

MUĞLA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ HETEROEKLEM GÜNEŞ
PİLLERİNDE ADMİTTANS SPEKTROSKOPİSİ VE
AKIM-İLETİM MEKANİZMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OSMAN PAKMA

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Şener OKTİK

EYLÜL, 2002

MUĞLA

MUĞLA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ HETEROEKLEM GÜNEŞ
PİLLERİNDE ADMİTTANS SPEKTROSKOPİSİ VE
AKIM-İLETİM MEKANİZMALARI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OSMAN PAKMA

Fen Bilimleri Enstitüsü'nce
“Yüksek Lisans”

Diploması Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir

Tezin Enstitü'ye Verildiği Tarih : 18.10.2002

Tezin Sözlü Savunma Tarihi : 20.09.2002

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Şener OKTİK

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Habibe BAYHAN

Jüri Üyesi : Yrd. Doç. Dr. Murat BAYHAN

Enstitü Müdürü : Prof. Dr. Murat BARLAS

Eylül, 2002

MUĞLA

YEMİN

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ Heteroeklem Güneş Pillerinde Admittans Spektroskopisi Ve Akım-İletim Mekanizmaları” adlı çalışmanın, tarafımdan bilimsel olarak ahlâk ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlandığımı belirtir ve bunu onurumla doğrularım.

18/10/2002

Osman PAKMA

TUTANAK

Muğla Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün .././2002 tarih ve... sayılı toplantısında oluşturulan jüri, Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliği'nin 21. Maddesine göre, Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans Öğrencisi Osman Pakma'nın "ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ Heteroeklem Güneş Pilllerinde Admittans Spektroskopisi Ve Akım-İletim Mekanizmaları" adlı tezini incelemiş ve aday .././2000 tarihinde saat 'da jüri önünde tez savunmasına alınmıştır.

Adayın kişisel çalışmaya dayanan tezini savunmasından sonradakikalık süre içinde gerek tez konusu, gerekse tezin dayanağı olan anabilim dallarından sorulan sorulara verdiği cevaplar değerlendirilerek tezin olduğuna.....ile karar verildi.

Tez Danışmanı

Prof. Dr.

Şener OKTİK

Üye

Üye

Yedek Üye

YÜKSEK ÖĞRETİM KURULU DÖKÜMANTASYON MERKEZİ
TEZ VERİ GİRİŞ FORMU

YAZARIN

Soyadı : PAKMA

Adı : Osman

Kayıt No:

TEZİN ADI

Türkçe : ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ Heteroeklem Güneş Pillerinde Admittans Spektroskopisi ve Akım-İletim Mekanizmaları

Y.Dil : Admittance Spectroscopy and Current-Transport Mechanisms of ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ Heterojunction Solar Cells

TEZİN TÜRÜ : Yüksek Lisans

Doktora

Sanatta Yeterlilik

TEZİN KABUL EDİLDİĞİ

Üniversite : Muğla Üniversitesi

Fakülte : Fen Edebiyat Fakültesi

Enstitü : Fen Bilimleri Enstitüsü

Diğer Kuruluşlar :

Tarih : 2002

TEZ YAYINLANMIŞSA

Yayınlanan

Basım Yeri :

Basım Tarihi :

ISBN :

TEZ YÖNETİCİSİNİN

Soyadı Adı : OKTİK Şener

Ünvanı : Prof. Dr.

TEZİN YAZILDIĞI DİL : Türkçe

TEZİN SAYFA SAYISI: 83

TEZİN KONUSU(KONULARI) :

ZnO/CdS/CuIn(S,Se₂) Heteroeklem Güneş Pillerinde Admittans Spektroskopisi ve Akım-İletim Mekanizmaları

TÜRKÇE ANAHTAR KELİMELER

- 1) Pn Heteroeklem
- 2) Elektriksel Karakterizasyon
- 3) Admittans Spektroskopisi
- 4) Akım-İletim Mekanizmaları

İNGİLİZCE ANAHTAR KELİMELER

- 1) Pn Heterojunction
- 2) Electrical Characterization
- 3) Admittance Spectroscopy
- 4) Current-Transport Mechanisms

- 1) Tezimden fotokopi yapılmasına izin vermiyorum.
- 2) Tezimden dipnot gösterilmek şartıyla bir bölümünün fotokopisi alınabilir.
- 3) Kaynak gösterilmek şartıyla tezimin tamamının fotokopisi alınabilir.

Osman Pakma

Yazarın İmzası:

Tarih: 18.10.2002

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Osman PAKMA
Doğum Yeri : Erlenbach/ALMANYA
Doğum Yılı : 29.11.1975
Medeni Hali : Evli

EĞİTİM VE AKADEMİK BİLGİLER

Lise : Atatürk Teknik Lisesi, Elektronik Bölümü, Denizli
Lisans : 1995-1999, Fizik Bölümü, Anadolu Üniversitesi
Fen Fakültesi
Yabancı Dil : İngilizce

MESLEKİ BİLGİLER

1999- Araştırma Görevlisi, Fizik Bölümü, Muğla Üniversitesi.

ÖNSÖZ

Akademik hayata başlamamda büyük etkisi olan ve yüksek lisans öğrenimim boyunca her koşulda yol gösterici olduğu, bilgi ve tecrübelerinden yararlanarak örnek aldığım bölüm başkanımız sayın hocam Prof. Dr. Şener OKTİK' e içten saygı ve şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmam süresince bana devamlı yol gösteren, içten ilgi ve alâkasını benden esirgemeyen sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Habibe Bayhan'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Laboratuar ve analiz konularında karşılaştığım teknik sorunlarda gösterdiği çözüm yolları ve yardımlarıyla her zaman yanımda hissettiğim sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Murat Bayhan'a teşekkürü borç bilirim.

IPE'de bulunduğum süre içerisinde yardımlarını benden esirgemeyen H.W.Schock, U.Rau, M.Turcu, K.Orgassa, I.M.Kötschau, M.Balboul, K.Weinert ve K.Quang'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez çalışmalarım süresince manevi desteklerini esirgemeyen, zaman zaman bilgi, fikir ve yardımlarını aldığım değerli Fizik bölümü öğretim üyeleri ve Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma teşekkürler ederim.

Hayatıma mutluluk ve düzen getirip karşılaştığım zorlukların aşılmasında beni sürekli cesaretlendirip sevgisiyle bana destek veren, , sevgisiyle ve yardımıyla yanımda olan canım eşime kalbimin içindeki en güzel duyguları sunuyorum.

Tez yazım süresince yanımdan bir an olsun ayrılmayan, en zor anlarda mutluluk kaynağım olan biricik kızıma tüm sevgimi sunuyorum.

Uzun yıllar zorlukları aşarak büyük emekler sarf eden, her türlü maddi imkanı sağlayan sevgili babama ne kadar teşekkür etsem azdır.

Yaşamın onca yükü ve ağırlığına rağmen her zaman ayakta kalmasını bilip bu bilinçle beni yetiştirdiği, doğruluğu, sabrı, özveriyi, mütevaziliği ve diğer tüm insani değerleri, doğduğum günden beri özenle ve itinayla bana öğrettiği için sevgili anneme minnet, şükran ve teşekkürlerimi sunarım. Şu an yanımda olmasan bile her an kalbimdesin.

ÖZET

ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ HETEROEKLEM GÜNEŞ PİLLERİNDE ADMİTTANS SPEKTROSKOPİSİ VE AKIM-İLETİM MEKANİZMALARI

PAKMA, Osman

Yüksek Lisans Tezi, Fizik

Eylül, 2002

Bu çalışmada toplu buharlaştırma tekniğiyle büyütülmüş olan CuIn(S,Se)₂ tabanlı heteroeklem aygıtların elektronik özellikleri iki grupta ele alınarak incelenmiştir. Birinci grup, Cu/In oranı sabit S/(S+Se) oranı değişken; ikinci grup ise S/(S+Se) oranı sabit Cu/In oranı değişken örneklerden oluşmaktadır. Parametreleri stokiometriye bağlı güneş pillerinin akım-gerilim karakteristikleri 25⁰C sıcaklıkta 100mW/cm²'lik ışınım altında ölçülmüştür. Soğurucu tabakasındaki bakır oranı sabit örneklerde, bulunan V_{oc} ve doluluk faktörü değerlerinin S/(S+Se) oranına göre az duyarlı iken J_{sc} değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte S/(S+Se) oranı sabit Cu/In oranı değişimine göre V_{oc} ve doluluk faktörü değerlerinin arttığı ve J_{sc} değerlerinin az duyarlı olduğu saptanmıştır.

Eklem kapasitansı ölçümlerinde, tabakadaki Cu/In oranı sabit iken tuzak seviyelerinin aktivasyon enerji değerlerinin tümünün benzer özellik gösterdiği ve yaklaşık 110meV civarında olduğu saptanmıştır. Cu/In oranı azalırken ise bir önceki tuzak seviyelerinin 229meV ve 246meV olduğu saptanmıştır.

Heteroeklemlerin yasak enerji aralığı değerleri kuantum verimliliği (QE) spektrali ile belirlenmiş olup soğurucu tabakanın yasak enerji aralığı değerlerinin 1.0eV ile 1.3eV arasında olduğu bulunmuştur. Güneş pillerinin sıcaklığa bağımlı akım-gerilim ölçümlerinde ise baskın olan akım-iletim mekanizmaları belirlenmeye çalışılmıştır. Tüm güneş pillerinin aktivasyon enerji değerlerinin yasak enerji aralığı değerlerinden daha küçük değerde olduğu bulunmuş ve baskın olan akım iletim mekanizmasının ara yüzeyde yeniden birleşme mekanizması olduğu belirlenmiştir.

ABSTRACT**ADMITTANCE SPECTROSCOPY AND CURRENT-
TRANSPORT MECHANISMS OF ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂
HETEROJUNCTION SOLAR CELLS****PAKMA, Osman****M.Sc. in Physics****September, 2002**

This work attempts to analyse the data on electronic properties of two groups of CuIn(S,Se)₂ based heterojunction devices deposited by co-evaporation technique. In the first group of samples; Cu/In ratio was kept constant and S/(S+Se) ratio was changed, in the second group S/(S+Se) ratio was maintained the same while the Cu/In ratio was altered. In an attempt to correlate solar cell parameters to the stoichiometry, current-voltage characteristics of these cells were measured under an illumination of 100mW/cm² at 25⁰C. For the constant copper content in the absorber layers, both V_{oc} and fill factor values are found to be only slightly sensitive to the S/(S+Se) ratios, whereas J_{sc} values decreased with increasing the S/(S+Se) ratios. However for the constant S/(S+Se) content, as the Cu/In ratio increases V_{oc} and fill factor values were observed to be improved significantly but J_{sc} exhibits only slight change.

From the junction capacitance measurements, for the constant Cu/In content in the layers, all the activation energy values of the trap levels determined exhibited similar values around 110meV. As the Cu/In ratio is reduced, in addition to the former level, trap levels at about 229meV and 246meV were identified.

The dependence of the band gap energy, E_g on the composition was determined from the evaluation of quantum efficiency (QE) spectra of the heterojunctions. The values of the band gap energy for the absorber layers were found to change between 1.0eV and 1.3eV. Temperature dependent current-voltage measurements were used to determine the dominant current mechanism in these solar cells. Basically for all types of the cells, the current was found to mainly be dominated by the recombination at the hetero-interface, with activation energies smaller than the values of the band gap of the absorber material.

İÇİNDEKİLER

	SAYFA
ÖNSÖZ	I
ÖZET.....	III
ABSTRACT.....	IV
TABLolar LİSTESİ	X
ŞEKİLLER LİSTESİ	XI
BÖLÜM 1 : GİRİŞ	1
BÖLÜM 2 :TEORİK BİLGİLER.....	6
2.1 ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ HETEROEKLEM GÜNEŞ PİLLERİNİN ÖZELLİKLERİ	6
2.1.1 GÜNEŞ PİLİNİ OLUŞTURAN TABAKALAR..	6
2.1.2 GÜNEŞ PİLLERİNİN HAZIRLANMASI	9
2.1.3 ENERJİ BANT PROFİLİ.....	11
2.2 ADMİTTANS SPEKTROSKOPİSİ.....	12
2.3 PN HETEROEKLEMLERDE EKLEM KAPASİTANSI.....	15
2.4 ZnO/CdS/CIS HETEROEKLEM YAPILARINDA AKIM İLETİM MEKANİZMALARI.....	20
2.4.1 ARA YÜZEYDE TÜNELLEMENİN ARTTIRDIĞI YENİDEN BİRLEŞME.....	23

2.4.2	BOŞALTILMIŞ BÖLGE İÇERİSİNDE TÜNELLEMENİN ARTTIRDIĞI YENİDEN BİRLEŞME.....	25
2.5	KUANTUM VERİMLİLİĞİ.....	27
2.6	FOTOVOLTAİK PARAMETRELER.....	32
BÖLÜM 3 : DENEYSEL ÖLÇÜM SİSTEMİ.....		35
3.1	AKIM-GERİLİM ÖLÇÜM SİSTEMİ.....	36
3.2	SPEKTRAL TEPKİ ÖLÇÜM SİSTEMİ.....	36
3.3	ADMİTTANS ÖLÇÜM SİSTEMİ.....	37
3.3.1	DÜŞÜK SICAKLIK SİSTEMİ.....	38
3.3.2	HP 4192A EMPEDANS ANALİZÖRÜ.....	40
3.4	KAPASİTANS-GERİLİM ÖLÇÜM SİSTEMİ.....	40
3.5	SICAKLIĞA BAĞIMLI AKIM-GERİLİM ÖLÇÜM SİSTEMİ.....	41
3.6	BİLGİSAYAR YAZILIMLARI.....	42
BÖLÜM 4 : DENEYSEL SONUÇLAR VE SONUÇLARIN TARTIŞILMASI.....		44
4.1	GÜNEŞ PİLLERİNİN SOĞURUCU TABAKASINDAKİ MATERYAL ORANLARI.....	44
4.2	ODA SICAKLIĞINDA AKIM –GERİLİM KARAKTERİSTİKLERİ.....	46
4.3	CuIn(S,Se) ₂ SOĞURUCU TABAKASININ YASAK ENERJİ ARALIĞININ TAYİNİ.....	48

4.4	ADMİTTANS SPEKTROSKOPİSİ ÖLÇÜMLERİ.....	52
4.5	KAPASİTANS-GERİLİM ÖLÇÜMLERİ.....	60
4.6	SICAKLIĞA BAĞIMLI AKIM-GERİLİM KARAKTERİSTİKLERİ.....	63
4.6.1	AYDINLIK ALTINDA AÇIK-DEVRE GERİLİMİNDEN YARARLANARAK AKIM-İLETİM MEKANİZMALARININ TESPİTİ.....	63
4.6.2	ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ HETEROEKLEM GÜNEŞ PİLLERİNİN KARANLIK ALTINDAKİ AKIM-İLETİM MEKANİZMALARININ TESPİTİ.....	68
BÖLÜM 5 : SONUÇ.....		75
KAYNAKLAR.....		78
SEMBOLLER		82

TABLOLAR LİSTESİ

		SAYFA
Tablo 1.1	Güneş pili üretiminde kullanılan bazı elementlerin rezerv durumları [6].....	4
Tablo 4.1.1	Ölçümlerde kullanılan ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ güneş pillerinin soğurucu tabakasındaki materyal oranları.....	45
Tablo 4.2.1	Oda sıcaklığı ve 100mW/cm ² 'lik ışınım altında akım-gerilim karakteristiğinden yararlanılarak hesaplanan fotovoltaik parametre değerleri.....	47
Tablo 4.3.1	Ölçümlerde kullanılan güneş pillerinin soğurucu tabakasının yasak enerji aralığı değerleri.....	51
Tablo 4.3.2	Kuantum verimliliği yöntemiyle hesaplanan güneş pillerinin kısa-devre akımları.....	52
Tablo 4.5.1	ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pillerinin 300K'de farklı frekanslardaki katkı yoğunlukları ve engel potansiyelleri.....	62
Tablo 4.6.1	Bakır ve sülfür oranına bağımlı ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pillerinin yasak enerji aralıklarının aydınlık altında hesaplanan aktivasyon enerjileri ile karşılaştırmaları.....	67
Tablo 4.6.2	ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pillerinin soğurucu tabakasının yasak enerji aralığı değerleri ile karanlık altında hesaplanan aktivasyon enerji değerlerinin karşılaştırması.....	74

ŞEKİLLER LİSTESİ

	SAYFA
Şekil 1.1 Güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren 10kWp'lik fotovoltaiik güç sistemi ¹	1
Şekil 1.2 İnce-film teknolojisiyle üretilen güneş pilinin görünüşü.....	2
Şekil 1.3 İnce-film ve organik boya maddelerinden üretilen güneş pillerinin verimliliklerinin karşılaştırılması [5].....	3
Şekil. 2.1.1 ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ güneş pilini oluşturan tabakalarının dizilişi.....	6
Şekil 2.1.2 (a) CuInSe ₂ 'nin kalkopirit yapısı (b) ZnSe'un kübik çinko yapısı.....	8
Şekil 2.1.3 Cu(In,Ga)(S,Se) ₂ yapısının yasak bant aralığına karşılık örgü sabiti.....	8
Şekil.2.1.4 Çok kristalli CuIn(S,Se) ₂ filminde yarı-sıvı yüzey filmi Cu _{2-y} (S,Se)'nin oluşturulması.....	10
Şekil.2.1.5 ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pilinin enerji bant diyagramı.....	11
Şekil 2.2.1 Seri ve paralel konfigürasyonlarda bağlanan direnç ve kondansatörlü CuIn(S,Se) ₂ güneş pilinin eşdeğer devresi.....	13
Şekil 2.2.2 ZnO/CdS/CIS güneş pillerinde kapasitansın açısıl frekans ile olan değişimi.....	15
Şekil 2.3.1 p ve n tipi yarıiletkenlerin bir araya gelmesi sonucu oluşan boşaltılmış bölge.....	16
Şekil 2.3.2 Keskin yük değişimli eklem modelinin (a) yüklerin, (b) elektrik alanının ve (c) engel potansiyelinin konum ile değişimi.....	16

Şekil 2.3.3	Lineer yük değişimli eklem modelinin (a) yüklerin, (b) elektrik alanının ve (c) engel potansiyelinin konum ile değişimi.....	19
Şekil 2.4.1	(a) ZnO/CdS/CIS heteroeklem yapının enerji bant diyagramı (b) ZnO/CdS/CIS heteroeklem yapılarda akım-iletim mekanizmaları.....	20
Şekil.2.5.1	Güneş spektrumunun foton enerjisine göre dağılımı.....	28
Şekil 2.6.1	Fotovoltaik pilin basit eşdeğer devresi.....	32
Şekil 2.6.2	İdeal bir güneş pilinin aydınlık ve karanlık altındaki akım-gerilim karakteristiği.....	34
Şekil 3.1	Deneysel ölçüm sistemi.....	35
Şekil 3.1.1	Keithley 238 akım-gerilim ölçüm cihazı.....	36
Şekil 3.2.1	Spektral Tepki ölçüm sistemi.....	37
Şekil 3.3.1	Düşük sıcaklık sistemi.....	38
Şekil 3.3.2	ITC 502 sıcaklık kontrol ünitesi.....	39
Şekil 3.3.3	Kreyostat (Oxford 43304).....	39
Şekil 3.3.4	HP 4192A Empedans Analizörü.....	40
Şekil 3.4.1	HP 3478A Multimetre.....	41
Şekil 3.5.1	Farklı kalınlıklara sahip nötral yoğunluk filtresi.....	41
Şekil 3.5.2	Keithley 2400 akım-gerilim ölçüm sistemi.....	42
Şekil 3.6.1	Testpoint altında yazılmış admittans programının görünüşü.....	43
Şekil 4.1.1	ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ /Mo/Cam güneş pillerinin üstten görünüşü.....	44

Şekil 4.1.2	Cu/In oranına karşı S/(S+Se) oranı değişimi.....	46
Şekil 4.2.1	Oda sıcaklığında ve 100mW/cm ² 'lik ışınım altında ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ güneş pillerinin akım-gerilim karakteristikleri.....	47
Şekil 4.2.2	Ölçümler sonucu elde edilen CuIn(S,Se) ₂ güneş pillerindeki Cu/In oranına sabit iken S/(S+Se) oranına göre kısa-devre akımı ve S/(S+Se) oranı sabit iken Cu/In oranına göre açık-devre geriliminin değişimi.....	48
Şekil 4.3.1	ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pillerinin farklı dalga boylu ışınımlar altındaki kuantum verimlilikleri.....	49
Şekil 4.3.2	ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pillerinin gönderilen fotonların enerjisine göre kuantum verimlilikleri.....	49
Şekil 4.3.3	VT104-1-14 kodlu güneş pilinin $(QE \times hc / \lambda)^2 - (hc / \lambda)$ grafiğinden soğurucu tabakasının yasak enerji aralığı değerinin tayini.....	50
Şekil 4.4.1	ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pillerinin sülfür ve bakır oranlarına bağımlı 100K ile 360K sıcaklıkları arasında 20K aralıkla frekansa bağımlı kapasitans grafikleri.....	54
Şekil 4.4.2	ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pillerinin 100K ile 360K sıcaklıkları arasında ve 20K aralıkla tuzak yoğunluğuna bağımlı enerji değişimi grafikleri.....	56
Şekil 4.4.3	ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pilindeki tuzak seviyeleri.....	57
Şekil 4.4.4	ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pillerinin frekansa bağımlı $\frac{dC}{d\omega}$ değişimleri.....	57

Şekil 4.4.5	$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) - \frac{1}{kT}$ grafikleri.....	59
Şekil 4.4.6	Niemegers ve Herberholz'un modeline göre ZnO/CdS/CIS Heteroeklem yapıdaki enerji bant diyagramı.....	59
Şekil 4.5.1	Düşük bakır oranına sahip ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pilinin oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki kapasitans-gerilim değişimleri.....	60
Şekil 4.5.2	Düşük bakır oranına sahip VT104-1-14 nolu ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pilinin oda sıcaklığındaki ve çeşitli frekanslardaki C ⁻² -V değişimleri.....	61
Şekil 4.5.3	Düşük bakır oranına sahip VT104-1-14 nolu ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pilinin 80K'de çeşitli frekanslardaki C-V değişimi.....	62
Şekil 4.5.4	Katkı yoğunluklarının frekansa bağımlı değişimi.....	63
Şekil 4.6.1	Sıcaklığa bağımlı y=1 oranı sabit, x oranı değişken ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pillerinin açık-devre gerilimlerinin sıcaklıkla değişimleri.....	65
Şekil 4.6.2	ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ /Mo heteroeklem yapılarının enerji-bant diyagramı.....	65
Şekil 4.6.3	Sıcaklığa bağımlı x=0.4 oranı sabit, y oranı değişken ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pillerinin açık-devre gerilimlerinin sıcaklığa bağımlı değişimleri.....	66
Şekil 4.6.4	Sıcaklığa bağımlı karanlık altında y oranı sabit, x oranı değişken doyum akım yoğunluğunun değişimi.....	68

Şekil 4.6.5	Sıcaklığa bağımlı karanlık altında x oranı sabit, y oranı değişken doyum akım yoğunluğunun değişimi.....	69
Şekil 4.6.6	Sıcaklığa bağımlı y oranı sabit,x oranı değişken ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pillerinin ters idealite faktörünün değişimi.....	71
Şekil 4.6.7	Sıcaklığa bağımlı x oranı sabit, y oranı değişken ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pilinin ters idealite faktörünün değişimi.....	71
Şekil 4.6.8	ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pillerinin y oranı sabit, x oranı değişken $\ln j_0 - 1/kT$ değişimleri.....	72
Şekil 4.6.9	ZnO/CdS/CuIn(S,Se) ₂ heteroeklem güneş pillerinin x oranı sabit, y oranı değişken $\ln j_0 - 1/kT$ değişimleri.....	73

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Son yıllarda enerji gereksinimi ile birlikte çeşitli enerji kaynaklarına olan talep artmıştır. Çevreye bakıldığında en büyük enerji kaynağı olarak güneş görünmektedir. Fakat son yıllara kadar insanoğlu, bu kaynaktan yararlanmayı pek düşünmemiş, ön plana çıkarmamıştır. Fosil enerji kaynaklarının tükenmeye başlaması ve dünyadaki nükleer santrallerin çevreye verdiği olumsuz etkiler nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına olan talep de artmıştır. Bu enerji kaynaklarından en göze çarpanı güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren fotovoltaik enerji kaynaklarıdır. Fotovoltaik enerji kaynaklarından en önemlisi ise güneş pilleridir.



Şekil 1.1 Güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren 10kWp'lik fotovoltaik güç sistemi¹.

Güneş pilleri, güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren elektronik aygıtlardır. Güneş pilleri üzerine yapılan ilk çalışma 1954 yılında Chapin, Pearson ve Prince adlı üç Amerikalı araştırmacının silisyum fotovoltaik pil üretmesiyle olmuştur [1]. Bu sıralarda da yeni ortaya çıkmakta olan uzay teknolojilerinde uydularını besleyecek yeni güç kaynakları aranmıştır. 1959'da Amerikalılar, güneş pilleri ile çalışan Vanguard adlı uydularını fırlatmışlardır [2]. Bu olaydan sonra da, bütün büyük laboratuvarlar güneş pilleri ile ilgilenmeye başlamışlardır.

¹ Muğla Üniversitesi Temiz Enerji Kaynakları Araştırma ve Geliştirme Merkezinin izniyle.

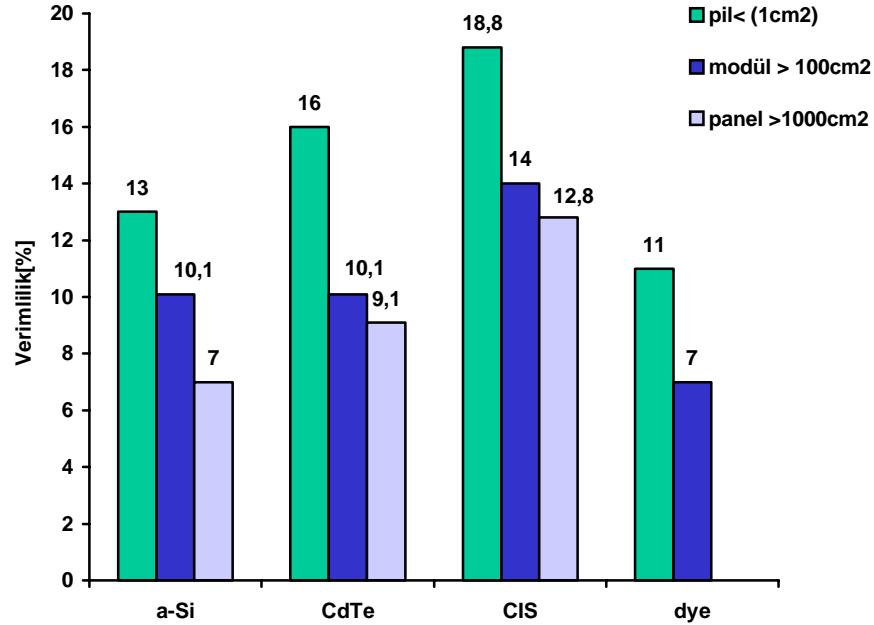
Günümüze kadar güneş pil üretim teknolojilerinde büyük ilerlemeler kaydedilmiş, yüksek verim değerlerine ulaşılmıştır. Tek kristal silisyumlu güneş pillerinde verimlilik %24'lere kadar ulaşmıştır [3]. Fakat tek kristal silisyumlu güneş pillerinde malzeme üretim maliyetinin yüksek ve malzeme tüketiminin fazla olması nedeniyle bu alanda değişik seçenek olarak çok kristalli malzemelerin geniş ölçekte kullanılmasına neden olmuştur. Güneş pillerinde kullanılan malzemenin kalınlığının, maliyetlerinin düşürülmesi yönünde yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları, ince film teknolojisinin doğmasına neden olmuştur. Bu alanda yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları güneş pilleri üretiminde kullanılabilecek bir çok yarı-iletken malzemenin düşük maliyetlerde cam gibi tutucu tabakalar üzerinde geniş yüzeylere kaplanabileceğini göstermiştir. Başka bir deyişle ince film yarı-iletken malzeme, büyüklükleri bir milimetrenin binde birinden milyonda birine değin değişen damarlardan oluşmaktadır. Damarların genişliği kristalin kalitesi ile doğru orantılıdır. Damarlar arasındaki süreksizlik, özellikle elektriksel yük taşıyıcılarının aktarılmasında önemli ölçüde engelleyici rol oynar.



Şekil 1.2 İnce-film teknolojisiyle üretilen güneş pilinin görünüşü.

İnce film güneş pilleri arasında üç büyük aday öne çıkmaktadır. Bunlar; amorf-silisyum (a-Si), kadmiyum-tellür (CdTe) ve bakır-indiyum-selenyum (CuInSe₂) bileşik yarı-iletkenleridir. Bu sayılan malzemeler dışında son zamanlarda organik boya maddelerinden (dye) üretilen güneş pilleri de gelecek için ümit verici adaylar arasında yer almaktadır [4]. Günümüzde ince film bileşik yarı-iletken ve

organik boya maddelerinden üretilen güneş pillerinin laboratuvar ölçümleri neticesinde elde edilen verimlilik değerleri Şekil 1.3’de verilmektedir.



Şekil 1.3 İnce-film ve organik boya maddelerinden üretilen güneş pillerinin verimliliklerinin karşılaştırılması [5].

Görüldüğü gibi en yüksek verimlilik bakır-indiyum-selenyum yapıları güneş pillerinden elde edilmektedir. Güneş pili üretiminde kullanılan malzemenin rezerv durumları da oldukça önemlidir. Silisyum, doğada en çok bulunan element olması nedeniyle rezerv konusunda geleceğe yönelik bir sorunu yoktur. Diğer güneş pillerini oluşturan elementlerin rezerv durumları dünyadaki yıllık üretim ve 500MW güç üretimi için gerekli miktar Tablo1.1’de özetlenmektedir.

Element	Dünya Rezervleri	Dünya Yıllık Üretimi	500MW güç için gereken Miktar Ton
Cd	970 000	20 000	25
Te	39 000	404	28
In	5 700	180	25
Se	130 000	2000	60
Ga	1 000 000	35	5

Tablo 1.1 Güneş pili üretiminde kullanılan bazı elementlerin rezerv durumları [6].

Çok kristalli ince film yapılarından olan bakır-indiyum-selenyum güneş pilleri; bakır, indiyum ve selenyum oranlarına göre 1-2.4 eV arasında yasak bant aralığı güneşin spektrumu ile ideal bir şekilde uyuşacak biçimde ayarlanabildiğinden, fotovoltaik uygulamalarında yaygınca kullanılmaktadır. Periyodik tablonun I., III. ve VI. grup elementlerin üçünün ya da daha fazlasının bir araya gelmesi ile oluşan bu bileşik yarı-iletkenlerinin soğurum katsayıları ($\alpha=10^4-10^5\text{cm}^{-1}$) yüksek olup; bakır, indiyum ve selenyumdan yapılan üçlü bileşik yarı-iletkenle başlayan bu grup CIS güneş pilleri olarak isimlendirilir. Bu tür yapılarda ilk üretilen güneş pillerindeki soğurucu tabaka CuInSe_2 yapısı olmuştur [7]. Daha sonra bu yapıya değişik elementler katılarak verim artırılmıştır. Günümüze kadar bu yapıda göze çarpan güneş pilleri CuInSe_2 , CuInS_2 , CuGaSe_2 , CuGaS_2 , Cu(In,Ga)Se_2 , CuIn(S,Se)_2 , Cu(In,Ga)(S,Se)_2 olarak sıralanabilir. Bu çalışmada kullanılan materyal farklı kompozisyona sahip CuIn(S,Se)_2 yapılı güneş pilleridir.

Çok kristalli yarı-iletken malzemenin her damar içerisinde elektriksel, optiksel ve yapısal özellikleri fotovoltaik uygulamalar için çok uygun olsa da, damarlar arası sınırlarda yer alan mikro düzeydeki yapısal kusurlar, çok kristalli malzemede karşılaşılan en önemli problemdir. Bu nedenle ZnO/CdS/CIS güneş pili yapılarının elektriksel karakterizasyonunun yapılması pil performansının belirlenmesinde çok büyük önem taşımaktadır. Admitans spektroskopisiyle yapılan

ölçümlerden tuzak seviyeleri belirlenebilmekte; kapasitans-gerilim ölçümüyle katkı yoğunlukları ve engel potansiyeli hesaplanabilmektedir. Sıcaklığa bağımlı akım-gerilim ölçümlerinden ise akım geçiş mekanizmaları belirlenebilmektedir.

Bu çalışmanın deneysel kısmının bir bölümü Stuttgart Üniversitesine bağlı IPE (Institute Physikalische Elektronik) laboratuvarlarında yapılmıştır. Güneş pillerinin tümü IPE'de hazırlanmış olup, elektriksel karakterizasyon ölçümleri de Muğla Üniversitesi araştırma laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sunumu aşağıda sıralanan formatı takip etmektedir; ikinci bölümde teorik bilgiler ana başlığı altında; materyal özellikleri, admittans spektroskopisi, akım-iletim mekanizmaları, eklem kapasitansı ile pn heteroeklem ara yüzeyi karakterizasyonu ve kuantum verimliliği ile ilgili teorik bilgiler kısaca verilmektedir. Üçüncü bölümde, kullanılan deneysel ölçüm sistemleri açıklanmıştır. Dördüncü bölümde ölçümler sonucunda elde edilen verilerin teorik yaklaşımlar altında incelenmesi ve elde edilen bulguların tartışılmasına yer verilmiştir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

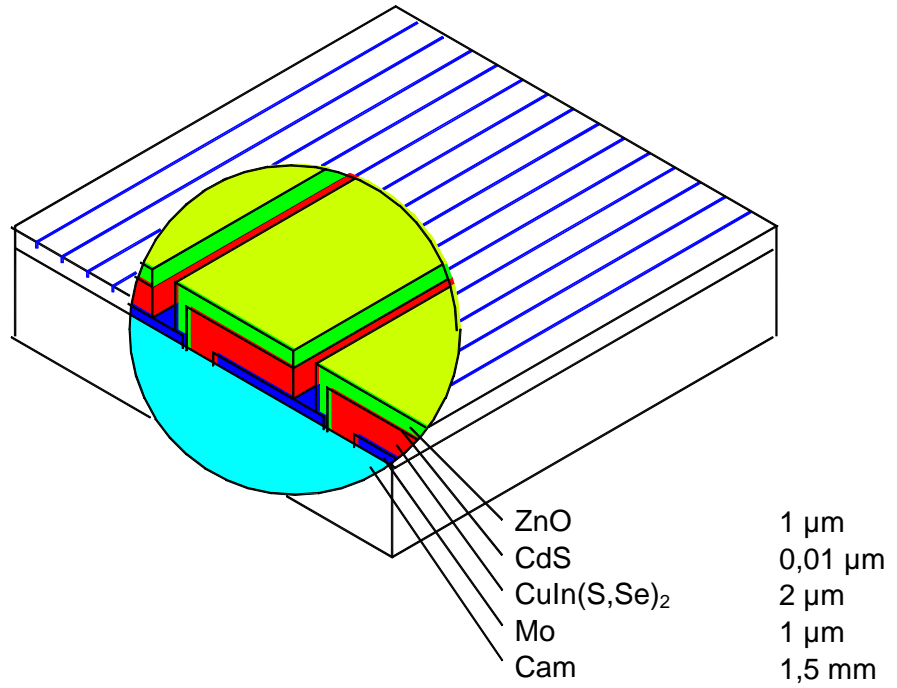
BÖLÜM 2

TEORİK BİLGİLER

2.1 ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ HETEROEKLEM GÜNEŞ PİLLERİNİN ÖZELLİKLERİ

2.1.1 GÜNEŞ PİLİNİ OLUŞTURAN TABAKALAR

Bu çalışmada incelenen güneş pilinin yapısı Şekil 2.1.1 de görüldüğü gibi pencere, ara, soğurucu, arka kontak ve koruyucu katman olmak üzere beş tabakadan meydana gelmektedir.



Şekil 2.1.1 ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ güneş pilini oluşturan tabakalarının dizilişi.

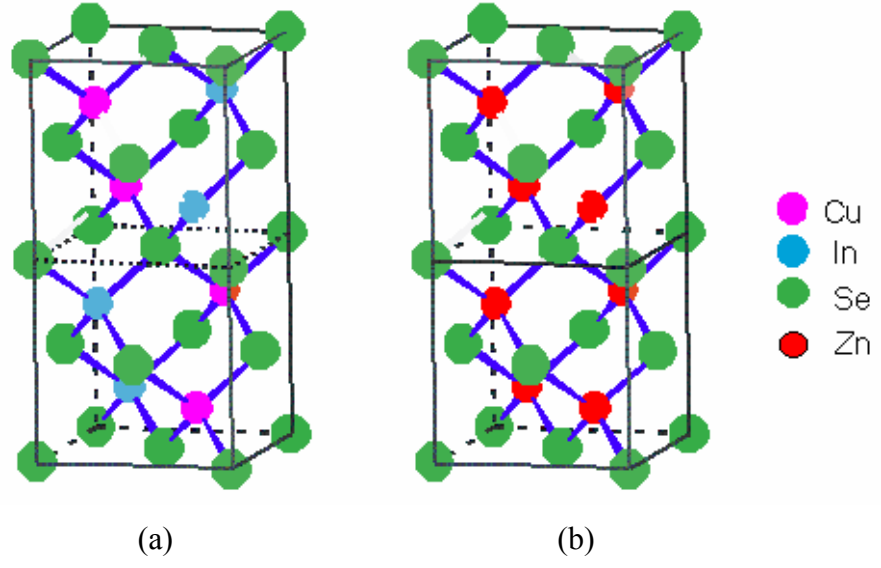
Pencere (ZnO) Tabakası : İlk üretilen CIS tabanlı güneş pillerinde pencere tabakası olarak CdS kullanılmıştır [8-9-10]. Fakat CdS'in optiksel geçirgenliğinin

düşük ve elektriksel direncinin yüksek olması nedeniyle, yerini optiksel geçirgenliği yüksek ve elektriksel direnci düşük olan ZnO'ye bırakmıştır [11]. ZnO'in yasak enerji aralığı 3.2eV mertebesinde olup, bu değer güneş spektrumunun önemli bir bölümünün geçmesine soğurmadan izin verir. ZnO pencere tabakası n-tipi olarak seçilir.

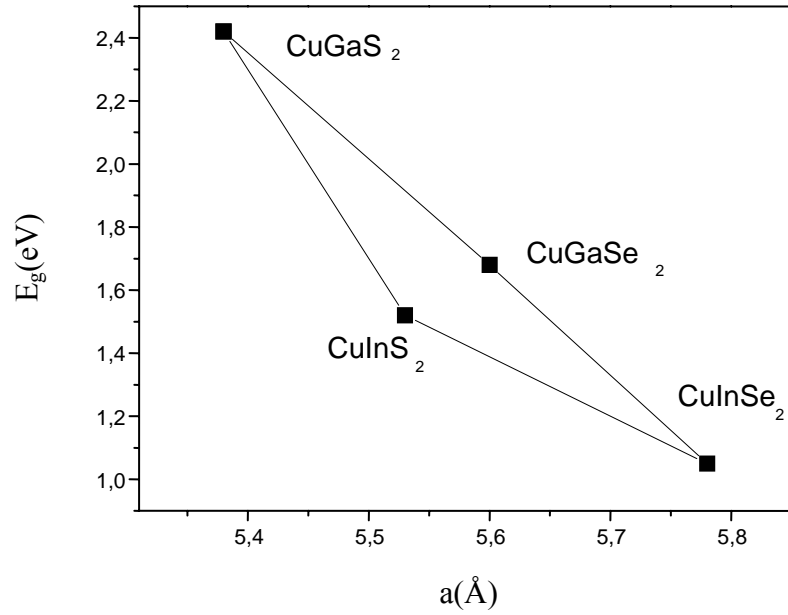
Ara (Buffer-CdS) Tabakası : Pencere tabakası ile soğurucu tabakası arasında örgü sabiti değerlerinin ve elektron düşkünlüğü (affinity) değerlerinin uyumunun sağlanması çok önemlidir. ZnO'in pencere tabakası olarak kullanılmasından sonra CdS'den tamamen vazgeçilmemiştir. ZnO ile CIS arasındaki örgü uyumsuzluğundan dolayı CdS ara tabaka görevini görmüştür. CdS'in ZnO'den sonra kullanılmasının diğer bir nedeni de soğurma katsayısının daha büyük olmasıdır. CdS ara tabakasının yasak enerji aralığı 2.4eV ve öz direnci de $1-10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ civarındadır.

Soğurucu Tabaka : Güneş pilinde elektron-boşluk çiftlerinin yaratılmasına neden olan tabakadır. CIS tabanlı güneş pillerinde CuInS_2 , CuInSe_2 , CuIn(S,Se)_2 , CuGaSe_2 , CuGaS_2 , Cu(In,Ga)Se_2 , Cu(In,Ga)S_2 , Cu(In,Ga)(S,Se)_2 gibi değişik soğurucu tabakalar üretmek mümkündür. Bu çalışmada kullanılan soğurucu tabaka CuIn(S,Se)_2 yapısıdır. CuInSe_2 ve CuInS_2 alaşımından meydana gelen CuIn(S,Se)_2 soğurucu tabakası I-III-VI₂ yarı-iletken ailesine üye olup, kristal yapısı tetragonal kalkopirit yapıdadır. Kalkopirit yapılar, CuInSe_2 yapısı örnek olarak ele alınırsa, II-VI yapısındaki kübik çinko (zinc blende) alaşımına benzer yapıda olup, Zn atomları yerine Cu ve In atomları yerleşmiştir. Şekil 2.1.2'de kübik çinko alaşımı ve kalkopirit yapının birim hücre yapıları gösterilmektedir. Şekil 2.1.2(a)'da görüldüğü gibi her bir Se atomunun dört bağından birine Cu ya da In atomu bağlanmıştır. I-VI ve III-VI yapıları genel olarak kuvvetli bağ oluştururlar.

I-III-VI₂ kalkopirit bileşiklerinin yasak bant aralıkları, diğer benzer yapılara oranla daha büyüktür. Bakır kaplı kalkopirit yapıların yasak bant aralıkları Şekil 2.1.3'de görüldüğü gibi 1.04eV-2.4eV aralığını kapsamaktadır.



Şekil 2.1.2 (a) CuInSe_2 'nin kalkopirit yapısı (b) ZnSe 'un kübik çinko yapısı.

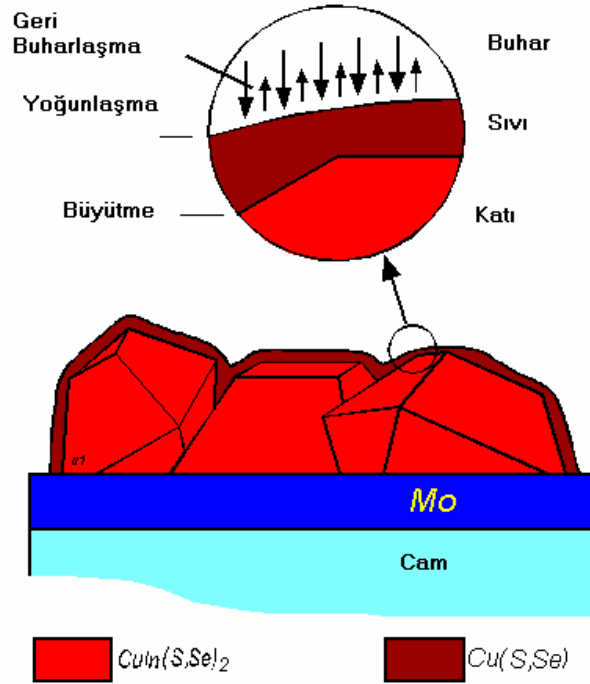


Şekil 2.1.3 Cu(In,Ga)(S,Se)_2 yapısının yasak bant aralığına karşılık örgü sabiti.

2.1.2 GÜNEŞ PİLLERİNİN HAZIRLANMASI

Şekil 2.1.1’de görüldüğü gibi ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pilinin sıralı tabakaları alttan yukarı doğru gidilerek hazırlanır. Tipik olarak 1µm kalınlığındaki aygıtın geri kontağı, soda-lime cam tutucu tabaka üzerine molibdenin elektron demeti yardımı ile buharlaştırılmasıyla ilk tabaka oluşturulur. Bu tabakanın tipik öz direnç değeri 0,15 - 0,25 Ω.µm arasında değişmektedir. Daha sonra molibden üzerine p-tipi soğurucu CuIn(S,Se)₂ tabakası, 550-600°C sıcaklıkları arasında yüksek vakum altında toplu-buharlaştırma (co-evaporation) tekniği kullanılarak büyütülür. Bu tabaka da yaklaşık olarak 1-2µm kalınlığındadır. Bu işlemden sonra da 50nm kalınlığındaki n-tipi ara tabaka CdS kimyasal banyo depolama tekniği kullanılarak büyütülür. Daha sonra ZnO, radyo frekansında salınım yapan magnetik alan içerisinde püskürtme tekniği ile oluşturulur ve en son olarak da Ni/Al/Ni kullanılarak güneş pilinin üst kontaktları oluşturulur [11].

Toplu-buharlaştırma yöntemiyle hazırlanan CuIn(S,Se)₂ filmini büyütme süresince, sırasıyla önce materyal çökeltme daha sonra ise film biçimlendirme işlemi yerine getirilir. Film büyütme süresince sıcaklık 550°-600°C sıcaklıkları arasında sabit tutulmalıdır. Yüksek bakır içeren CuIn(S,Se)₂ yapılarda, Cu_{2-y}(S,Se)’nin CuIn(S,Se)₂’den ayrışması film yüzeyinde ikincil bir faz özelliğine sahip bir tabakanın oluşmasına neden olur. Film yüzeyinde oluşan bu ikincil faz durumu, KCN (potasyum siyanür) içinde soğurucu materyalin asitle tepkimesi sonucunda yok edilir. KCN asitinin kullanımı , film yüzeyi üzerindeki kusurları belli ölçüde sınırlandırır. Film büyütme süresince yüksek bakır karışımı çok önemli bir rol oynamaktadır. Yüksek bakır oranına sahip filmlerdeki damar ebatları yüksek indiyum içeren filmlerdeki damar ebatlarından daha büyük olup yaklaşık 1µm’dir [12]. Şekil 2.1.4’de gösterilen Cu_{2-y}(S,Se) tabakası CuIn(S,Se)₂’un büyütülmesi için gerekli yarı-sıvı bir yüzey filmi oluşturmaktadır.



şekil 2.1.4 Çok kristalli CuIn(S,Se)_2 filminde yarı-sıvı yüzey filmi $\text{Cu}_{2-y}(\text{S,Se})$ ' nin oluşturulması.

Soğurucu tabakanın üretim aşamalarında, büyütme sürecinin bitimine kadar yüksek bakır oranı tercih edilir. Geniş damarların oluşumuna neden olan bakırın yerini doldurabilecek diğer element ise indiyumdur. Güneş pilinin elektronik özelliklerini olumlu yönde etkileyen yüksek indiyum oranı bakırın yerine tercih edilebilmektedir. İndiyumun kullanıldığı büyütme işleme ilk örnek BOEING (bi-layer-process) olarak bilinen tek katmanlı işlemdir. Bu işleme yüksek bakır oranı ile başlanılıp, yüksek indiyum oranıyla son verilir [13]. Diğer bir işlem ise ters çevrimli işlemdir. Ters çevrilmiş sürecin en iyi sonuç vereni üç aşamalı süreçtir (three-stage) [14]. Bu işleminde de selenyum ve sülfür oranları işlem sonuna kadar sabit tutulur. İlk süreçte indiyum oranı ile başlanılıp, ikinci süreçte ise yüksek bakır oranı ile devam edilir, son süreçte ise yine indiyum katkılanır.

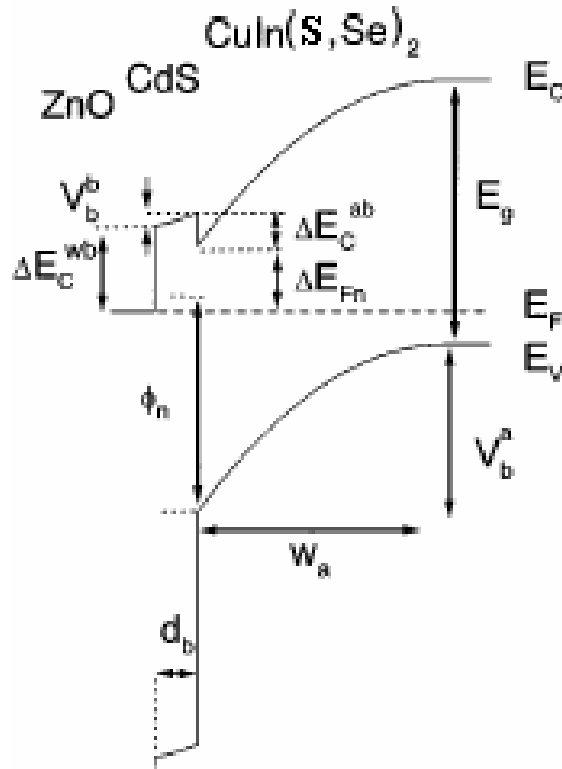
Üç süreçli işleme büyütülen filmlerin yüzey morfolojileri, BOEING işleminde büyütülen filmlere göre daha düzgün ve pürüzsüz olmaktadır. Ayrıca CIS

yapılı güneş pillerinde, üç süreçli işlemle üretilenlerin diğer sözü edilen işlemlerle üretilenlere nazaran daha verimli olduğu saptanmıştır [15].

2.1.3 ENERJİ BANT PROFİLİ

Materyali farklı yarı-iletkenlerin birleşmesiyle meydana gelen aygıtlara heteroeklem yarı-iletkenler denir. Heteroeklem yapıyı oluşturan materyallerin iletkenlik tipleri aynı ise izotip, farklı ise anizotip heteroeklem olarak adlandırılır. ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ yapılı güneş pilleri anizotip heteroeklem yapıda olup, dar yasak enerji aralığına sahip p-tipi CuIn(S,Se)₂ yarı-iletkeni ile geniş yasak enerji aralığına sahip n-tipi CdS yarı-iletkeni kullanılarak üretilirler.

Dar yasak enerji aralığına sahip CuIn(S,Se)₂ ve geniş yasak enerji aralığına sahip CdS'ten meydana gelen CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pilinin Anderson [16] modeline göre dengedeki bant diyagramı Şekil 2.1.5'de görülmektedir.



Şekil 2.1.5 ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pilinin enerji bant diyagramı.

İletim ve değerlik bandı enerjileri $E_{C,V}$ ile belirtilmiştir. E_F ise Fermi enerji seviyesini belirtmektedir. CdS ara tabakanın kalınlığı d_b , soğurucu tabakanın yasaak enerji aralığı E_g ile gösterilmiştir. Soğurucu tabakanın boşaltılmış bölgesinin genişliği ise w_a ile belirtilmiş olup ΔE_{Fn} soğurucu tabakadaki iletim bandından Fermi seviyesine olan uzaklığı, ϕ_n ara yüzeydeki değerlik bandından Fermi seviyesine olan uzaklığı vermektedir

2.2 ADMİTTANS SPEKTROSKOPİSİ

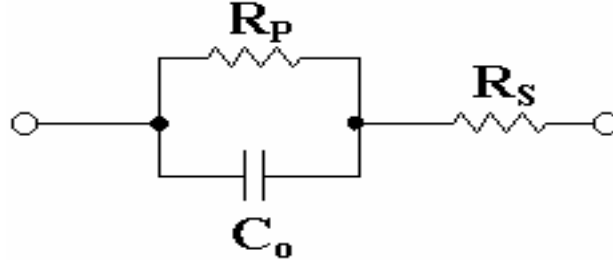
Güneş pilinin eklem bölgesindeki özelliklerinin belirlenmesine yönelik olmak üzere yapılan admittans spektroskopisi ölçümleri, frekans ve sıcaklığın fonksiyonu olarak konduktans $G(\omega, T)$ ve kapasitans $C(\omega, T)$ ölçümlerini kapsamaktadır. ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem aygıtın boşaltılmış bölgesindeki katkı düzeylerinin analizi sıcaklığa bağımlı kompleks admittans ölçümüyle yapılabilir. Kompleks admittans Y 'nin açısal frekans ile olan bağıntısı;

$$Y(\omega) = G(\omega) + i\omega C(\omega) \quad (2.2.1)$$

ile verilir. Bu ifadeler Kramer-Kronigs kuralına göre ve Şekil 2.2.1'de görüldüğü gibi CuIn(S,Se)₂ güneş pilinin eşdeğer devresi göz önüne alınarak çözümlendiğinde (2.2.1) nolu ifade[17-18],

$$Y(\omega) = \frac{\omega^2 \tau^2 G}{1 + \omega^2 \tau^2} + i\omega \left(\frac{\tau C}{1 + \omega^2 \tau^2} + \frac{\epsilon_s}{w} \right) \quad (2.2.2)$$

şeklinde verilir. Buradaki w boşaltılmış bölgenin genişliği ve ϵ_s ise yarıiletkenin dielektrik sabitidir.



Şekil 2.2.1 Seri ve paralel konfigürasyonlarda bağlanan direnç ve kondansatörlü CuIn(S,Se)₂ güneş pilinin eşdeğer devresi.

Boşaltılmış bölgede sığ alıcı ve verici düzeyleriyle birlikte kapasitif etki gösteren pn eklemlerine değişik frekanslar uygulandığında, çoğunluk yük taşıyıcıları uygulanan frekansa karşı bir tepki gösterir. Bu durumda tepki(cevap) süreleri relaksasyon süreleri τ_{rel} ile bağlıdır [19-20];

$$\tau_{rel} = \varepsilon / \sigma \quad (2.2.3)$$

Bu bağıntıda σ iletkenliği ifade etmektedir. Açısal modülasyon frekansı ($\omega = 2\pi f$), τ_{rel}^{-1} değerini aştığında çoğunluk yük taşıyıcıları uygulanan frekansa tepki vermezler. Yüksek frekanslarda, bütün yarı-iletkenlerde olduğu gibi, pn eklemi bir dielektrik gibi davranır ve kapasitans değeri,

$$C_{geo} = \frac{\varepsilon_s}{d} \quad (2.2.4)$$

eklemin geometrik kapasitansına eşit olur. Güneş pilinde bulunan tuzak seviyeleri eklem kapasitansına önemli oranda etki etmektedir. Eklem kapasitansı, çoğu durumda boşaltılmış bölge kapasitansı (C_{SCR})olarak da adlandırılır ve

$$C_{SCR} = \frac{\varepsilon_s}{w} = \left(\frac{\varepsilon_s q N_A}{V_{bi}} \right)^{1/2} \quad (2.2.5)$$

şeklinde verilir. Burada N_A alıcı konsantrasyonunu, q elektronun yükünü ve V_{bi} ise engel potansiyelini vermektedir.

Buna göre tuzak seviyesinin aygıt kapasitansına olan katkısı; açılmalık frekans ω ile olan değişimi,

$$C_t \propto \frac{\omega_0^2}{(\omega_0^2 + \omega^2)} \quad (2.2.6)$$

olarak verilir [21].

Kapasitansın değişim gösterdiği noktadaki frekans değerini ifade eden bükülme frekansı ω_0 (Şekil 2.2.2), tuzak seviyesinin relaksasyon süresi ile;

$$\omega_0 = \frac{2}{\tau_e} = 2N_{C,V} v_{th} \sigma_{n,p} \exp\left(-\frac{E_T}{kT}\right) \quad (2.2.7)$$

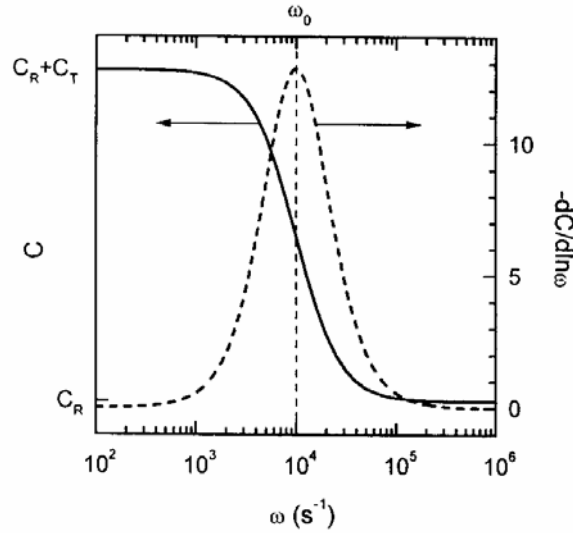
şeklinde bağıntılıdır [22]. Burada $N_{C,V}$ band durumuna göre durum yoğunluğunu, v_{th} taşıyıcının termal hızını ve $\sigma_{n,p}$ elektron ve boşluk için tuzak tutma kesit alanını vermektedir. E_T enerji değeri ise band durumuna göre tuzak seviyesinin bant kıyısına olan uzaklığını göstermektedir.

Denklem (2.2.7)'deki $N_{C,V}$ ve v_{th} ifadeleri sıcaklığa bağımlı olduklarından, ω_0 bükülme frekansı sıcaklığa bağımlı olarak,

$$\omega_0 = \xi_0 T^2 \exp\left(-\frac{E_T}{kT}\right) \quad (2.2.8)$$

yazılabilir. Pre-eksponansiyel faktörü olarak adlandırılan ξ_0 sıcaklıktan bağımsız tüm parametreleri ifade etmektedir. Şekil 2.2.2'de kapasitansın frekans ile değişimi görülmektedir. Kapasitans frekans değişimlerindeki bükülme, relaksasyon süresi ile

doğrudan bağlıdır. Kapasitans frekans değişimindeki bükülme frekansından sonra azalan kapasitans değeri, yarı-iletkenin boşaltılmış bölgesinin konduktansının artmasına neden olur. Konduktansın artmasıyla birlikte özdirenç de ara yüzeydeki ac sinyalini takip edemeyen tuzak seviyelerinin serbest yük taşıyıcılarınca boşaltılması sonucunda azalmaya başlayacaktır.

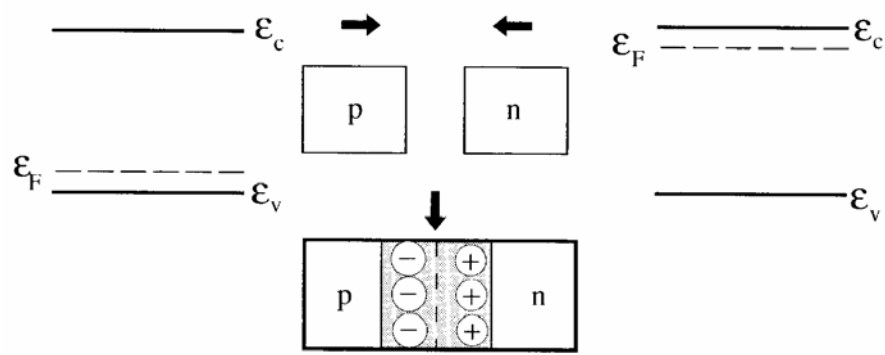


Şekil 2.2.2 ZnO/CdS/CIS güneş pillerinde kapasitansın açısal frekans ile olan değişimi.

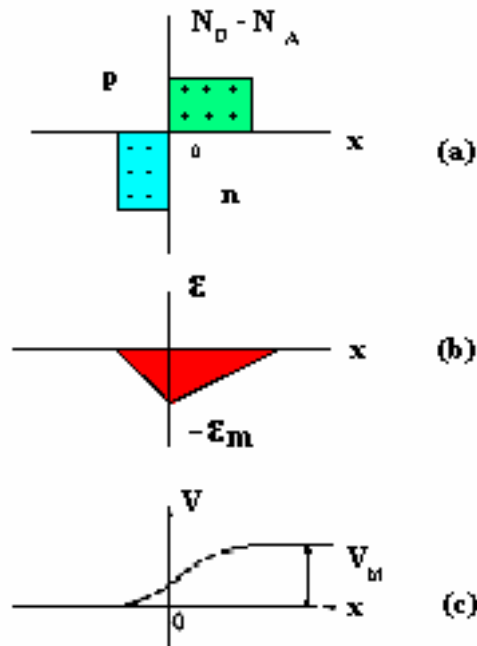
2.3 PN HETEROEKLEMLERDE EKLEM KAPASİTANSI

Şekil 2.3.1’de görüldüğü gibi ısısal denge ve hiçbir ileri veya ters gerilimin uygulanmadığı durumdaki bir pn eklemde, elektriksel olarak yüksüz olan p- ve n-tipi bölgeler eksi yüklü alıcı (N_A) ve artı yüklü verici (N_D) iyonların bulunduğu boşaltılmış bölgeler tarafından ayrılmışlardır. Bu durum artı ve eksi yüklerden oluşmuş düzlem levhali kapasitansa benzer. Bu yükler sonucu pn eklem aygıtında bir kapasitans etkisi söz konusudur.

Boşaltılmış bölgenin genişliği ve elektrostatik potansiyelin değişimi Şekil 2.3.2’de gösterilen keskin (abrupt) değişimli eklem modeli kullanılarak hesaplanabilir.



Şekil 2.3.1 p ve n tipi yarıiletkenlerin bir araya gelmesi sonucu oluşan boşaltılmış bölge.



Şekil 2.3.2 Keskin yük değişimli eklem modelinin (a) yüklerin, (b) elektrik alanının ve (c) engel potansiyelinin konum ile değişimi.

Keskin değişimli eklem modelinde eklem dolayındaki yük yoğunluğu aşağıda verildiği gibidir:

$$\rho(x) = \begin{cases} -qN_A & -w_p < x < 0 \\ +qN_D & 0 < x < w_n \\ 0 & \text{diğer bölgeler} \end{cases} \quad (2.3.1)$$

Genişlikleri sırasıyla w_n ve w_p olan serbest yüklerden boşaltılmış n- ve p-tipi bölgelerdeki tüm alıcı ve verici yoğunluklarının iyonize olduğu ve x-konumu ile keskin değiştiği (Şekil 2.3.2a) durumda, eklem merkezindeki ($x=0$) yük nötralizasyonu şartı,

$$q N_A w_p = q N_D w_n \quad (2.3.2)$$

olarak verilir. Poisson eşitliğini kullanılarak eklem bölgesindeki elektrik alan şiddeti E hesaplanabilir,

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{dE}{dx} = -\frac{\rho}{\epsilon_s} \quad (2.3.3)$$

Buradaki ρ yük yoğunluğunu ifade etmektedir. Bu denklemin çözümlüyle boşaltılmış bölge sınırlarına göre elektrik alan ifadeleri,

$$\begin{aligned} E(x) &= -qN_A(x + w_p)/\epsilon_p & -w_p < x < 0 \\ E(x) &= qN_D(x - w_p)/\epsilon_n & 0 < x < w_n \end{aligned} \quad (2.3.4)$$

olarak bulunabilir. Buradaki ϵ_p ve ϵ_n sırasıyla p- ve n-tipi yarı-iletken malzemelerin dielektrik sabitleridir. Aynı şekilde boşaltılmış bölge boyunca elektrostatik potansiyeldeki değişimler;

$$V(x) = qN_A x(x + 2w_p) / 2\varepsilon_p \quad -w_p < x < 0 \quad (2.3.5)$$

$$V(x) = -qN_D x(x - 2w_p) / 2\varepsilon_n \quad 0 < x < w_n$$

olarak verilebilir.

Boşaltılmış bölge boyunca potansiyelde olan değişim toplam difüzyon ya da engel potansiyeli olarak adlandırılır. Buna göre engel potansiyeli V_{bi} ,

$$V_{bi} = \frac{q}{2\varepsilon} \left(\frac{N_D N_A}{N_A + N_D} \right) w^2 \quad (2.3.6)$$

şeklinde bulunur. pn-heteroeklem yapının boşaltılmış bölge kapasitansı n-tipi ve p-tipi bölgelerin kapasitanslarının seri toplamı şeklinde düşünülebilir. Bu durumda,

$$C_T^{-1} = C_n^{-1} + C_p^{-1}$$

$$C_n = \left| \frac{dQ_n}{d(V_{bn} - V_n)} \right| \quad \text{ve} \quad C_p = \left| \frac{dQ_p}{d(V_{bp} - V_p)} \right| \quad (2.3.7)$$

şeklinde yazılabilir. Buradaki V_{bn} ve V_{bp} sırasıyla n- ve p-tipi kısımlardaki engel potansiyellerini ifade etmektedir. Ayrıca buradaki net yük değerleri,

$$Q_n = BqN_D w_n \quad \text{ve} \quad Q_p = BqN_A w_p \quad (2.3.8)$$

şeklinde olup, B eklem kesit alanını belirtmektedir. Buna göre toplam kapasitans;

$$C = \frac{dQ}{dV} = \sqrt{\frac{B^2 \varepsilon_p \varepsilon_n q N_A N_D}{2(\varepsilon_p N_A + \varepsilon_n N_D)(V_{bi} - V)}} \quad (2.3.9)$$

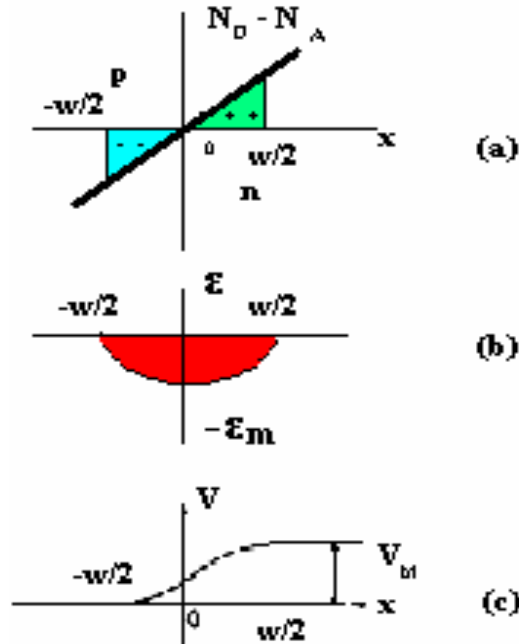
olarak ifade edilir. Eğer eklemde bir tarafındaki katkı yoğunluğu biliniyorsa, $1/C^2$ - V grafiğinin değişiminden diğer bölgenin katkı yoğunluğu hesaplanabilir. Eğer $N_D \gg N_A$ ise, kapasitans;

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} - V)}{B^2 q \epsilon_p N_A} \quad (2.3.10)$$

şeklinde yazılabilir. $1/C^2$ - V değişimi doğrusal olup değişimin voltaj eksenini kestiği nokta eklemdeki engel potansiyelini (V_{bi}) verir. Eğer pn eklemi Şekil 2.3.3'de görüldüğü gibi lineer yük dağılımlı (linearly graded) bir eklem yapı olarak ele alınırsa kapasitans değeri;

$$C = \frac{dQ}{dV} = \left[\frac{a \epsilon^2 q}{12(V_{bi} \pm V)} \right]^{1/3} \quad (2.3.11)$$

şeklini alır. Buradaki a safsızlık yoğunluğunun konum ile olan değişimini ifade etmektedir.

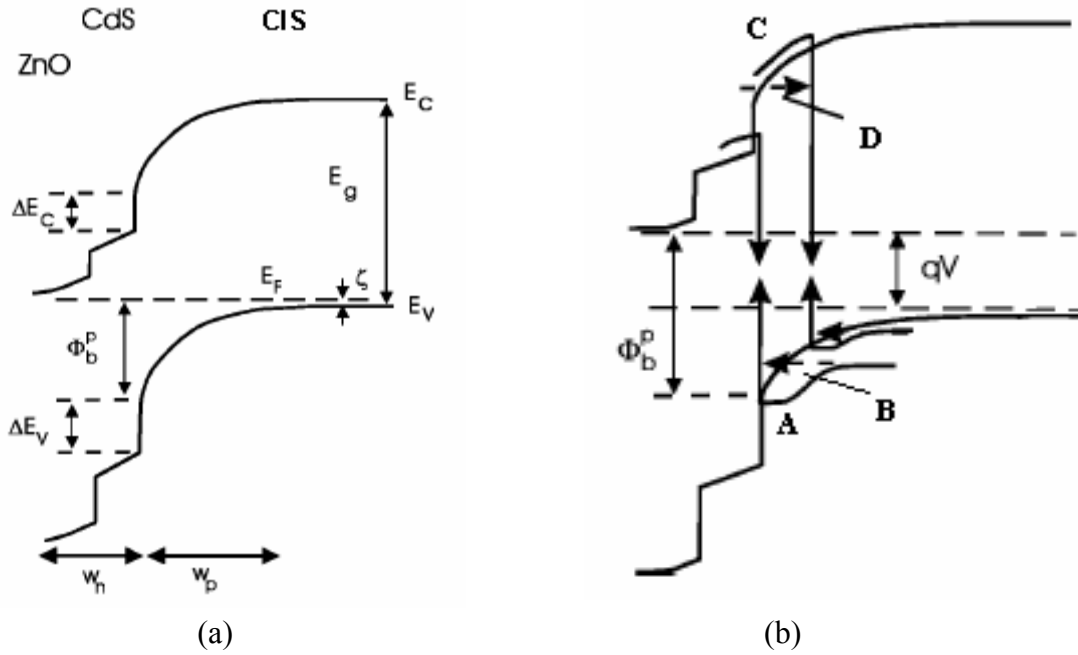


Şekil 2.3.3 Lineer yük değişimli eklem modelinin (a) yüklerin, (b) elektrik alanının ve (c) engel potansiyelinin konum ile değişimi.

2.4 ZnO/CdS/CIS HETEROEKLEM YAPILARINDA AKIM-İLETİM MEKANİZMALARI

ZnO/CdS/CIS heteroeklem güneş pil yapısında Şekil 2.4.1(b)'de görüldüğü gibi dört farklı akım-iletim mekanizması ileri sürülmüştür [23]. Bunlar;

- Ara yüzeyde yeniden birleşme mekanizması (A)
- Ara yüzeyde tünellemenin arttırdığı yeniden birleşme mekanizması (B)
- Boşaltılmış bölgede yeniden birleşme mekanizması (C)
- Boşaltılmış bölgede tünellemenin arttırdığı yeniden birleşme mekanizması(D)



Şekil 2.4.1 (a) ZnO/CdS/CIS heteroeklem yapının enerji bant diyagramı (b) ZnO/CdS/CIS heteroeklem yapılarında akım-iletim mekanizmaları.

Hurkx ve grubu tarafından geliştirilmiş olan tünellemenin arttırdığı akım iletim mekanizmasına göre yeniden birleşme oranı [24];

$$R = \frac{np - n_i^2}{\gamma_p (n + n^*) + \gamma_n (p + p^*)} \quad (2.4.1)$$

şeklinde olup, burada

$$n^* = N_C \exp\left[\frac{(E_T - E_C)}{kT}\right], \quad p^* = N_V \exp\left[\frac{(E_V - E_T)}{kT}\right]$$

olarak tanımlanır. N_C, N_V iletim ve değerlik bandındaki etkin durum yoğunluklarını; E_C, E_V ve kT ise sırasıyla iletim, değerlik bant enerjilerini ve ısısal enerjii ifade etmektedir. n ve p serbest elektron ve boşluk yoğunluklarını, n_i ise saf yük yoğunluğunu belirtmektedir. $\gamma_{n,p}$ ifadesi elektron veya boşlukların yakalanma süresini belirtmekte olup ara yüzeyde yeniden birleşme mekanizması etkin ise denklem (2.4.1)'deki R oranı $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ biriminde olup,

$$\gamma_{n,p} = [S_{n,p} (1 + \Gamma)]^{-1} \quad (2.4.2)$$

şeklinde yazılabilir. Buradaki $S_{n,p}$ ara yüzeydeki elektron veya boşlukların yeniden birleşme hızını ve Γ terimi de düzeltme faktörünü ifade etmektedir. Eğer boşaltılmış bölge içerisinde yeniden birleşme mekanizması etkin ise R oranı $\text{cm}^{-3}\text{s}^{-1}$ biriminde olup,

$$\gamma_{n,p} = \tau_{n,p} (1 + \Gamma)^{-1} \quad (2.4.3)$$

şeklinde yazılabilir. Buradaki $\tau_{n,p}$ ifadesi ise elektron veya boşlukların yaşam sürelerini vermektedir. Isısal uyarımlı tünelleme ile arttırılan yeniden birleşme mekanizması için düzeltme faktörü;

$$\Gamma = 2\sqrt{3\pi} \frac{|F|}{F_\Gamma} \exp\left(\frac{|F|^2}{F_\Gamma^2}\right) \quad (2.4.4)$$

ile ifade edilir [25]. Bağınıtıda;

$$F_\Gamma = \left[24m^* (kT)^3\right]^{1/2} (q\hbar)^{-1} \quad (2.4.5)$$

olup, $|F|$ tuzak çevresindeki elektrik alan şiddetini, m^* niceliği etkin tünelleme kütleini ve q ise elementer yükü belirtmektedir. Şekil 2.4.1'de görüldüğü gibi parabolik bant eğilmesinin olduğu durumda elektrik alan şiddeti;

$$|F| = \sqrt{(2qN_A V_b(x) \varepsilon_s)} \quad (2.4.6)$$

olup,

$$\Gamma_{n,p} = 2\sqrt{3\pi} \frac{|F|}{F_\Gamma} \exp\left(\frac{qV_b(x)}{kT} - \frac{E_{00}^2}{3(kT)^2}\right) \quad (2.4.7)$$

şeklinde gösterilir. Buradaki E_{00} karakteristik tünelleme enerjisi olup,

$$E_{00} = \frac{q\hbar}{2(N_A / m^* \varepsilon_s)^{1/2}} \quad (2.4.8)$$

şeklinde verilir [26].

2.4.1 ARAYÜZEYDE TÜNELLEMENİN ARTTIRDIĞI YENİDEN BİRLEŞME

Yeniden birleşme seviyelerinin iletim ya da değerlik bandına yakın olmadıkları $\left(p^* = \frac{\gamma_n}{\gamma_p}; n^* \ll n \text{ koşulunda} \right)$ durumlarda denklem(2.4.1) sadeleşerek;

$R = \frac{P}{\gamma_p}$ şeklini alır. İleri besleme durumunda ara yüzeydeki yeniden birleşme akımı;

$$\begin{aligned} J_{if} &= qS_p (1 + \Gamma) p \\ J_{if} &= qS_p (1 + \Gamma) N_v \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(\frac{-\phi_b^p}{kT}\right) \end{aligned} \quad (2.4.9)$$

olarak verilir. Burada V uygulanan potansiyeli, Φ_b^p potansiyel engelini ve S_p 'de ara yüzeydeki boşlukların yeniden birleşme hızını ifade etmektedir. Denklem (2.4.9) ayrıca boşaltılmış bölge boyunca Fermi enerji düzeyinin sabit olduğu varsayılmaktadır. Maksimum yeniden birleşme hızının ısısal hıza eşit olduğu ($s_p = v_{th}$) ve tünellemenin önemsiz olduğu ($\Gamma \ll 1$) durumlarda ise yeniden birleşme akımı Schottky kontakları için geliştirilmiş olan termo-iyonik emisyon akım ifadesi ile aynı olmaktadır [27]. Dolayısıyla;

$$J_{if} = qS_p (1 + \Gamma) N_v \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \right] \exp\left(\frac{-\phi_b^p}{kT}\right) \quad (2.4.10)$$

şeklinde verilmektedir. Tünellemenin önemli olduğu durumlarda ise ($\Gamma \gg 1$) akım ifadesi;

$$J_r = qS_p N_V 2\sqrt{3\pi} \sqrt{\frac{\Phi_b^p - V - \zeta}{3kT} \frac{E_{00}}{(kT)^2}} \times \left[\exp\left(\frac{-\Phi_b^p}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \exp\left[\frac{\zeta}{kT} \left(\frac{1}{A_{ps}} - 1\right)\right] \right] \quad (2.4.11)$$

şeklindedir. Burada $V_b = \Phi_b^p - V - \zeta$ olup soğurucu tabaka içindeki bant eğilme miktarını ve ζ 'de nötral bölge içerisinde Fermi düzeyi ile değerlik bandı arasındaki enerji farkını vermektedir.. Tünelleme için diyot idealite faktörü A;

$$\frac{1}{A} = 1 - \frac{E_{00}^2}{3(kT)^2} \quad (2.4.12)$$

olarak verilir. Eklem ara yüzeyinde bantlardaki değişimin parabolik olduğu durumlarda ise akım;

$$J_r = J_{00} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \right] \exp\left(\frac{-\Phi_b^p}{kT}\right) \quad (2.4.13)$$

şeklinde ifade edilir. Burada;

$$J_{00} = qS_p N_V \sqrt{\frac{\pi q V_b E_{00}}{kT \cosh(E_{00}/kT)}} \exp\left[\frac{-\zeta}{kT} \left(\frac{1}{A} - 1\right)\right] \quad (2.4.14)$$

ile verilir. Bu durumda diyot idealite faktörü;

$$A = \frac{E_{00}}{kT} \coth\left(\frac{E_{00}}{kT}\right) \quad (2.4.15)$$

olarak ifade edilir.

2.4.2 BOŞALTILMIŞ BÖLGE İÇERİSİNDE TÜNELLEMEİN ARTTIRDIĞI YENİDEN BİRLEŞME

Boşaltılmış bölge içerisinde tünellemenin arttırdığı yeniden birleşme mekanizmasını ele alacak olursak düzeltme faktörü [27];

$$\Gamma = 2\sqrt{3\pi} \sqrt{\frac{qV_b(x)}{3kT} \frac{E_{00}^2}{(kT)^2}} \exp\left(\frac{qV_b(x)}{3kT} \frac{E_{00}^2}{(kT)^2}\right) \quad (2.4.16)$$

şeklindedir. Burada yine bantlardaki eğilme parabolik olup; elektrik potansiyelin konum ile olan değişimi;

$$V_b(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s} (\omega - x)^2 = \frac{\epsilon_s}{2qN_A} |F(x)|^2 \quad (2.4.17)$$

şeklinde verilir. Walter ve grubu, yeniden birleşme seviyelerinin dağılımlarının üstel olarak değiştiğini varsaymaktadır [26]. Buna göre;

$$dN_T(\eta) = (kT^*)^{-1} \exp\left(-\frac{\eta}{kT^*}\right) d\eta \quad (2.4.18)$$

şeklinde verilmekte olup burada kT^* dağılımdaki karakteristik enerjiyi, $\eta = E_T - E_V, \eta = E_T - E_C$ dağılımdaki değerlik, iletim bandı kıyısındaki maksimum olduğu durumları göstermektedir. Bant aralığına bağlı net yeniden birleşme oranı;

$$R_{T^*} = np \int_0^{E_g} \frac{\exp(-\eta/kT^*)}{\gamma_p n + \gamma_n p + \gamma_n N_V} \frac{d\eta}{kT^*} \quad (2.4.19)$$

olarak yazılabilir. Eğer $E_g > kT^* > kT$ ve integrasyon sınırları da $\pm\infty$ olarak tanımlanır ve $v = \gamma_n N_V \exp(-\eta/kT)/(\gamma_p n + \gamma_n p)$ değişimi kullanılırsa,

$$R_{T^*} \approx np \frac{T}{T^*} \frac{(\gamma_p n + \gamma_n p)^{T/T^* - 1}}{(\gamma_n N_V)^{T/T^*}} \int_0^\infty \frac{v^{T/T^* - 1}}{1+v} dv = np \frac{(\gamma_p n + \gamma_n p)^{T/T^* - 1}}{(\gamma_n N_V)^{T/T^*}} \frac{\pi T/T^*}{\sin(\pi T/T^*)}$$

olarak bulunur. Bu ifadeyi daha da genelleştirecek olursak, n_m, p_m ve F_m ifadelerine maksimum yeniden birleşme noktasındaki serbest elektron ve boşluk yoğunlukları ve elektrik alanı dersek, maksimum yeniden birleşme oranını;

$$R_{T^*}(\delta x) = np \left[\tau_p n_m \exp\left(\frac{-qF_m \delta x}{kT}\right) + \tau_n p_m \exp\left(\frac{qF_m \delta x}{kT}\right) \right]^{T/T^* - 1} \times \frac{1+\Gamma}{(\tau_n N_V)^{T/T^*}} \frac{\pi T/T^*}{\sin(\pi T/T^*)} \quad (2.4.20)$$

olarak bulunur. Yeniden birleşme oranı standart SRH (Shockley-Read-Hall) yeniden birleşme oranı ile tünellemenin arttırdığı yeniden birleşme oranının toplamıdır [28]. Toplam yeniden birleşme akımı $u = (\tau_p p_m / n_m \tau_n)^{1/2} \exp(qF_m \delta x / kT)$ ifadesi kullanılarak

$$J = q \int_{-x_m}^{w-x_m} R_{T^*}(\delta x) d\delta x \approx q \int_{-\infty}^{\infty} R_{T^*}(\delta x) d\delta x = q \int_0^\infty R_{T^*}(u) \frac{kT}{F_m} \frac{du}{u} \quad (2.4.21)$$

bulunabilir. Aynı zamanda;

$$R_{T^*}(u) = np (\tau_p n_m \tau_n p_m)^{(T/T^* - 1)/2} (u^{-1} + u)^{(T/T^* - 1)} \times \frac{1+\Gamma}{(\tau_n N_V)^{T/T^*}} \frac{\pi T/T^*}{\sin(\pi T/T^*)}$$

şeklinde yazılabileceğinden akım,

$$J = (np)^{(T/T^*+1)/2} \frac{(\tau_p \tau_n)^{(T/T^*+1)/2}}{(\tau_n N_V)^{T/T^*}} \frac{kT}{F_m} \frac{\pi T/T^*}{\sin(\pi T/T^*)} \times \int_0^\infty \frac{(u^{-1} + u)^{(T/T^*-1)}}{u} du$$

olarak ifade edilebilir. Bu denklem çözümünden,

$$J = \frac{kT}{F_m} \left(\frac{N_C N_V}{\tau_n \tau_p} \right)^{1/2} \left(\frac{\tau_p N_C}{\tau_n N_V} \right)^{T/2T^*} \Lambda(T/T^*, 1) \left[\exp\left(\frac{qV - E_g}{kT} \right) \right]^{(T/T^*+1)/2} \quad (2.4.22)$$

$$J = J_{00} \exp\left(\frac{qV}{AkT} \right) \exp\left(\frac{-E_g}{AkT} \right)$$

elde edilir. Burada J_{00} sıcaklıkla çok zayıfça değişmekte olup, idealite sabiti A,

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{T}{T^*} - \frac{E_{00}^2}{3k^2 T^2} \right) \quad (2.4.23)$$

şeklinde ifade edilir. Eğer yasak enerji aralığının ortalarında yer alan tuzak seviyeleri daha etkin iseler bu durumda $E_{00} \rightarrow 0$ olacağından, idealite faktörü;

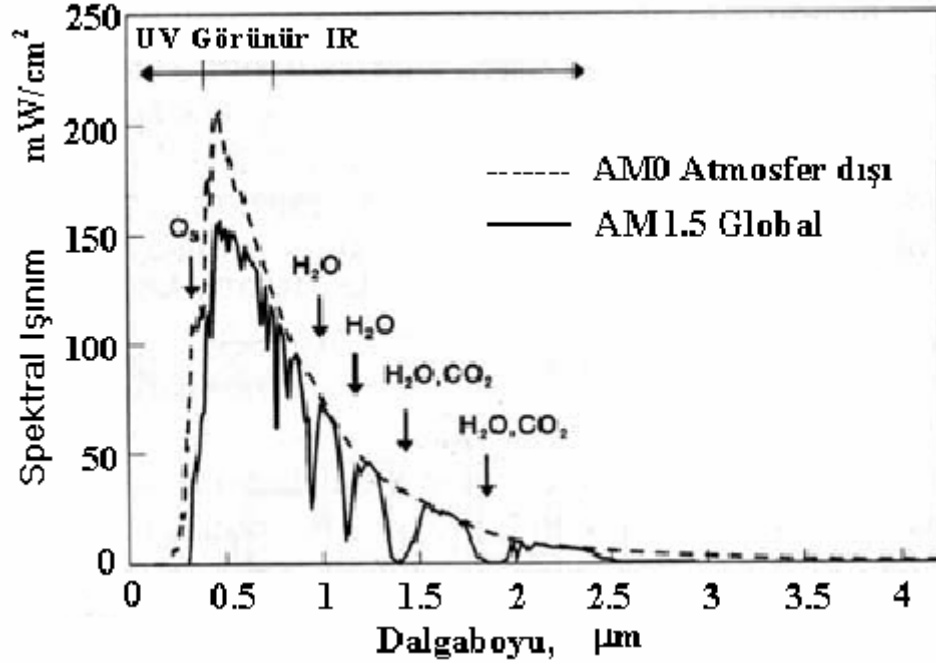
$$\frac{1}{A} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{T}{T^*} \right) \quad (2.4.24)$$

şeklini alır.

2.5 KUANTUM VERİMLİLİĞİ

Bir güneş pilinin performansı, üzerine düşen güneş ışınımının şiddeti ve spektral dağılımı ile bağlıdır. Güneş pili performansı ışımının standart koşullarının sağlandığı şartlar altında ölçülür. AM0 atmosferin dışındaki güneş ışınımını, AM1 standart atmosfer koşulları altında güneş zenitte olduğu andaki deniz seviyesindeki ışım miktarını ve AM2 ise zenit ile güneş arasındaki açının 60° olduğu durumda

dünya yüzeyindeki ortalama ışınım miktarını vermektedir. Güneş pili performansı ölçümlerinde AM1.5(1000W/m²) ışınım miktarı kullanılmaktadır.



Şekil 2.5.1 Güneş spektrumunun foton enerjisine göre dağılımı.

Bir güneş pilinin performansı spektral tepki karakteristiği ile belirlenir. Genelde elektron ve boşlukların, kusur ve arayüzey bölgelerinde birleşmelerinden (istenilmeyen) dolayı oluşan kayıplar güneş pilinin performansını etkiler ve ideal bir pn eklem diyod davranışından uzaklaşır. Bir diyod denklemi;

$$J = J_o \left[\exp\left(\frac{qV}{AkT}\right) - 1 \right] \quad (2.5.1)$$

ile verilir ve A söz konusu etkileri de içeren bir parametredir (*diyod idelalite faktörü*). Işınım altına bırakılan bir diyodun her iki eklem bölgesinde ekstra elektron ve boşluklar yaratılır. Çoğunluk taşıyıcılarının toplam akıma olan oranında bir değişiklik olmamasına karşın bu oran azınlık taşıyıcıları için oldukça büyüktür. Bu ters doyum akımının oldukça artmasına neden olur. Bu durumda diyod denklemi;

$$J = J_o \left[\exp\left(\frac{qV}{AkT}\right) - 1 \right] - J_L \quad (2.5.2)$$

ile ifade edilir. J_L , kayıplar ihmal edildiğinde diyod üzerine düşen ışınımın tüm dalga boylarını da içeren aydınlık doyum akım yoğunluğudur. J_L akımına eklemenin boşaltılmış bölgesinde (J_W) ve diğer bölgelerinde (J_b) oluşan akımlarda katkıda bulunurlar;

$$J_L = J_W + J_b \quad (2.5.3)$$

Diyod üzerine düşen ışınım şiddeti, $E (W / m^2)$ ise; boşaltılmış bölgede oluşan akım yoğunluğu;

$$J_W = q \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(\lambda) E(\lambda) [1 - \exp[-\alpha(\lambda)W]] d\lambda \quad (2.5.4)$$

olarak tanımlanır. Bu denklemde, $Q(\lambda)$, $\alpha(\lambda)$, W ve λ_1, λ_2 , kuantum verimliliğini, soğurum katsayısını, boşaltılmış bölge genişliğini ve soğurumun dalga boyu limitlerini ifade etmektedir. Boşaltılmış bölgenin bir yayılım uzaklığı yakınlarında (L) bulunan taşıyıcıların oluşturduğu akım;

$$J_b = q \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(\lambda) E(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)W] [1 - \exp[-\alpha(\lambda)L]] d\lambda \quad (2.5.6)$$

olarak tanımlanır. Dolayısıyla toplam aydınlık doyum akım yoğunluğu;

$$J_L = J_W + J_b = q \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(\lambda) E(\lambda) [1 - \exp[-\alpha(\lambda)(W + L)]] d\lambda \quad (2.5.7)$$

olarak ifade edilebilir. Genel olarak; arayüzey ve kusur bölgelerinde elektron ve boşlukların birleşerek akıma olan katkıları;

$$\left[1 + \frac{s}{\mu E} \right]^{-1}$$

oranı kadar azalır. Dolayısıyla kısa devre akımı (*foto akım*) aydınlık doyum akımına göre;

$$J_{SC} \equiv J_{fa} = \left[1 + \frac{s}{\mu E} \right]^{-1} J_L \quad (2.5.8)$$

olarak ifade edilir. Işınım şiddeti, $E(\lambda)$; $E_{AM1.5}$ (W/m^2) standartlarına göre normalize edilirse;

$$\begin{aligned} J_{SC,AM1.5} &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} j_{SC,AM1.5}(\lambda) d\lambda = \\ &= \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{j_{SC,olcülen}(\lambda)}{E_{olcülen}} E_{AM1.5}(\lambda) d\lambda \quad (2.5.9) \end{aligned}$$

elde edilir. $J_{SC,olcülen}$ ve $E_{olcülen}$ ölçülen akım yoğunluğunu ve ışınım şiddetini ifade eder. Kuantum verimliliği, Q , yüzeye gelen birim fotona karşı diyotta yaratılan akım;

$$Q(\lambda) = \frac{n_{elektron}(\lambda)}{n_{foton}(\lambda)} \quad (2.5.10)$$

olarak tanımlanır. Bu bağıntıda; $n_{elektron}$ ve n_{foton} elektron ve foton yoğunluğu olup

$$n_{elektron}(\lambda) = \frac{j_{SC, olculen}(\lambda)}{q}, \quad n_{foton}(\lambda) = \frac{E_{AM1.5}(\lambda)}{E_{foton}(\lambda)}$$

olarak tanımlanır. Bu bağıntılar (2.5.9) nolu denklemde yerine konulursa kuantum verimliliği;

$$Q(\lambda) = \frac{hc}{q\lambda} \frac{j_{SC, olculen}(\lambda)}{E_{olculen}(\lambda)} \quad (2.5.11)$$

olarak elde edilir. Dolayısıyla; AM1.5 koşulunda kısa devre akım yoğunluğu, $J_{SC, AM1.5}$,

$$J_{SC, AM1.5} = \frac{q}{hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(\lambda) E_{AM1.5}(\lambda) d\lambda \quad (2.5.12)$$

olarak bulunur. Kısa devre akım yoğunluğu, $J_{SC, olculen}$, eklemin pencere ve soğurum tabakalarının soğurum katsayılarına (α) bağımlıdır. Soğurum katsayısı yarı-iletkenin bant aralığı kenarında, foton enerjisine bağlı olarak hızla artmaya başlar. Bu artma yarı-iletkenin değerlik bandı ile iletkenlik bandı arasındaki geçiş türüne (*direk ve direkt olmayan*) bağlı olarak bir davranış gösterir. Soğurum katsayısı genellikle;

$$\alpha \propto A^* (hv - E_g)^\xi \quad (2.5.13)$$

olarak verilir ve A^* sabit olmak üzere $\xi=0.5, 2$ direk ve direkt olmayan geçiş katsayılarıdır. Sonuç olarak kuantum verimliliği, Q ,

$$Q(hv) \propto \frac{(E_g - hv)^\xi}{hv} \quad (2.5.14)$$

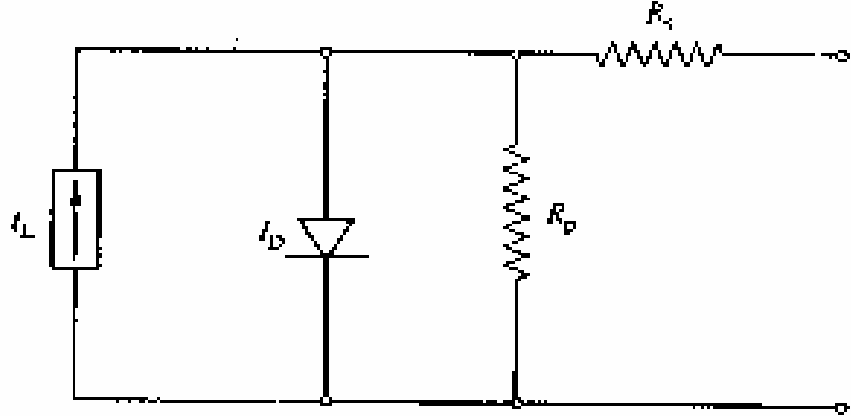
orantılıdır. $(Qhv)^\xi - hv$ karakteristiğinin doğrusal bölgesinin hv eksenini kestiği nokta eklemin o tabakasına ait bant aralığı değerini verir.

2.6 FOTOVOLTAİK PARAMETRELER

Fotovoltaik uygulamalarında kullanılan terminoloji Şekil 2.6.1 de görülen güneş pilinin basit bir eşdeğer devre modeli ele alınarak açıklanabilir. Uygulanan gerilim altında ileri yönde diyottan geçen akımı I_D ve ışığın oluşturduğu akım I_L ile gösterilebilir. Burada R_s ve R_p aygıtın seri ve paralel direnç etkilerini belirtmektedir. Işık altında güneş pilinden geçen net akım;

$$I = I_D + I_L = I_0[\exp(qV / AkT) - 1] - I_L \quad (2.6.1)$$

ile belirlenebilir. Burada I_0 aygıtın ters doyum akımını, k Boltzmann sabitini, T sıcaklığı, V uygulanan gerilimi ve A ise diyot idealite faktörünü belirtmektedir.



Şekil 2.6.1 Fotovoltaik pilin basit eşdeğer devresi.

Şekil 2.6.2 de güneş pilinin karanlık ve aydınlık altında akım-gerilim karakteristiği görülmektedir. Işık altındaki güneş piline hiçbir gerilim uygulanmadığında akım değeri;

$$I_{SC} = -I_L \quad (2.6.2)$$

olup kısa-devre akımı adını alır. İdeal koşullarda bu değer, ışınım ile yaratılan akım değerine eşittir. Işınım altında akımın sıfır olduğu noktadaki gerilim,

$$V_{oc} = (AkT/q) \ln[(I_L - I_0) + 1] \quad (2.6.3)$$

olup, açık-devre gerilimi adını alır. Açık-devre gerilimi diyot akımıyla birlikte, A'ya ve I_0 'a bağlıdır. Denklem (2.6.2) yi Denklem(2.6.3) de yerine konulursa;

$$I = I_0 [\exp(qV_{oc} / AkT) - 1] \quad (2.6.4)$$

şeklini alır. Görüldüğü gibi karanlık altındaki diyotun akım denkleminde benzerdir.

Güneş pilinin verimliliği, maksimum güç noktası göz önüne alınarak hesaplanır. Şekil 2.6.2 de görüldüğü gibi maksimum gerilim (V_m) ve maksimum akımın (I_m) kaplamış olduğu alan maksimum gücü verir. Yani,

$$P_m = V_m I_m = I_{SC} V_{oc} FF \quad (2.6.5)$$

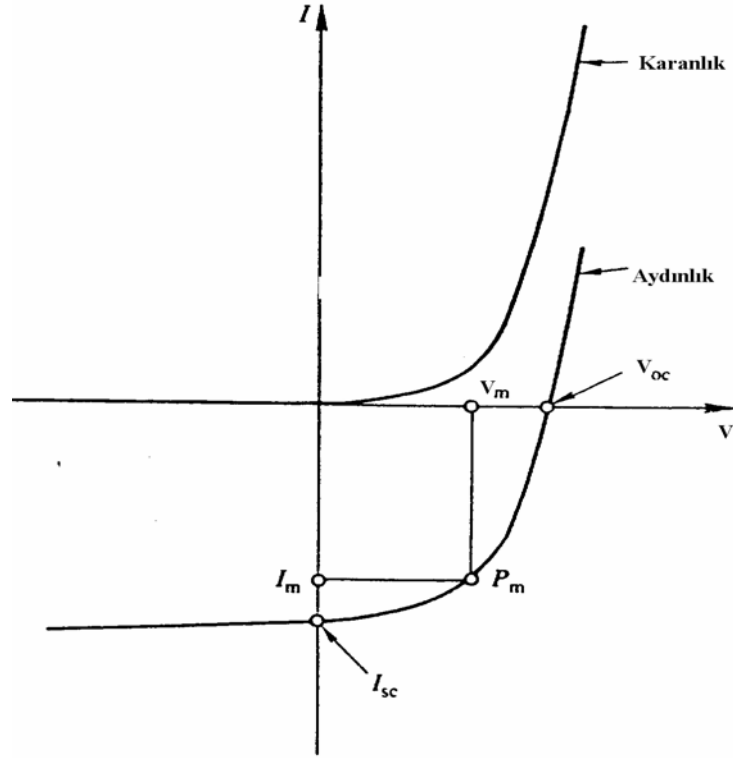
şeklindedir. Denklem (2.6.5)'deki FF ifadesi doluluk faktörü adını alıp, ışınım altındaki akım-gerilim eğrisinde, akımların eksi, gerilimlerin pozitif olduğu bölgede hesaplanan en büyük $V_{mp} \times I_{mp}$ değerinin $V_{oc} \times I_{sc}$ oranı olarak tanımlanır.

$$FF = I_{mp} V_{mp} / I_{Sc} V_{oc} \quad (2.6.6)$$

Güneş pilinin verimliliği ise, güneş pili üzerine düşen güneş ışınım gücünün, güneş pilinden alınabilecek güce oranı olarak tanımlanır.

$$\eta = \frac{V_{mp} I_{mp}}{P_{rad}} \quad (2.6.7)$$

şeklinde yazılır.



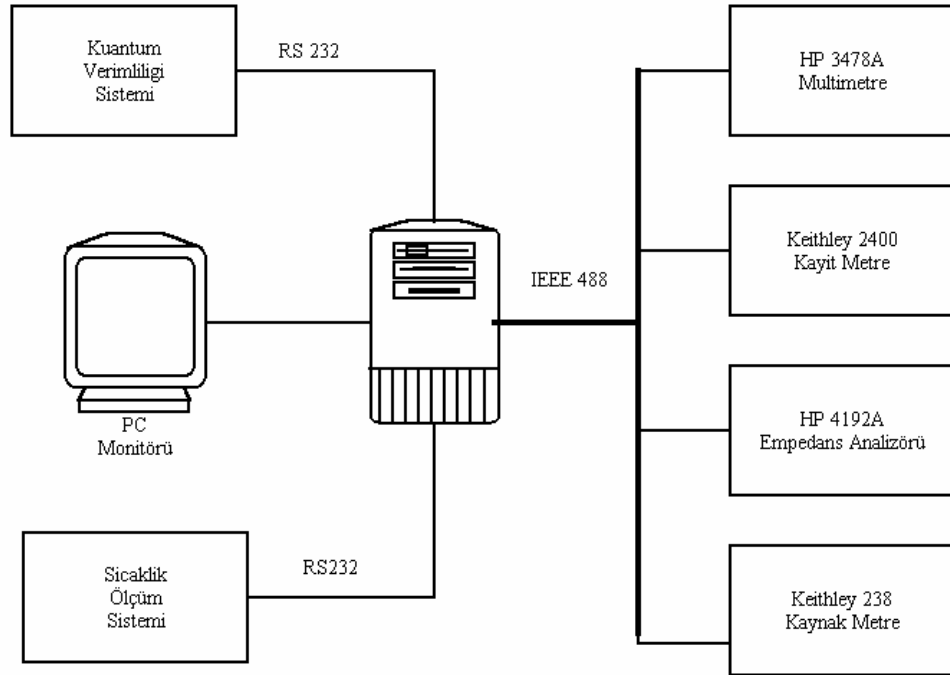
Şekil 2.6.2 İdeal bir güneş pilinin aydınlık ve karanlık altındaki akım-gerilim karakteristiği.

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÖLÇÜM SİSTEMİ

Ölçümlerde kullanılan karakterizasyon sistemlerinin bağlantı şeması Şekil 3.1’de görülmektedir. Güneş pillerinin karakterizasyonları aşağıda verilen ölçümler ile gerçekleştirilmiştir:

- 1) Oda sıcaklığında akım-gerilim karakterizasyonu
- 2) Kuantum verimliliği tayini
- 3) Admittans spektroskopisi
- 4) Kapasitans-gerilim karakterizasyonu
- 5) Sıcaklığa bağımlı akım-gerilim karakterizasyonu



Şekil 3.1 Deneysel ölçüm sistemi.

3.1 AKIM-GERİLİM ÖLÇÜM SİSTEMİ

Güneş pillerinin oda sıcaklığında aydınlık akım-gerilim karakterizasyonu 100mW/cm^2 'lik ışınım altında halojen lamba kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Akım-gerilim ölçümleri Keithley-238 kaynakmetre yardımıyla Labview yazılımı altında bilgisayar kontrolü altında alınmıştır.

Keithley 238: Şekil 3.1.1'de görülen Keithley 238 akım-gerilim ölçüm cihazı, hem akım kaynaklı gerilim ölçümü, hem de gerilim kaynaklı akım ölçebilme özelliğine sahiptir. Maksimum voltaj çıkışı ± 15 volt, maksimum akım çıkışı da $\pm 1\text{A}$ 'dir. $\pm 0,1\%$ hassasiyetle ölçüm yapabilen alet IEEE-488 ve RS-232 ara yüzey veri yollarına sahiptir [29].

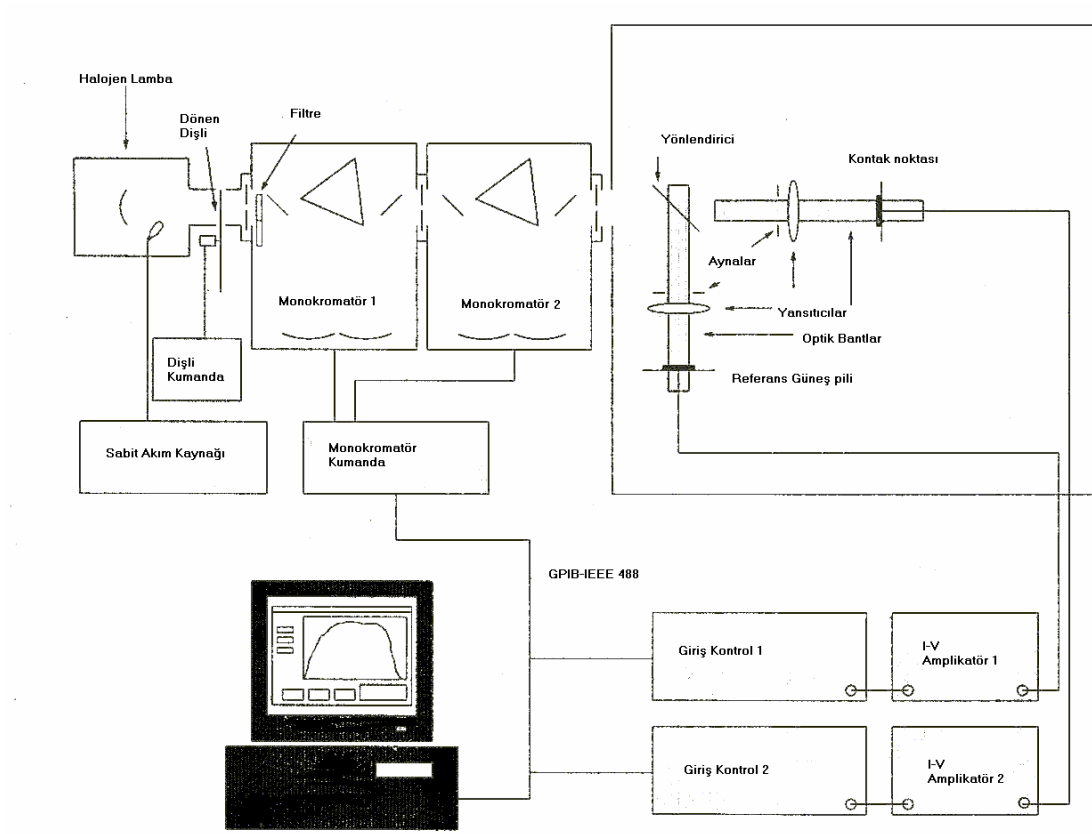


Şekil 3.1.1 Keithley 238 akım-gerilim ölçüm cihazı.

3.2 SPEKTRAL TEPKİ ÖLÇÜM SİSTEMİ

Şekil 3.2.1'deki spektral tepki ölçüm sistemi (spectral response) kullanılarak güneş pillerinin kuantum verimlilikleri belirlenmiştir. Sistemde iki adet monokromatör ve bir adet de dönen dişli sistem (chopper) bulunmaktadır. 150W 'lık halojen lambanın yayımladığı ışık demetleri ve monokromatörler yardımıyla belirli

dalga boyları güneş pili üzerine gönderilir. Labview yazılımı yardımıyla bilgisayara dalga boyuna karşın kısa-devre akım verileri aktarılır.



Şekil 3.2.1 Spektral Tepki ölçüm sistemi.

Ölçüm referans bir güneş pili (silisyum güneş pili) ile kalibre edilmiştir. Ölçümlerde tipik olarak 330-1300nm dalga boyu aralığı kullanılmıştır.

3.3 ADMİTTANS ÖLÇÜM SİSTEMİ

Admittans spektroskopisi ölçümünde şu cihazlar kullanılmıştır;

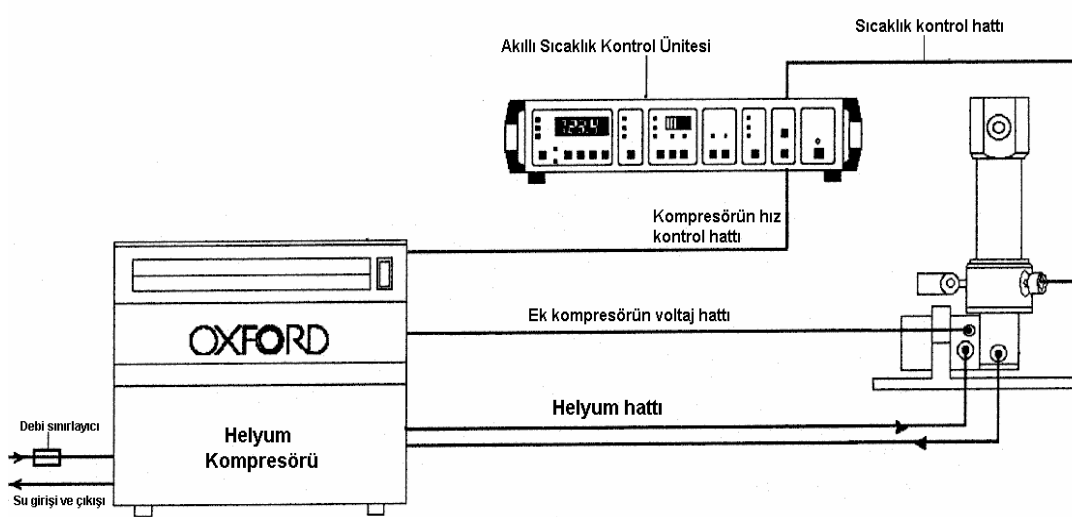
- düşük sıcaklık sistemi
- HP 4192 A empedans analizörü

3.3.1 DÜŞÜK SICAKLIK SİSTEMİ

Düşük sıcaklık sistemi şu cihazlardan meydana gelmektedir,

- helyum pompası
- ITC 502 sıcaklık kontrol ünitesi
- kreyostat
- vakum pompası

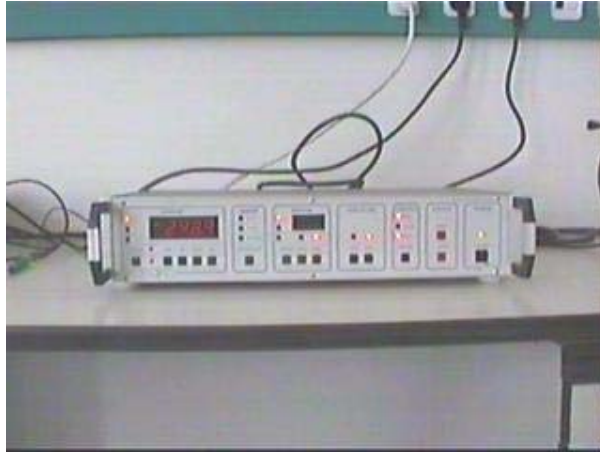
Şekil 3.3.1’de düşük sıcaklık sisteminin bağlantı şeması verilmektedir.



Şekil 3.3.1 Düşük sıcaklık sistemi.

Helyum pompası: Şekil 3.3.1’de gösterilen hattaki borular içinde dolaşan helyum, kompresör tarafından sisteme sürülerek sıkıştırılır. Isınmış olan helyum buharları, helyum tüpü etrafına sarılmış boruların içinden soğuk su geçirilerek soğutulur ve sıvılaştırılır. Bu durumda sıvı helyum genleşme kapakçığından geçerken düşük basınç altında hızla buharlaşır ve kreyostat içerisine yerleştirilen malzemeyi hızla soğutur [30].

ITC 502 Sıcaklık Kontrol Ünitesi: Şekil 3.3.2’de ITC 502 sıcaklık kontrol ünitesinin resmi görülmektedir. RS-232 ara yüzey hattı üzerinden OXFORD-OBJECT BENCH yazılımı ile bilgisayarla doğrudan iletişim kurabilen cihaz, kreyostat içindeki sıcaklığa göre sistemdeki helyum akışını ve sıcaklığı kontrol edebilmektedir. Ölçüm yapabileceği sıcaklık değerleri 10-330K arasındadır. 1K aralığında sıcaklığı kontrol edebilmektedir [31].



Şekil 3.3.2 ITC 502 sıcaklık kontrol ünitesi.

Kreyostat: İndiyum ve alüminyum alaşımından dizayn edilmiş Oxford 43304 modelli kreyostat Şekil 3.3.3’de verilmektedir. Vakum bölgesi, ek kompresör ve helyum giriş-çıkışı olmak üzere üç ana bölümden meydana gelmektedir.



Şekil 3.3.3 Kreyostat (Oxford 43304).

3.3.2 HP 4192A EMPEDANS ANALİZÖRÜ

Frekans ölçüm sınırları 5Hz-13MHz olup, osilatör genlik aralığı da 5mV-1V arasındadır. Doğru akım, ileri ve ters besleme özelliğine sahip aletin -35V tan +35V'a kadar ayarlanabilmesi mümkündür [32]. Aynı anda empedans, admittans, kapasitans, indüktans ölçebilmekle birlikte, aralarındaki faz değerlerini ve kalite faktörlerini de ölçebilmektedir. $\pm 0,15$ hassasiyetle ölçüm yapabilen cihaz IEEE-488 ara yüzey veri yoluna sahip olup testpoint yazılımı yardımı ile bilgisayar ile kontrol edilebilmek mümkündür. Şekil 3.3.4'de cihazın resmi verilmektedir.



Şekil 3.3.4 HP 4192A Empedans Analizörü.

3.4 KAPASİTANS-GERİLİM ÖLÇÜM SİSTEMİ

Kapasitans-gerilim ölçüm sisteminde HP 4192A empedans analizörü ve HP 3478A multimetre kullanılmıştır. IEEE-488 ara yüzey veri yolundan iki cihaz aynı anda testpoint yazılımı yardımıyla bilgisayar ile kontrol edilebilmektedir. Ölçümler 300KP'de gerçekleştirilmiş olup, admittans ölçüm sisteminde olduğu gibi düşük sıcaklık sistemi kullanılmıştır.

HP 3478A Dijital Multimetre: Hem doğru hem de alternatif akım değerlerini ölçebilen cihaz, $\pm\%0,1$ hassasiyetlidir. IEEE-488 ve RS 232 ara yüzeye sahip cihaz çeşitli yazılımlar yardımıyla okuduğu değerleri bilgisayara aktarabilmektedir [33].



Şekil 3.4.1 HP 3478A Multimetre.

3.5 SICAKLIĞA BAĞIMLI AKIM-GERİLİM ÖLÇÜM SİSTEMİ

Sıcaklığa bağımlı karanlık ve aydınlık akım-gerilim ölçümlerinde diğer ölçümlerde kullanılan düşük sıcaklık sistemi kullanılmıştır. Güneş pilleri üzerine halojen lamba yardımıyla $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 'lik ışınım uygulanmıştır. Kreyostat'ın üst noktasına üstten gelen ışınımın doğal spektrumunu bozmadan sadece geçen ışınımın gücünü kontrol eden kalınlıkları farklı nötral yoğunluk filtresi konulmuştur. Filtreler gelen ışınımın güneş pilleri üzerine 2;5;10;20;50 ve $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 'lik güç değerlerinde geçmesini sağlamaktadır. RS 232 ara yüzey bağlantısı ve mikroişlemci kontrollü motor ile kontrol edilebilen filtre Şekil 3.5.1'de görülmektedir.



Şekil 3.5.1 Farklı kalınlıklara sahip nötral yoğunluk filtresi.

Akım-gerilim ölçümünde Keithley-2400 cihazı kullanılmış olup, IEEE-488 ara yüzey kontrol ile testpoint yazılımı yardımıyla veriler kaydedilmiştir.

Keithley 2400 Dijital Akım-Gerilim Ölçüm Cihazı: Şekil 3.5.2’de görülen Keithley 2400 akım-gerilim ölçüm cihazı, hem akım kaynaklı gerilim ölçümü, hem de gerilim kaynaklı akım ölçümü yapabilmektedir. $\pm 1\mu\text{V}$ ’dan $\pm 200\text{V}$ ’a gerilim ölçümü ve $\pm 10\text{pA}$ ’den $\pm 1\text{A}$ ’e kadar akım ölçümü yapabilmektedir. $\pm 0,15\%$ hassasiyetle ölçüm yapabilen cihaz IEEE-488 ve RS-232 ara yüzey veri yoluna sahiptir [34].



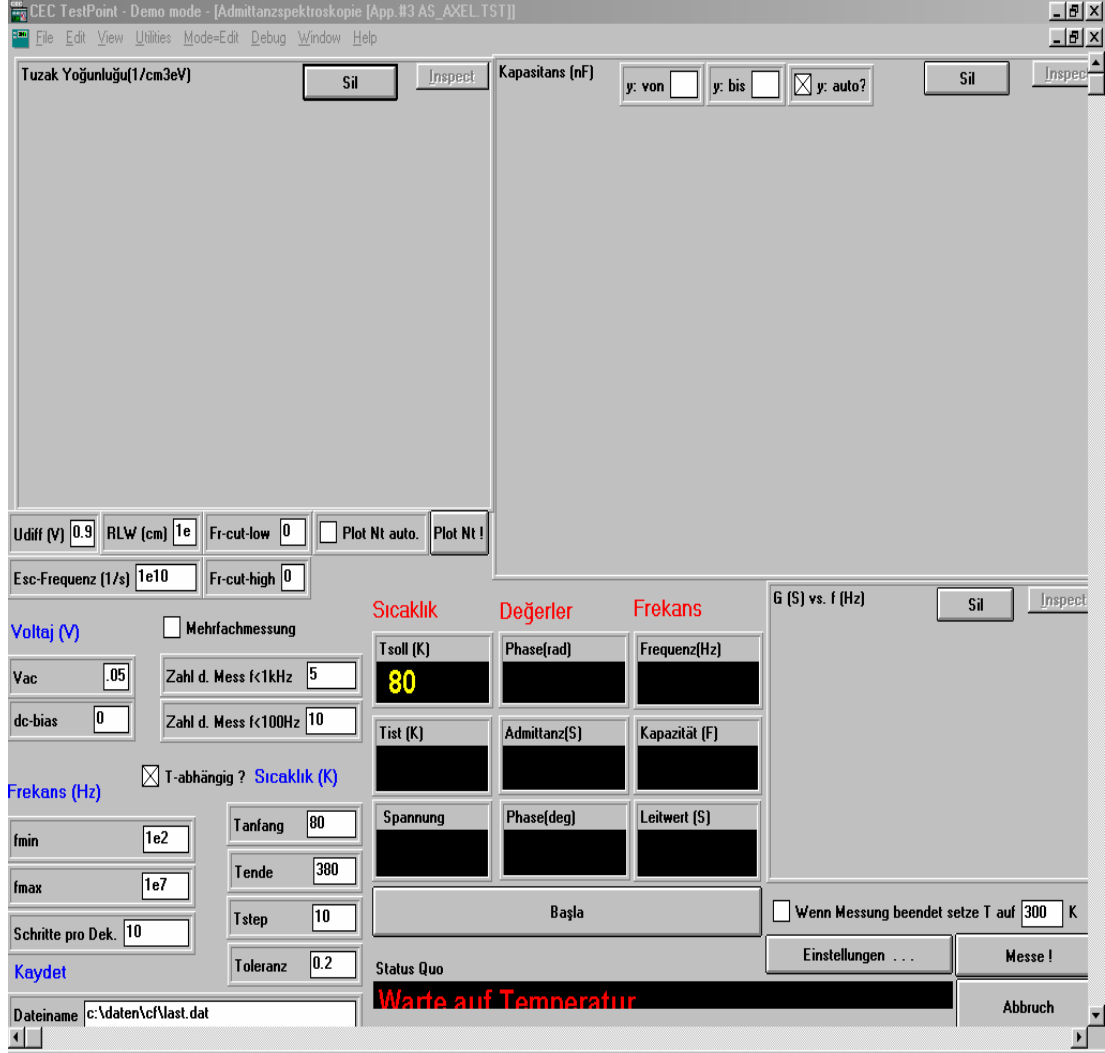
Şekil 3.5.2 Keithley 2400 akım-gerilim ölçüm cihazı.

3.6 BİLGİSAYAR YAZILIMLARI

Bu çalışmada gerçekleştirilen ölçümlerde testpoint ve labview yazılımları kullanılmıştır. IEEE-488 ara yüzey kontrol kartı yardımıyla saniyede 488 kilobaytlık veriler bilgisayara kaydedilmiştir. Aynı zamanda düşük sıcaklık sistemini kontrol etmek amacıyla object bench yazılımı kullanılmış olup RS 232 veri yolu ile ITC 502 sıcaklık ünitesinin kontrolü sağlanmıştır.

Testpoint: Equipment firması tarafından üretilmiş olan Testpoint yazılımı RS 232 ve IEEE-488 veri yollarıyla bilgisayara bağlı olan herhangi bir cihazın kontrolünü sağlayan, Windows ortamında çalışan bir paket programdır. İsteğe uygun

olarak görsel biçimde programlanabilen yazılımın bilgisayar görüntüsü Şekil 3.6.1’ de verilmektedir.



Şekil 3.6.1 Testpoint altında yazılmış admittans programının görünüşü.

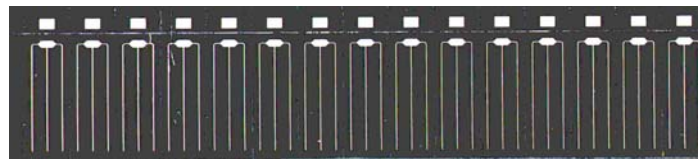
Labwiev: Cool engineering firması tarafından üretilmiş olan Labwiev programı da testpoint yazılımına benzemekte olup RS 232 ve IEEE-488 veri yollarıyla yardımıyla cihazları kontrol edebilmek mümkündür.

BÖLÜM 4

DENEYSEL SONUÇLAR VE SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

4.1 GÜNEŞ PİLLERİNİN SOĞURUCU TABAKASINDAKİ MATERYAL ORANLARI

Bu çalışmada incelenen güneş pillerinin üretilmesine (Bölüm2.1) soda-lime cam yüzeyine elektron ışınım tekniği kullanılarak molibden kaplanması ile başlanmıştır. Daha sonra molibden üzerine yaklaşık 550-600 °C sıcaklıklarında ortak buharlaştırma (co-evaporation) yöntemiyle soğurucu yüzey büyütülmüş olup bu işlem sonrası soğurucu tabakanın materyal oranları X-ışını spektroskopisi yöntemi (EDX-Energy Dispersive Analysis by X-rays) ile belirlendikten sonra da diğer tabakaların kaplanması ile güneş pillerinin üretimi tamamlanmıştır. Şekil 4.1.1'de üretilen küçük güneş modülünün üst yüzey görüntüsü görülmektedir. Görüldüğü gibi tek bir yüzeyde 15 adet güneş pili yer almaktadır. Yapılan kontaklar sonucu her bir güneş pili birbirinden bağımsızdır. Materyal oranları ise her bir bölgede homojen olmayan durum sergilemektedir.



Şekil 4.1.1 ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂/Mo/Cam güneş pillerinin üstten görünüşü.

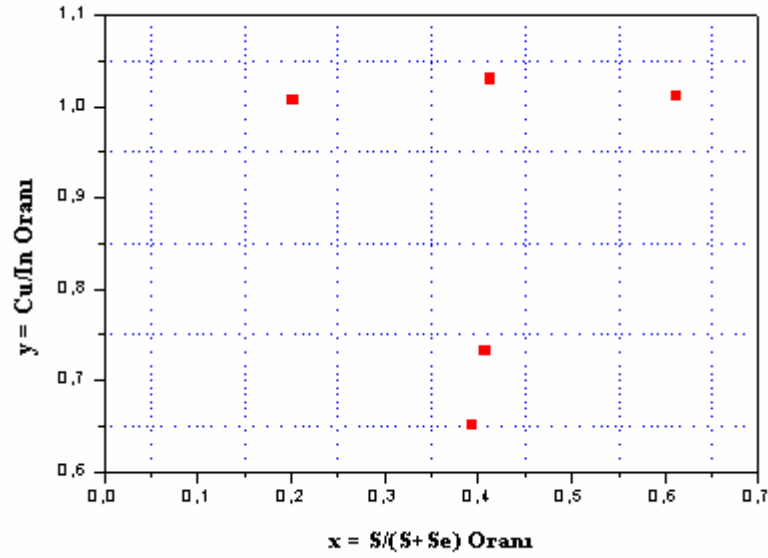
Ölçümlerde kullanılan güneş pillerinin kod numaraları ve soğurucu tabakasındaki materyal oranları Tablo 4.1.1 ve Şekil 4.1.2 'de özetlenmiştir. Ölçümlerde kullanılan güneş pilleri iki grupta toplanabilir. Birinci grup $y = Cu / In \approx 1.01$ oranı sabit $x = S / (S + Se)$ oranı değişken üç adet güneş pilinden,

diğer grup ise $x = S / (S + Se) \approx 0.4$ oranı sabit $y = Cu / In$ oranı değişken üç adet güneş pilinden meydana gelmektedir. Bu tez çalışmasında değişen bakır ve sülfürün oranlarının elektriksel parametrelerine olan etkileri incelenmiştir.

Güneş pillerinin, önce oda sıcaklığında 100mW/cm^2 ’lik ışınım ve karanlıkta altında akım-gerilim karakteristikleri belirlenmiş, daha sonra da spektral kuantum verimliliği ölçüm yöntemi ile yasak enerji aralıkları tayin edilmiştir. Bu işlemlerden sonra sıcaklığa bağımlı admittans spektroskopisi ölçümleri, kapasitans-gerilim ölçümleri ve son olarak da sıcaklık bağımlı akım-gerilim ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Pil No	Cu %	In %	Se %	S %	X=Cu/In	Y=S/(S+Se)
VT 098-2-2	23,94	23,79	41,7	10,57	1,006	0,202
VT 102-3-1	24,73	24,01	30,0	21,14	1,029	0,413
VT 103-1-4	23,92	23,68	20,3	32,09	1,010	0,612
VT 104-1-14	20,32	27,79	30,69	21,18	0,731	0,408
VT 100-1-14	18,54	28,5	32,12	20,84	0,650	0,395

Tablo 4.1.1 Ölçümlerde kullanılan ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ güneş pillerinin soğurucu tabakasındaki materyal oranları.



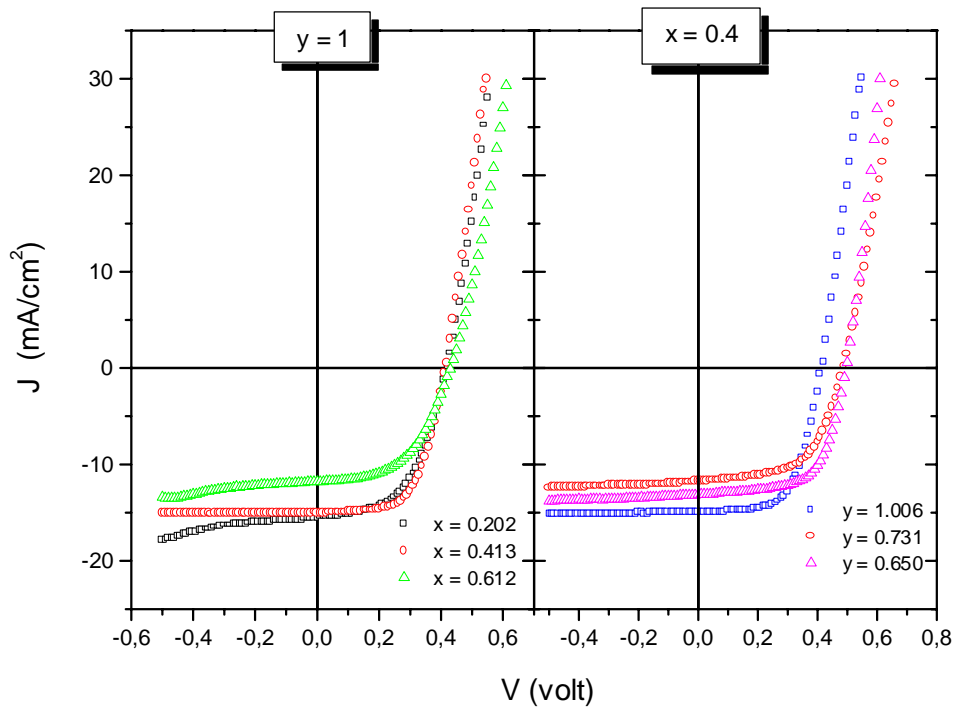
Şekil 4.1.2 Cu/In oranına karşı S/(S+Se) oranı değişimi.

4.2 ODA SICAKLIĞINDAKİ AKIM-GERİLİM KARAKTERİSTİKLERİ

ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pillerinin fotovoltaik performansları 100mW/cm²'lik ışınım altında halojen lamba kullanılarak ölçülmüş ve sistemin kalibrasyonu silisyum referans güneş pili ile yapılmıştır. Her birinin alanı 0.5cm² olan beş adet güneş pilli üzerinde gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarında elde edilen akım-gerilim karakteristikleri yardımıyla hesaplanan açık devre gerilimi V_{oc} , kısa devre akımı I_{sc} ve doluluk faktörü FF ve diğer parametre değerleri değerler Tablo 4.2.1 de verilmektedir.

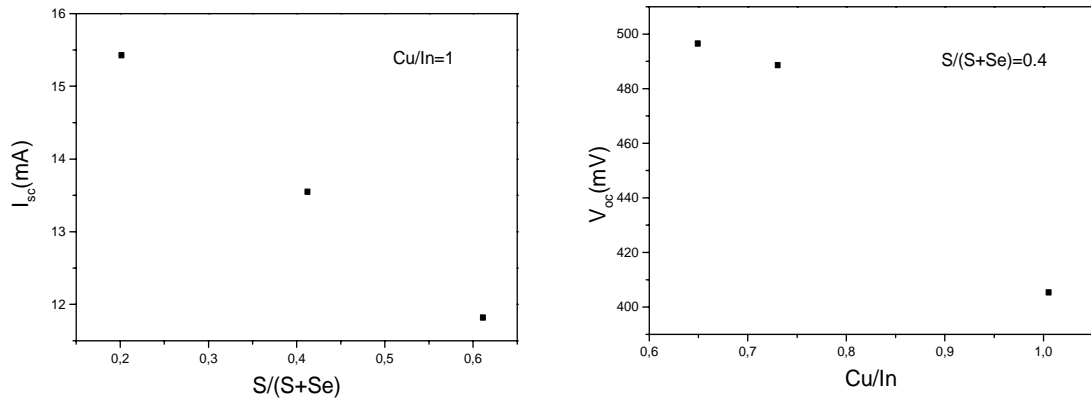
Pil No	VT 098-2-2	VT 102-3-1	VT 103-1-4	VT 104-1-14	VT 100-1-14
$V_{oc}(mV)$	419.05	405.15	431.24	488.33	496.32
$I_{sc}(mA)$	-15.47	-13.54	--11.81	-11.73	-13.14
MPP(mW)	3.49	2.84	2.63	3.36	4.14
FF(%)	53.76	51.66	51.64	58.65	63.44
Eta(%)	6.97	5.67	5.26	6.72	8.28
$A(cm^2)$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Lum.(Mw/cm ²)	100	100	100	100	100
$J_{sc}(mA/cm^2)$	-30.94	-27.08	-23.62	-23.46	-26.28
$R_p(ohm)$	1.25×10^2	9.84×10^1	2.70×10^2	6.39×10^2	8.02×10^2
$R_s(ohm)$	2.80	5.72	3.34	3.63	1.89
n_1	1.91	1.22	2.47	2.08	1.90
$I_0(A)$	1.22×10^{-6}	8.06×10^{-11}	9.61×10^{-6}	6.69×10^{-7}	3.10×10^{-7}
n_2	1.78	0.85	2.41	1.96	1.82

Tablo 4.2.1 Oda sıcaklığı ve 100mW/cm²'lik ışınım altında akım-gerilim karakteristiğinden yararlanılarak hesaplanan fotovoltaik parametre değerleri.



Şekil 4.2.1 Oda sıcaklığında ve 100mW/cm²'lik ışınım altında ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ güneş pillerinin akım-gerilim karakteristikleri.

Tablo 4.2.1’de görüldüğü gibi bakır oranı sabit iken açık-devre gerilimi ve doluluk faktörü değerleri $S/(S+Se)$ oranına göre az duyarlıdır. Fakat kısa-devre akımı $S/(S+Se)$ oranı arttıkça düşmektedir. $S/(S+Se)$ oranı sabit Cu/In oranı değişimine göre ise açık devre gerilimi Cu/In oranı arttıkça düşmekte, kısa-devre akımında fazla bir değişim gözlenmemektedir. Ayrıca $S/(S+Se)$ oranı değişiminde verimlilik fazla oranda değişmemekle birlikte bakır oranını azaldıkça verimlilik artmaktadır. Buna göre bakırın katkı oranı $ZnO/CdS/CuIn(S,Se)_2$ güneş pillerinde verimliliğe önemli derecede etki ettiği söylenebilir.

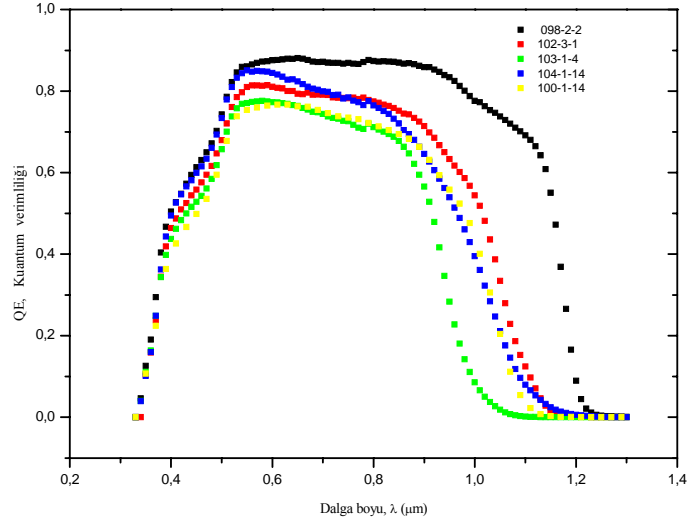


Şekil 4.2.2 Ölçümler sonucu elde edilen $CuIn(S,Se)_2$ güneş pillerindeki Cu/In oranına sabit iken $S/(S+Se)$ oranına göre kısa-devre akımı ve $S/(S+Se)$ oranı sabit iken Cu/In oranına göre açık-devre geriliminin değişimi.

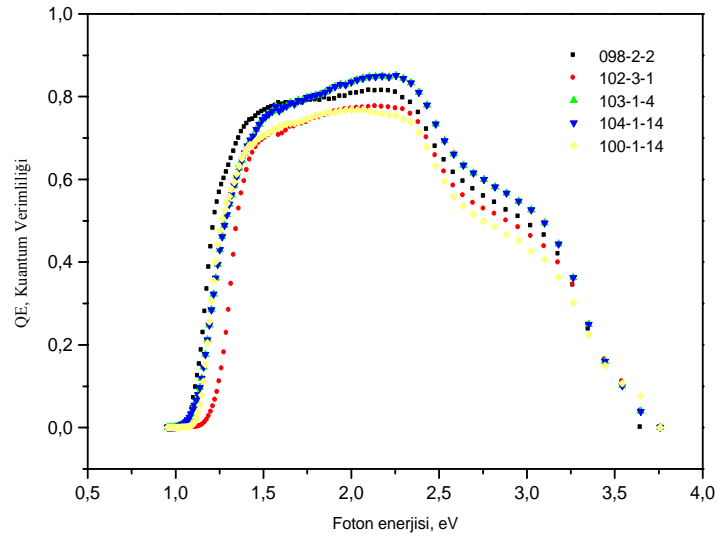
4.3 $CuIn(S,Se)_2$ SOĞURUCU TABAKASINININ YASAK ENERJİ ARALIĞININ TAYİNİ

İncelenen güneş pillerinin akım-iletim mekanizmalarının belirlenmesinde soğurucu tabakasının yasak bant enerji aralığı değerinin bilinmesi oldukça önemlidir. Şekil 4.3.1’de AM1.5 ışına altında $ZnO/CdS/CuIn(S,Se)_2$ güneş pillerinin belli dalga boyuna karşın kuantum verimlilikleri görülmektedir. Kuantum verimliliğinin 320-400nm arasındaki keskin artış ZnO ’in yasak bant enerji aralığına, 450-550nm arasındaki artma CdS tabakasının yasak bant enerji aralığına karşılık gelmektedir.

900-1300nm arasındaki değişim ise eklem soğurucu tabakasındaki ilgili geçiş sonucunu oluşturmaktadır.



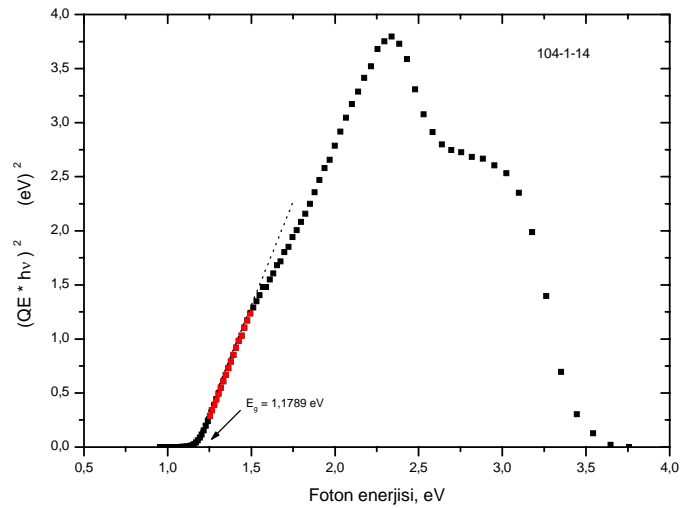
Şekil 4.3.1 ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pillerinin farklı dalga boylu ışınımlar altındaki kuantum verimlilikleri.



Şekil 4.3.2 ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pillerinin gönderilen fotonların enerjisine göre kuantum verimlilikleri.

Gelen ışınımın dalga boylarını enerjiye dönüştürürsek, kuantum verimliliğinin gelen fotonların enerjisine karşın grafiği Şekil 4.3.2’de verildiği gibidir. Görüldüğü gibi 1 ile 3,7 eV arasındaki enerjiye sahip fotonlar iletme katkıda bulunmaktadır. İncelenen güneş pillerinin kuantum verimlilikleri benzer özellik göstermektedir.

Denklem (2.5.14) yardımıyla, $(Qhv)^\xi - hv$ karakteristiğinin doğrusal bölgesinin hv eksenini kestiği nokta eklem o tabakasına ait bant aralığı değerini verir. Buradaki $\xi=0.5, 2$ katsayı değerleri direkt ve direkt olmayan geçiş durumlarına bağımlı katsayılarıdır. Literatürde $ZnO/CdS/CuIn(S,Se)_2$ güneş pillerinde, yapılan deneysel ölçümler neticesinde direkt geçişli durumların olduğu açıklanmaktadır [35-36]. Buna göre kuantum verimliliğini ölçtüğümüz güneş pillerinin $(Qhv)^2 - hv$ grafiklerini çizip 1 ile 1.5 eV arasında kalan eğimden hv eksenini kestiği noktayı belirleyecek olursak, soğurucu tabakasına ait yasak enerji aralığı değerlerini bulmuş oluruz. Yapılan hesaplamalar neticesinde incelenen güneş pillerinin soğurucu tabakasının ait yasak enerji aralığı değerleri Tablo 4.3.1’de verilmektedir.



Şekil 4.3.3 VT104-1-14 kodlu güneş pilinin $(QE \times hc / \lambda)^2 - (hc / \lambda)$ grafiğinden soğurucu tabakasının yasak enerji aralığı değerinin tayini.

Tablo 4.3.1’de görüldüğü gibi ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ güneş pillerinin soğurucu tabakasının yasak enerji aralığı değerleri 1.04 eV ile 1.28 eV arasında değişmektedir.

Pil No	E _g (eV)
VT 098-2-2	1,04
VT 102-3-1	1,11
VT 103-1-4	1,28
VT 104-1-14	1,14
VT 100-1-14	1,15

Tablo 4.3.1 Ölçümlerde kullanılan güneş pillerinin soğurucu tabakasının yasak enerji aralığı değerleri.

Kuantum verimliliğini belirlemede en önemli parametrelerden biri şüphesiz kısa-devre akımıdır. Denklem (2.5.12)’de belirtildiği gibi,

$$J_{SC, AM1.5} = \frac{q}{hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} Q(\lambda) E_{AM1.5}(\lambda) d\lambda$$

kuantum verimliliğine karşı çizilen dalga boyu karakteristiğinin gösterdiği alan incelenen güneş pilinin kısa-devre akımını vermektedir. Yapılan ölçümler neticesinde hesaplanan kısa-devre akım değerleri Tablo 4.3.2’de verilmektedir. Kuantum verimliliği yöntemiyle hesaplanan kısa-devre akım değerleri aydınlık altındaki akım-gerilim ölçümlerinden elde edilen kısa-devre akım değerleri ile uyum içerisindedir. Bu da yaptığımız ölçümlerin hassasiyetini göstermektedir.

Pil No	$J_{sc}(\text{mA/cm}^2)$
VT 098-2-2	30,8
VT 102-3-1	28,6
VT 103-1-4	24,6
VT 104-1-14	26,8
VT 100-1-14	26,3

Tablo 4.3.2 Kuantum verimliliği yöntemiyle hesaplanan güneş pillerinin kısa-devre akımları.

4.4 ADMİTTANS SPEKTROSKOPİSİ ÖLÇÜMLERİ

Bölüm 2.2’de bahsedildiği gibi ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pilinin boşaltılmış bölgesindeki katkı düzeylerinin analizi sıcaklığa bağımlı kompleks admittansın ölçümüyle yapılabilir. Aygıtın ac sinyallerine karşı göstermiş olduğu admittans

$$Y(\omega) = G(\omega) + iC(\omega) \quad (2.2.1)$$

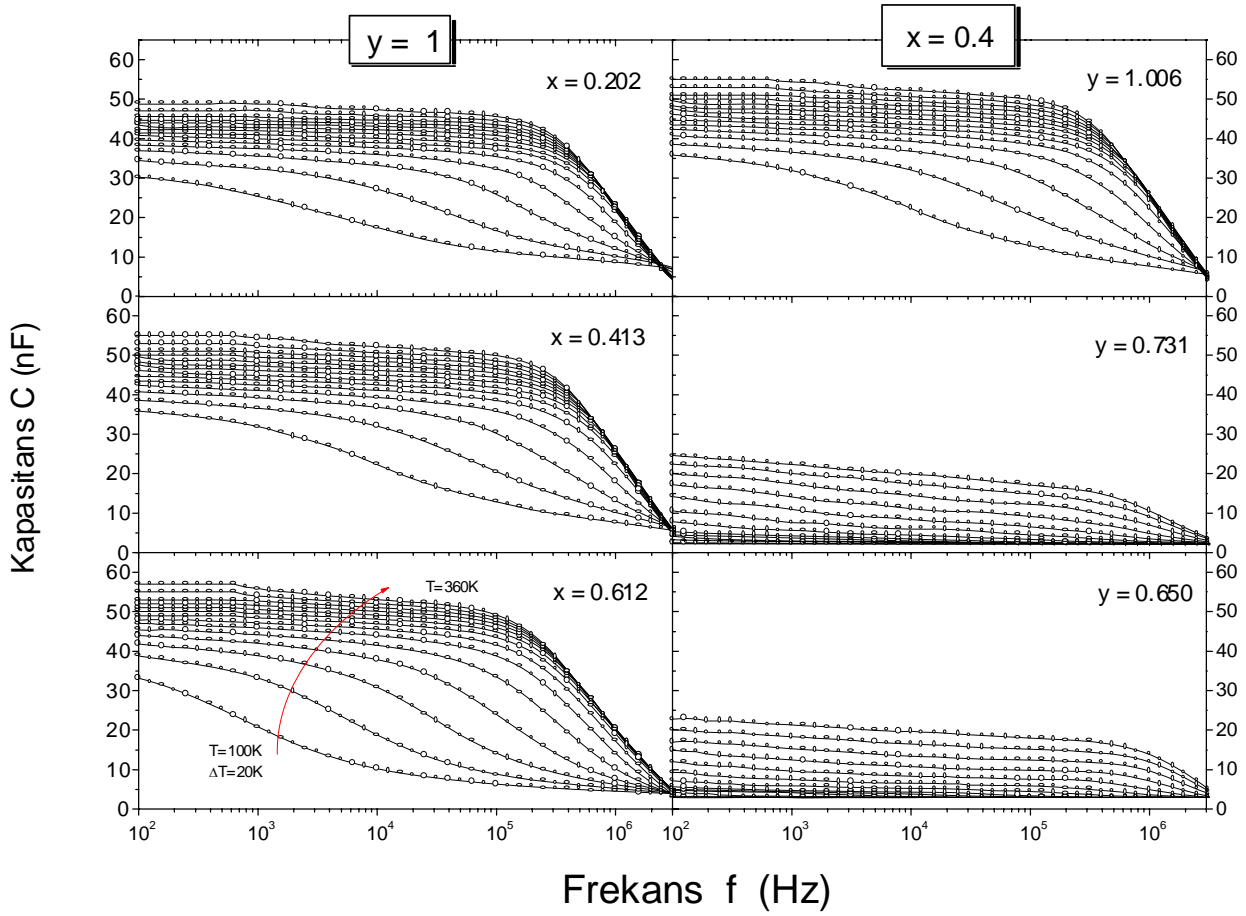
ile verilir. Buradaki ω açısal frekansı, $G(\omega)$ aygıtın konduktansını ve $C(\omega)$ ise kapasitansını belirtir. Bu çalışmada sadece kapasitans ölçüm sonuçları verilmektedir.

Güneş pillerinin admittans spektroskopisi ölçümleri 100K ile 360K sıcaklıkları arasında 20K aralıklarla ölçülmüştür. Uygulanan frekanslar 100Hz ile 10MHz arasındadır. Sıcaklık ve frekans bağımlı kapasitans ölçümleri Şekil 4.4.1’de verilen karakteristiklerde x ve y oranlarına bağımlı kalınarak incelenmiştir. Görüldüğü gibi değişen sülfür oranına karşın kapasitans-frekans karakteristikleri benzer özellikler göstermektedir. Kapasitans değerleri 30nF/cm² ile 55nF/cm² arasında değişmektedir. Düşük frekanslarda, sıcaklık arttıkça tuzakların eklem kapasitansına olan etkisi daha da artmaktadır. Tuzakların eklem kapasitansına olan katkısı aşağıda verilen denklem ile hesaplanabilir [37];

$$C(\omega) = C_{SCR} + \frac{C_{lf} - C_{SCR}}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (4.4.1)$$

Denklem (4.4.1)'deki ilk terim eklem kapasitansını, diğer terim ise tuzaklardan gelen katkıyı ifade etmektedir. Buradaki C_{lf} düşük frekans kapasitansını ifade etmektedir. Yüksek frekanslarda, çoğunluk yük taşıyıcıları uygulanan frekansı takip edemediklerinden güneş pili yaklaşık bir dielektrik materyal gibi davranmaktadır. Bu durumda ölçülen kapasitans eklem kapasitansı, yada boşaltılmış bölge kapasitansı adını alır. Şekil 4.4.1'deki birinci grupta görüldüğü gibi eklem kapasitansın en düşük değeri yaklaşık 10nF/cm^2 ye eşittir. Denklem (2.2.5) yardımıyla $\varepsilon_s = 10\varepsilon_0$ [38] ve eklem kapasitans değeri 10nF/cm^2 alınarak boşaltılmış bölge genişliği $w=960\text{nm}$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.4.1'deki ikinci grupta ise bakır oranı azaldıkça kapasitans değerleri azalmakta ve yaklaşık 3nF/cm^2 ile 20nF/cm^2 arasında değişmektedir. Eklem kapasitans değerleri yaklaşık düşük sıcaklıklarda 3nF/cm^2 değerindedir. Denklem (2.2.5) kullanılarak boşaltılmış bölge genişliği bu örnekler için $w=3200\text{nm}$ olarak hesaplanmıştır.

Bu sonuçlar yardımıyla, incelenen örneklerde, tuzak etkilerinin yüksek sıcaklıklarda ve düşük frekanslarda önemli olduğu söylenebilir.



Şekil 4.4.1 ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pillerinin sülfür ve bakır oranlarına bağımlı 100K ile 360K sıcaklıkları arasında 20K aralıkla frekansa bağımlı kapasitans grafikleri.

ZnO/CdS/CIS heteroeklem güneş pilleri için kapasitansın, farklı frekans değerleri için boşaltılmış bölge genişliği ile olan değişimi [39],

$$C = \frac{q^2}{\tilde{U}_{ext}} \int_{x_o}^{\omega} \tilde{U}_p(x) N_T(E_{F_p}(x)) dx = \frac{q^2}{\tilde{U}_{ext}} \int_{E_{F_p}(\infty)}^{E_{\omega}} \tilde{U}_p(x(E)) N_T(E) \frac{w}{qV_{bi}} dE \quad (4.4.2)$$

şeklinde verilir. Bu denklemde verilen integralin sınırları kesim frekansı ile uygulanan frekans arasında değişmektedir. Eğer gerekli dönüşümler yapılarak

integral sınırlarını Fermi enerji seviyesi ile son enerji seviyesi arasında alınırsa denklemin sağ tarafı görüldüğü gibi tüm bileşenleri enerjinin fonksiyonu biçiminde yazılabilir. Buradaki N_T tuzak yoğunluğunu, \tilde{U}_{ext} uygulanan dış ac sinyalinin genliğini, \tilde{U}_p ise aygıt üzerine düşen ac sinyalinin genliğini vermektedir. Eğer aşağıda verilen dönüşümler yapılırsa [40],

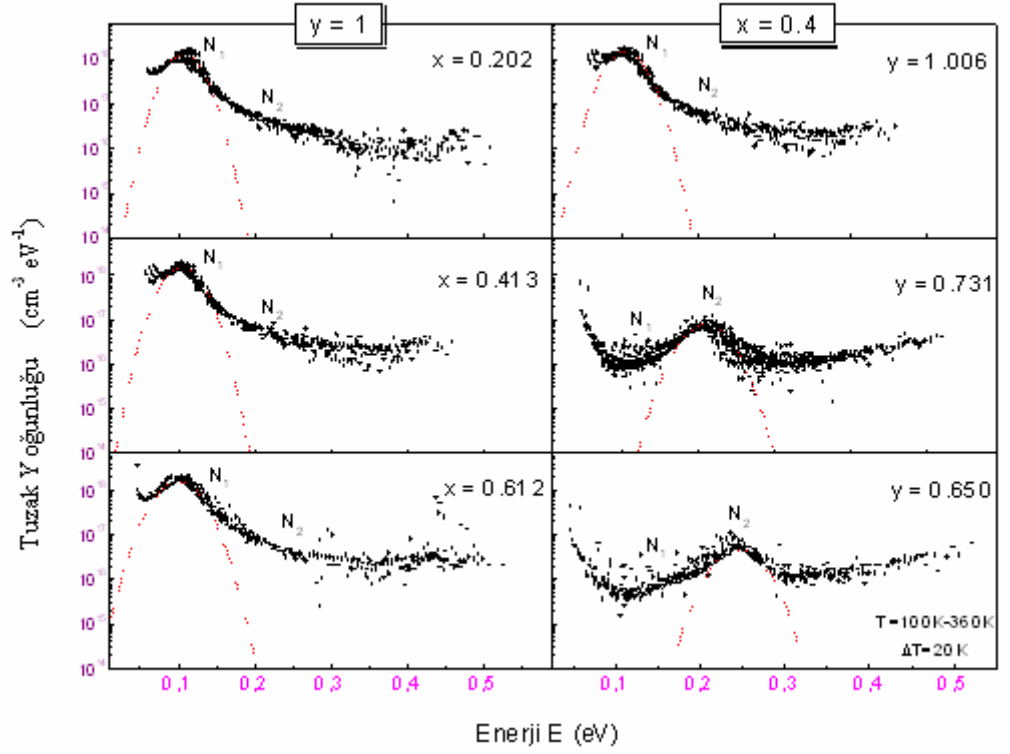
$$\frac{dC}{d\omega} = \frac{dC}{dE_\omega} \frac{dE_\omega}{d\omega} ; \frac{dE_\omega}{d\omega} = -\frac{kT}{\omega}$$

denklem (4.4.2) yardımıyla tuzak yoğunluğu;

$$N_T(E_\omega) = -\frac{V_{bi}}{qw} \frac{dC}{d\omega} \frac{\omega}{kT} = \frac{c(E_\omega)}{k \ln(2\sigma_p \nu_{th} N_V \omega^{-1})} \frac{dC}{dT} \quad (4.4.3)$$

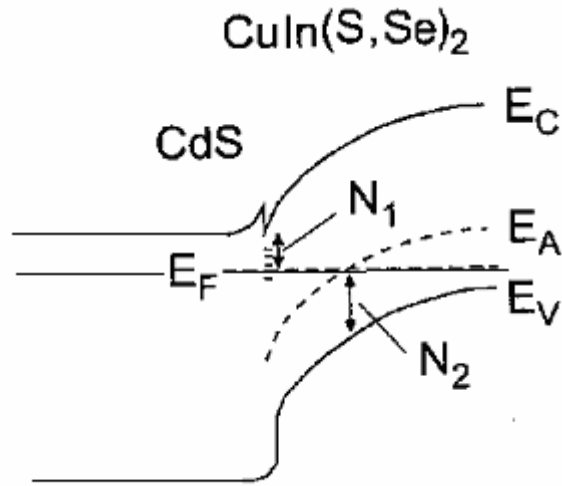
olarak bulunur. Burada $c(E_\omega)$ ifadesi kusur durumlarının, miktar olarak üstünlüklerini veren dağılımların buldukları derinliğe bağlı fonksiyonu vermektedir. Bu bağıntılar yardımı ile tuzak yoğunluğunun enerjiye bağımlı değişimleri hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 4.4.2’de çizilen grafiklerde verilmiştir.

Şekil 4.4.2’deki grafiklerde N_1 ve N_2 ile ifade edilen iki farklı tuzak seviyeleri saptanmış, N_1 ve N_2 tuzak seviyelerinin konumları Şekil 4.4.3’de gösterilmiştir [41]. Burada, N_1 seviyesi CdS/CuIn(S,Se)₂ ara yüzeyindeki iletim bandından verici seviyelere olan uzaklığı belirtmektedir. N_2 seviyesi ise soğurucu tabakanın boşaltılmış bölgesindeki değerlik bandından alıcı seviyelerine olan uzaklığı vermektedir. Yüksek bakır oranına sahip örneklerde tek maksimumun (N_1) olduğu görülmektedir. N_1 düzeyinin tuzak yoğunluğu 10^{18}cm^{-3} mertebesinde olup diğer N_2 düzeyinden daha baskındır. Sülfür oranının tuzak seviyelerine fazla etkisi olmadığı söylenebilir. Bu nedenle, bakır oranı yüksek pillerde verici seviyelerinin daha etkin rol oynadığı söylenebilir.

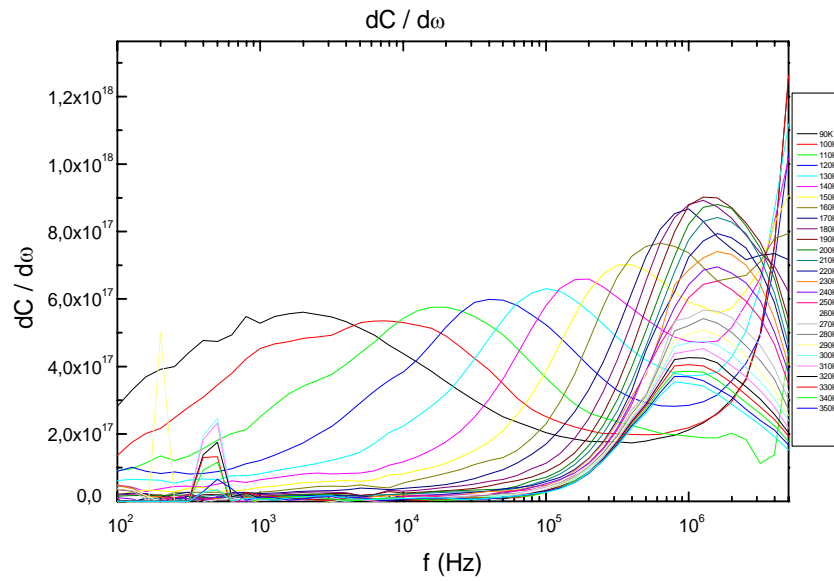


Şekil 4.4.2 ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pillerinin 100K ile 360K sıcaklıkları arasında ve 20K aralıkla tuzak yoğunluğuna bağımlı enerji değişimi grafikleri.

Şekil 4.4.2’de bakır oranı azaldıkça N_1 piklerinin baskınlığını yitirmekte ve N_2 pikleri değişmeyip baskın hale gelmektedir. Buna göre, bakır oranı azaldıkça CdS/CuIn(S,Se)₂ ara yüzeyindeki tuzakların yoğunluğu azalmakta, bununla birlikte soğurucu tabakanın boşaltılmış bölgesindeki alıcı seviyeleri baskın hale gelmektedir.



Şekil 4.4.3 ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pilindeki tuzak seviyeleri.



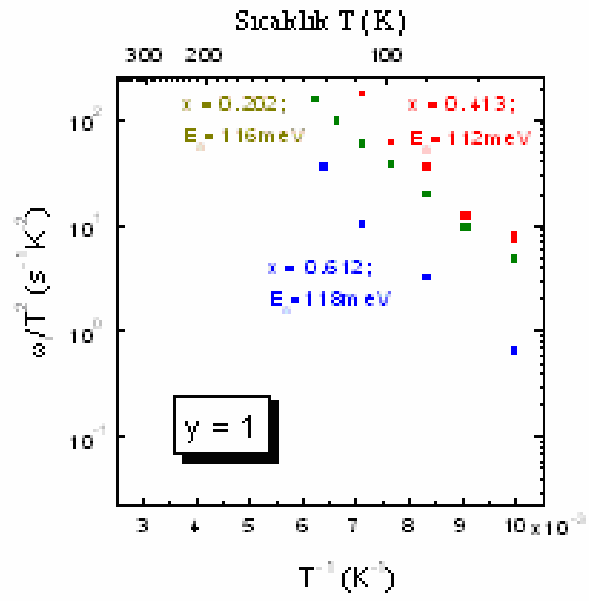
Şekil 4.4.4 ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pillerinin

frekansa bağımlı $\frac{dC}{d\omega}$ değişimleri.

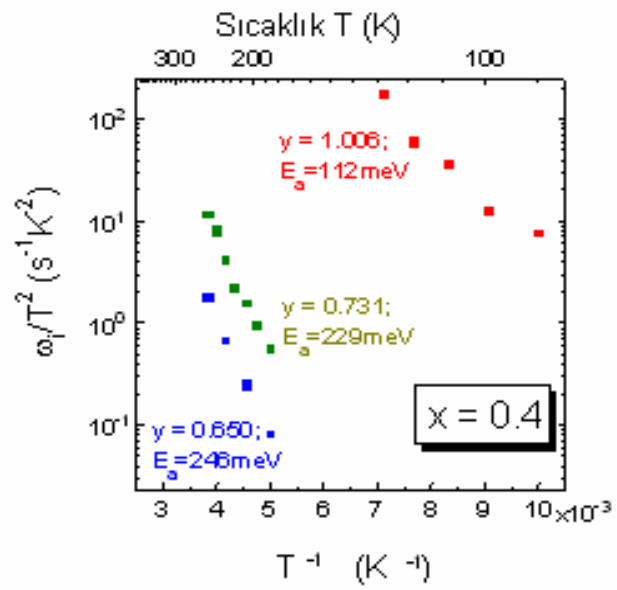
Ölçümlerdeki frekans değerlerinin $\frac{dC}{d\omega}$ değişimleri incelendiğinde elde edilen piklerin maksimumları Şekil 4.4.4'de görüldüğü gibi bükülme frekanslarını verecektir. Bulunan bükülme frekansı değerleri yardımı ile tuzak enerji seviyeleri hesaplanabilir. Kapasitansın ani değişim gösterdiği bükülme frekans değerinin relaksasyon süresi ile değişimi Bölüm 2'de belirtilmiş olup, denklem (2.2.8) ile tanımlanmıştır. Eğer bu denklem,

$$\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) = \ln \xi_0 - \frac{E_a}{kT}$$

dönüşümünden $\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) - \frac{1}{kT}$ Arrhenius çizimi yapıldığında, bulunan doğrunun eğimi tuzakların aktivasyon enerjisini verecektir. Şekil 4.4.5'da bu yöntem ile bulunan tuzak seviyeleri görülmektedir. Görüldüğü gibi değişen sülfür oranının CdS/CuIn(S,Se)₂ ara yüzeyindeki tuzak seviyelerine fazla bir etkisinin olmadığı görülmektedir. İncelenen güneş pilleri bakır oranı bakımından yüksek olduğunda CdS/CuIn(S,Se)₂ ara yüzeyinde bulunan tuzak seviyeleri etkin rol oynadığı belirlenmiştir. Bu durumda tuzak seviyeleri Şekil 4.4.5'de görüldüğü gibi 100-110meV arasında değişmektedir. Fakat bakır oranı azaldığında CdS/ CuIn(S,Se)₂ ara yüzeyindeki tuzak seviyelerinin azaldığı ve soğurucunun boşaltılmış bölgesindeki tuzak seviyelerinin daha etkin rol oynadığı belirlenmiştir. Bu tuzak seviyeleri de 200-250meV arasında değişmektedir. Tuzak seviyelerini belirlemenin diğer yolu Şekil 4.4.2'deki piklerden elde edilen Gauss eğrilerinin maksimum noktalarına denk gelen enerji değerlerini bulmaktır. Dikkat edilirse her iki yöntemde elde edilen tuzak seviyeleri tam uyum içerisindedir.



(a)



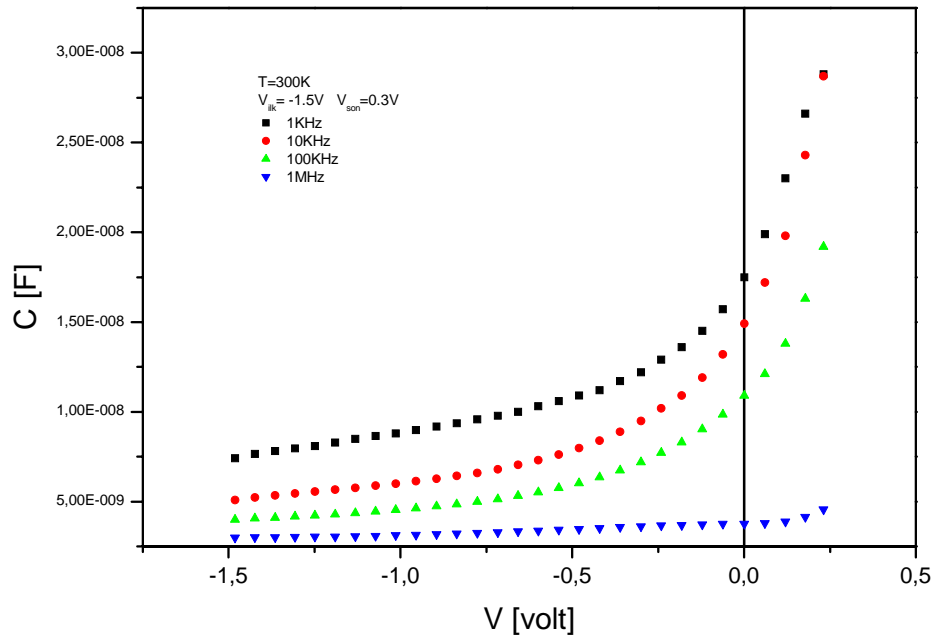
(b)

Şekil 4.4.5 $\ln\left(\frac{\omega_0}{T^2}\right) - \frac{1}{kT}$ grafikleri.

4.5 KAPASİTANS-GERİLİM ÖLÇÜMLERİ

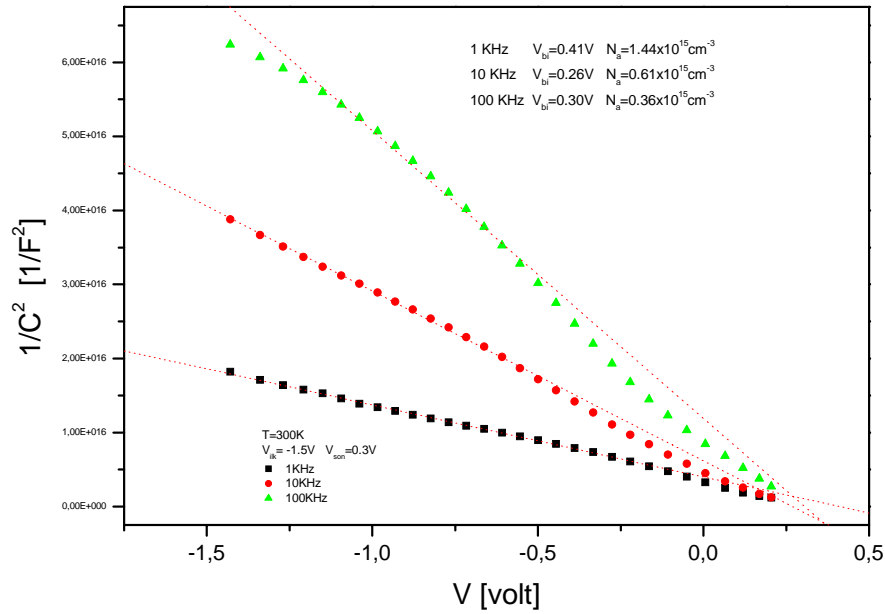
300K sıcaklığında yapılan kapasitans-gerilim ölçümlerinden faydalanarak ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pilindeki katkı yoğunlukları ve engel potansiyelleri hesaplanmıştır. Ölçümlerde uygulanan sabit frekanslar 1kHz, 10kHz, 100kHz ve 1MHz ve uygulanan gerilim değerleri ise -1.5V'dan 0.3V'a 0.05V aralıklarındadır.

Şekil 4.5.1'de düşük bakır oranına sahip VT100-1-14 nolu güneş pilinin 300K sıcaklığındaki kapasitans-gerilim değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.5.1 Düşük bakır oranına sahip ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pilinin oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki kapasitans-gerilim değişimleri.

Şekil 4.5.1'de görüldüğü gibi güneş pilinin gerilime karşın kapasitans değişimleri frekans arttıkça azalmaktadır. Bunun nedeni eklemde keskin değişimli (abrupt) iyonize alıcı ve verici yoğunluklarının bulunduğuudur. Düşük frekanslarda tuzaklardan gelen katkılardan dolayı kapasitans değerleri daha yüksektir.



Şekil 4.5.2. Düşük bakır oranına sahip VT104-1-14 nolu ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pilinin oda sıcaklığındaki ve çeşitli frekanslardaki C⁻²-V değişimleri.

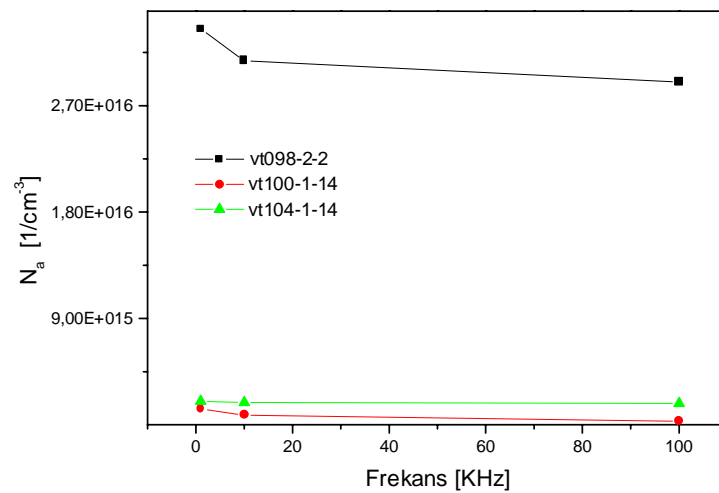
C⁻²-V grafiği incelendiğinde lineer bir değişimin olduğu anlaşılabilir. Eğer bu doğruların eğimini alıp, x eksenini kestiğimiz noktayı alırsak engel potansiyelini bulmuş oluruz. Diğer taraftan da katkı yoğunluklarını hesaplayabiliriz. Düşük bakır oranına sahip güneş pillerinin hesaplanan katkı yoğunlukları 10¹⁵cm⁻³ mertebelerindedir.

Kapasitans-gerilim ölçümleri sonucunda, 300K ve 1KHz, 10KHz frekanslarında hesaplanan katkı yoğunluklarının ve engel potansiyellerinin değerleri Tablo 4.5.1'de verilmektedir. Bu veriler ışığında; frekans arttıkça engel potansiyellerinin arttığı ve katkı yoğunluklarının azaldığı anlaşılmaktadır. Bir diğer nokta ise düşük bakır oranına sahip güneş pillerinin katkı yoğunluklarının düşük olduğudur. Bu admittans spektroskopisindeki ölçümlerde saptanan verileri doğrulamaktadır. Yani tuzakların baskın hale getirdiği verici seviyeleri bakır oranı düştükçe baskınlığını yitirmekte ve katkı yoğunluğuna etki eden tuzak yoğunluğunun azalmakta olduğu sonucu ile örtüşmektedir. Şekil 4.5.3'de katkı yoğunluğunun

frekansa bağımlı grafiği görülmektedir. Görüldüğü gibi düşük frekanslarda uygulanan ac sinyali izleyen önemli miktardaki ara yüzey durum yoğunluğunun yüksek frekanslarda giderek azalmaktadır.

Pil No	Cu/In	S/(S+Se)	$N_a(1/cm^3)$ [1KHz]- $V_{bi}(v)$	$N_a(1/cm^3)$ [10KHz]- $V_{bi}(v)$	$N_a(1/cm^3)$ [100KHz]- $V_{bi}(v)$
VT 098-2-2	1,006	0,202	$3,35.10^{16}$ 1,20	$3,08.10^{16}$ 1,14	$2,90.10^{16}$ 1,10
VT 102-3-1	1,029	0,413	$5,64.10^{16}$ 1,62	$5,54.10^{16}$ 1,71	$5,33.10^{16}$ 1,92
VT 103-1-4	1,010	0,612	$9,27.10^{16}$ 1,46	$9,19.10^{16}$ 1,63	$8,66.10^{16}$ 1,91
VT 100-1-14	0,650	0,395	$1,36.10^{15}$ 0,36	$0,82.10^{15}$ 0,57	$0,32.10^{15}$ 0,88
VT 104-1-14	0,731	0,408	$2,01.10^{15}$ 0,82	$1,91.10^{15}$ 0,88	$1,82.10^{15}$ 0,98

Tablo 4.5.1 ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pillerinin 300K'de farklı frekanslardaki katkı yoğunlukları ve engel potansiyelleri.



Şekil 4.5.3 Katkı yoğunluklarının frekansa bağımlı değişimi.

4.6 SICAKLIĞA BAĞIMLI AKIM-GERİLİM KARAKTERİSTİKLERİ

ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pillerinin baskın olan akım-iletim mekanizmalarını belirlemek için; güneş pilleri 200 K ile 360 K sıcaklık değerleri arasında 10K aralıklarla ve gelen ışımının doğal spektrumunu bozmadan sadece geçen ışımının gücünü kontrol eden nötral yoğunluk filtresi kullanılarak akım-gerilim karakteristikleri ölçülmüştür.

4.6.1 AYDINLIK ALTINDA AÇIK-DEVRE GERİLİMİNDEN YARARLANARAK AKIM-İLETİM MEKANİZMALARININ TESPİTİ

Bölüm 2.4'de CdS/CuIn(S,Se)₂ yapılarında olası akım-iletim mekanizmalarından bahsedilmişti. Tüm yeniden birleşme modellerinde akım yoğunluğu J_{sc} olmak üzere;

$$J_{sc} = j_0 \left\{ \exp\left(\frac{qV}{AkT}\right) - 1 \right\} \quad (4.6.1)$$

ile belirtilir. Buradaki V uygulanan gerilimi, kT/q da termal gerilimi belirtir. Doymuş akım yoğunluğu j_0 genel olarak;

$$j_0 = j_{00} \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (4.6.2)$$

şeklinde yazılır. Buradaki E_a aktivasyon enerjisini, j_{00} ise sadece sıcaklığa bağımlı prefaktör sabitini belirtmektedir. Buradan da açık-devre gerilimi,

$$V_{oc} \approx \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{j_{sc}}{j_0}\right) = \frac{E_a}{q} - \frac{AkT}{q} \ln\left(\frac{j_{00}}{j_{sc}}\right) \quad (4.6.3)$$

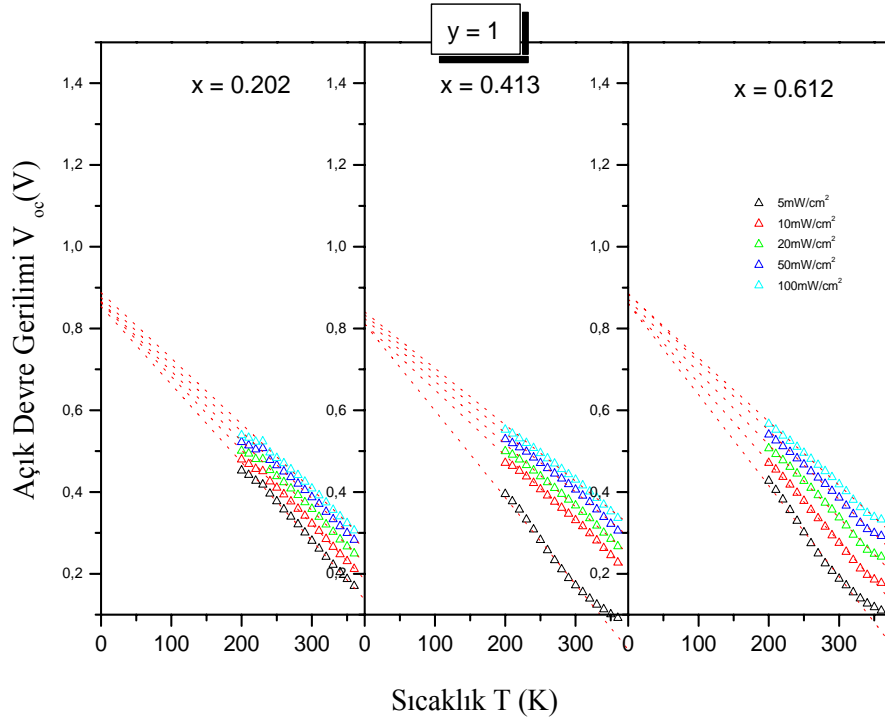
şeklinde yazılabilir.

Şekil 4.6.1 ve Şekil 4.6.2’de sıcaklığa bağımlı açık-devre geriliminin belli ışınım altındaki değişimlerini görmekteyiz. Yapılan ölçümlerde sıcaklık 200K ile 360K arasında 10K aralıklarla ayarlanmıştır. Uygulanan ışınım güçleri ise filtreye bağımlı olarak 5; 10; 20; 50 ve 100mW/cm²’dir. Elde edilen bu grafikler yardımıyla eğimleri y-eksenine fit ettiğimizde 0K’de her bir açık-devre gerilim değerlerinin çakıştığı görülmektedir. Denklem (4.6.3) yardımıyla açık-devre gerilimi 0K’de;

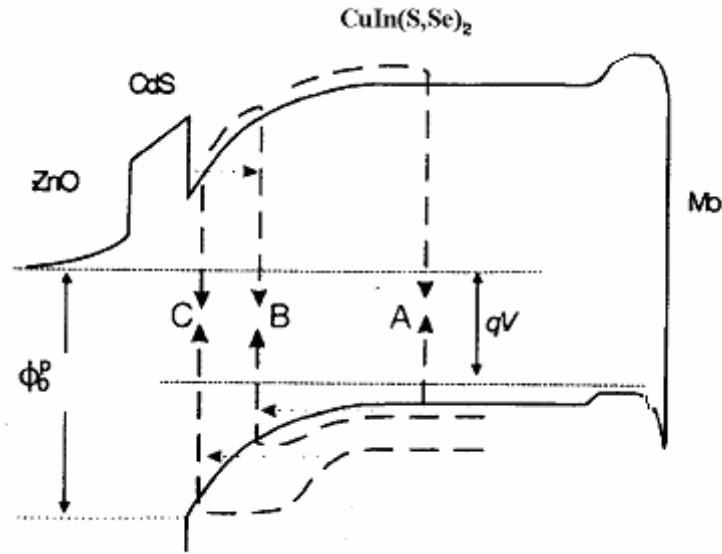
$$V_{oc} \approx \frac{E_a}{q} \quad (4.6.4)$$

aktivasyon enerjine eşit olmaktadır.

Şekil 4.6.1’de Cu/In oranı sabit S/(S+Se) oranı değişken sıcaklığa bağımlı açık-devre gerilimlerinin değişimleri görülmektedir. Değişen sülfür oranına göre aktivasyon enerji değerleri 0.8 ile 0.85eV arasında değişmektedir. Sülfür oranının değişiminin açık-devre gerilimine bir etkisi olmadığı söylenebilir. Grafikler dikkatle incelenecek olursa 230K altındaki sıcaklıklarda açık-devre gerilimlerinde sapmaların olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ise arka kontak olan molibdenin (Mo) düşük sıcaklıklarda içeri doğru kayarak boşaltılmış bölge içerisinde yer almasıdır [5].

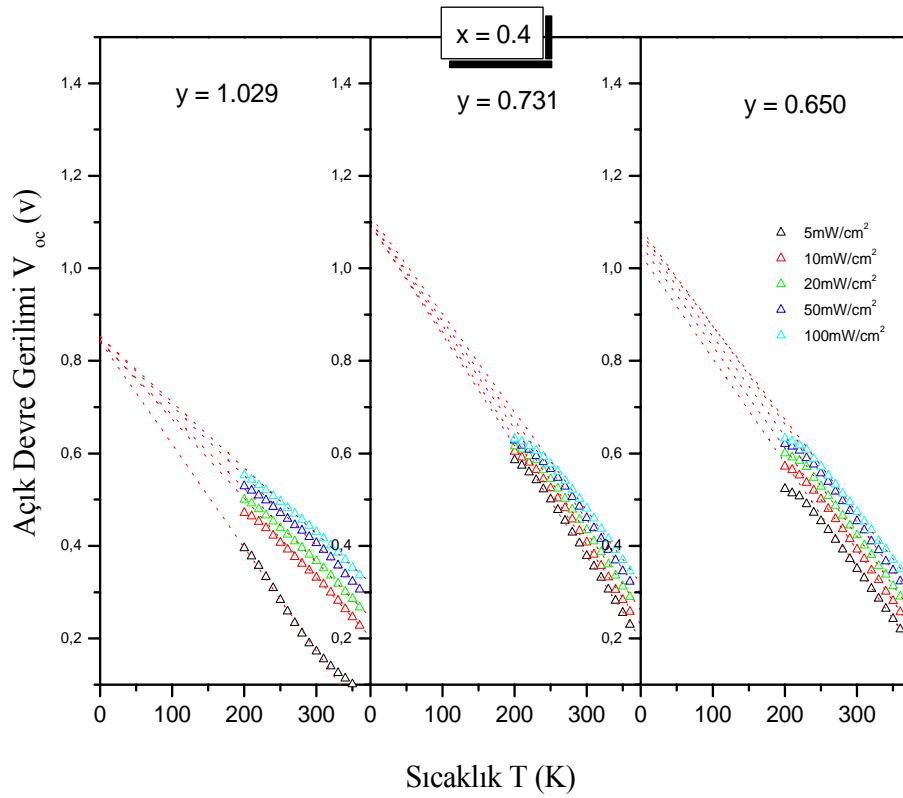


Şekil 4.6.1 Sıcaklığa bağımlı $y=1$ oranı sabit, x oranı değişken $\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{CuIn}(\text{S},\text{Se})_2$ heteroeklem güneş pillerinin açık-devre gerilimlerinin sıcaklıkla değişimleri.



Şekil 4.6.2 $\text{ZnO}/\text{CdS}/\text{CuIn}(\text{S},\text{Se})_2/\text{Mo}$ heteroeklem yapılarının enerji-bant diyagramı.

Şekil 4.6.3’de S/(S+Se) oranı sabit Cu/In oranı değişimine göre güneş pillerinin açık-devre gerilimlerinin sıcaklığa bağımlı değişimleri görülmektedir. Aktivasyon enerji değerleri 0.8 ile 1.15eV arasındadır. Güneş pillerindeki bakır oranının azalması aktivasyon enerji değerlerini arttırmaktadır. Tablo 4.6.1’de güneş pillerinin aydınlık altında sıcaklığa bağımlı açık-devre gerilimlerinden yararlanarak elde edilmiş aktivasyon enerji değerlerinin soğurucu tabakanın yasak enerji aralığı ile karşılaştırmaları görülmektedir.



Şekil 4.6.3 Sıcaklığa bağımlı $x=0.4$ oranı sabit, y oranı değişken ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pillerinin açık-devre gerilimlerinin sıcaklığa bağımlı değişimleri.

Pil No	Cu/In	S/(S+Se)	E_g (eV)	E_a (eV)
VT 098-2-2	1,006	0,202	1,04	0,84
VT 102-3-1	1,029	0,413	1,11	0,83
VT 103-1-4	1,010	0,612	1,28	0,84
VT 104-1-14	0,731	0,408	1,15	1,07
VT 100-1-14	0,650	0,395	1,14	1,10

Tablo 4.6.1. Bakır ve sülfür oranına bağımlı ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pillerinin yasak enerji aralıklarının aydınlık altında hesaplanan aktivasyon enerjileri ile karşılaştırmaları.

Aktivasyon enerjisi, soğurucu tabakanın yasak enerji aralığı değerine eşit ise ($E_a=E_g$), boşaltılmış bölge içerisinde tünellemenin yükselttiği yeniden birleşme mekanizması daha etkin ve aktivasyon enerjisi soğurucunu tabakanın yasak enerji aralığı değerinden küçük ($E_a<E_g$) ya da ϕ_b^p değerine eşit ise ara yüzeyde tünellemenin yükselttiği yeniden birleşme mekanizması etkin olur [42-43]. Bu durumda ölçümler sonucunda elde ettiğimiz aktivasyon enerji değerlerini yasak enerji aralığı değerleri ile karşılaştıracak olursak daha küçük değerde çıktığı görülmektedir. Buna göre aydınlık altında, ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ güneş pillerinin akım-iletim mekanizmaları CdS/CuIn(S,Se)₂ ara yüzeyinde tünellemenin yükselttiği yeniden birleşme mekanizmasının daha etkin olduğu söylenebilir. Ayrıca bakır oranı azaldıkça aktivasyon enerji değerinin soğurucu tabakanın yasak enerji aralığı değerine doğru yaklaşacağı ve akım-iletim mekanizmasının da boşaltılmış bölge içerisinde tünellemenin yükselttiği yeniden birleşme mekanizmasına doğru kayacağı söylenebilir.

Baskın olan akım-iletim mekanizmasını daha doğru söyleyebilmemiz için karanlık altındaki elde edilmiş olan akım-gerilim sonuçlarından yararlanabiliriz.

4.6.2 ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ HETEROEKLEM GÜNEŞ PİLLERİNİN KARANLIK ALTINDAKİ AKIM-İLETİM MEKANİZMALARININ TESPİTİ

Genel olarak, ısıl uyarılma sonucu oluşan akım-iletim mekanizmalarının baskın olduğu durumlarda [44];

a) $\log J \propto \frac{qV}{AkT}$ şeklinde değişmekte ve A idealite değerleri baskın olan akım-

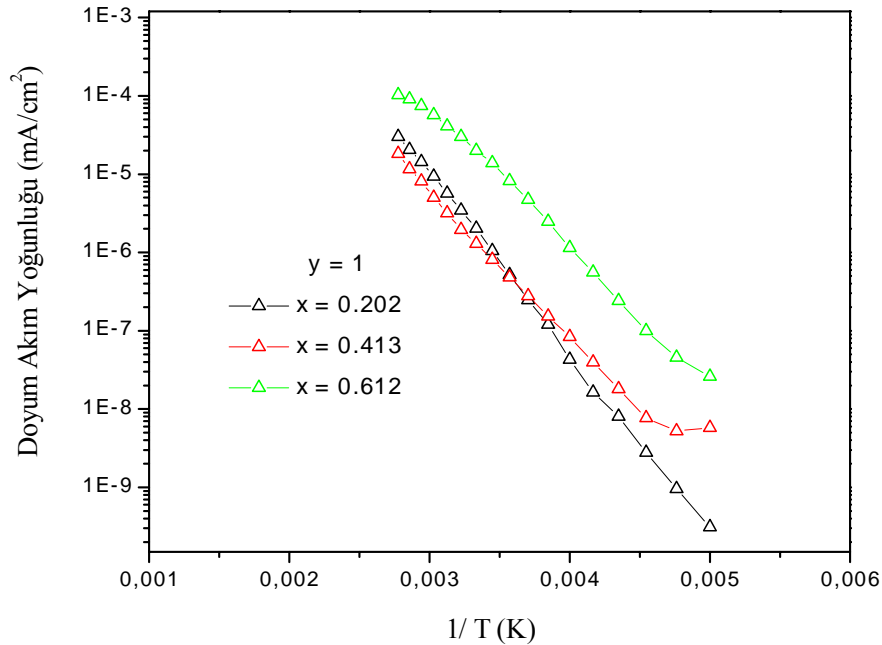
iletim mekanizması ve eklemi oluşturan katkı yoğunluklarına göre 1 ile 2 değerleri arasında değişmektedir.

b) $\log j_0 - 1/T$ değişimi doğrusal olarak değişmektedir.

Eğer tünelleme mekanizması etkin rol oynuyor ise [45];

a) $\log J - V$ değişimlerinin eğimleri sıcaklıktan bağımsız olup, idealite sabiti neredeyse sabittir.

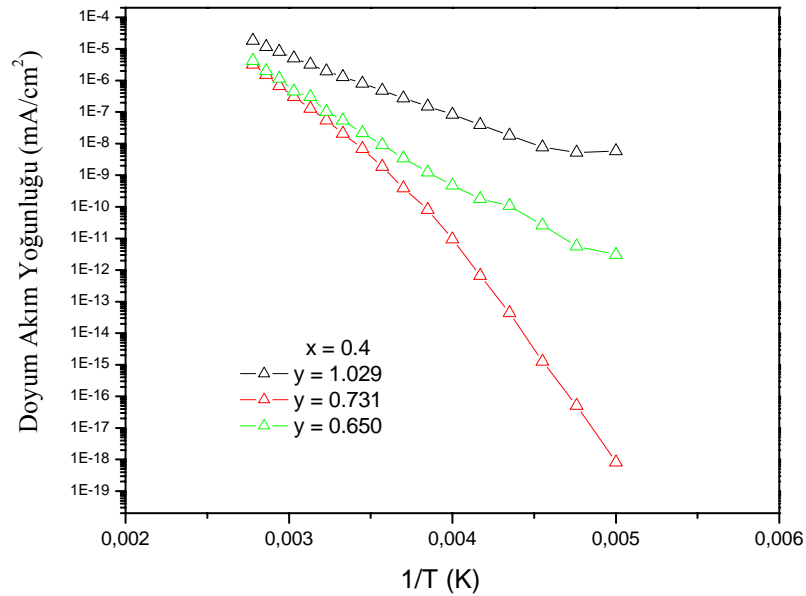
b) $\log j_0 - T$ değişimi doğrusal olarak değişmektedir.



Şekil 4.6.4 Sıcaklığa bağımlı karanlık altında y oranı sabit, x oranı değişken doyum akım yoğunluğunun değişimi.

Ölçümler neticesinde, karanlık altında $\log j_0 - 1/T$ grafikleri Şekil 4.6.4 ve Şekil 4.6.5’de görülmektedir. Şekil 4.6.4 dikkatle incelenecek olursa doyum akım yoğunluğunun sıcaklık ile doğrusal şekilde değiştiği görülmektedir. Fakat sıcaklık arttığında bu doğrusallığın kaybolduğu görülmektedir.

Şekil 4.6.5’de de aynı değişimler görülmektedir. Ölçümlerden de görüldüğü gibi 200-300K sıcaklıkları arasında ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ güneş pillerinin karanlık altındaki akım-iletim mekanizması ısıl uyarılmanın baskın olduğu mekanizmayla açıklanmalıdır. Fakat yüksek sıcaklıklarda doğrusallığın kaybolduğundan akım-iletim mekanizması tünellemenin baskın olduğu mekanizmayla açıklanmalıdır. Bununla birlikte söyleyebileceğimiz diğer önemli bir hususta ölçümlerden elde edilen akım-gerilim karakteristik eğimlerinin yavaşça değişmesinin bu tip güneş pillerinde tünelleme mekanizmalarının etkin bir mekanizma olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.6.5 Sıcaklığa bağımlı karanlık altında x oranı sabit, y oranı değişken doyum akım yoğunluğunun değişimi.

Akım-iletim mekanizması ile ilgili daha detaylı bilgi alabilmek için ters idealite faktörünün sıcaklıkla olan değişimini inceleyebiliriz. Bölüm 2’de de bahsedildiği gibi ara yüzeyde tünellemenin yükselttiği yeniden birleşme mekanizması baskın ise diyot idealite faktörü;

$$\frac{1}{A} = 1 - \frac{E_{00}^2}{3(kT)^2} \quad (2.4.12)$$

şeklin değişmekteydi. Boşaltılmış bölge içerisinde tünellemenin yükselttiği yeniden birleşme mekanizması baskın ise diyot idealite faktörü de

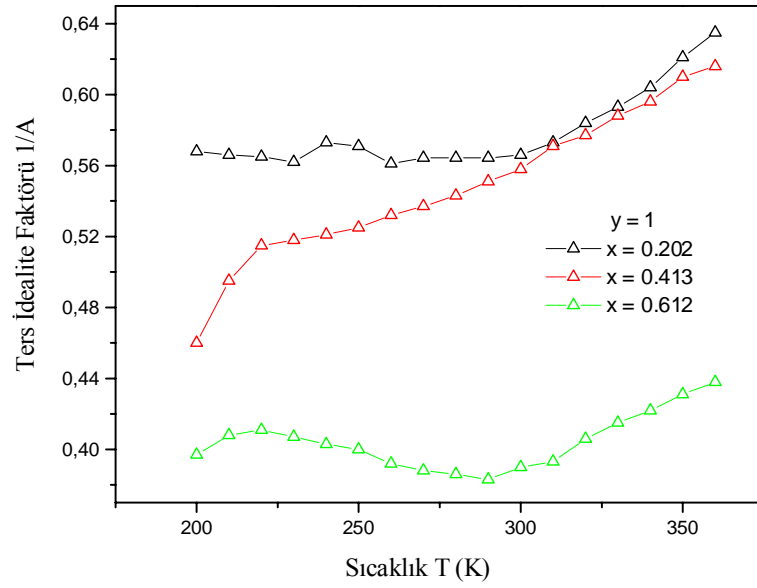
$$\frac{1}{A} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{T}{T^*} - \frac{E_{00}^2}{3k^2 T^2} \right) \quad (2.4.23)$$

şeklinde değişmekte olup soğurucu tabakadaki tuzak seviyeleri etkin rol oynarlar ise

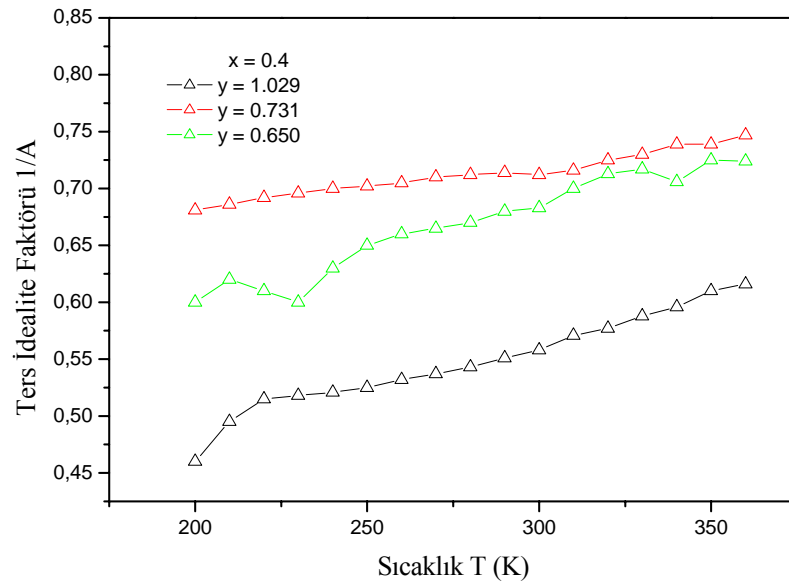
$$\frac{1}{A} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{T}{T^*} \right) \quad (2.4.24)$$

şekline dönüşmekteydi. Şekil 4.6.6 ve Şekil 4.6.7’de da yine oranlara bağımlı ters idealite faktörünün sıcaklıkla değişimini görülmektedir. Şekil 4.6.6 incelenecek olursa idealite faktörünün 1.6 ile 2.4 arasında değiştiğini görmekteyiz. Literatürde diyot idealite sabitinin sıcaklığın fonksiyonu olarak değişmesi ve ayrıca 1’den büyük değerler almasının boşaltılmış bölgede ya da ara yüzeyde tünellemenin yükselttiği yeniden birleşme mekanizmasının etkin rol olduğu söylenmektedir [38]. Görüldüğü gibi güneş pillerinin akım-iletim mekanizmaları boşaltılmış bölgede ya da ara yüzeyde tünellemenin yükselttiği yeniden birleşme mekanizması ile etkin olduğu söylenebilir.

Şekil 4.6.6 ve Şekil 4.6.7’de görüldüğü gibi ters idealite faktörü sıcaklığa bağımlı olarak artmaktadır. Yani akım-iletim mekanizması ısıl uyarılma ile gerçekleşmektedir.



Şekil 4.6.6 Sıcaklığa bağımlı y oranı sabit, x oranı değişken ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pillerinin ters idealite faktörünün değişimi.



Şekil 4.6.7 Sıcaklığa bağımlı x oranı sabit, y oranı değişken ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pilinin ters idealite faktörünün değişimi.

Karanlık altındaki akım-iletim mekanizmalarını daha doğru tespit edebilmemiz için aktivasyon enerji değerleri bulunabilir. Doyum akım yoğunluğu,

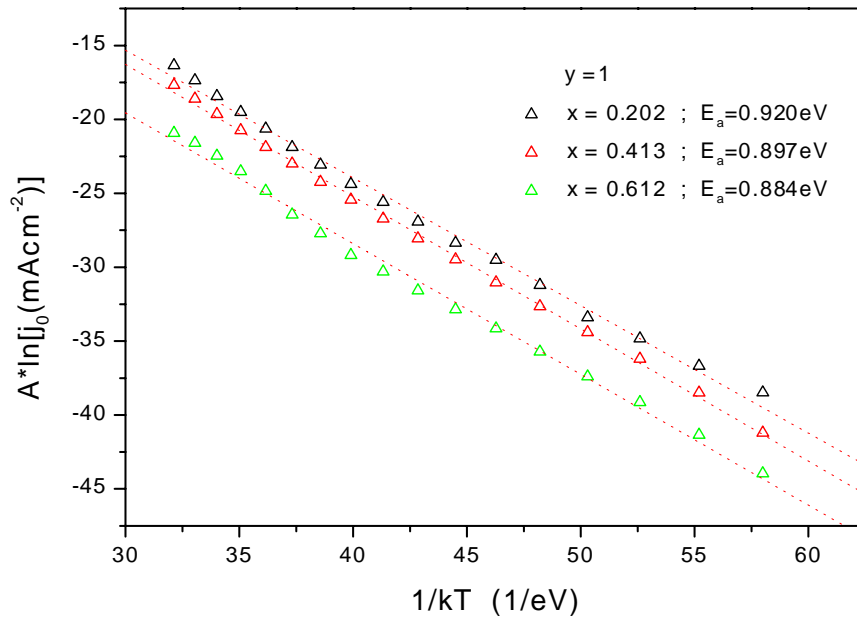
$$j_0 = j_{00} \exp\left(-\frac{E_a}{AkT}\right)$$

denkleminde yola çıkarak,

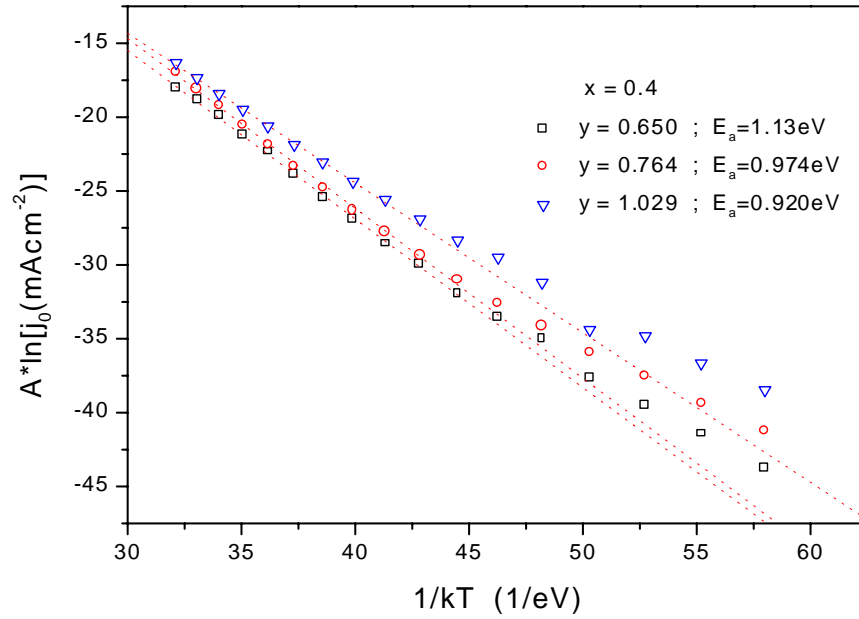
$$A \ln j_0 = -\frac{E_a}{kT} + \ln j_{00} \quad (4.6.7)$$

denklemini yardımıyla $A \ln j_0 - 1/kT$ grafiğindeki eğimi hesaplayarak aktivasyon enerji değerlerini bulabiliriz.

Şekil 4.6.8 ve Şekil 4.6.9'da yine x ve y oranına bağlı güneş pillerinin $A \ln j_0 - 1/kT$ grafiklerinin değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.6.8 ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pillerinin y oranı sabit, x oranı değişken $A \ln j_0 - 1/kT$ değişimleri.



Şekil 4.6.9 ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pillerinin x oranı sabit, y oranı değişken $\ln j_0 - 1/kT$ değişimleri.

Karanlık altında hesaplanan aktivasyon enerji değerleri ile soğurucu tabakanın yasak enerji aralığı değerlerinin karşılaştırması Tablo 4.6.2’de verilmektedir. $\ln j_0 - 1/kT$ grafiğinin eğiminden yararlanarak bulunan aktivasyon enerji değerleri görüldüğü gibi açık-devre gerilimi-sıcaklık değişiminden bulunan değerlerle hemen hemen yakındır. Yani aydınlık ve karanlık altında ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pillerinin akım-iletim mekanizmaları değişmemektedir. Karanlık altında da baskın olan akım-iletim mekanizmasının ara yüzeyde tünellemenin yükselttiği yeniden birleşme mekanizması olacağı söylenebilir. Ayrıca dikkati çeken bir nokta yine aydınlık altında olduğu gibi karanlıkta da bakır oranı azaldıkça aktivasyon enerji değerlerinin soğurucu tabakanın yasak enerji aralığı değerlerine yaklaştığı görülmekte olup akım-iletim mekanizması soğurucu tabakanın boşaltılmış bölgede gerçekleşebileceğidir.

Pil No	Cu/In	S/(S+Se)	E _g (eV)	E _a (eV)
VT 098-2-2	1,006	0,202	1,04	0,92
VT 102-3-1	1,029	0,413	1,11	0,92
VT 103-1-4	1,010	0,612	1,28	0,88
VT 104-1-14	0,731	0,408	1,15	1,13
VT 100-1-14	0,650	0,395	1,14	1,97

Tablo 4.6.2 ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ heteroeklem güneş pillerinin soğurucu tabakasının yasak enerji aralığı değerleri ile karanlık altında hesaplanan aktivasyon enerji değerlerinin karşılaştırması.

BÖLÜM 5

SONUÇ

Bu çalışmada, günümüz fotovoltaik uygulamalarında kullanılan ince film güneş pillerinden biri olan değişik kompozisyonlu $ZnO/CdS/CuIn(S,Se)_2$ heteroeklem yapılarının sıcaklığa bağlı karanlık ve aydınlık altında akım-gerilim ve admittans spektroskopisi analiz yöntemleri kullanılarak; akım iletim mekanizmaları ve baskın tuzak seviyelerinin belirlenmesi hedef alınmıştır.

Ölçümleri gerçekleştirilen güneş pilleri iki ayrı gruba ayrılabilir; $x = Cu/In \approx 1.01$ oranı sabit $y = S/(S + Se)$ oranı değişken üç adet güneş pili ve $y = S/(S + Se) \approx 0.4$ oranı sabit $x = Cu/In$ oranı değişken üç adet güneş pilinden meydana gelmektedir.

Oda sıcaklığında, $100mW/cm^2$ 'lik ışığa altında yapılan akım-gerilim ölçümleri sonucunda; güneş pillerinin verimliliklerinin bakır oranına büyük ölçüde bağlı olduğu saptanmıştır. Düşük bakır oranına sahip güneş pillerinin doluluk faktörleri ve açık-devre gerilimleri daha yüksek çıktığı ve dolayısıyla yüksek verime sahip olduğu saptanmış, sülfür oranının ise açık-devre gerilimi ve doluluk faktörüne etki etmediği anlaşılmıştır.

Yapılan kuantum verimliliği ölçümlerinden güneş pillerinin soğurucu tabakalarının yasak bant aralıklarının $1.0-1.3eV$ arasında değiştiği saptanmıştır. Daha sonraki aşamada güneş pillerinin sıcaklığa bağımlı frekans-kapasitans değişimleri incelenmiştir. Düşük frekans ve yüksek sıcaklıklarda tuzak etkilerinin eklem kapasitansına önemli derecede etki ettiği belirlenmiş, düşük sıcaklık ve yüksek frekanslarda ise güneş pillerinin bir dielektrik gibi davrandığı gözlenmiştir. Yüksek bakır oranına sahip güneş pillerinde tuzakların aktivasyon enerjilerinin $110-120meV$ arasında değiştiği ve $CdS/CuIn(S,Se)_2$ ara yüzeyindeki verici seviyelerinin baskın olduğu saptanmıştır. Ayrıca gözlenen bir diğer önemli nokta ise yüksek bakır oranına

sahip güneş pillerinde sülfür oranının değişmesinin tuzak seviyelerine bir etkisi olmadığı yönündedir. Düşük bakır oranına sahip güneş pillerinde ise aktivasyon enerjileri 200-250meV arasında değişmekte olup, soğurucu tabakadaki alıcı seviyelerinin daha baskın olduğu anlaşılmaktadır. Bunun nedeni; kristal örgü içerisinde bakır atomunun bulunması gereken yerde boşlukların bulunması ve dolayısıyla verici seviyelerindeki tuzak yoğunluklarının azalmasıdır.

300K sıcaklığında gerçekleştirilen frekans bağımlı kapasitans-gerilim ölçümlerinde admittans spektroskopisinde olduğu gibi tuzak seviyelerinin eklem kapasitansa nasıl etki ettiği incelenmiştir. Yapılan ölçümlerden katkı düzeyleri ve engel potansiyelleri belirlenmiştir. Yüksek bakır oranına sahip güneş pillerinde katkı düzeylerinin düşük bakır oranına sahip güneş pillerine göre daha büyük olduğu saptanmıştır. Ayrıca engel potansiyeli değerlerinin frekans arttıkça büyümesi ve düşük frekanslarda uygulanan ac sinyalinin izleyen önemli miktarda ara yüzey durum yoğunluğunun yüksek frekanslarda giderek azalma gösterdiği belirlenmiştir.

Sıcaklık bağımlı akım-gerilim ölçümlerinden güneş pillerinin akım-iletim mekanizmalarının belirlenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak aydınlık altındaki güneş pillerinin akım-iletim mekanizmaları belirlenmeye çalışılmıştır. Aydınlık altında açık-devre geriliminin sıcaklığa bağımlı grafikleri yardımıyla aktivasyon enerjileri saptanmıştır. Yüksek bakır oranına sahip güneş pillerinde aktivasyon enerjilerinin 0.85eV civarında olduğu ve sülfür oranının aktivasyon enerjisine etki etmediği görülmüştür. Düşük bakır oranına sahip güneş pillerinde ise aktivasyon enerjilerinin 1.1eV'a kadar yükseldiği tespit edilmiştir. Saptanan aktivasyon enerji değerlerinin soğurucu tabakanın yasak enerji aralığı ile kıyaslandığında daha küçük olduğu görülmüştür. Eğer aktivasyon enerjisi yasak enerji aralığı değerine eşit ise ($E_a=E_g$), boşaltılmış bölge içerisinde tünellemenin yükselttiği yeniden birleşme mekanizması daha etkin olmalıdır. Fakat aktivasyon enerjisi yasak enerji aralığından küçük ($E_a<E_g$) ya da ϕ_b^p değerine eşit ise ara yüzeyde tünellemenin yükselttiği yeniden birleşme mekanizması etkin olur. Buna göre aydınlık altında güneş pilinde akım-iletim mekanizması olarak ara yüzeyde tünellemenin yükselttiği yeniden birleşme mekanizmasının daha etkin olduğu söylenebilir. Bununla beraber karanlık altındaki

ölçümlerden doyum akım yoğunluğunun sıcaklık ile değişimi incelenip yeniden birleşme mekanizmalarının daha etkin rol oynadığı saptanmıştır. Ters idealite faktörünün sıcaklık ile değişimleri incelendiğinde; literatürdeki modeller ile uyum içerisinde olduğu gözlenmiş ve hesaplanan aktivasyon enerji değerlerinin aydınlık altında hesaplanmış olan değerler ile örtüştüğü saptanmıştır. Buna göre aydınlık ve karanlık altında ZnO/CdS/CuIn(S,Se)₂ güneş pillerinin akım-iletim mekanizmalarının değişmediği belirlenmiştir. Sonuç olarak tünellemenin yükselttiği yeniden birleşme mekanizmasının daha etkin olduğu ve bakır oranı azaldıkça mekanizmanın soğurucu tabakanın boşaltılmış bölgesindeki akım-iletim mekanizmasına doğru kayacağı söylenebilir.

Yapılan ölçümler neticesinde elde edilen sonuçlar;

- Soğurucu tabakadaki bakır atomlarının fazla olması güneş pilinin verimliliğini düşürmekte ve verici tuzak seviyelerini baskın hale getirmektedir.
- Soğurucu tabakaya farklı oranlarda oranlarda sülfür katkılanarak güneş pilinin elektriksel özelliklerine fazla etkilememektedir.
- Bu tür güneş pillerinde baskın olan akım-iletim mekanizması tünellemenin yükselttiği yeniden birleşme mekanizması olduğu anlaşılmaktadır.
- Eğer CIS yapılu güneş pilleri fotovoltaik alanında kullanılması istendiğinde verimi daha yüksek olan düşük bakır oranlı yapılar tercih edilmelidir. Ayrıca güneş pilinin kısa-devre akımı değiştirilmesi gerekirse güneş pilinin soğurucu tabakasını farklı oranlarda sülfür katkılanmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] M.Cook, L.Bilman, R.Adcock, Photovoltaic Fundamentals, Solar Technical Information Programme for Department of Energy USA .
- [2] Tomas Markvart, Solar Electricity, John Wiley&Sons Press (1994).
- [3] J.Zhao, A.Wang, M.A.Green, A.Ferrazza, Apply.Phys.Lett., **73**,1991 (1998).
- [4] G. Kron, T. Egerter, G. Nelles, A. Yasuda, J. H. Werner, U. Rau, Thin Solid Films **403-404**, 242-246 (2002).
- [5] U.Rau, H.W.Schock, in Clean Electricity from Photovoltaics, edited by M.D.Archer, R.Hill, Imperial College Pres, London, UK, (2002).
- [6] H.Schock ve A.Shah, 14th European PV Solar Energy Conference (1997).
- [7] S.Wagner, J.L.Shay, P.Migliorato, H.M.Kasper, Apply.Phys.Lett., **25**, 434 (1974).
- [8] R.R.Potter, C.Eberspacher, L.B.Fabick, Conf.Record 18th. IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Las Vegas, IEEE Pres, Piscataway, 1659-1664 (1985).
- [9] R.W.Birkmire, B.E.McCandless, W.N.Shafarman, R.D.Varrin, Proc.9th.European Photovoltaic Solar Energy Conversion, Vienna, European Commission, 511-514 (1989).
- [10] R.H.Mauch, M.Ruckh, J.Hedström, D.Lincot, J.Kessler, R.Klinger, L.Stolt, J.Vedel, H.W.Schock, Proc.9th.European Photovoltaic Solar Energy Conf., Lisbon, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1415-1419 (1991).

- [11] U.Rau, H.W.Schock, *Apply.Phys.A*, **69**, 131 (1999).
- [12] R.Klenk, T.Walter, H.W.Schock, D.Cahen, *Adv. Mater.*, **5**, 114 (1993).
- [13] R.A.Mickelsen, W.S.Chen, H.W.Schock, *Apply.Phys.Lett.*, **36**, 371 (1980);
US-Patent 4,335,266 (1982).
- [14] A.M.Gabor, J.R.Tuttle, D.S.Albin, M.A.Contreras, R.Noufi, A.M.Hermann,
Apply.Phys.Lett., **65**, 198 (1994).
- [15] J.R.Tuttle, J.S.Ward, T.A.Berens, M.A.Contreras, K.R.Ramanathan,
A.L.Tennant, J.Keane, E.D.Cole, K.Emery, R.Noufi, *Mater Res. Soc. Symp.*
Proc., **426**, 143 (1996).
- [16] B.L.Sharma ve R.K.Purohit, *Semiconductor Heterojunctions*, Pergamon Pres
Ltd., (1974)
- [17] A.S.Kavasoğlu, *ZnO/CdS/Cu(In,Ga)Se₂ Heteroeklem Güneş Pillerinin
Elektriksel Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, (2000).
- [18] U.Rau, F.Engelhardt, O.Seifert, M.Schmitt ve J.Parisi, Presented at EuroSun
'96, Freiburg; Germany, (1996).
- [19] K.W.Böer, in *Survey of Semiconductor Physics*, Vol.I, p.1135, New York
(1990).
- [20] R.Herberholz, M.Igalson, H.W.Schock, *J.Apply.Phys.*, **83**, 318, (1998).
- [21] E.H.Nicollian, A.Goetzberger, *Apply.Phys.Lett.*, **7**, 216, (1965).

- [22] T.Walter, R. Heberholz, C.Müller, H. W. Schock J.Appl. Phys., **80**, 4411-4420 (1996) .
- [23] V. Nadenau, U.Rau, A.Jasenek ve H.W. Schock , J.Appl.Phys., **87**, 584, (2000).
- [24] G.A.M.Hurkx, D.B.M.Klaasen ve M.P.GKnovers, IEEE Trans. Electron Devices, **ED-39**, 331 (1992).
- [25] F.A.Padovani, R.Stratton, Solid State Electron, **9**, 695, (1966)
- [26] T.Walter, R.Menner, C.H.Köble, H.W.Schock, in Proceedings of the 12th European Photovoltaic Energy Conference, edited by R.Hill, W.Palz, P.Helm (Stephens, Bedford, Uk, 1994),p.1755. (1994).
- [27] U.Rau, A. Jasenek, H.W. Schock, F. Engelhardt ve T.Meyer, Thin Solid Films, **361-362**, 298 (2000).
- [28] E.H.Rhoderick, R.H.Williams, Metal-Semiconductor Contacts, 2nd Edition, Clarendon Pres, Oxford, 96 (1988).
- [29] Keithley-236 Instruction Manuel.
- [30] OXFORD Instruction Manuel.
- [31] Installation and Operation Manual ,EDWARDS.
- [32] HP4192A Operation Manuel , HEWLETT-PACKARD CO.
- [33] HP3478A Operation Manuel , HEWLETT-PACKARD CO.
- [34] Keithley-2400 Instruction Manuel.

- [35] J.Parisi, D.Hilburger, M.Schmitt, U.Rau, Solar Energy Mat. And Solar Cells, **50**, 79-85 (1998).
- [36] M.Schmitt, U.Rau, J.Parisi, in Proc. 13th European Photovoltaic Energy Conf., Nice, p.1969 (1995).
- [37] Y.Zohta, Solid State Electron, **16**, 1029 (1973).
- [38] A.Jasenek, U.Rau, V.Nadenau, H.W.Schock, J.Apply. Phys., **87**, 594 (2000).
- [39] R.Herberholz, Spektroskopie elektrischer Defekte in Heteroübergängen auf der Basis von Cu(In,Ga)Se₂, Stuttgart, (1998).
- [40] M.Igalson, H.W.Schock, J.Apply. Phys., **80**, 5765 (1996).
- [41] M.Turcu, I.M.Kötschau, U.Rau, J.Apply. Phys., **91**, 1391 (2002).
- [42] M.Turcu, O.Pakma, U.Rau, Apply. Phys. Lett., **80**, 2598, (2002).
- [43] J.Reiss, J.Malmström, A.Werner, I.Hengel, R.Klenk, M.Ch.Lux-Steiner, Materials Research Society, **668**, H9.4.1 (2001)
- [44] R.N.Hall, Solid-State Electron, **24**, 595 (1981)
- [45] W.Hwang, E.S.Yang, H.C.Card, C.M.Wu, Proc. 14th Photovoltaic Specialists Conf., San Diego, CA, January 7-10, 1980, IEEE, New York, 404 (1980).

SEMBOLLER

ϕ : İş fonksiyonu.

E_g : Yasak enerji aralığı.

E_f : Fermi enerji seviyesi.

E_c : İletkenlik bandı enerji seviyesi.

E_v : Değerlik(valans) bandı enerji seviyesi.

N_A : Alıcı (acceptor) konsantrasyonu.

N_D : Verici (donor) konsantrasyonu.

w_p : p-tipi yarıiletkenin boşaltılmış (depletion width) bölge genişliği.

w_n : n-tipi yarıiletkenin boşaltılmış bölge genişliği.

q : elektronun yükü.

ϵ_p : p-tipi yarıiletkenin dielektrik sabiti.

ϵ_n : n-tipi yarıiletkenin dielektrik sabiti.

V_{bn} : n tipi yarıiletkenin potansiyel bant bükülme miktarı.

V_{bp} : p tipi yarıiletkenin potansiyel bant bükülme miktarı.

V_{bi} : pn eklemdeki engel (built-in) potansiyeli.

ΔE_c : pn heteroeklemlerdeki spike enerji miktarı.

ΔE_v : pn heteroeklemlerdeki notch enerji miktarı.

τ_e : yük taşıyıcıların (relaksasyon) yaşam süresi.

k : boltzman sabiti.

v_{th} : ısısal hız.

ω : açısal frekans.

E_r : Tuzakların enerji seviyesi.

n_i : katıksız (intrinsic) yük konsantrasyonu.

N_c : iletkenlik bandı kıyısındaki yük taşıyıcı konsantrasyonu.

N_v : değerlik bandı kıyısındaki yük taşıyıcı konsantrasyonu.

J_o : pn eklemde ters beslemedeki sızıntı akım yoğunluğu.

I_o : pn eklemde ters beslemedeki sızıntı akımı.

J_{oo} : sıcaklıktan bağımsız ters beslemedeki sızıntı akım yoğunluğu parametresi.

I_{oo} : sıcaklıktan bağımsız ters beslemedeki sızıntı akımı parametresi.

A : diyot idealik faktörü.

R : yeniden birleşme oranı (recombination rate).

E_{00} : karakteristik tünelleme enerjisi.

m^* : etkin kütle.

T^* : aktivasyon sıcaklığı.

C : kapasitans.

ρ : yük yoğunluğu.

Y : admittans.

η : optiksel güç oranı.

R_p : paralel (şönt) direnç etkisi.

R_s : seri direnç etkisi.

C_o : frekanstan bağımsız kapasitans.

ω_o : bükülme (kritik) frekansı.

ζ_o : sıcaklıktan bağımsız emisyon parametresi.

$\sigma_{n,p}$: elektron veya deşik için tuzak kapma tesir kesiti.

E_a : aktivasyon enerjisi.

$L_{n,p}$: n ve p tipi yarıiletkenlerin difüzyon uzunluğu.

J_L : güneş pilinin yük direnci üzerinden geçen akım.

I_{sc} : güneş pilinin kısa-devre akımı.

V_{oc} : güneş pilinin açık-devre gerilimi.

FF : güneş pilinin doluluk oranı.

V_m : güneş pilinin maksimum güç noktasındaki gerilim çıkışı.

I_m : güneş pilinin maksimum güç noktasındaki akım çıkışı.

Q : Kuantum verimliliği.