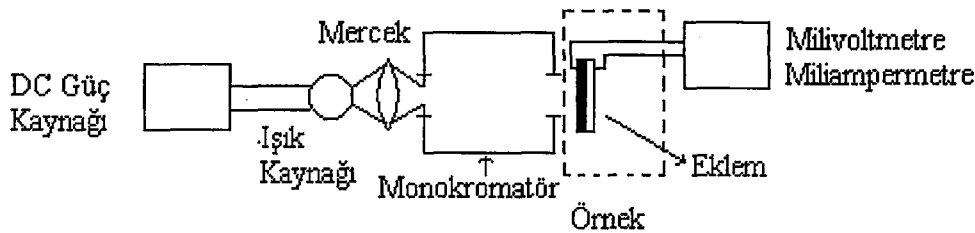
ifadeleri ile bulunur. (2.21) ve (2.22) denklemleri kullanılarak CIS-GaAs pilin fill faktörü ve verimi belirlenmiştir. Pilin açık devre gerilim V_{oc} ve kısa devre akım yoğunluğu J_{sc} aydınlık akım-gerilim karakteristiğinin sırasıyla x ve y eksenlerini kestiği noktaların değerleridir (Şekil 1.16).

2.12 Kapasitans-Gerilim Karakteristikleri

CIS-GaAs yapıların kapasitans-gerilim ölçümlerinde ($f=3-5\text{MHz}$ için) “Hewlett Packard Impedance Analyzer” kullanıldı. Elde edilen C-V eğrilerinden (1.11) denklemi kullanılarak p-n eklemının genişliği bulundu. Bu ifadede boşluğun elektrik sabiti $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ ve GaAs dielektrik katsayısı $\epsilon = 10,9$ olarak kullanıldı. Çizilen $1/C^2-V$ eğrilerinden (1.15) denklemiyle yük taşıyıcılarının konsantrasyonu hesaplandı.

2.13 Fotoduyarlılığının Spektral Dağılım Ölçümleri

Pillerin fotoduyarlılığının spektral dağılım ölçümleri oda sıcaklığında $\lambda = 300-1000 \text{ nm}$ dalga boyu aralığında incelendi. Şekil 2.13 ölçüm devresini göstermektedir. Devrede “Oriel” marka monokromatör kullanıldı. “Osram” lambasından saçılan ışık mercekle monokromatörün girişine odaklanmakta ve monokromatörden çıkan monokromatik ışık demeti örneklerin CIS ince film olan yüzeylerine düşürülmektedir. Farklı dalga boylu ışığın etkisiyle oluşan fotoakım veya fotogerilim, miliampermetre veya milivoltmetre ile ölçüldü. Bu ölçümlerden örneğin fotogerilim-dalga boyu spektrumları elde edildi. Fotoduyarlılık spektrumlarından pilin spektral duyarlılık bölgesi bulundu.



Şekil 2.13 Fotoduyarlılığın spektral ölçüm devresi

3.BULGULAR

3.1 GaAs ve CIS Yarıiletkenlerin Elektrik Parametreleri

Tek kristal GaAs örneklerin ve CIS polikristal filmlerin elektrik özelliklerini incelenmek için termal elektromotor kuvveti (TEMK) yöntemi, öz direnç ve Hall olayı ölçümleri kullanıldı (Bölüm 2.7, 2.8). Altlık olarak kullanılan GaAs örnekler n-tipi iletkenliğe, CIS filmlerin ise p-tipi iletkenliğe sahip oldukları bulundu.

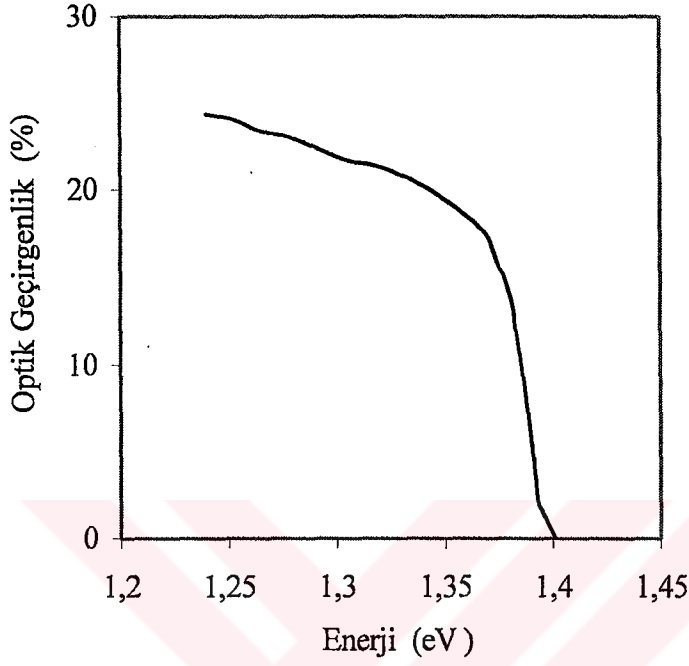
Öz direnç ve yük taşıyıcılarının konsantrasyonu ölçümlerinde Van der Pauw yöntemi kullanıldı (Bölüm 2.8). Kare şeklinde ve kalınlığı $d=0,039$ cm olan GaAs örneğin öz direnci (2.4) formülü kullanılarak $\rho= 0,09 \Omega\text{cm}$ olarak elde edildi. GaAs örneklerde elektron konsantrasyonu (2.9) formülü kullanılarak $n= 1,6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplandı (Bölüm 2.8). Elde edilen öz direnç ve yük taşıyıcı konsantrasyonu değerleri (2.12) denklemlerinde kullanılarak örneğin elektron mobilitesi $\mu= 4444 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ olarak bulundu.

CIS filmlerin elektrik özelliklerini belirlemek için cam altlığın üzerine CuInSe₂ filmi kaplandı ve filmin dört köşesine In-Ga omik kontak yapıldı (Şekil 2.6). CIS filmlerin Van der Pauw yöntemiyle öz direnci $\rho=650 \Omega\text{cm}$ ve deliklerin konsantrasyonu $p=1,8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulundu.

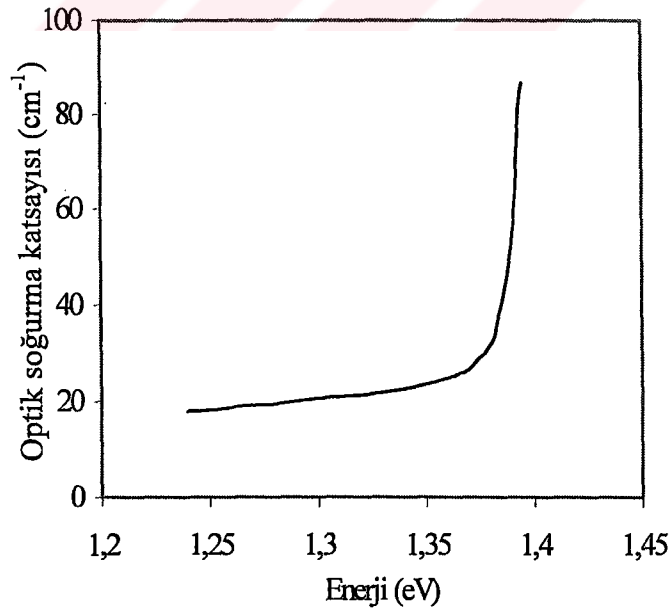
3.2 GaAs Altlıklarının Optik Soğurma Spektrumları

GaAs örneklerin optik geçirgenliği ve yasak band genişliği hakkında bilgiler elde etmek için örneklerin optik geçirgenlik spektrumları $\lambda= 500-1000 \text{ nm}$ aralığında “Perkin Elmer Lambda 2S” spektrometresi kullanılarak ölçüldü. Ölçümler oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Şekil 3.1’de GaAs’ın optik geçirgenlik spektrumu gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi fotonların enerjisi $E<1,4 \text{ eV}$ olduğunda GaAs’da optik geçirgenlik gözlenmektedir. (2.16) formülü kullanılarak ve GaAs için optik yansıma katsayısı $\lambda=0,5-2 \mu\text{m}$ aralığı için $R= 0,297$ alınarak (Caferov,1998) GaAs optik soğurma katsayısının fotonların enerjisi ile değişimi elde edildi (Şekil 3.2). Şekilde görüldüğü gibi $E>1,38 \text{ eV}$ fotonlar için soğurma katsayısı keskin şekilde artmaktadır. Fotonların bu sınır değeri GaAs’ın yasak band genişliğine yaklaşık olarak eşittir.

Elde edilen GaAs'ın yasak band genişliğinin ($E_g \cong 1,38$ eV) Çizelge 1.2'de verilen değerden sapmasını bu çalışmada kullanılan örneklerin kalınlığı ile yorumlamak mümkündür ($d=390$ μm). Yasak bandın daha duyarlı ölçümleri için daha ince kalınlıkta GaAs örneklerin kullanılması gerekmektedir.

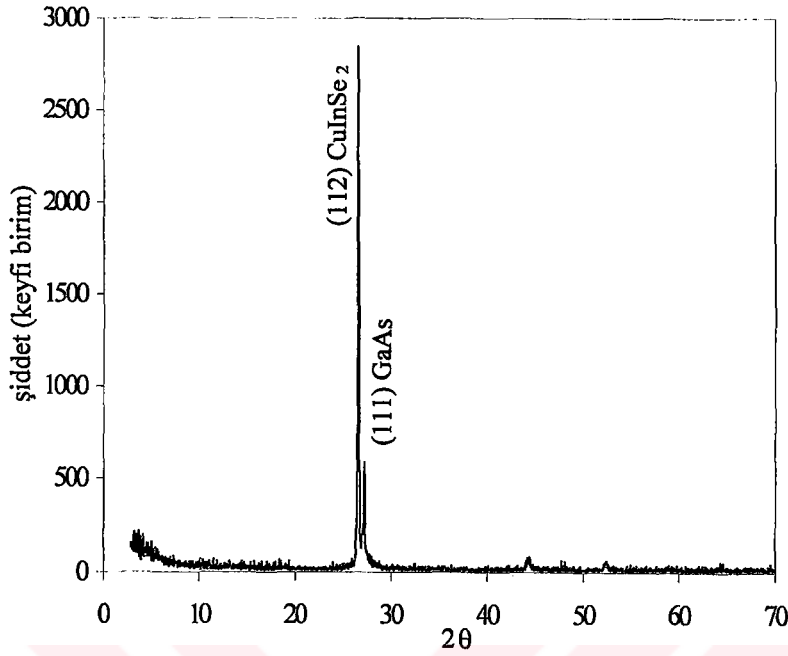


Şekil 3.1 Temiz GaAs örneğin optik geçirgenlik spektrumu



Şekil 3.2 Temiz GaAs örneğin optik soğurma spektrumu

3.3 CIS-GaAs Heteroeklemlerin X-ışınları Kırınım Desenlerinin İncelenmesi



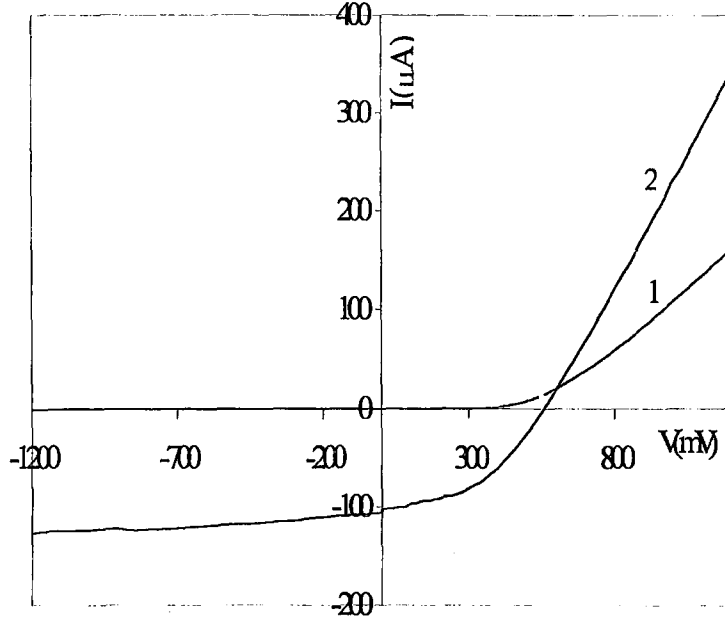
Şekil 3.3 CIS-GaAs eklemlerin x-ışını kırınım desenleri

X-ışınları kırınım desenlerinin ölçümleri için CIS-GaAs heteroeklemi, ölçüm setine ışınlar film yüzeyine düşecek şekilde yerleştirildi. $3^\circ \geq 2\theta \geq 70^\circ$ aralığı için $3^\circ/\text{dak}$ tarama hızıyla spektrum ölçüldü. Şekil 3.3'de CIS-GaAs heteroeklemin x-ışınları kırınım deseni gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi (111) GaAs ve (112) CuInSe₂ dışındaki piklerin şiddeti dikkate alınmayacak derecede düşüktür. Bunun nedeni, (111) yönlü GaAs'ın yüzeyindeki atomlar (112) yönlü CuInSe₂ düzlemindeki atomlarla aynı dizilişe sahiptirler. Başka bir deyişle (111) GaAs tek kristal altlığı (112) CuInSe₂ filmindeki atomların dizilişlerini yönlendirmektedir. (2.2) formülü kullanılarak örgü parametreleri, GaAs için $a=5,66 \text{ \AA}$ ve CIS için $a=b=5,786 \text{ \AA}$; $c=11,572 \text{ \AA}$ bulundu.

Film yüzeylerinin morfolojisi optik mikroskopta (Olympus TOKYO, 210285) ve taramalı elektron mikroskopta (JEOL JSM 6400*) incelenmesi polikristal yapıya sahip ve tane boyutlarının yaklaşık $1 \mu\text{m}$ olduğunu göstermiştir.

* Bu ölçümler Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü Katıhal Laboratuvarında yapılmıştır.

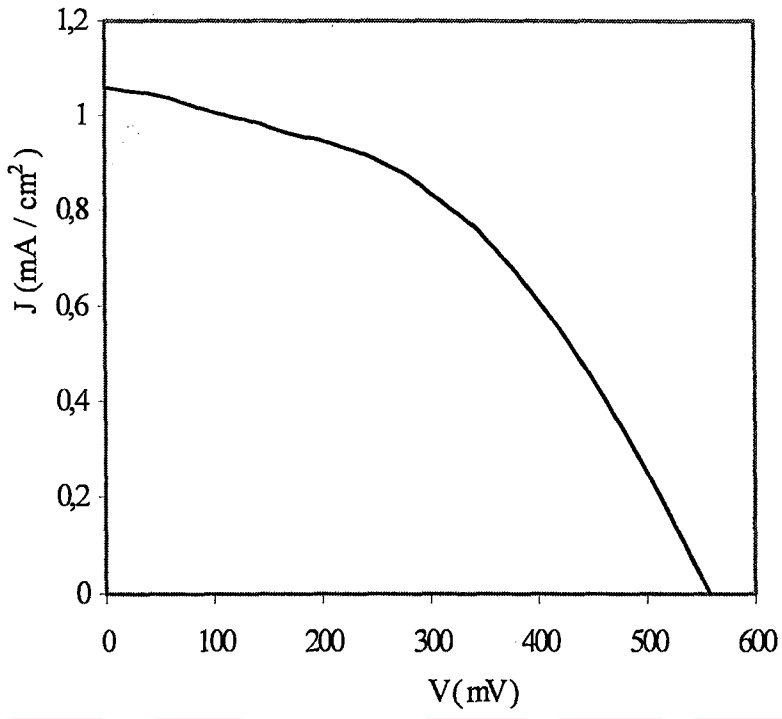
3.4 CIS-GaAs Eklemlerin Akım-Gerilim ve Kapasitans-Gerilim Karakteristikleri



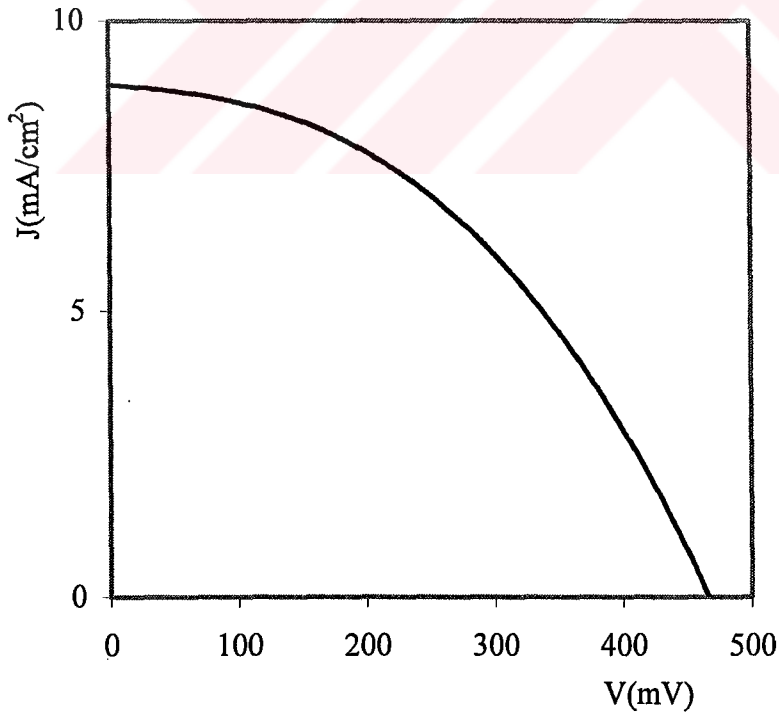
Şekil 3.4 CIS-GaAs heteroekleminin akım-gerilim karakteristikleri (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta

Şekil 3.4’de CIS-GaAs eklem (d=1 μ m CIS için) akım-gerilim karakteristiği gösterilmektedir. Akım-gerilim karakteristiğinin doğru yönü, pCIS filmine pozitif gerilim uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Eklem karanlıktaki akım-gerilim karakteristiği (1 eğrisi) doğrultucu özellik göstermektedir ve doğrultma katsayısı $K=380$ ’dir ($V=1,2$ volt). Eklem doğru yönde akım-gerilim karakteristiği (1.5) denklemi ile ifade olunur ve ideallik faktörü $A=2,7$ olarak hesaplanmıştır. Bu ideallik faktörüne göre, heteroeklemdeki doğru akımın mekanizması yük taşıyıcılarının termiyon emisyon ve rekombinasyon olayları ile belirlenir.

Şekil 3.4’deki aydınlık akım-gerilim karakteristiğinin koordinat sisteminin dördüncü bölgesi Şekil 3.5’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi pilin fotoelektrik parametreleri $V_{oc}=550$ mV, $J_{sc}=1,1$ mA/cm²’dir.



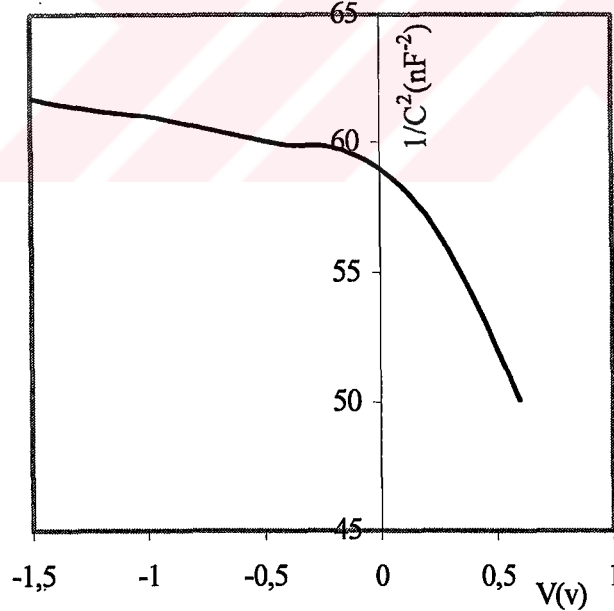
Şekil 3.5 CIS-GaAs heteroeklemin (film kalınlığı 1 μm) fotoakım yoğunluğu-gerilim eğrisi



Şekil 3. 6 CIS-GaAs heteroeklemin (film kalınlığı 0,5 μm) fotoakım yoğunluğu-gerilim eğrisi

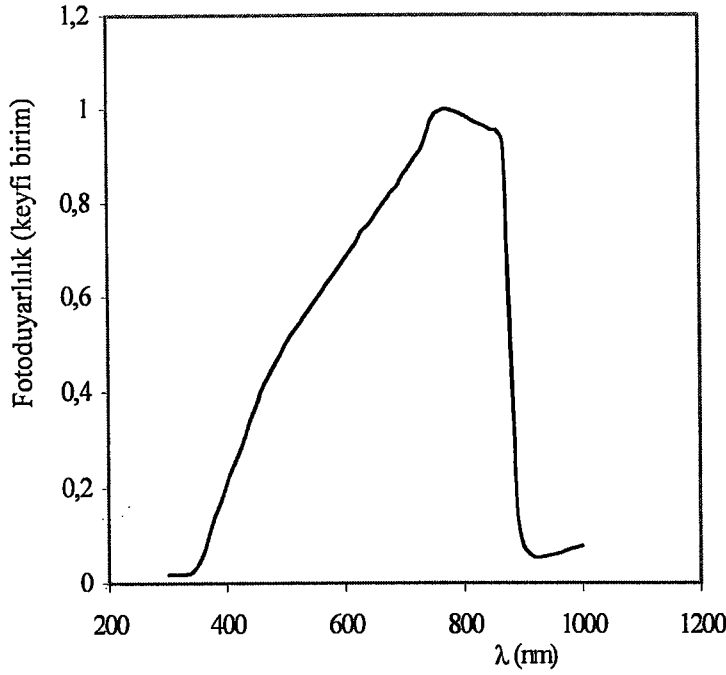
Başka bir pilin ($d=0,5 \mu\text{m}$ CIS için) aydınlıkta akım-gerilim karakteristiği şekil 3.6 ile gösterilmektedir. Bu pilin fotovoltaiik parametreleri $V_{oc}=467 \text{ mV}$, $J_{sc}=8,9 \text{ mA/cm}^2$ 'dir, Şekil 3.6 eğrisinden (1.9) denklemi kullanılarak fill faktörü $FF=0,44$ olarak hesaplandı. Şekil 3.5 ve 3.6'daki fotovoltaiik karakteristikleri karşılaştırsak CIS film kalınlığı $1 \mu\text{m}$ 'den $0,5 \mu\text{m}$ 'ye azaldığı zaman fotopilin karakteristiklerinin iyileştiğini görürüz.

CIS-GaAs ekleminin (film kalınlığı $1 \mu\text{m}$) karanlıktaki kapasitans-gerilim karakteristiği Şekil 3.7'de verilmektedir. Şekilden (1.15) formülü kullanılarak eklemin GaAs tarafındaki yük taşıyıcılarının konsantrasyonu $p=5,6 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulundu (Çizelge 3.1). Bu değer temiz GaAs altlıktaki Hall ölçümlerinden bulunan elektron konsantrasyonu $n=1,6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ile karşılaştırıldı. Temiz GaAs altlıktaki ve heteroeklemin GaAs tarafındaki yük taşıyıcılarının konsantrasyonlarının farkı, bakırın CIS filminden GaAs yönünde difüzyonu ile yorumlanabilir. Bölüm 2.1'de sözedildiği gibi CIS filminin GaAs altlık yüzeyine kaplanması yaklaşık 520°C 'da gerçekleşmektedir. Bu sıcaklıkta bakırın difüzyonu filmde GaAs altlığa doğrudur. Bu olayı araştırmak için, CIS-GaAs heteroeklemin GaAs altlığında bakırın konsantrasyon dağılımı incelenmiştir (Bölüm 3.6).



Şekil 3.7 CIS-GaAs heteroeklemin kapasitans-gerilim karakteristiği ($f=3\text{MHz}$)

3.5 CIS-GaAs Heteroeklemlerin Fotoduyarlılık Spektrumları

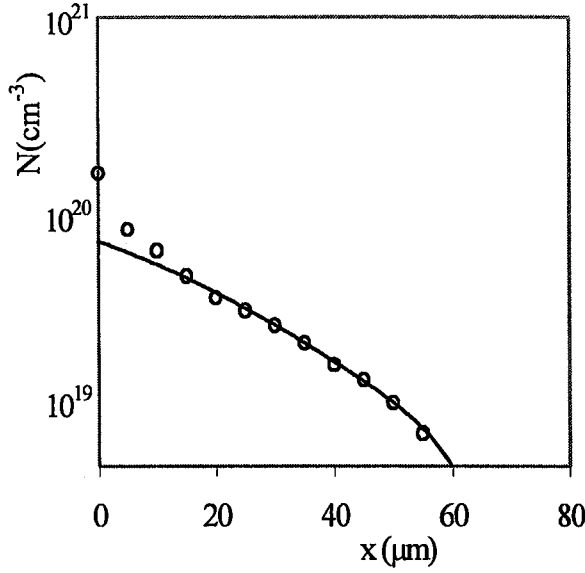


Şekil 3.8 CIS-GaAs heteroeklemin fotoduyarlılık spektral dağılımı

Eklemlerin fotoduyarlılık spektrumları $\lambda=300-1000 \text{ nm}$ dalga boyu aralığında incelendi ve aynı bölgede duyarlılık gözlemlendi (Şekil 3.8). Spektrumun $\lambda>0,9 \text{ }\mu\text{m}$ bölgesinde fotoduyarlılığın düşük olmasını CIS polikristal filmdeki ve sınır bölgedeki tuzaklar rolünü oynayan örgü kusurlarıyla yorumlamak mümkündür. Böylece Şekil 3.8'den görüldüğü gibi CIS-GaAs pili 350-1000 nm aralığında ışığa duyarlıdır.

3.6 Bakırın CIS Filminden GaAs Altığa Difüzyonu

Bakır GaAs'da yüksek difüzyon katsayısına sahiptir ve bu nedenle bakırın CIS filminin büyütülmesi sırasında GaAs'da yayılmasının CIS-GaAs fotopillerinin özelliklerinde köklü değişiklikler meydana getirdiği bilinmektedir. Bu çalışmada, CIS-GaAs eklemlerinin hazırlanma sürecinde bakırın GaAs altığa difüzyonu x-ışınları floresans (XIF) yöntemi ile incelendi (Dzhafarov, 2000). Bakır konsantrasyonunun GaAs'da difüzyon dağılımı, ince filmlerin ardışık çıkarılması ile ve 8.04 keV'lik CuK_α x-ışın. floresans pikinin şiddetini ölçerek analiz edildi (Bölüm 2.5).



Şekil 3.9 Bakırın GaAs altlıkta konsantrasyon dağılımı ($T=520^{\circ}\text{C}$)

Şekil 3.9, XIF yöntemiyle bakır atomlarının konsantrasyon dağılımının GaAs altlığın kalınlığı boyunca değişimini göstermektedir, sürekli çizgi ise (3.1) eşitliği ile verilen teorik eğridir. Bakır atomlarının GaAs'ın kalınlığı boyunca dağılım profili Bölüm 1.11.3'de anlatıldığı gibi Fick denklemi ile, katkılarının sabit konsantrasyonlu kaynaktan yarı-sonsuz boyutlu katıya difüzyonu için tanımlanmıştır.

$$N(x,t) = N_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (3.1)$$

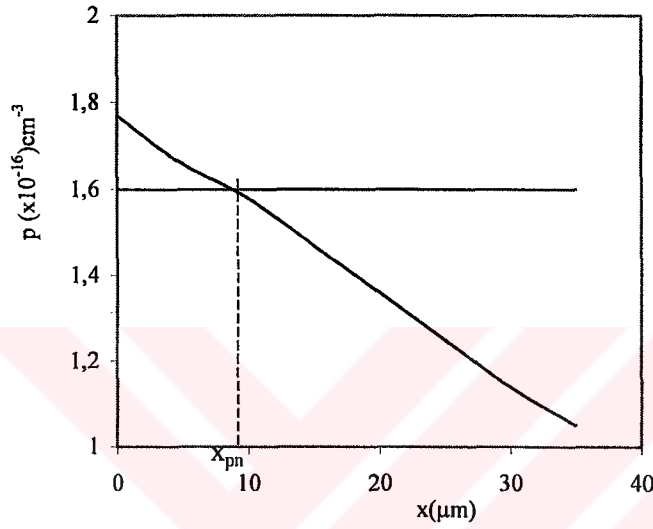
Bu denklemde $N_0=N(0,t)$ altlığın yüzeyindeki bakırın konsantrasyonu, D difüzyon katsayısı, t difüzyon süresi, $\operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{Dt}})$ hata fonksiyonudur. Bakır konsantrasyonunun deneysel verileri difüzyon katsayısı yaklaşık $D=1.2 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ ($T=520^{\circ}$) olmak üzere teorik (3.1) denklemi ile uyumludur.

GaAs altlığın iletkenlik tipinin GaAs'dan ince filmlerin seri olarak çıkarılması TEMK yoluyla ölçümleri, GaAs'ın yakın yüzey bölgesinde (5-8 μm kalınlıkta) p tipi bir katmanın oluştuğunu, yani CuInSe_2 'den bakır atomlarının, GaAs'a yayılması yakın ara yüzey bölgesinde bir p-n homoeklemin meydana geldiğini göstermiştir.

GaAs'da akseptör tipli olan bakırın CIS filmden GaAs'a difüzyonu ile altlıkta oluşan deliklerin konsantrasyon dağılımını hesaplamak için aşağıdaki formül kullanıldı.

$$p = \sqrt{N_{cu} N_v} \exp\left(\frac{\Delta E_a}{2kT}\right) \quad (3.2)$$

Burada N_{cu} bakır konsantrasyonu, N_v valans bandındaki deliklerin etkin durum yoğunluğu ($7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), ΔE_a bakır atomlarının GaAs'da iyonlaşma enerjisidir (0,38 eV). Bu değerlerle Şekil 3.9'daki bakır konsantrasyonunun değerleri kullanılarak deliklerin GaAs'da konsantrasyon dağılımı hesaplandı (Şekil 3.10)

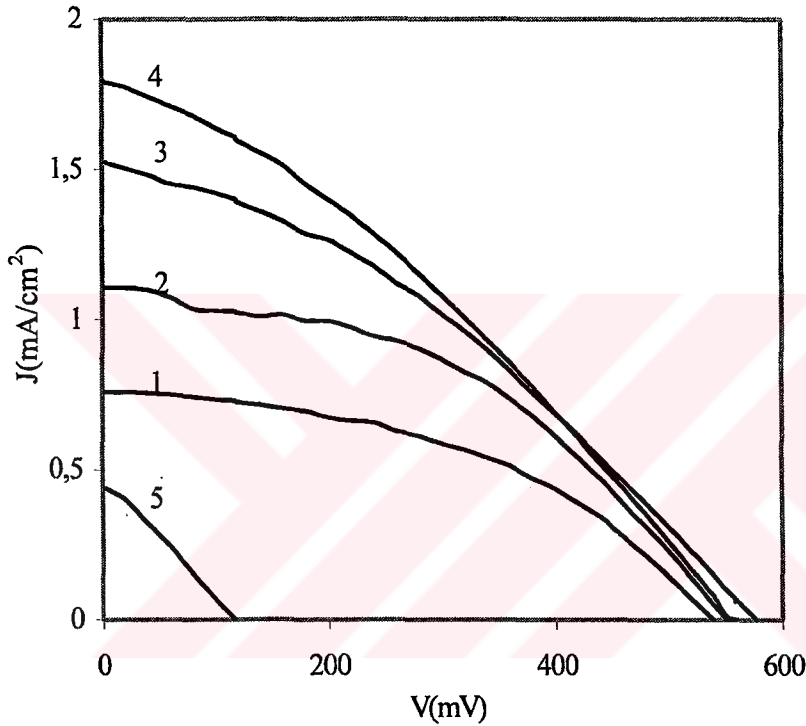


Şekil 3.10 GaAs'daki delik konsantrasyonunun kalınlıkla değişimi

Şekilden görüldüğü gibi deliklerin konsantrasyonu bakır atomlarının konsantrasyonundan yaklaşık 5×10^3 kat daha azdır. n-tipi GaAs altlıkta elektron konsantrasyonu $n = 1,6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olduğunda Şekil 3.10'den elde ettiğimiz p-n eklem derinliği (p=n noktası) yaklaşık 8 μm'dir. Şekil 3.10'den elde edilen bu değer, deneysel TEMK yöntemiyle bulunan GaAs'daki p-tipi bölgenin kalınlığına yaklaşık olarak eşittir. Böylece CIS-GaAs heteroeklemlerin elde edilme sürecinde bakırın CIS filminden n-tipi GaAs'a difüzyonu sonucunda GaAs'da yaklaşık $x = 8 \text{ μm}$ kalınlıkta p-n homoekelem meydana gelmektedir ve oluşturulan yapı iki seri birleşmiş pCIS-pGaAs-nGaAs eklemlerden oluşmaktadır.

3.7 CIS Film Kalınlığının CIS-GaAs Pillerinin Elektrik ve Fotovoltaik Özelliklerine Etkisi

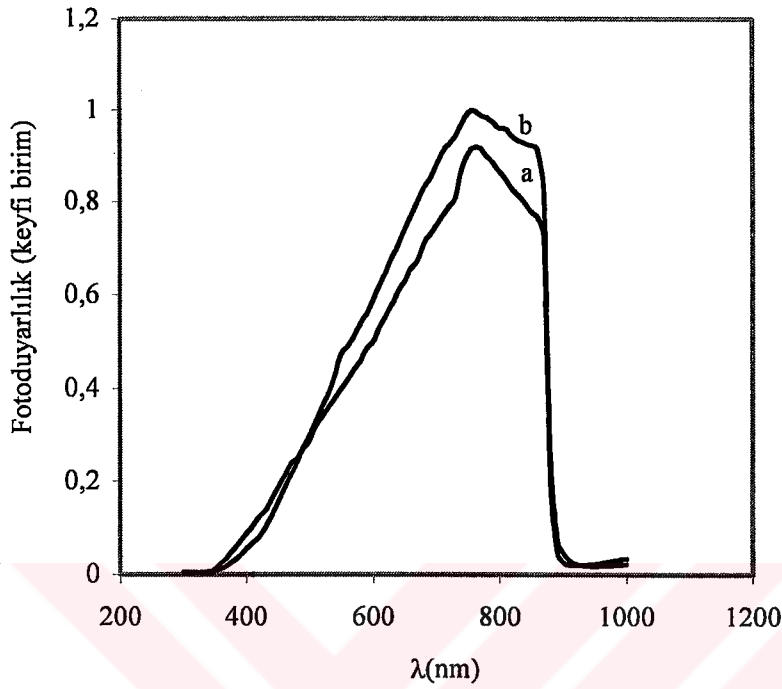
CIS-GaAs kalınlığının heteropillerin fotovoltaik parametrelerine etkisini incelemek için örnekler önce 230°C'da 10 dakika tavlandı. Daha sonra CIS filmlerden seri olarak parlatma yöntemi ile ince tabakalar (yaklaşık 0,25 μm 'lik) çıkarıldı. Herbir çıkarmadan sonra CIS filmin yüzeyine omik kontak yapıldı ve pillerin elektrik ve fotovoltaik karakteristikleri ölçüldü.



Şekil 3.11 CIS-GaAs heteroeklemin fotoakım yoğunluğu-gerilim karakteristikleri: (1) film çıkarmadan önce, (2) 1.çıkarma, (3) 2.çıkarma,(4) 3.çıkarma, (5) 4.çıkarma (film yok)

Şekil 3.11'de pilden ince filmler çıkardıkça fotovoltaik karakteristiğinin değişimi gösterilmektedir. Pilen bu eğrilerden elde edilen fotovoltaik parametreleri (J_{sc} , V_{oc}) Çizelge 3.1'de verilmektedir. Şekil 3.11 ve Çizelge 3.1'den görüldüğü gibi CIS filmin kalınlığı azaldıkça kısa devre akım yoğunluğu 2,3 kat ($0,77 \text{ mA/cm}^2$ 'den $1,81 \text{ mA/cm}^2$ kadar), açık devre gerilimi (511 mV'dan 580 mV kadar) artmaktadır. Bununla beraber Şekil 3.11 (5) eğrisinde CIS filmin tamamı GaAs altlıktan çıkarıldıktan sonra altlıkta p-n homoekekleme oluşan fotoduyarlılık gözükmemektedir ($J_{sc}=0,44 \text{ mA/cm}^2$, $V_{oc}=111,7 \text{ mV}$). Bu ölçümler bakırın CIS filminden GaAs altlığına difüzyonu ile GaAs altlıkta p-n eklem oluştuğunu kanıtlamaktadır.

Kapasitans-gerilim karakteristiklerinden $V=0$ gerilimde elde edilen eklem kalınlığı yaklaşık $1,5\text{-}2\text{ }\mu\text{m}$ aralığında değişmektedir (Çizelge 3.1). Bununla birlikte ekleminden film çıkarttıkça fotoduyarlılığın arttığı gözlenmiştir (Şekil 3.12).



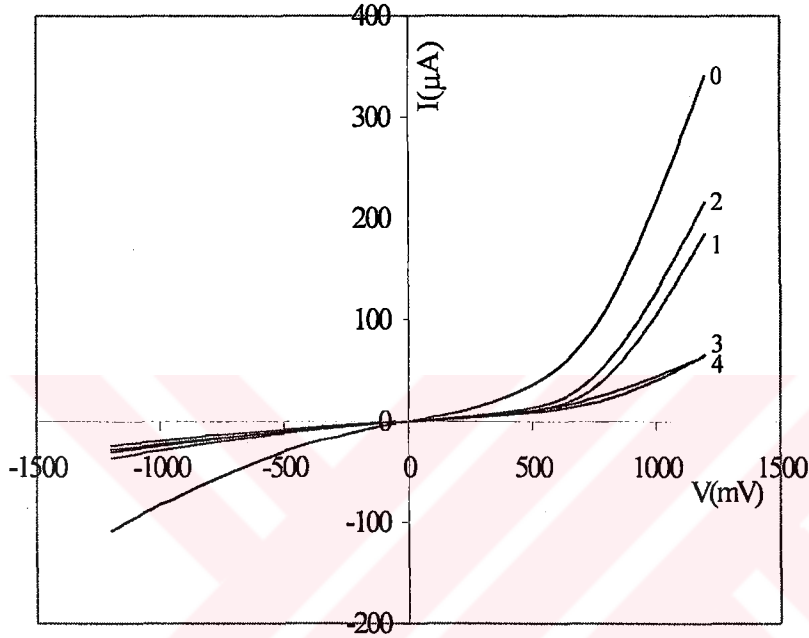
Şekil 3.12 CIS-GaAs heteroekleminin fotoduyarlılığının spektral dağılımları: (a) film çıkarmadan önce, (b) CIS filminden $0,5\text{ }\mu\text{m}$ 'lik tabaka çıkarmadan sonra

Çizelge 3.1 Tavlandıktan ve seri olarak film çıkarıldıktan sonra örneğin elektriksel özellikleri

No	Uygulanan işlemler	Eklem Kalınlığı $d(\mu\text{m})$	Fotovoltaik parametreler		Yük taşıyıcıların konsantrasyonu $n(\text{cm}^{-3})$
			$V_{oc}(\text{mV})$	$J_{sc}(\text{mA}/\text{cm}^2)$	
1	Tavlama ($T=230^\circ\text{C}$, $t=10\text{dak}$)	1,49	551	0,77	$5,7 \times 10^{12}$
2	1.çıkarma	1,48	567	1,08	$5,8 \times 10^{12}$
3	2.çıkarma	1,95	570	1,55	$6,6 \times 10^{12}$
4	3.çıkarma	1,82	580	1,81	$6,2 \times 10^{12}$
5	4.çıkarma	2,18	111,7	0,44	—

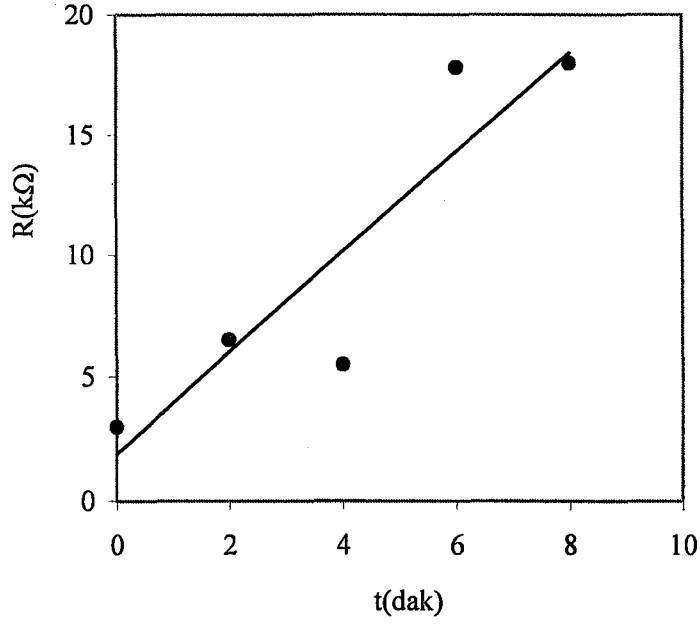
3.8 Termal Tavlamanın CIS-GaAs Heteroeklemlerin Karakteristiklerine Etkisi

Havadaki tavlamanın pillerin elektrik ve fotovoltatik karakteristiklerine etkisini incelemek için örnekler 220°C'da karanlıkta seri olarak ikişer dakika tavlandı ve her bir tavlama işleminden sonra örneğin akım-gerilim karakteristiği, kapasitans-gerilim karakteristiği ve fotovoltatik parametreleri ölçüldü.

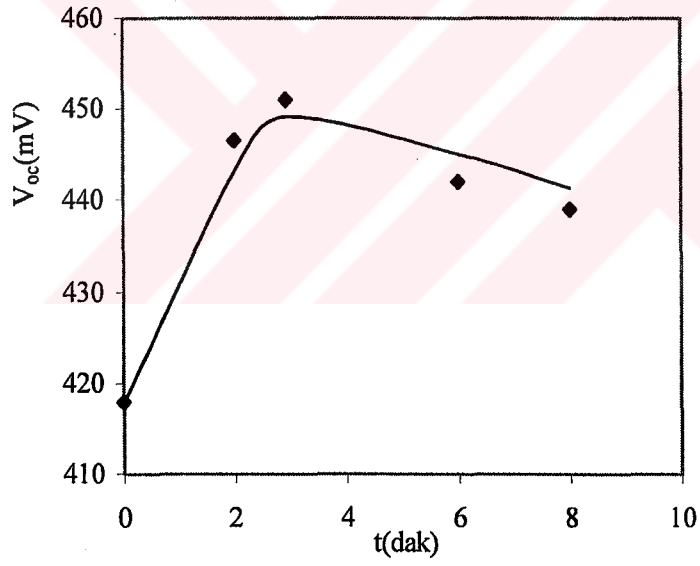


Şekil 3.13 CIS-GaAs heteroekleminin karanlıkta akım-gerilim karakteristiğinin 220°C'da tavlama işlemleriyle değişimi (0) tavlamadan önce, (1) 1.tavlama, (2) 2.tavlama, (3) 3.tavlama, (4) 4.tavlama

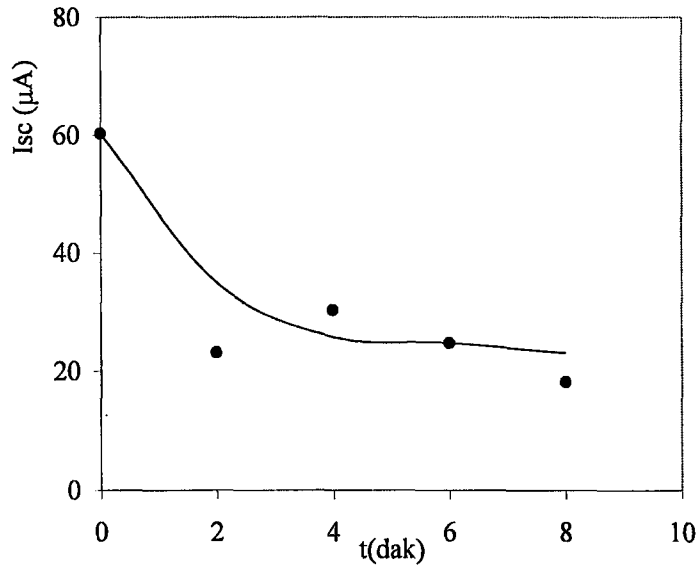
Bu deneylerin sonuçları Şekil 3.13'de verilen karanlık akım-gerilim karakteristikleri ile gösterilmektedir. Şekil 3.13'deki akım-gerilim karakteristiklerinden (doğru yön) hesaplanan CIS-GaAs yapı seri direncinin tavlama süresiyle değişimi Şekil 3.14'de verilmiştir. Görüldüğü gibi 8 dakika tavlama sürecinde yapının seri direnci 3 kΩ'dan 18kΩ'a kadar artmaktadır. Aydınlıktaki akım-gerilim karakteristiklerinden elde edilen eklemlerin fotovoltatik parametreleri Şekil 3.15 ve 3.16'de gösterilmektedir. Açık devre gerilimi 4 dakika tavlama sürecinde artmaktadır (Şekil 3.15), kısa devre akımı ise aynı süre içinde azalmaktadır (Şekil 3.16). Bu V_{oc} ve I_{sc} parametrelerinin tavlama süresiyle değişimi bakırın CIS filminden GaAs altlığına difüzyonu ile açıklanabilir. Bakır katkısı GaAs'da akseptör etkisi yaptığından, bakırın difüzyonu sonucunda elektronlar deliklerle birleşir (rekombinasyon olayı) ve GaAs'da serbest yük taşıyıcıların konsantrasyonu azalır ve direnç artar. Bunun sonucunda kısa devre akımı azalır ve açık devre gerilimi artar.



Şekil 3.14 CIS-GaAs eklemlerin seri direncinin (220°C 'da) tavlama süresiyle değişimi

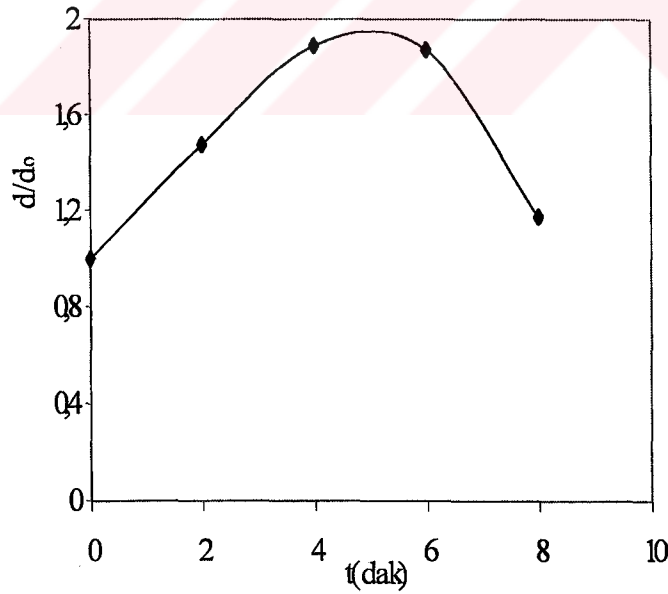


Şekil 3. 15 CIS-GaAs heteroeleminin (220°C 'da) tavlama süresiyle açık devre gerilim değişimi



Şekil 3. 16 CIS-GaAs heteroekleminin (220°C'da) tavlama süresiyle kısa devre akımı değişimi

Tavlama işlemleriyle elde edilen kapasitans-gerilim karakteristiklerinden hesaplanan eklem kalınlığının tavlama süresiyle değişimi Şekil 3.17'de verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi ilk 4-5 dakikada eklem genişliği artmaktadır.



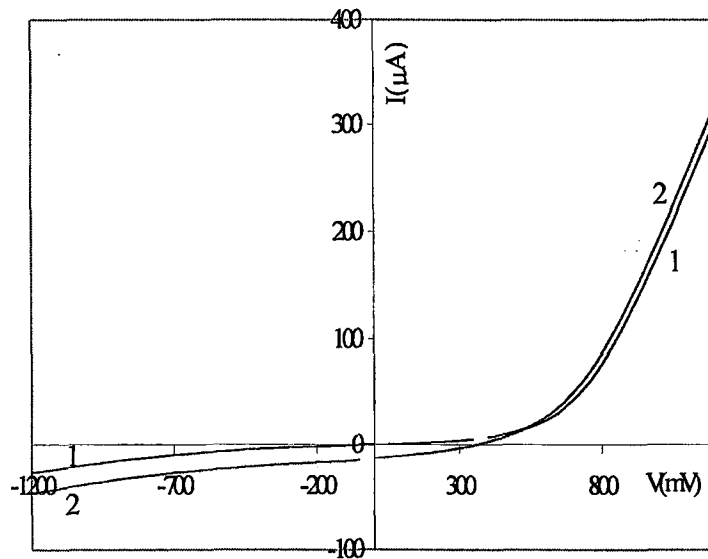
Şekil 3. 17 CIS-GaAs heteroekleminin (220°C'da) tavlama süresiyle eklem kalınlığının başlangıç değerine oranının zamanla değişimi

3.9 Na Difüzyonunun CIS İnce Filmlerin ve CIS-GaAs Heteroeklemlerin Elektriksel ve Fotoelektriksel Özelliklerine Etkisi

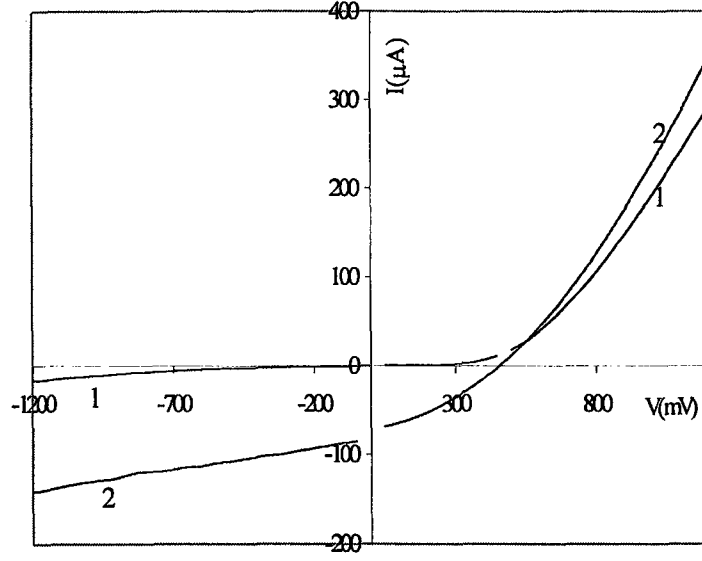
Na difüzyonunun CIS filmlerinin elektriksel özelliklerine etkisini incelemek için camın üzerinde kare şeklinde CIS filmi (yaklaşık $1\mu\text{m}$ kalınlığında) Bölüm 2.1’de anlatıldığı gibi büyütüldü. Filmin dört köşesine In-Ga omik kontakt yapıldıktan sonra Van der Pauw yöntemiyle filmin öz direnci $\rho=650\ \Omega\text{cm}$ ve Hall olayı ile delik konsantrasyonu $p=1,8\times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}$ olarak bulundu (Bölüm 2.8). Daha sonra filmin üzerine NaCl kaplandı ve vakumda 300°C ’da 10 dakika difüzyon tavlaması yapıldı (Bölüm 2.2). Tavlamadan sonra yeniden öz direnç ve Hall ölçümleri yapıldı. Na difüzyonu sonucunda filmin öz direncinin $\rho=3,2\ \Omega\text{cm}$ ’ye kadar azaldığı ve delik konsantrasyonunun $p=3,7\times 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$ ’e kadar arttığı gözlemlendi.

Na difüzyonunun CIS-GaAs fotopillerin özelliklerine etkisini incelemek için örnek iki parçaya kesildi ve birinin CIS film yüzeyine NaCl kaplandı ve hemen vakumda 300°C ’da 10 dakika difüzyon tavlama yapıldı, öteki parça ise kontrol amacıyla kullanıldı. Her iki örnekte elektriksel ve fotoelektriksel ölçümler yapıldı.

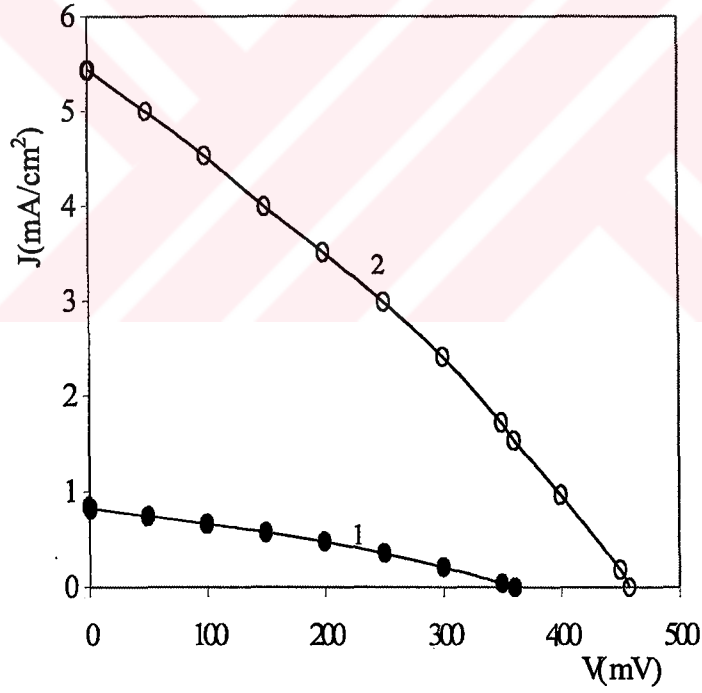
Şekil 3.18 ve Şekil 3.19 ’de kontrol ekleminin ve Na katkılanmış eklemin akım-gerilim karakteristikleri verilmiştir. Görüldüğü gibi Na katkılanmış pilin fotoduyarlılığı kontrol piline göre keskin şekilde artmaktadır. Bu eğrilerden elde edilen parametreler Çizelge 3.2’de verilmiştir.



Şekil 3. 18 Kontrol eklemin akım-gerilim karakteristiği: (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta



Şekil 3. 19 Na katkılanmış eklemın akım-gerilim karakteristiği: (1) karanlıkta, (2) aydınlıkta

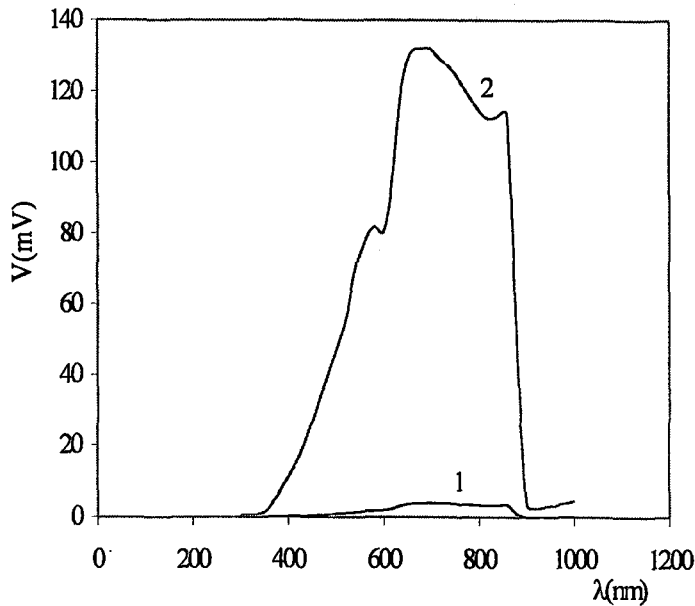


Şekil 3.20 CIS-GaAs pillerinin fotoakım yoğunluğu-gerilim eğrileri (1) kontrol eklemi, (2) Na katkılanmış eklem

Çizelge 3.2 Na katkılanmış ve katkılanmamış CIG-GaAs heteroeklemlerin parametreleri

Parametreler	CIS-GaAs (Kontrol eklem)	CIS-GaAs (Na katkılanmış eklem)
V_{oc} (mV)	370	470
J_{sc} (mA/cm ²)	0,8	5,5
Fotoduyarlılık Katsayısı $\frac{J_a}{J_k}$ (V=1,2volt; ters yön)	1,7	8,5
Doğrultma Katsayısı $\frac{I_{iletim}}{I_{ters}}$ (Karanlık; =1,2volt)	11,4	17,5
p (cm ⁻³)	$1,4 \times 10^{11}$	$1,45 \times 10^{12}$
Eklem kalınlığı d (μm)	3,4	0,95

Şekil 3.20’de kontrol ve Na katkılanmış pillerin fotovoltaiik karakteristiklerini verilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi Na difüzyonu sonucunda kısa devre akımı $J_{sc}=0,8$ mA/cm²’den 5,5 mA/cm²’ye; açık devre gerilimi $V_{oc}= 370$ mV’den 470 mV’a kadar artmaktadır (Çizelge 3.2). Ayrıca Çizelge 3.2’den görüldüğü gibi ters yöndeki fotoduyarlılık yaklaşık 5 kat artmaktadır, kapasitans-gerilim karakteristiklerinden hesaplanan eklem kalınlığı ise $d=3,4$ μm’den 0,95 μm’ye azalmaktadır.



Şekil 3. 21 CIS-GaAs eklemelerin fotoduyarlılık spektrumları: (1) kontrol eklemi, (2)Na katkılanmış eklem

Şekil 3.21’de kontrol eklem ve Na katkılanmış eklem spektral duyarlılık spektrumları verilmiştir. Şekilden fotoakım yoğunluğu-gerilim ölçümleriyle uyumlu olarak Na katkılanmış örneğin fotoduyarlılığının kontrol örneğine göre arttığı görülmektedir.

Böylece p-tipi CIS filmlerine Na difüzyonu sonucunda deliklerin konsantrasyonu, ayrıca Na ile katkılanmış CIS-GaAs pilde fotovoltajik parametreler keskin olarak artmaktadır.



4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

CIS-GaAs heteroeklemler, CIS filmlerinin tek kristalli n-tipi GaAs altlığına yüzeyine vakumda buharlaştırmasıyla hazırlandı. X-ışınları kırınımı, elektron ve optik mikroskop incelemeleri ile CIS filmlerinin polikristal yapıya sahip olduğu ve (111) GaAs altlığın yüzeyinde (112) yönünde büyüdüğü görüldü. Kalkopirit yapıları CIS filmlerin örgü parametreleri $a=b=5,786 \text{ Å}$ ve $c=11,572 \text{ Å}$; kübik (çinko bilende) yapıları GaAs için $a=5,66 \text{ Å}$ olarak bulundu.

Elektrik, fotovoltaiik ve fotoduyarlılık spektrumlarının incelemelerinden CIS-GaAs pillerinin ışığa duyarlılığı $\lambda=0,35-1,0 \text{ µm}$ aralığında olduğu ve fotovoltaiik parametrelerinin $V_{oc}=467 \text{ mV}$, $J_{sc}=8,9 \text{ mA/cm}^2$, $FF=0,44$ olduğu görüldü.

Karanlıktaki akım-gerilim karakteristiği $A=2,7$ ideallik faktörü ile ifade edilir. Bu ideallik faktörü eklemenden geçen akımın rekombinasyon mekanizması ile gerçekleştiğini göstermektedir.

X-ışınları floresans yöntemiyle bakır atomlarının konsantrasyon dağılımı GaAs altlıkta incelendi ve bakırın GaAs'da difüzyon katsayısı $D=1,2 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ (520°C) bulundu. Bu sonuçlar, CIS-GaAs eklemlerin yapılması sürecinde (520°C 'da) bakır atomlarının CIS filminden GaAs altlığa difüzyon yayılması ile yorumlanabilir.

Bakır, GaAs'da akseptör özelliğine sahip olduğundan eklemnin büyütülmesi aşamasında bakırın GaAs'da difüzyonu sonucunda, n-tipi GaAs altlığın yüzey bölgesinde p-tipi tabaka oluşmaktadır. CIS-GaAs'dan ince filmler çıkararak ve iletkenlik tipini termal elektromotor kuvveti (TEMK) yöntemiyle ölçerek, GaAs altlığında yaklaşık $x=8 \text{ µm}$ derinlikte gerçekten p-n homoeklemin yerleştiği görüldü.

Bakırın GaAs'da ΔE_a iyonlaşma enerjisini ($0,38 \text{ eV}$) kullanarak ve x-ışınları floresans yöntemiyle elde edilen bakırın GaAs'da konsantrasyon dağılımını hesaba katarak, altlıktaki deliklerin konsantrasyon dağılımı hesaplandı ve p-n homoeklemin GaAs'da yaklaşık $x=8 \text{ µm}$ derinlikte yerleştiği bulundu. p-n homoeklemin derinliği ile ilgili bu hesaplamaların sonucu TEMK yöntemiyle deneysel olarak ölçülen p-n homoeklemin derinliği ile yaklaşık olarak aynıdır ($x=8 \text{ µm}$).

Böylece CIS-GaAs yapıların büyütülmesi sırasında, bakırın difüzyonu sonucunda pCIS-pGaAs hetero ve pGaAs-nGaAs homoelekmanlardan oluşmuş, pCIS-pGaAs-nGaAs yapı meydana gelmektedir.

220°C’da tavlamanın CIS-GaAs pillerin elektrik ve fotovoltatik karakteristiklerine etkisi incelendi. Kısa süreli tavlamalarda (0-4 dakika aralığında) V_{oc} ’nin arttığı (420 mV’dan 450 mV’a kadar) ve J_{sc} ’nin azaldığı gözlemlendi. Fotovoltatik parametrelerin bu şekilde değişmesi, bakırın CIS filminden n-tipi GaAs’a difüzyonu ve seri direncin artması ile yorumlanabilir. Daha uzun süreli tavlamalar ($t > 4$ dak) V_{oc} ve J_{sc} parametrelerini azaltmaktadır. Bu olay ise heteroelekmandeki uygunsuzluk kusurlarının (dislokasyonların) ve başka katkıların etkin hale gelmesi ile yorumlanabilir.

İlk kez Na difüzyonunun CIS filmlerinin elektriksel özelliklerine ve CIS-GaAs eklemlerin karakteristiklerine etkisi incelendi. Na’un CIS filmine difüzyonu sonucunda (300°C, 10 dak) filmin öz direnci $\rho = 650 \Omega\text{cm}$ ’den $3,2 \Omega\text{cm}$ ’ye kadar azaldı ve delik konsantrasyonu yaklaşık 200 kat arttı ($1,8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ’den $3,7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ’e kadar). Aynı şekilde CIS-GaAs pillerin fotovoltatik parametrelerinin Na katkısının etkisi ile önemli ölçüde arttığı gözlemlendi: $V_{oc}=370\text{mV}-470 \text{ mV}$; $J_{sc}=0,8\text{mA}/\text{cm}^2-5,5 \text{ mA}/\text{cm}^2$. Na’un pillerin karakteristiklerine etkisini deliklerin konsantrasyonunun artmasıyla açıklamak mümkündür.

İdeal (sınırdaki kusurları olmayan) pCIS-pGaAs-nGaAs hetero-homoelekmanın ideal enerji band diyagramını ele alalım. Bu eklemin band diyagramını çizmek için Çizelge 4.1’de verilen CIS-GaAs parametreleri kullanıldı.

Çizelge 4.1 pCIS, pGaAs ve nGaAs parametreleri (300 K)

Parametre	pCIS	GaAs	
		p-tipi	n-tipi
Yasak band E_g (eV)	1,02 (E_{g1})	1,41 (E_{g2})	1,41 (E_{g2})
Afinite χ (eV)	4,3; 4,5	4,07	4,07
Fermi düzeyi E_F (eV)	0,18 (E_{F1})	0,20 (E_{Fp})	0,03 (E_{Fn})
Termodinamik iş fonksiyonu ϕ (eV)	5,14; 5,34	5,28	4,10

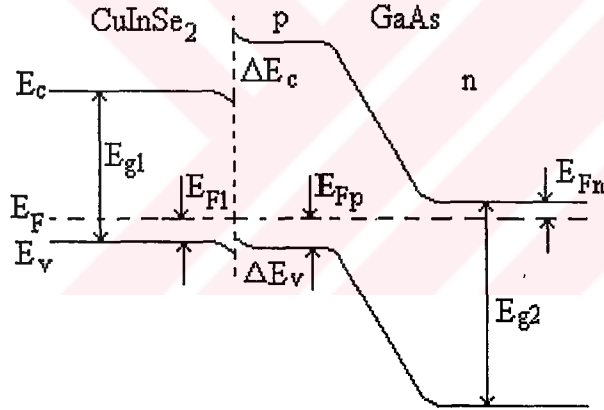
Çizelgede verilen Fermi düzeylerinin enerjisi n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerde aşağıdaki formüllerle hesaplandı.

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_{Fn}}{kT}\right) \quad (4.1)$$

$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_{Fp}}{kT}\right) \quad (4.2)$$

Burada N_c ve N_v sırasıyla iletkenlik ve valans bandlarının etkin durum yoğunluğudur, n-tipi GaAs için $N_c = 4,2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, p-tipi GaAs için $N_v = 7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ve p-tipi CIS için $N_v = 1,5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ kullanıldı. İletkenlik ve valans bandlarındaki kesintiler $\Delta E_c = \chi_1 - \chi_2 = 0,43 \text{ eV}$ ve $\Delta E_v = E_{g2} - E_{g1} - \Delta E_c = 0,04 \text{ eV}$ olarak alındı.

Şekil 4.1'de, çizelge 4.1'de verilen parametreler kullanılarak ideal pCIS-pGaAs-nGaAs eklemin ideal enerji band diyagramı verilmiştir.



Şekil 4.1 pCIS-pGaAs-nGaAs ideal hetero-homoekleminin enerji band diyagramı

Bu band diyagramından görüldüğü gibi hem pCIS-pGaAs heteroeklemin, hem de pGaAs-nGaAs homoeklemin elektrik alanları aynı yöndedir (sağdan sola doğru). Yani bu eklemlerin elektrik alanlarının şiddeti toplanmaktadır. Işığın etkisiyle oluşan elektron-delik çiftleri her iki eklemdede aynı yönde ayrılabilirler. Bunun yanında Şekil 4.1'de görüldüğü gibi, CIS-GaAs eklemin doğru yönü, pCIS filmine pozitif gerilimin uygulanmasıyla gerçekleşmektedir. Deneysel akım-gerilim ölçümlerinde doğru yön pCIS filmine pozitif gerilimin uygulanmasıyla sağlanmıştır.

KAYNAKLAR

Braunger, D., Hariskos, D., Bilger, G., Rau, U. ve Schock, H.W., (2000), "Influence of Sodium on the Growth of polycrystalline Cu(In,Ga)Se₂ Thin Films", Thin Solid Films, 361-362: 161-166.

Caferov, T., (1998), Yarıiletken Fiziği-1, Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.

Caferov, T., (2000), Katıhal Elektroniği, Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul.

Dzhafarov, T.D., Sungu, B., Sadigov ve M., Bacaksız, E., (2000), "Copper Diffusion in CuInSe₂-GaAs Structures", Twelfth International Conference on Ternary and Multinary Compounds, 13-17.3.2000, Taiwan, P2-103.

Green, M.A., (1982), Solar Cells, Englewood Cliffs, New Jersey.

Heske, C., Fink, R. ve Umbach, E., (1996), "Na Induced Effects on the Electronic structure and composition of Cu(In,Ga)Se₂ Thin-Film Surfaces", Applied Physics Letters, 68(24): 3431-3433.

Heske, C., Eich, D., Groh, U., Fink, R., Umbach, E., Van Buuren, T., Bostedt, C., Franco, N., Terminello, L.J., Grush, M.M., Callcott, T.A., Himpsel, F.J., Ederer, D.L., Perera, R.C.C., Riedl ve Karg, F., (2000), "Self-limitation of Na Content at the CdS/Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cell Hetrojunction", Thin Solid Films, 361-362: 360-363.

Igarashi, O., (1993), "Epitaxial Growth of CuInSe₂ Single Crystals by Halogen Transport Method", Journal of Crystal Growth, (130):343-356.

Kronik, L., Rau, U., Guillemoles, J.F., Braunger, D., Schock, H.W. ve Cahen, D., (2000), "Interface redox Engineering of Cu(In,Ga)Se₂-based solar cells: Oxygen, Sodium and Chemical Bath Effects", Thin Solid Films, 361-362: 353-359.

Lide, D.R., (1993-1994), Handbook of Chemistry and Physics, CRC Press, Tokyo.

Magomedov, MRA., Amirkhanova, D.K., Ismailov, S.M., Khokhlachev, P.P. ve Zubairuev, R.Z., (1997), "Influence of Heat-Treatment on the Electrophysical Properties of Thin-Films of Copper-Indium Diselenide", Technical Physics, 42(3): 282-286.

Nakada, T., Ohbo, H., Fukuda, M. ve Kunioka, A., (1997), "Improved Compositional Flexibility of (CuIn,Ga)Se₂-based Thin Film Solar Cells by Sodium Control Technique", Solar Energy Materials and Solar Cells, 49(1): 261-267.

Niki, S., Makita, Y., Yamada, A., Hellman, O., Fons, P.J., Obara, A., Okada, Y., Shioda, R., Oyanagi, H., Kurafuji, T., Chichibu, S. ve Nakanishi, H., (1995), "Heteroepitaxy and Characterization of CuInSe₂ on GaAs (001)", Journal of Crystal Growth, 150: 1201-1205.

- Niki, S., Shioda, R., Okada, Y., Oyanagi, H., Yamada, A. ve Makita, Y., (1995), "Characterization of Molecular Beam Epitaxy Grown CuInSe₂ on GaAs (001)", *Journal of Crystal Growth*, (150): 1196-1200.
- Niki, S., Fons, P., Yamada, A. ve Oyanagi, H., (1998), "Direct Observation of the Cu_{2-x}Se Phase of Cu-rich Epitaxial CuInSe₂ Grown on GaAs (001)", *Journal Applied Physics*, 84(12): 6926-6928.
- Ohshima, T., (1994), "A Rotational Co-Evaporation Technique for Epitaxial Growth of CuInSe₂ Thin Films on GaAs", *Journal of Crystal Growth*, 142: 332-338.
- Oral, M., (1979), Güneş Pilleri, Ege Üniversitesi, İlker Matbaası, İzmir.
- Özkan, M., (1998), CuInSe₂ İnce Filminin Üretimi, Yapısal ve Optik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Rau, U., Schmitt, M., Engelhardt, F., Seifert, O., Parisi, J., Riedl, W., Rimmasch, J. ve Karg, F., (1998), "Impact of Na and S Incorporation on the Electronic Transport Mechanisms of Cu(In,Ga)Se₂ Solar Cells", *Solid State Communications*, 107(2): 59-63.
- Rockett, A. ve Birkmire, R.W., (1991), "CuInSe₂ for Photovoltaic Applications", *Journal Applied Physics*, 70(7): R82-R90.
- Scheer, R., Luck, I., Kanis, M., Kurps, R. ve Krüger, D., (2000), "Effect of Sodium and Oxygen doping on the conductivity of CuInSe₂ Thin Films", *Thin Solid Films*, 361-362: 468-472.
- Schroder, D.J., Hernandez, J.L., Berry, G.D. ve Rockett, A.A., (1998), "Hole Transport and Doping States in Epitaxial CuIn_{1-x}Ga_xSe₂", *Journal Applied Physics*, 83(3):1519-1526.
- Shirakata, S., Yokoyama, A. ve Isomura, S., (1993), "Preparation of SnO₂-CuInSe₂ Heterojunction", *Japanese Journal of Applied Physics*, 32(S32-3): 77-79.
- Shur, M., (1987), *GaAs Devices and Circuits*, Plenum Press, New York.
- Sze, S.M., (1981), *Physics of Semiconductor Devices*, John Wiley and Sons, New York.
- Tanaka, T., Demizu, Y., Yamaguchi, T. ve Yoshida, A., (1998), "Preparation of Ordered Vacancy Chalcopyrite Thin Films by RF Sputtering From CuInSe₂ Target with Na₂Se", *Japanese Journal of Applied Physics*, 152(4): 329-332.
- Tanaka, T., Yamaguchi, T., Wakahara, A. ve Yoshida, A., (1999), "Effect of Substrate Temperature on Properties of Thin Films Prepared by RF Sputtering from CuInSe₂ Target with Na₂Se", *Thin Solid Films*, 343-344: 320-323.
- Tanaka, T., Yamaguchi, T. ve Yoshida, A., (2000), "Influence of Na on CuInSe₂ Thin Films", *Thin Solid Films*, 361(7): 353-359.

Tseng, B.H., Lin, S.B., Hsieh, K.C. ve Hwang, H.L., (1995), "Stoichiometric Control of CuInSe_2 Thin Films Using a Molecular Beam Epitaxy Technique", *Journal of Crystal Growth*, 150:1206-1210.

Yamaguchi, T., Yamamoto, Y., Tanaka, T., Tanahashi, N. ve Yoshida, A., (1998), "Influence of Annealing Temperature on the Properties of Cu(In,Ga)Se_2 Thin-Films by Crystallization in Se Vapour", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 50(1-4): 1-6.



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	05.07.1975	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1989-1992	Özel Şişli Terakki Lisesi
Lisans	1993-1997	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü
Yüksek Lisans	1997-2000	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü

Çalıştığı Kurumlar 1997-1998 (Güz Dönemi) Hava Harp Okulu Fizik Lab.

1998-Devam ediyor Yıldız Teknik Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü
Araştırma Görevlisi