

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI**



**İKİ EKLEMLİ  $Ga_xIn_{1-x}P/GaAs$  GÜNEŞ HÜCRELERİNİN  
TASARIMI, EPİTAKSİYEL BÜYÜTÜLMELERİ VE HÜCRE  
FABRİKASYONU**

**DOKTORA TEZİ**

**TUĞÇE ATAŞER**

**BALIKESİR, HAZİRAN - 2017**

**T.C.  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI**



**İKİ EKLEMLİ  $Ga_xIn_{1-x}P/GaAs$  GÜNEŞ HÜCRELERİNİN  
TASARIMI, EPİTAKSİYEL BÜYÜTÜLMELERİ VE HÜCRE  
FABRİKASYONU**

**DOKTORA TEZİ**

**TUĞÇE ATAŞER**

**Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Orhan ZEYBEK (Tez Danışmanı)**

**Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK (Eş Danışmanı)**

**Prof. Dr. Halil GÜLER**

**Prof. Dr. Sibel GÖKDEN**

**Doç. Dr. Ahmet Şenol AYBEK**

**Doç. Dr. Mustafa Kemal ÖZTÜRK**

**BALIKESİR, HAZİRAN - 2017**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

Tuğçe ATAŞER tarafından hazırlanan “İKİ EKLEMLİ  $Ga_xIn_{1-x}P/GaAs$  GÜNEŞ HÜCRELERİNİN TASARIMI, EPİTAKSİYEL BÜYÜTÜLMELERİ VE HÜCRE FABRİKASYONU” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 30.06.2017 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Doç. Dr. Orhan ZEYBEK

Eş Danışman

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Üye

Prof. Dr. Halil GÜLER

Üye

Prof. Dr. Sibel GÖKDEN

Üye

Doç. Dr. Ahmet Şenol AYBEK

Üye

Doç. Dr. Mustafa Kemal ÖZTÜRK



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

**Bu tez çalışması Kalkınma Bakanlığı tarafından 2011K120290 ve 2016K121220 nolu projeler ile desteklenmiştir.**

## ÖZET

### İKİ EKLEMLİ $Ga_xIn_{1-x}P/GaAs$ GÜNEŞ HÜCRELERİNİN TASARIMI, EPİTAKSİYEL BÜYÜTÜLMELERİ VE HÜCRE FABRİKASYONU

DOKTORA TEZİ

TUĞÇE ATAŞER

BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DOÇ. DR. ORHAN ZEYBEK)

(EŞ DANIŞMAN: PROF. DR. SÜLEYMAN ÖZÇELİK)

BALIKESİR, HAZİRAN - 2017

Bu çalışmada, tek eklemli GaAs, iki eklemli GaInP/GaAs ve iki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücre yapılarının analitik güneş hücre modeline göre tasarımları yapıldı. Tasarımı yapılan güneş hücrelerinin teorik olarak elektriksel parametreleri sıcaklığın fonksiyonu olarak hesaplandı. Tek eklemli GaAs güneş hücresinin teorik verimi %19,92 olarak hesaplandı. İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücresinin teorik verimi %25,62 olarak bulundu. Tasarımı yapılan iki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücresinin In içeriği arttıkça, verim değerinde azalma olduğu görüldü. Güneş hücrelerinin tasarımında belirlenen optimizasyon şartları göz önüne alınarak, tek eklemli GaAs ve iki eklemli GaInP/GaAs güneş hücreleri MBE tekniği ile büyütüldü. Güneş hücresi yapılarının HR-XRD ve PL ölçüm sistemleri ile yapısal ve optik karakterleri belirlendi. Güneş hücre fabrikasyonları litografik teknikle gerçekleştirildi. A1 numunesi olarak adlandırılan tek eklemli GaAs güneş hücresinin ön ve arka kontağı için Au metali kullanıldı. İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücresinden iki parça alınarak B1 ve B2 olarak adlandırıldı. B1 numunesinin ön ve arka kontağı Au metaliyle üretildi. B2 numunesinin ön kontağı Au/Ti ve arka kontağı AuZn alaşımı ile yapıldı. Güneş hücrelerinin çıktı parametreleri AM1.5 Güneş simülatörü altında I-V ölçüm sistemi ile belirlendi. A1 güneş hücresinin verim değeri %12,11 olarak elde edildi. B1 güneş hücresinin verim değeri %14,65, B2 güneş hücresinin verim değeri %15,26 olarak hesaplandı. B1 ve B2 güneş hücresine uygulanan farklı metalizasyon süreci %4,16'lık verim artışına neden oldu. B1 ve B2 numunesine  $Al_2O_3/TiO_2$  yansıma önleyici kaplama yapıldığında, verim değerleri sırasıyla %15,72 ve %16,90 olarak elde edildi. İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücresinin ön yüzündeki kontaklar arasına kaplanan yansıma önleyici katmanın verim değerlerini artırdığı görüldü.

**ANAHTAR KELİMELELER:** Güneş hücresi, III-V grubu, Moleküler Demet Epitaksi, Yansıma Önleyici,  $Al_2O_3/TiO_2$ .

## ABSTRACT

### DESIGN, EPITAXIAL GROWTH AND CELL FABRICATION OF $Ga_xIn_{1-x}P/GaAs$ DUAL JUNCTION SOLAR CELLS

PH.D THESIS

TUĞÇE ATAŞER

BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

DEPARTMENT OF PHYSICS

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. ORHAN ZEYBEK )

(CO-SUPERVISOR: PROF. DR. SÜLEYMAN ÖZÇELİK )

BALIKESİR, JUNE 2017

In this study, single junction GaAs, dual junction GaInP/GaAs and dual junction  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  solar cell structures were designed by using analytical solar cell model. The electrical parameters of these solar cells were theoretically calculated as a function of temperature. Theoretical efficiency of the single junction GaAs solar cell was calculated as 19.92%. Theoretical efficiency of dual junction GaInP/GaAs solar cell was found to be 25.62%. It has been observed that the efficiency of dual junction  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  solar cell decreased as increasing of In incorporation into the cells. Considering the optimization conditions in the design of solar cells, single junction GaAs and dual junction GaInP/GaAs solar cells were grown using MBE technique. The structural and optical characteristic of the solar cells were determined using HR-XRD and PL measurement systems. Solar cell fabrication was performed by lithography technique. The front and back contact of the single junction GaAs, which is called as A1 sample, solar cell was used Au metal. The two parts of dual junction GaInP/GaAs solar cell were named as B1 and B2 samples. The front and back contact of B1 sample was made Au metal. The front contact of the B2 sample was covered AuTi metal and back contact of the B2 sample was made AuZn alloy. Output parameters of the solar cells was determined using I-V measurement system under the AM1.5 solar simulator. The efficiency value of A1 sample was obtained 12.11%. The efficiency value of B1 and B2 samples were calculated as 14.65% and 15.26%, respectively. The different metallization process, which was applied to B1 and B2 samples, was resulted in an increase 4.16% efficiency. The efficiency values of B1 and B2 samples were obtained 15.72% and 16.90%, respectively when the front contact of solar cells were covered with  $Al_2O_3/TiO_2$  antireflection coating. The antireflection coating, which was covered between the contacts on the front side of the dual junction GaInP/GaAs solar cell, was caused to an increase of the efficiency values.

**KEYWORDS:** Solar cell, III-V group, molecular beam epitaxy, antireflection,  $Al_2O_3/TiO_2$ .

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ .....	viii
SEMBOL LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ.....	xii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. GÜNEŞ HÜCRE FİZİĞİ.....</b>	<b>6</b>
2.1 Güneş Hücresi .....	6
2.2 Güneş Spektrumu .....	9
2.3 Hava Kütleli (AM).....	12
2.4 Güneş Hücrelerinin Çalışma Prensipleri .....	14
2.5 Çok Eklemlili Güneş Hücreleri .....	17
2.5.1 Çok Eklemlili Güneş Hücrelerinin Gelişimi .....	17
2.5.2 Çok Eklemlili Güneş Hücre Yapısı.....	19
2.5.3 Çok Eklemlili Güneş Hücrelerinin Optimizasyonu .....	26
2.6 İki Eklemlili GaInP/GaAs Güneş Hücreleri .....	31
2.7 GaInP ve GaAs Yarıiletkenlerinin Malzeme Parametreleri .....	34
2.7.1 GaAs yarıiletken malzemenin özellikleri .....	34
2.7.2 GaInP Yarıiletken malzemenin özellikleri .....	36
<b>3. GÜNEŞ HÜCRE TASARIMI .....</b>	<b>38</b>
3.1 Analitik Güneş Hücre Modeli .....	38
3.1.1 Soğurma katsayısı .....	39
3.1.2 Yansıma Katsayısı .....	40
3.1.3 Kısa Devre Akım Yoğunluğu .....	40
3.1.4 Harici Kuantum Verimi .....	44
3.1.5 Karanlık Akım Yoğunluğu .....	44
3.1.6 J-V Karakteristiği.....	45
3.1.7 Tüketim Verimi.....	47
3.2 Sıcaklık Etkisi.....	48
3.3 Numerik Analiz .....	49
<b>4. NUMERİK MODELLEME VE SONUÇLARI.....</b>	<b>53</b>
4.1 Tek Eklemlili GaAs Güneş Hücre Modellemesi .....	53
4.1.1 Tek Eklemlili GaAs Güneş Hücresinin J-V Karakteristiği.....	53
4.2 İki Eklemlili GaInP/GaAs Güneş Hücre Modellemesi.....	54
4.2.1 İki Eklemlili GaInP/GaAs Güneş Hücresinin J-V Karakteristiği .....	55
4.3 İki Eklemlili Ga <sub>1-y</sub> In <sub>y</sub> P/Ga <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> As Güneş Hücre Modellemesi .....	57
4.4 İki Eklemlili Ga <sub>1-y</sub> In <sub>y</sub> P/Ga <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> As Güneş Hücre Performansı .....	59
4.4.1 Modellenen Güneş Hücrelerinin J-V Karakteristiği .....	59
4.4.2 İki Eklemlili Ga <sub>1-y</sub> In <sub>y</sub> P/Ga <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> As Güneş Hücresinin Harici Kuantum Verimliliği.....	63
4.4.3 İki Eklemlili Ga <sub>1-y</sub> In <sub>y</sub> P/Ga <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> As Güneş Hücrelerinin Verim Değerlerinin Karşılaştırılması.....	65

4.5 İki Eklemlı Ga <sub>1-y</sub> In <sub>y</sub> P/Ga <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> As Güneş Hücrelerine Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi.....	66
<b>5. KULLANILAN YÖNTEMLER VE DENEYSSEL SİSTEMLER .....</b>	<b>74</b>
5.1 Güneş Hücresi Büyütme Teknikleri .....	74
5.1.1 Moleküler Demet Epitaksi (MBE) Yöntemi.....	74
5.2 Güneş Hücresi Karakterizasyon Teknikleri.....	77
5.2.1 Yüksek Çözünürlüklü X-ışını Kırınımı (HR-XRD) .....	77
5.2.2 Fotolüminesans (PL).....	80
5.3 Fabrikasyon Sistemleri .....	82
5.3.1 Termal Buharlaştırma (Evaporasyon) Sistemi.....	82
5.3.2 Dönel Kaplama Cihazı.....	83
5.3.3 Maske Hizalama Sistemi .....	84
5.3.4 Hızlı Isıl Tavlama (RTA) sistemi .....	85
5.4 Yansıma Önleyici Oluşturma .....	86
5.4.1 Püskürtme Sistemi .....	86
5.4.2 Morötesi-Görünür Bölge (UV-VIS) Spektroskopisi.....	87
5.5 Güneş Hücrelerinin Elektriksel Karakterizasyonu .....	88
5.5.1 Akım-Gerilim (I-V) Sistemi .....	88
<b>6. GÜNEŞ HÜCRELERİNİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONLARI</b>	<b>89</b>
6.1 Güneş Hücrelerinin Büyütülmesi .....	89
6.1.1 Tek Eklemlı GaAs Güneş Hücresi Yapısının Büyütülmesi .....	89
6.1.2 İki Eklemlı GaInP/GaAs Güneş Hücresi Yapısının Büyütülmesi .....	91
6.2 Güneş Hücresi Yapılarının Karakterizasyonları .....	94
6.2.1 Yüksek Çözünürlüklü X-ışınları Kırınım Analiz Bulguları .....	94
6.2.1 Fotolüminesans (PL) Ölçümlerinin Analiz Bulguları.....	97
6.3 Güneş Hücresi Fabrikasyonu .....	99
6.4 Güneş Hücrelerine Yansıma Önleyici Katmanın Oluşturulması.....	104
6.4.1 UV-VIS Analiz Bulguları .....	105
6.5 Güneş Hücrelerinin Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri .....	106
6.5.1 Tek Eklemlı Güneş Hücresi Yapısının Analizi .....	106
6.5.2 İki Eklemlı Güneş Hücresi Yapısının Analizi .....	108
<b>7. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>114</b>
<b>8. KAYNAKLAR.....</b>	<b>117</b>



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Güneş hücresinin çalışma prensibi.....	6
Şekil 2.2: Güneş radyasyon spektrumu.....	7
Şekil 2.3: Kara cisim radyasyonu, AM0 ve AM1.5G için güneş spektrumu.....	12
Şekil 2.4: AM1.5, AM0 ve AM1 için hava kütle diyagramı.....	13
Şekil 2.5: Yarıiletkenlerin enerji bant diyagramı (a) $h\nu < E_g$ (b) $h\nu > E_g$ (c) $h\nu = E_g$ .....	15
Şekil 2.6: Güneş hücresinin çalışmasını temsil eden bant diyagramı (a) denge durumunda, (b) ışık altında.....	17
Şekil 2.7: Farklı türlerdeki güneş hücrelerinin verimlerinin karşılaştırılması.....	19
Şekil 2.8: Çok eklemli güneş hücresinde spektrum yarılmalari.....	20
Şekil 2.9: Güneş hücre yapısı.....	21
Şekil 2.10: Güneş hücresinin eşdeğer devresi.....	22
Şekil 2.11: Tünel eklem şematik bant yapısı.....	23
Şekil 2.12: Tünel diyotun I-V karakteristiği (a) ters, (b) ileri, (c) daha büyük ileri besleme durumunda.....	24
Şekil 2.13: Yarıiletkenlerin yasak enerji aralığına karşı örgü sabiti diyagramı.....	29
Şekil 2.14: N tane hücreye sahip olan çok eklemli güneş hücresinin şematik yapısı.....	30
Şekil 2.15: Güneş hücresine gelen güneş ışığının kalınlığa göre soğurulması.....	31
Şekil 2.16: İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücre yapısı.....	33
Şekil 2.17: GaAs bileşiğinin kristal yapısı.....	34
Şekil 2.18: GaAs bant yapısı.....	35
Şekil 2.19: GaInP yarıiletken bileşiği.....	36
Şekil 2.20: GaInP bileşiğinin kristal yapısı.....	36
Şekil 3.1: Tek eklemli güneş hücre yapısı.....	41
Şekil 3.2: Güneş hücresinin J-V karakteristiği.....	46
Şekil 3.3: Güneş hücre performansı hesaplama algoritması.....	50
Şekil 4.1: Tek eklemli GaAs güneş hücre modeli.....	53
Şekil 4.2: Modellenen tek eklemli GaAs güneş hücresinin J-V grafiği.....	54
Şekil 4.3: İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücre modeli.....	55
Şekil 4.4: Modellenen iki eklemli GaInP/GaAs güneş hücresini J-V karakteristiği.....	56
Şekil 4.5: İki eklemli $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$ güneş hücre yapısı.....	57
Şekil 4.6: Modellenen $Ga_{0,42}In_{0,58}P/GaAs$ güneş hücresinin, alt ve üst hücrelerin akım uyumu.....	60
Şekil 4.7: Modellenen $Ga_{0,42}In_{0,58}P/Ga_{0,99}In_{0,01}As$ güneş hücresinin, alt ve üst hücrelerin akım uyumu.....	60
Şekil 4.8: Modellenen $Ga_{0,38}In_{0,62}P/Ga_{0,95}In_{0,05}$ güneş hücresinin, alt ve üst hücrelerin akım uyumu.....	60
Şekil 4.9: Modellenen $Ga_{0,28}In_{0,72}P/Ga_{0,7}In_{0,3}As$ güneş hücresinin, alt ve üst hücrelerin akım uyumu.....	61

<b>Şekil 4.10:</b> İki eklemli $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$ güneş hücrelerinin AM0 spektrumundaki J-V grafiği.....	62
<b>Şekil 4.11:</b> İki eklemli $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$ güneş hücrelerinin AM0 spektrumundaki J-V grafiği.....	62
<b>Şekil 4.12:</b> İki eklemli $Ga_{0,42}In_{0,58}P/GaAs$ güneş hücresinin AM1.5G için, QE değerleri. ....	63
<b>Şekil 4.13:</b> İki eklemli $Ga_{0,42}In_{0,58}P/Ga_{0,99}In_{0,01}As$ güneş hücresinin AM1.5G için, QE değerleri.....	64
<b>Şekil 4.14:</b> İki eklemli $Ga_{0,38}In_{0,62}P/Ga_{0,95}In_{0,05}As$ güneş hücresinin AM1.5G için, QE değerleri.....	64
<b>Şekil 4.15:</b> İki eklemli $Ga_{0,28}In_{0,72}P/Ga_{0,7}In_{0,3}As$ güneş hücrelerinin AM1.5G için, QE değerleri.....	65
<b>Şekil 4.16:</b> $Ga_{1-x}In_xAs$ yarıiletken malzemenin $E_g$ değerlerinin sıcaklık göre değişimi. ....	66
<b>Şekil 4.17:</b> $Ga_{1-y}In_yP$ yarıiletken malzemenin $E_g$ değerlerinin sıcaklıkla değişimi.....	67
<b>Şekil 4.18:</b> İki eklemli $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$ güneş hücrelerinin AM1.5G için $J_{SC}$ 'ye sıcaklık etkisi. ....	68
<b>Şekil 4.19:</b> İki eklemli $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$ güneş hücrelerinin AM0 için $J_{SC}$ 'ye sıcaklık etkisi.....	68
<b>Şekil 4.20:</b> İki eklemli $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$ güneş hücrelerinin AM1.5G için Voc'a sıcaklık etkisi.....	69
<b>Şekil 4.21:</b> İki eklemli $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$ güneş hücrelerinin Voc'un sıcaklığa göre değişimi.....	70
<b>Şekil 4.22:</b> İki eklemli $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$ güneş hücrelerinin AM1.5G için $\eta$ 'ye sıcaklık etkisi. ....	71
<b>Şekil 4.23:</b> İki eklemli $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$ güneş hücrelerinin AM0 için $\eta$ 'ye sıcaklık etkisi.....	71
<b>Şekil 5.1:</b> Gazi-Fotonik'de kurulu olan VG-Semicon V80H MBE sistemi. ....	75
<b>Şekil 5.2:</b> MBE sisteminin vakum odalarının şematik gösterimi. ....	76
<b>Şekil 5.3:</b> Kübik bir kristal düzleminden X-ışını saçılması.....	78
<b>Şekil 5.4:</b> Yüksek çözünürlüklü X-ışınları kırınım düzeneği.....	79
<b>Şekil 5.5:</b> XRD cihazının genel görünümü.....	80
<b>Şekil 5.6:</b> Yarıiletkeni $\nu_L$ frekansında uyardıktan sonra fotoluminesans sırasında oluşan geçişler.....	81
<b>Şekil 5.7:</b> PL sistemin deneysel düzeneği.....	81
<b>Şekil 5.8:</b> Fotoluminesans ölçüm sistemi. ....	82
<b>Şekil 5.9:</b> Termal buharlaştırma sistemi. ....	83
<b>Şekil 5.10:</b> Dönel Kaplama Cihazı. ....	84
<b>Şekil 5.11:</b> Maske hizalam sistemi. ....	84
<b>Şekil 5.12:</b> Hızlı ısı tavlama (RTA) sistemi. ....	85
<b>Şekil 5.13:</b> Bestec marka püskürtme sistemi. ....	87
<b>Şekil 5.14:</b> UV-VIS spektrometresi.....	87
<b>Şekil 5.15:</b> I-V ölçüm sistemi. ....	88
<b>Şekil 6.1:</b> Tek eklemli GaAs güneş hücre yapısı.....	89
<b>Şekil 6.2:</b> İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücre yapısı. ....	92
<b>Şekil 6.3:</b> Tek eklemli GaAs güneş hücresinin HR-XRD desenleri.....	95
<b>Şekil 6.4:</b> İki Eklemli GaInP/GaAs güneş hücresinin HR-XRD desenleri.....	96
<b>Şekil 6.5:</b> Tek eklemli GaAs güneş hücre yapısının PL spektrumu. ....	98

<b>Şekil 6.6:</b> İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücre yapısının PL spektrumu.....	99
<b>Şekil 6.7:</b> Mesa yapısında kullanılan foto-maske.....	100
<b>Şekil 6.8:</b> Oluşturulan mesa yapısı.....	101
<b>Şekil 6.9:</b> İnce ızgara foto-maskesi.....	101
<b>Şekil 6.10:</b> Oluşturulan ince ızgara yapısı.....	102
<b>Şekil 6.11:</b> Toplayıcı ızgara foto-maskesi.....	102
<b>Şekil 6.12:</b> Oluşturulan toplayıcı ızgara yapısı.....	103
<b>Şekil 6.13:</b> Arka kontak foto-maskesi.....	103
<b>Şekil 6.14:</b> Oluşturulan arka kontak yapısı.....	104
<b>Şekil 6.15:</b> Fabrikasyon işlemi tamamlanmış iki eklemli güneş hücre yapısı.....	104
<b>Şekil 6.16:</b> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> yansıma önleyici katmanın geçirgenlik spektrumu.....	105
<b>Şekil 6.17:</b> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> yansıma önleyici katmanın yansıma spektrumu.....	106
<b>Şekil 6.18:</b> GaAs güneş hücre yapısı.....	107
<b>Şekil 6.19:</b> Tek eklemli güneş hücre yapısının I-V grafiği.....	108
<b>Şekil 6.20:</b> GaInP/GaAs güneş hücre yapısı.....	109
<b>Şekil 6.21:</b> B1 numunesinin I-V grafiği.....	110
<b>Şekil 6.22:</b> B2 numunesinin I-V grafiği.....	111
<b>Şekil 6.23:</b> AR kaplanmış B1 numunesinin I-V grafiği.....	112
<b>Şekil 6.24:</b> AR kaplanmış B2 numunesinin I-V grafiği.....	113

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 1.1:</b> 2015 yılı sonunda Türkiye'de enerji kaynağına dayalı elektrik santrallerinin kurulu gücü [8].	2
<b>Tablo 2.1:</b> Farklı konsantrasyonlardaki güneş hücrelerin eklem sayısına göre maksimum teorik verimleri [52].	18
<b>Tablo 2.2:</b> GaAs'ın 300 K'deki temel parametreleri [65,96].	34
<b>Tablo 2.3:</b> GaInP'ın 300 K'deki temel parametreleri [90,99].	37
<b>Tablo 3.1:</b> Analitik hücre modelindeki temel parametreler.	42
<b>Tablo 4.1:</b> Tek eklemli GaAs güneş hücresinin teorik olarak hesaplanan elektriksel parametreleri.	54
<b>Tablo 4.2:</b> İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücresinin teorik olarak hesaplanan elektriksel parametreleri.	56
<b>Tablo 4.3:</b> İki eklemli $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$ güneş hücresinin hesaplanan yasak enerji aralıkları.	58
<b>Tablo 4.4:</b> Güneş hücre performansı hesaplanmasında kullanılan parametreler [99].	58
<b>Tablo 4.5:</b> Güneş hücrelerinin teorik olarak hesaplanan elektriksel parametreleri.	66
<b>Tablo 4.6:</b> İki eklemli $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$ güneş hücrelerinin performans değerleri.	72
<b>Tablo 6.1:</b> Tek eklemli güneş hücresi yapısının büyütme sıcaklık değerleri.	91
<b>Tablo 6.2:</b> İki eklemli güneş hücre yapısının büyütme sıcaklık değerleri.	94
<b>Tablo 6.3:</b> Parçacık boyutu, dislokasyonu ve gerilim.	97
<b>Tablo 6.4:</b> GaAs güneş hücresinin elektriksel parametreleri.	108
<b>Tablo 6.5:</b> B1 numunesinin elektriksel parametreleri.	110
<b>Tablo 6.6:</b> B2 numunesinin elektriksel parametreleri.	111
<b>Tablo 6.7:</b> AR kaplanmış B1 numunesinin elektriksel parametreleri.	112
<b>Tablo 6.8:</b> AR kaplanmış B2 numunesinin elektriksel parametreleri.	113

## SEMBOL LİSTESİ

<b>a</b>	: Örgü sabiti
<b>Å</b>	: Angstrom
<b>AES</b>	: Auger Elektron Spektroskopisi
<b>Al</b>	: Alüminyum
<b>AlAs</b>	: Alüminyum arsenik
<b>AlGaAs</b>	: Alüminyum galyum arsenik
<b>AlInP</b>	: Alüminyum indiyum fosfat
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	: Alüminyum oksit
<b>AM</b>	: Hava Kütle Sabiti
<b>AM0</b>	: Hava kütle sıfır
<b>AM1</b>	: Hava kütle bir
<b>AM1.5</b>	: Hava kütle 1.5
<b>Ar</b>	: Argon
<b>AR</b>	: Yansıma önleyici
<b>As</b>	: Arsenik
<b>ASTM</b>	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
<b>Au</b>	: Altın
<b>B</b>	: Radyoaktif rekombinasyon katsayısı
<b>Be</b>	: Berilyum
<b>c</b>	: Boşluktaki ışık hızı
<b>C</b>	: Karbon
<b>CH<sub>4</sub></b>	: Metan
<b>CO<sub>2</sub></b>	: Karbon dioksit
<b>CVD</b>	: Kimyasal Buhar Biriktirme
<b>DC</b>	: Doğru akım
<b>DI</b>	: De-iyonize
<b>D<sub>n</sub></b>	: Taban tabakadaki difüzyon sabiti
<b>D<sub>p</sub></b>	: Yayıcı tabakadaki difüzyon sabiti
<b>E<sub>C</sub></b>	: İletim bandı enerji seviyesi
<b>E<sub>F</sub></b>	: Fermi enerji seviyesi
<b>E<sub>g</sub></b>	: Yasak enerji aralığı
<b>E<sub>V</sub></b>	: Valans bandı enerji seviyesi
<b>EJ</b>	: Eksa joule
<b>EQE</b>	: Harici Kuantum Verimi
<b>eV</b>	: Elektron volt
<b>fcc</b>	: Yüzey merkezli kübik
<b>Fe</b>	: Demir
<b>FF</b>	: Dolum Faktörü
<b>Ga</b>	: Galyum
<b>GaAs</b>	: Galyum arsenik
<b>GaInAs</b>	: Galyum indiyum arsenik
<b>GaP</b>	: Galyum fosfat
<b>GaInP</b>	: Galyum indiyum fosfat
<b>Ge</b>	: Germanyum
<b>GEPA</b>	: Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası

<b>h</b>	: Planck sabiti
<b>h<math>\nu</math></b>	: Foton enerjisi
<b>H<sub>2</sub>O</b>	: Su
<b>HR-XRD</b>	: Yüksek Çözünürlüklü X-ışınları Kırınımı
<b>In</b>	: İndiyum
<b>InAs</b>	: İndiyum arsenik
<b>InP</b>	: İndiyum fosfat
<b>IR</b>	: Kızılötesi
<b>I<sub>sc</sub></b>	: Kısa devre akımı
<b>I-V</b>	: Akım-Gerilim
<b>J</b>	: Joule
<b>J<sub>0</sub></b>	: Doyum akım yoğunluğu
<b>J<sub>d</sub></b>	: Karanlık akım yoğunluğu
<b>J<sub>sc</sub></b>	: Kısa devre akım yoğunluğu
<b>k</b>	: Boltzmann sabiti
<b>K</b>	: Kelvin
<b>k.b.</b>	: Keyfi birim
<b>km</b>	: Kilometre
<b>KWh</b>	: Kilowatt saat
<b>L<sub>n</sub></b>	: Taban tabakadaki difüzyon yoğunluğu
<b>L<sub>p</sub></b>	: Yayıcı tabakadaki difüzyon yoğunluğu
<b>MgF<sub>2</sub></b>	: Magnezyum florür
<b>MBE</b>	: Moleküler Demet Epitaksi
<b>MW</b>	: Megawatt
<b>n</b>	: Birim hacimdeki elektron sayısı
<b>N</b>	: Azot
<b>N<sub>A</sub></b>	: Alıcı katkı yoğunluğu
<b>N<sub>D</sub></b>	: Verici katkı yoğunluğu
<b>n<sub>i</sub></b>	: Saf taşıyıcı yoğunluğu
<b>Ni</b>	: Nikel
<b>nm</b>	: Nanometre
<b>NREL</b>	: Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı
<b>MOCVD</b>	: Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme
<b>O<sub>2</sub></b>	: Oksijen
<b>p</b>	: Birim hacimdeki deşik sayısı
<b>P</b>	: Fosfor
<b>Pt</b>	: Platin
<b>PL</b>	: Fotoluminesans
<b>PR</b>	: Fotodirenç
<b>R</b>	: Yansımaya katsayısı
<b>RF</b>	: Radyo frekansı
<b>RHEED</b>	: Yüksek Enerjili Elektron Yansımaya Kırınımı
<b>rpm</b>	: Dakikadaki devir sayısı
<b>RTA</b>	: Hızlı Isıl Tavlama
<b>q</b>	: Elektron yükü
<b>S<sub>b</sub></b>	: Taban tabakadaki yüzey rekombinasyon hızı
<b>S<sub>e</sub></b>	: Yayıcı tabakadaki yüzey rekombinasyon hızı
<b>Si</b>	: Silisyum
<b>Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub></b>	: Silisyum nitrür
<b>SiO<sub>2</sub></b>	: Silisyum dioksit

<b>Sn</b>	: Kalay
<b>T</b>	: Sıcaklık
<b>Ti</b>	: Titanyum
<b>TiO<sub>2</sub></b>	: Titanyum dioksit
<b>UV</b>	: Morötesi
<b>UHV</b>	: Ultra yüksek vakum
<b>VIS</b>	: Görünür
<b>V<sub>oc</sub></b>	: Açık devre voltajı
<b>W<sub>b</sub></b>	: Taban tabaka kalınlığı
<b>W<sub>e</sub></b>	: Yayıcı tabaka kalınlığı
<b>x, y</b>	: Alaşım oranı (kompozisyonu)
<b>Zn</b>	: Çinko
<b>ZnS</b>	: Çinko sülfür
<b>µm</b>	: Mikrometre
<b>λ</b>	: Dalgaboyu
<b>σ</b>	: Stefan-Boltzmann sabiti
<b>α</b>	: Soğurma katsayısı
<b>φ<sub>0</sub></b>	: Yayıcı tabakadaki foton akısı
<b>φ<sub>0</sub>'</b>	: Taban tabakadaki foton akısı
<b>µ</b>	: Mobilite
<b>τ</b>	: Taşıyıcı ömrü

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmalarında bana her türlü imkânı sağlayan engin bilgi ve tecrübeleri ile bana her zaman yol gösteren, çalışma azmi ve başarılarıyla her daim örnek aldığım, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü, saygıdeğer hocam Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e teşekkür eder ve saygılarımı sunarım.

Doktora tez çalışmalarımın her aşamasında bilimsel bilgileri ile beni aydınlatan ve tez çalışmalarımı verimli bir şekilde gerçekleştirebileceğim ortamı benim için sağlayan değerli tez danışman hocam Doç. Dr. Orhan ZEYBEK'e teşekkür eder ve saygılarımı sunarım.

Bilgilerini ve desteklerini benden hiç esirgemeyen ve deneyimleri ile beni yönlendiren değerli hocalarım Doç. Dr. Mustafa Kemal ÖZTÜRK'e ve Prof. Dr. Sibel GÖKDEN'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmalarımın deney sürecinde bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi araştırmacılarının her birine ayrı ayrı teşekkür ederim

Öğrenim hayatım sürecinde benden destek ve yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen canım aileme sonsuz teşekkür ederim.

Akademisyen olmayı hayal ettiğim bu yolda karşılaştığım tüm zorluklara rağmen benden desteğini ve yüreğini hiçbir zaman eksik etmeyen yol arkadaşım canım eşim Şahin ATAŞER'e tüm kalbimle teşekkür ederim.



# 1. GİRİŞ

Enerji gereksinimi, insanlık tarihinin başlangıcı ile birlikte ortaya çıkmıştır. Enerji, modern dünyanın gelişimini etkileyen ve insan hayatının iyileştirilmesinde en önemli faktördür. Enerji talebinin büyük çoğunluğunun petrol, doğal gaz, kömür ve uranyum gibi fosil kaynaklarından sağlanması, doğal yaşam koşullarımız için büyük bir tehdit oluşturmaktadır [1]. Bu alanda yapılan çalışmalar, gelecekte yaşanılabilir bir dünya için 2050 yılına kadar fosil yakıtların kullanılması ile açığa çıkan karbondioksit (CO<sub>2</sub>) ve metan (CH<sub>4</sub>) gibi sera gazı emisyonlarının %60 ile 70 oranında azaltılması gerektiğini gösterdi [2]. Bu emisyonların azaltılması, enerji üretiminde kullanılan geleneksel kaynaklar yerine, çevre dostu olan yenilenebilir enerji teknolojilerinin tercih edilmesi ile sağlanabilir [3].

Yenilenebilir enerji, doğal kaynaklardan elde edilen ve dünya döngüsü ile sürekliliği olan enerjiye denir. Yenilenebilir enerji türlerine, güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve jeotermal enerji örnek gösterilebilir. Bu enerji türleri arasında güneş enerjisi, elektrik enerjisi üretiminde en önemli enerji kaynağıdır. Dünyanın mevcut enerji tüketim oranı, yaklaşık olarak 1,3 EJ iken, güneş ışığı her gün yaklaşık olarak  $1,5 \times 10^{22}$  J'luk (15 000 EJ) enerjiyi dünyaya yayar [4,5]. Bu verilere göre, yeryüzüne gelen güneş ışığı, tüketilenden 10 000 kat daha fazla olduğundan, güneş enerjisi, gelecekteki sürdürülebilir ve temiz enerji üretimi için en uygun kaynaktır [6].

Gelişen teknoloji ile günlük ihtiyaçlarımızın büyük çoğunluğu elektrik enerjisi ile karşılanmaktadır. Hızla gelişen teknoloji sayesinde artan elektrik ihtiyacını karşılamak için güneş enerjisinden elektrik üretim payı, Dünya'da ve Türkiye'de hızlı bir şekilde artmaktadır. Dünya genelinde güneş enerjisinden elektrik üretim payına bakılacak olunursa, Amerika Birleşik Devletleri başta olmak üzere Avrupa ülkeleri ve Çin ilk sıralarda yer almaktadır. Ülkemizin güneş enerji potansiyeli ve yıllık güneşlenme süresi, coğrafi konumumuz nedeniyle, İspanya dışındaki tüm Avrupa ülkelerine göre oldukça fazladır [7]. Güneş Enerji Potansiyeli Atlası'nın (GEPA) belirlemiş olduğu verilere göre, ülkemizin yıllık toplam

güneşlenme süresi 2,737 saat (günlük toplam 7,5 saat), yıllık toplam gelen güneş enerjisi 1,527 kW.h/m<sup>2</sup>.yıl (günlük toplam 4,2 kW.h/m<sup>2</sup>)'dır.

Ülkemizin artan elektrik gereksinimi, çeşitli enerji kaynaklarından sağlanmaktadır. Türkiye'de enerji kaynaklarına dayalı enerji santrallerinin 2015 yılının sonundaki kurulu gücü, Tablo 1'de verilmektedir [8]. Tablodan da görüldüğü gibi, ülkemizin elektrik ihtiyacının büyük bir kısmı kömür ve doğal gaz olan fosil yakıtlardan elde edilmektedir. Ancak ülkemizde kömür rezervlerin kısıtlı olması ve doğal gaz kaynaklarının bulunmaması, enerji ihtiyacımızı karşılamada ülkemizi dışa bağılı hale getirmektedir [9,10].

**Tablo 1.1:** 2015 yılı sonunda Türkiye'de enerji kaynağına dayalı elektrik santrallerinin kurulu gücü [8].

<b>Yakıt Tipi</b>	<b>Kurulu Güç (MW)</b>	<b>(%)</b>
İthal Kömür	6 070,2	8,30
Taş Kömür+Asfatit	755,0	1,03
Linyit	8 840,1	12,09
Sıvı Yakıtlar	722,4	0,99
Doğal Gaz	25 145,3	34,38
Endüstriyel Atık+Atık Isı	98,5	0,13
Biyokütle	271,6	0,37
Rüzgâr	4 503,2	6,16
Güneş	248,8	0,34
Barajlar	19 077,2	26,08
Deniz Göl ve Akarsu	6 790,6	9,28
Jeotermal	623,9	0,85
<b>Toplam</b>	<b>73 146,7</b>	<b>100,00</b>

Tablo 1'de görüldüğü gibi, hidroelektrik santrallerden üretilen elektrik, Türkiye için önde gelen yenilenebilir enerji kaynağıdır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının stratejik planına göre, 2023 yılına kadar, ülkemizin potansiyel hidroelektrik kapasitesini yaklaşık olarak 36 000 MW'a yükseltmek, kurulu rüzgâr ve güneş enerjisi kapasitelerini sırasıyla, yaklaşık olarak 20 000 MW'a ve 3 000 MW'a çıkarmaktır [8,11]. Böylece devletimizin desteği ile 2023 yılında ülkemizin elektrik talebinin %30'u yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilebilecektir [12]. Yenilenebilir enerjiden üretilen elektrik enerjisinin payını arttırmak, sera gazı emisyonlarının azalması ile çevre dostu enerji elde edilmesinin yanında, ülkemizin elektrik enerji üretimindeki dışa olan bağıllığını önemli ölçüde azaltmış olacaktır.

Fransız bilim adamı Henri Becquerel tarafından 1839'da keşfedilen ve fotovoltajik etki ile çalışan güneş hücreleri, güneş enerjisini, yenilenebilir ve temiz

elektrik enerjisine dönüştürebilen cihazlardır [13,14]. Güneş hücreleri, gürültüsüz, hareketli mekanik parçalar içermeyen, güvenilir ve çevreye zarar vermeyen aygıtlardır. Güneş hücreleri bu özelliklerinden dolayı yüksek güvenilirliğe ve düşük işletim maliyetine sahiptir. Ulaşımın zor olduğu kırsal kesimlerde aydınlanma, haberleşme ve sulama gibi temel ihtiyaçların karşılanmasına dayalı birçok uygulamada güneş hücre aygıtları tercih edilmektedir.

Uyduların enerji ihtiyacı güneş hücrelerinden karşılanmaktadır. Kullanılan güneş hücreleri yüksek radyasyona ve uzayın ilgi bölgesindeki şartlara dayanıklı olmalıdır. Si yerine doğrudan yasak enerji aralığına sahip olan GaAs teknolojisine dayalı güneş hücreleri bu alanda öne çıkmaktadır. Ardışık eklemli III-V grubu güneş hücreleri güneş spektrumunun geniş bölgesinde foto-akım dönüşümü sağlayabilmek amacıyla, yasak enerji aralığı artacak şekilde alttan üste doğru büyütülür. Çok eklemli III-V güneş hücre yapılarının büyütülmesinde örgü uyumunun sağlanması imkânı olan ve yasak enerji aralığı elementel kompozisyona bağlı olarak ayarlanma şansı bulunan GaInP/GaAs hücre yığınları uydu uygulamaları için yaygın kullanım alanına sahiptir.

Güneş hücrelerinin gelişimine katkı sağlamak için yapılan teorik çalışmalar, güneş hücre aygıtlarındaki, fiziksel davranışların daha iyi anlaşılmasına yardımcı olur. Hücre modelleme yöntemlerinin ve yazılımlarının geliştirilmesi, Ar-Ge süresini kısaltmaktadır. Bu geliştirilen yöntemler ve yazılımların geneli analitik güneş hücre modeline dayanmaktadır. Analitik güneş hücre modeli, güneş spektrumunun spektral ışıyım değerlerinden yararlanarak, güneş hücresinin elektriksel parametrelerin hesaplanmasında kullanılır. Bu model, hem azınlık hem de çoğunluk taşıyıcılar için süreklilik ve akım denklemlerini ve Poisson denklemini içeren beş diferansiyel denklem kümesinin çözümünü içerir. Gelişmiş tasarım ve modelleme ile büyütme şartlarının optimizasyonu sağlanarak, yüksek verim değerlerine sahip yüksek kaliteli güneş hücreleri geliştirmek mümkündür. Böylece güneş hücrelerinin tasarımında önerilen optimize şartları göz önüne alınarak, üretimi esnasında oluşan maliyet ve zaman kaybı azaltılabilmektedir [15,16].

III-V tabanlı güneş hücreleri, aynı alttaş üzerine farklı yarıiletken malzemelerin epitaksiyel olarak büyütülmesi ile sağlanır. Epitaksiyel kristal büyütme teknikleri ile çeşitli elektronik ve optoelektronik devre elemanlarının üretilmesi

teknolojiye büyük katkı sağlamaktadır. Bu epitaksiyel büyütme yöntemleri, Moleküler Demet Epitaksi (MBE), Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) ve Metal Organik Kimyasal Buhar Biriktirme (MOCVD) gibi farklı yöntemlerle elde edilir. Bu yöntemler arasında, MBE sistemi III-V tabanlı güneş hücrelerinin üretimde en çok tercih edilen tekniklerden biridir. MBE tekniğinin düşük büyütme oranına sahip olması, yüksek kalitede yarıiletken malzeme üretilmesine imkân sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, iki eklemlilik GaInP/GaAs güneş hücresinin verim değerlerini artırmaktır. Bu doğrultuda öncelikli olarak analitik güneş modeline göre tek eklemlilik GaAs, örgü ve akım uyumuna sahip iki eklemlilik GaInP/GaAs güneş hücrelerinin tasarımı ve üretimidir. Bu tasarım sayesinde güneş hücrelerinin verim değerinin iyileştirilmesindeki optimize şartları belirlenerek, MBE tekniği ile büyütülen tek eklemlilik GaAs ve iki eklemlilik GaInP/GaAs güneş hücrelerine farklı metal kontakların ve  $Al_2O_3/TiO_2$  yansıma önleyici katmanın verim değerlerini artırması hedeflenmektedir. Ayrıca İndiyum (In) içeriğinin değiştirilmesi ile iki eklemlilik  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin tasarımı yapılarak hücre verimi üzerinde etkisinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu tasarım sayesinde GaAs alttaş üzerine büyütülen güneş hücrelerini epitaksiyel kaldırma yöntemi ile esnek alttaş üzerine yapıştırılarak düşük maliyetli, hafif ve yüksek verime sahip güneş hücrelerinin üretimine yol gösterici olması beklenmektedir.

Bu bilgiler doğrultusunda, tez çalışması yedi bölümden oluşmaktadır:

- Birinci bölümde, güneş enerjisi ve güneş hücreleri hakkında genel bilgiler verilerek tezin amacını ve önemini kapsayan bilgiler sunuldu.
- İkinci bölümde, güneş hücreleri, güneş spektrumu, güneş hücresinin çalışma prensibi ve çok eklemlilik güneş hücreleri gelişimi, hücre yapısı ve optimizasyonu hakkında genel bilgiler verildi. İki eklemlilik GaInP/GaAs güneş hücreleri hakkında genel bilgiler sunuldu ve bu güneş hücreleri ile ilgili literatür çalışmaları verildi.
- Üçüncü bölümde, güneş hücrelerinin tasarımı ile ilgili bilgiler verilerek, analitik güneş hücre modeline göre tasarlanan güneş hücrelerinin performans hesaplanmalarında kullanılan denklemler, ayrıntılı olarak verildi. Ayrıca tasarlanan güneş hücrelerinin elektriksel parametrelerin hesaplanmasında kullanılan yöntem ve algoritma ayrıntılı bir şekilde sunuldu.

- Dördüncü bölümde, büyütülen tek eklemli GaAs ve iki eklemli GaInP/GaAs güneş hücrelerin tasarımları yapıldı. Tasarımı yapılan güneş hücrelerinin elektriksel parametreleri hesaplandı. Ayrıca modellenen iki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücresinin İndiyum (In) içerikleri değiştirilerek, elektriksel parametrelerindeki değişimler hesaplandı. Buna bağlı olarak bu güneş hücrelerinin sıcaklığın verim değeri üzerindeki etkisi incelendi.
- Beşinci bölümde, güneş hücrelerin büyütülmesinde kullanılan MBE tekniği, hücre karakterizasyonunda kullanılan yüksek çözünürlüklü x-ışınları kırınım (HR-XRD) yöntemi, fotoluminesans (PL) sistemi hakkında genel bilgiler verildi. Güneş hücre yapılarının fabrikasyonu esnasında kullanılan termal buharlaştırma sistemi, dönel kaplama cihazı, maske hizalama sistemi ve hızlı ısı tavlama (RTA) sistemleri ile ilgili genel bilgiler sunuldu. Güneş hücresi yüzeyine oluşturulan yansımaya önleyici (AR) kaplamada kullanılan püskürtme sistemi ve karakterizasyonunda kullanılan morötesi-görünür bölge (UV-VIS) spektroskopisi ve güneş hücrelerinin elektriksel parametrelerinin ölçülmesinde kullanılan akım-gerilim (I-V) sistemi hakkında genel bilgiler sunuldu.
- Altıncı bölümde, güneş hücrelerinin büyütme sürecindeki adımlar sunuldu. Hücrelerin yapısal ve optik analiz bulguları verildi. Güneş hücrelerinin fabrikasyon süreçleri tanıtıldı. Güneş hücresine yansımaya önleyici katman oluşturulması verildi ve bu katmanın analiz bulguları verildi. Güneş hücrelerinin I-V ölçüm analizleri AM1.5 ışınımı altında incelenerek, hesaplanan elektriksel çıktı parametreleri verildi.
- Yedinci bölümde ise teorik ve deneysel olarak yapılan çalışmalar değerlendirilerek önerilerde bulunuldu.

## 2. GÜNEŞ HÜCRE FİZİĞİ

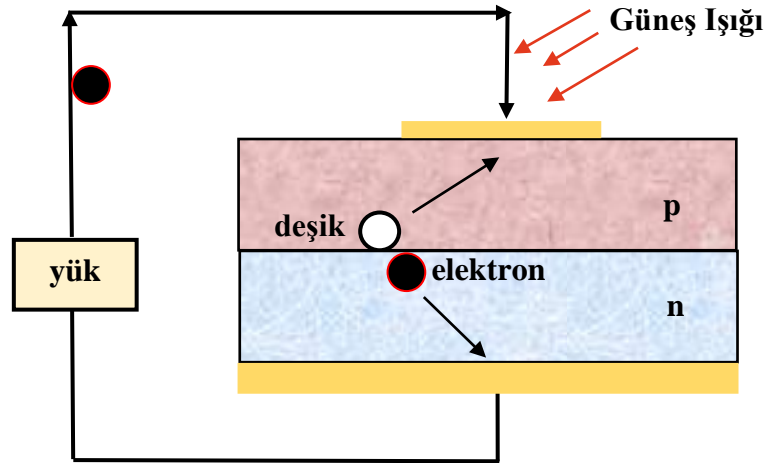
### 2.1 Güneş Hücresi

Güneş hücreleri, güneşten gelen ışınları soğurup, doğrudan elektrik enerjisine dönüştürmek için tasarlanır ve üretilir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan güneş hücreleri, ileri teknoloji cihazların (transistör, ışık yayan diyot ve fotodiyot) yapısı gibi, yarıiletken tabanlı p-n eklemelerden oluşmaktadır. Güneş hücresindeki p-n eklemesinin çalışması için fotovoltaik etkinin sağlanması gerekir. Bu etki, Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, iki adımda gerçekleşir:

i-) Güneşten gelen fotonların soğurularak, elektron-deşik çifti oluşturması,

ii-) Üretilen elektron-deşik çiftlerinin p-n eklemesinin tüketim bölgesinde meydana gelen elektrik alan tarafından birbirinden ayrılmasıdır [17].

Uyarılmış elektronlar taban durumlarına dönmeden önce elektrik enerjisi oluşturmak üzere dış devreyi besler.



Şekil 2.1: Güneş hücresinin çalışma prensibi.

## Güneş hücreleri.

(1) tek kristal (monokristal) ve polikristal silisyum gibi silisyum tabanlı güneş hücreleri [18,19],

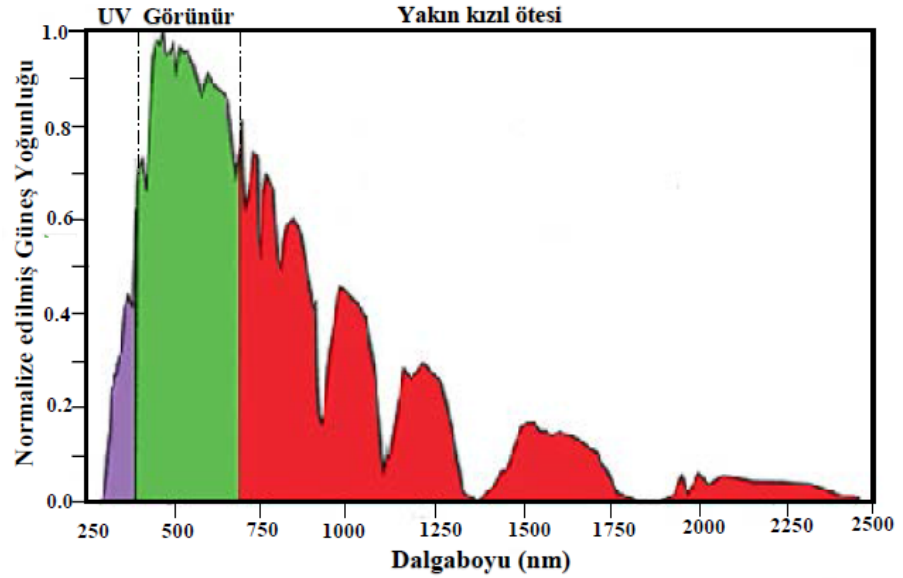
(2) amorf silisyum, kadmiyum tellür ve kadmiyum sülfür gibi ince film tabanlı güneş hücreleri [20,21]

(3) yığın (bulk) heteroeklem ve hibrit peroskite gibi organik/inorganik tabanlı güneş hücreleri [22,23],

(4) güneş ışığının yoğunlaştırıldığı teknolojide ve uzay uygulamalarında kullanılan GaAs, GaInAs ve GaInP gibi III-V tabanlı güneş hücreleri [24,25]

olmak üzere dört grupta toplanır. III-V tabanlı güneş hücreleri tek eklemli, iki eklemli ve üç eklemli gibi farklı yapılarda tasarlanabilmektedir.

Yer yüzeyine gelen güneş ışınları, çeşitli dalgalılarına sahip elektromanyetik radyasyonlardan meydana gelir. Dünya yüzeyine ulaşan güneş ışınları spektrumu, Şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2: Güneş radyasyon spektrumu.

Güneş spektrumu dalgalılarına göre, mor ötesi (UV), görünür (VIS) ve kızılötesi (IR) olmak üzere üç bölgeye ayrılır. Güneş ışınlarının %9'u UV bölgede (300-400 nm), %43'ü VIS bölgede (400-700 nm) ve %52'si de IR bölgede (700-

2500 nm) yer alır. Güneş hücrelerinin verimi, güneşten gelen ışınımın ne kadarının soğrulduğu ile ilgilidir. Bundan dolayı güneş hücre tasarımı en önemli etken güneş spektrumudur. Güneş spektrumu 0,5 ile 4,4 eV arasında geniş bir enerji aralığındaki fotonları içerir. Kullanılan yarıiletken malzemeye bağlı olarak, güneş hücreleri bu fotonların belli bir kısmını kullanabilmektedir [26]. Bu durum, yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığına ve güneş hücresinin eklem sayısına bağlı olarak değişmektedir.

Bir güneş hücresinin elektriksel performansı ve kalitesi, hücrede kullanılan yarıiletken malzemelere yani malzemenin yasak enerji aralığına bağlı olarak belirlenir. Tek eklemli güneş hücre yapıları yasak enerji aralığının kısıtlı değeri nedeniyle güneş spektrumunun sadece belirli bir bölgesini soğurabildiğinden dolayı verim değerleri düşüktür. Verim değerinin düşük olmasında iki faktör öne çıkmaktadır:

1-) Güneş hücresine gelen yasak enerji aralığından büyük enerjiye sahip fotonlardır. Bu fotonların fazla olan enerjileri ısı enerjisine dönüşerek termal kayıplara neden olur.

2-) Yasak enerji aralığından küçük enerjiye sahip fotonlardır. Bu fotonlar, elektrik üretimine katkı sağlayamazlar.

Bu kayıplar, güneş spektrumunun daha etkin bir şekilde kullanılmasına olanak sağlayan çok eklemli güneş hücrelerinin geliştirilmesine sebep olmuştur [27]. Çok eklemli güneş hücre tasarımları ile fotonların iletim ve ısı kayıpları azaltılabilir.

Çok eklemli güneş hücreleri farklı yarıiletken malzemelerin üst üste büyütülmesi ile oluşur. Üst hücrede yasak enerji aralığı en büyük malzeme bulunurken, alt hücrelerde yasak enerji aralığı küçük malzemeler kullanılmaktadır [28,29]. Yani bu güneş hücrelerine güneş ışığı geldiğinde, yüksek enerjiye sahip fotonlar, üst hücrede soğrulurken, alt hücrelere daha düşük enerjili fotonlar geçiş yapar [30,31]. Bu güneş hücrelerinin tasarımında, yüksek verim elde edebilmek için geniş yasak enerji aralıklarına ve yüksek kaliteye sahip olan, III-V tabanlı yarıiletken malzemeler tercih edilmektedir. Bu yarıiletkenler, 0,3 ile 2,3 eV arasında değişen yasak enerji aralığına sahiptirler [32]. Farklı yasak enerji aralığına sahip olan çok



eklemlı güneş hücreleri, güneş spektrumunun ultraviyole bölgeden yakın kızılötesi bölgeye kadar olan fotonları soğurur. Böylece yüksek verime sahip güneş hücre aygıtları çok eklemlı güneş hücre teknolojisi ile elde edilir. Bu güneş hücreleri karasal ve uzay uygulamaları gibi farklı alanlarda kullanılmaktadır [33].

## 2.2 Güneş Spektrumu

Güneş, çevresine ısı ve ışık şeklinde çok büyük miktarda enerji yayar. Güneş, hidrojen ve helyum atomlarından oluşan bir yıldız olarak tanımlanır [1]. Yaklaşık olarak Güneş, Dünya çapının 109 katına ( $1,5 \times 10^6$  km), hacminin  $1,3 \times 10^6$  katına ( $1,41 \times 10^{27}$ ) kütesinin 333 bin katına ( $1,98 \times 10^{30}$  kg) ve yoğunluğunun 1/4'üne eşittir. Güneşin iç kısmının sıcaklığı  $2 \times 10^7$  K olup, yüzey sıcaklığı 6000 K'dir. Güneş yüzeyini, kütesinin %74'ünü ve hacminin %92'sini oluşturan hidrojen, kütesinin %24-25'ini ve hacminin %7'sini oluşturan helyum ve geriye kalan kısımlarını da Ni, O, C, Si ve Fe gibi elementler oluşturur.

Güneş enerjisinin kaynağı güneşin iç kısımlarında meydana gelen füzyon reaksiyonlarından oluşmaktadır. Füzyon süresi boyunca, dört hidrojen atomu birleşerek, termal enerji olarak yayılan bir helyum atomu oluşturur [34]. Güneşte her bir saniyede 564 milyon ton hidrojen, 560 milyon ton helyuma dönüşür ve buradaki 4 milyon tonluk kütle kaybından açığa çıkan enerji, Einstein bağıntısına ( $E=mc^2$ ) göre,  $3,86 \cdot 10^{26}$  J'dur [35]. Bu büyük enerji, UV bölgeden IR bölgeye kadar elektromanyetik radyasyon olarak yayılır. Füzyon reaksiyonları tarafından üretilen bu enerji, herhangi bir kirletici gaz veya diğer yan reaksiyon ürünlerini içermediği için, güneş enerjisi temiz ve yenilenebilir enerji kaynağıdır.

Güneşten gelen ışınım, enerji taşıyan fotonlardan meydana gelir. Bu fotonlar, güneş ışınım spektrumundaki farklı dalgalıboylarına bağılı olarak, farklı enerjilere sahiptir. Bir fotonun enerjisi,

$$E(\text{eV}) = \frac{1,24}{\lambda(\mu\text{m})} \quad (2.1)$$

eşitliğı ile ifade elde edilir. Eşitlikteki  $\lambda$ , mikrometre cinsinden foton dalgalıboyudur. Güneş hücresi üzerine ışık düşürüldüğünde, hücreyi oluşturan malzemelerin yasak

enerji aralığından daha büyük enerjiye sahip olan fotonlar elektrik üretme yeteneğine sahiptirler [2,15]. Bu yüzden yüksek kaliteli güneş hücre tasarımında güneş ışığının spektral doğası önemli etkindir.

Güneş ışığı, yaklaşık 6000 K sıcaklığa sahip olan kara cisim ışımasına benzer radyasyon spektrumu içeren bir ışık kaynağıdır. Bundan dolayı güneş ışığının özelliklerini tanımlamak için güneş radyasyonu kara cisim ışıması olarak modellenmektedir. Kara cisim, tüm elektromanyetik ışınları soğurarak, sıcaklığa bağlı ışık spektrumu yayan bir cisim olarak tanımlanır. Güneş radyasyonun yaydığı spektral parlaklık, kara cismin uyduğu yasalarla belirlenebilir:

**1-) Planck yasası:** Belirli bir sıcaklıktaki termal denge durumunda kara cisim ışımasının yaydığı elektromanyetik radyasyon olarak ifade edilir. Yayılan enerjinin dalgaboyuna göre değişimi,

$$E_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left[ e^{hc/\lambda kT} - 1 \right]} \quad (2.2)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikteki h Planck sabiti ( $6,626 \times 10^{-34}$  J·s), c boşluktaki ışık hızı ( $3 \times 10^8$  m/s),  $\lambda$  dalgaboyu, k Boltzmann sabiti ( $1,38 \times 10^{-23}$  J·K<sup>-1</sup>), T kara cisim sıcaklığı (6000K)'dir.

**2-) Stefan-Boltzmann yasası:** İdeal bir kara cisim, T(K) sıcaklığında birim yüzeyden birim zamanda

$$\int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4 = 5,66 \times 10^{-8} T^4 \quad (2.3)$$

eşitliği ile verilen enerji yayınlar. Eşitlikteki  $\sigma$  Stefan-Boltzman sabitidir.

**3-) Wien yer değiştirme yasası:** Eşitlik (2.2)'deki yayınlanan maksimum enerjiye karşılık gelen dalgaboyu,

$$\lambda_{\text{mak}} = \frac{b}{T} \quad (2.4)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikteki  $b$  Wien yer değiştirme sabiti olup,  $2,898 \times 10^{-3}$  m·K'dir.

Güneş radyasyonunun yaydığı spektral parlaklık,

$$I_{\lambda} = E_{\lambda} \frac{G}{\int_0^{\infty} E_{\lambda} d\lambda} \quad (2.5)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikteki  $G$  güneş radyasyon yoğunluğu olup,  $1353$  W/m<sup>2</sup>'dir. Eşitlik (2.5)'de Eşitlik (2.2) ve (2.3) yerine yazılıp düzenlenirse,

$$I_{\lambda} = \frac{8,925 \cdot 10^{-6}}{\lambda^5 (e^{\frac{0,0143}{\lambda T}} - 1) T^4} \quad (2.6)$$

eşitliği elde edilir. Eşitlikteki  $\lambda$  güneşten gelen fotonların dalgaboyu,  $T$  kara cisim sıcaklığı olup yaklaşık  $6000\text{K}$ 'dir.

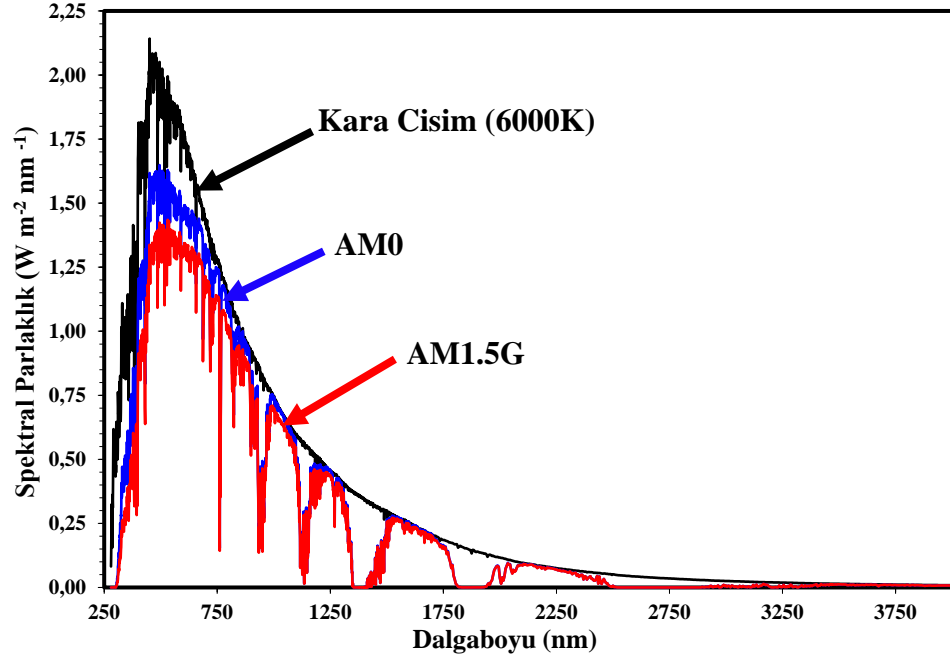
Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (ASTM) tarafından geliştirilen spektral parlaklık dağılımı Şekil 2.3'de verildi. Dalgaboyunun bir fonksiyonu olarak verilen bu dağılım, ışığın farklı doğal ve yapay kaynakları altında ölçülen performansı ile ilgili olarak spektral anlamda güneş hücrelerini değerlendirmek için kullanılan tek ve ortak referanstır. Atmosfer dışındaki güneş radyasyonu kara cisim radyasyonuna benzer şekilde farklı dalgaboylarında dağılır (Şekil 2.3). Güneş enerjisi yeryüzüne elektromanyetik ışımaya yoluyla ulaşırken yaklaşık olarak %30'u saçılmalardan dolayı azalır. Bundan dolayı yeryüzüne ulaşan güneş spektrumu, atmosfer dışındaki spektrumdan farklılık gösterir. Bu azalmanın nedeni,

1-) Atmosferdeki moleküllerin Rayleigh saçılmasından,

2-) Atmosferdeki yabancı maddelerce saçılmasından

3-) Atmosferde oluşan su buharı ve kirlilik gibi yabancı maddelerce soğrulma

süreçlerinden kaynaklanmaktadır. Güneş hücresinin verimi, ışığın hücreye geldiği açıya, havanın nem oranına, hücrenin kurulduğu coğrafi alana ve hücrenin alanı gibi birçok faktöre göre değişiklik gösterir. Bundan dolayı güneş spektrumu güneş hücrelerin karakterizasyonunda kullanılmaktadır [36,37].



Şekil 2.3: Kara cisim radyasyonu, AM0 ve AM1.5G için güneş spektrumu.

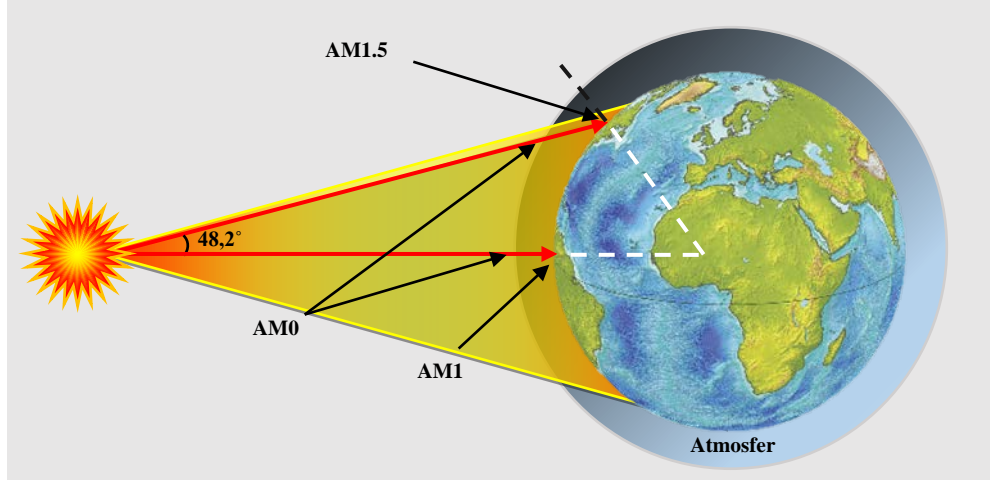
### 2.3 Hava Kütlesi (AM)

Güneş ışığının spektral dağılımını ve yoğunluğunu etkileyen güneş ve yüzey arasındaki hava kütlesi, atmosfer dışındaki ve yeryüzüne gelen farklı güneş spektrumlarına olanak sağlar. Hava kütle sabiti (AM), güneş hücrelerinin performanslarını değerlendirmede, güneşin geliş açısına bağlı olarak standart test şartlarında kullanılmak için tanımlanmıştır. Hava kütle sabiti,

$$AM = \frac{1}{\cos\theta} \quad (2.7)$$

eşitliği ile ifade edilir ve  $\theta$  güneşten gelen ışığın gelme açısıdır. Güneşten gelen ışınım,  $\theta$  açısına bağlı olarak, farklı AM değerleri ile tanımlanmıştır. Şekil 2.4'de atmosfer dışındaki ve yeryüzüne farklı açılarda gelen güneş radyasyonları gösterilmektedir. Yeryüzüne ulaşan radyasyon şiddetinin miktarı, Eşitlik (2.7)'den görüldüğü gibi  $\cos\theta$ 'ya bağlı olarak değişmektedir. Bundan dolayı yeryüzüne paralel olarak yerleştirilen güneş hücresi üzerine düşen radyasyon şiddeti, gün ve yıl içinde güneşin pozisyonuna göre değişiklik gösterir. Güneş hücreleri güneş ışınlarına doğru

yönlendirildiğinde, daha fazla güneş ışını soğuracağından, verim değerinde artış gözlenir.



Şekil 2.4: AM1.5, AM0 ve AM1 için hava kütle diyagramı.

AM0 güneş spektrumu, atmosfer dışına gelen ışınları temsil eder ve güneş değişmezi olarak tanımlanır. Radyasyon yoğunluğu,  $1353 \text{ W/m}^2$  olan bu spektrumun uydular ve uzay araçları gibi uzay boşluğunda kullanılmak için tasarlanan güneş hücrelerinin karakteristiklerini değerlendirmede referans alınır [38].

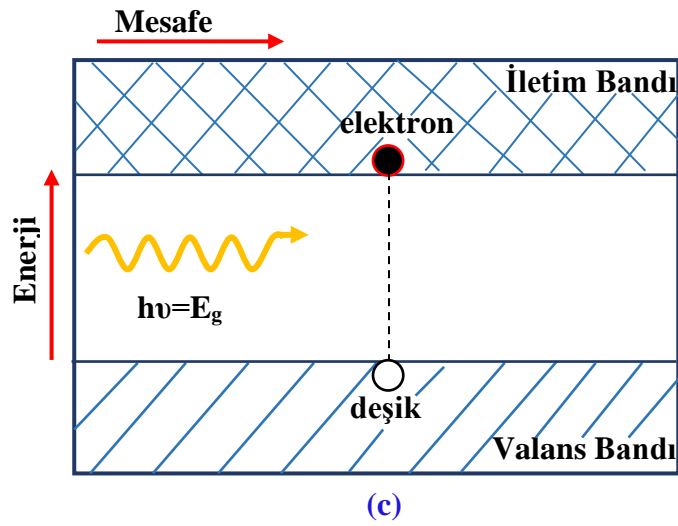
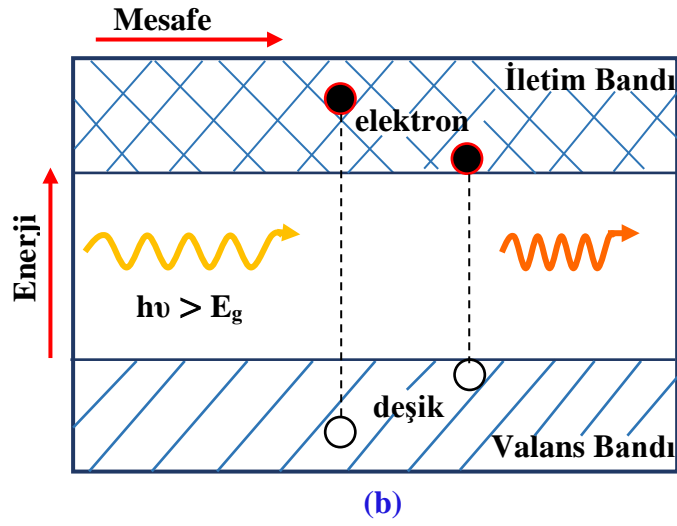
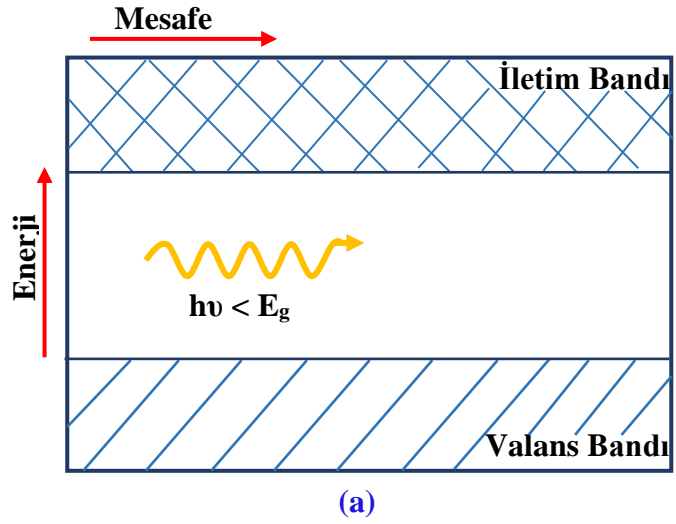
Güneş ışınları dik olarak dünya yüzeyine ulaştığında en kısa mesafeye sahip olurlar. Bu spektrum hava kütle katsayısı 1 (AM1) olarak tanımlanır ve radyasyon yoğunluğu  $925 \text{ W/m}^2$ 'dir [39].

AM1.5D ve AM1.5G güneş spektrumları yeryüzüne normale  $48,2^\circ$ 'lik açıyla gelen güneş ışınlarıdır. AM1.5D güneş spektrumu, doğrudan yani atmosferde saçılmadan dünya yüzeyine gelen ışınları temsil eder. Bu güneş spektrumunun radyasyon yoğunluğu  $900 \text{ W/m}^2$ 'dir [13]. AM1.5G spektrumu, doğrudan ve atmosferde saçıldıktan sonra dünya yüzeyine gelen güneş ışınlarını içerir. Bu spektrum karasal uygulamalarda kullanılan güneş hücrelerinin performans değerlendirmelerinde kullanılır ve radyasyon yoğunluğu  $1000 \text{ W/m}^2$ 'dir [13]. Yeryüzünde  $1 \text{ m}^2$ 'ye ulaşabilen  $1000 \text{ W}$ 'lık güneş radyasyon yoğunluğunun  $445 \text{ W}$ 'lık kısmı görünür bölgeye,  $527 \text{ W}$ 'lık kısmı kızılötesi bölgeye,  $23-30 \text{ W}$ 'lık kısmı ise morötesi bölgeye denk gelir. Bu dağılımdan da görüldüğü gibi güneş ışınlarından yeryüzüne ulaşabilen enerjinin büyük bir kısmı kızılötesi bölgesinden kaynaklanmaktadır.

## 2.4 Güneş Hücrelerinin Çalışma Prensibi

Güneş ışığı farklı enerjilere sahip olan fotonlardan meydana gelmektedir. Bu fotonların enerjisi, ışığın rengine yani dalgaboyuna bağlı olarak değişmektedir. Güneş hücresi üzerine ışık düşürüldüğünde, hücreyi oluşturan malzemenin yasak enerji aralığı, hücrenin fotovoltaiik özelliklerini belirlemektedir. Bir güneş hücresinin çalışması için güneş hücresini oluşturan yarıiletken malzemede elektron-deşik çifti oluşturulması gerekir. Yarıiletken malzeme üzerine güneş ışığı geldiğinde, değerlik bandında bulunan elektronlar, gelen fotonları soğurarak iletim bandına geçerler. Bu değerlik bandında elektronların yerine deşik meydana gelir. Bu süreçte, yarıiletken malzemede elektron-deşik çifti oluşur.

Yarıiletken malzemede elektron-deşik çifti oluşumunu, güneşten gelen fotonun enerjisi belirler. Malzemenin yasak enerji aralığından daha az enerjiye sahip olan fotonlar ( $h\nu < E_g$ ) elektron geçişi için yeterli enerjiye sahip olmadıklarından, güneş hücresi tarafından soğrulamazlar (Şekil 2.5(a)). Bundan dolayı, düşük enerjiye sahip bu fotonlar elektrik üretimine katkıda bulunamazlar [40,41]. Malzemenin yasak enerji aralığından daha büyük enerjiye sahip olan fotonlar ( $h\nu > E_g$ ) değerlik bandındaki elektronlara yeterli enerjiyi aktararak iletim bandına geçmesini sağlar ve güneş hücresinde elektron-deşik çifti oluşturur (Şekil 2.5(b)). Ancak, buradaki enerji farkı ( $h\nu - E_g$ ), yarıiletken malzemenin örgü titreşimlerini artırarak, ısı enerjisine dönüşür [42]. Bu durum güneş hücrelerinde termalizasyon kayıplarına yol açar. Bu yüzden, yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığına en yakın enerjiye sahip olan fotonlar güneş hücre performansına katkı sağlamaktadır (Şekil 2.5(c)).

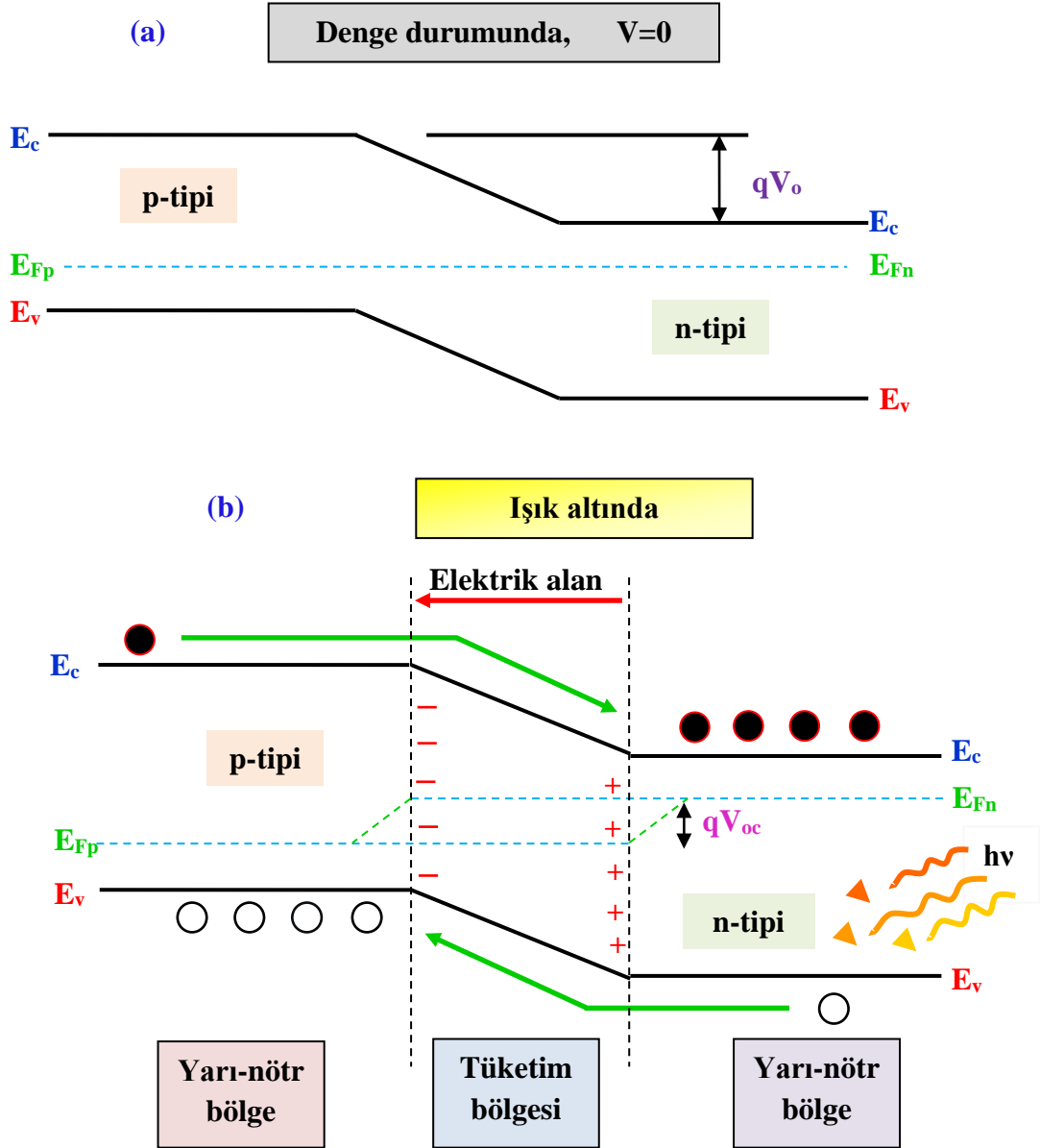


Şekil 2.5: Yarıiletkenlerin enerji bant diyagramı (a)  $h\nu < E_g$ , (b)  $h\nu > E_g$ , (c)  $h\nu = E_g$ .

Güneş hücreleri, güneşten gelen foton enerjisini, elektrik gücüne dönüştürebilen ve bir yüke iletebilen p-n tabanlı cihazlardır. Bundan dolayı, bir güneş hücresinin çalışma prensibi bir p-n eklemine dayanmaktadır. Güneş hücresi üzerine güneş ışığı geldiğinde, malzemenin yasak enerji aralığına eşit veya yakın enerjiye sahip olan fotonlar elektron-deşik çiftlerini oluşturur [43,44]. Bu taşıyıcılar, güneş hücresini oluşturan p-n eklemine tüketim bölgesinde oluşan elektrik alan sayesinde, bu bölgede toplanarak çoğunluk taşıyıcılar haline gelir. Bu taşıyıcılar, sürüklenme mekanizmasının taşıyıcı geçişlerinin baskın hale geldiği p-n eklemeye ulaşıncaya kadar tüketim bölgesine difüzyon ederler. p-tipi bölgede üretilen elektronlar n-tipi tarafa, n-tipi bölgede üretilen deşikler ise, p-tipi tarafa doğru hareket ederler. Taşıyıcıların bu şekilde hareket etmesi, Şekil 2.6'de görüldüğü gibi, termal dengedeki Fermi enerji seviyesinin ( $E_F$ ), azınlık elektron Fermi enerji seviyesine ( $E_{Fn}$ ) ve azınlık deşik Fermi enerji seviyesi ( $E_{Fp}$ ) olmak üzere ikiye ayrılmasına neden olmaktadır [39]. Fermi enerji seviyelerinin ayrılması  $E_{Fn}-E_{Fp}$  kadarlık bir enerji farkı oluşturur. Bu fark açık devre voltajı olarak tanımlanır ve  $V_{oc}=(E_{Fn}-E_{Fp})/q$  eşitliği ile ifade edilir [45].

Bir güneş hücresi ışığa maruz kaldığında, p-n eklemine tüketim bölgesinde oluşan konsantrasyon gradyenti nedeniyle, oluşan elektron-deşik çifti, çoğunluk taşıyıcıların konsantrasyonunda herhangi bir değişim oluşturmamaktadır. Ancak bu olay azınlık taşıyıcılarının konsantrasyonundaki artışa yol açar. Böylece difüzyon akım yoğunluğu baskın hale gelir. Üretilen azınlık taşıyıcılar, güneş hücresinde n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye akan akım yoğunluğunu ( $J_{ph}$ ) belirler [46]. n-tipi bölgeye tüm negatif yüklerin ve p-tipi bölgeye tüm pozitif yüklerin toplanması, güneş hücresinde ışık ile uyarılmış ileri beslenmeye sebep olur. Harici yüklerin bulunduğu bu ileri beslenme sonucunda, akım yoğunluğuna ters yönde bir akım yoğunluğu oluşur. Bu akım yoğunluğu, karanlık akım yoğunluğu olarak tanımlanır. Karanlık akım yoğunluğu, güneş hücresinin toplam akım yoğunluğuna ters yönde olmasından dolayı minimize edilmesi gerekir.





Şekil 2.6: Güneş hücresinin çalışmasını temsil eden bant diyagramı (a) denge durumunda, (b) ışık altında.

## 2.5 Çok Eklemli Güneş Hücreleri

### 2.5.1 Çok Eklemli Güneş Hücrelerin Gelişimi

Tek eklemli güneş hücresini oluşturan yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığından yüksek veya düşük enerjiye sahip fotonlar, foto-üretimde kayıplara neden olur [47]. Bu kayıplar, güneş hücrelerinde verim değerinin azalmasına sebep olmaktadır. William Shockley ve Hans Queisser tarafından, 1961 yılında, tek eklemli

güneş hücresinde teorik olarak hesaplanan en yüksek verim, Shockley-Queisser (SQ) sınırı olarak adlandırıldı. Tablo 2.1’de verildiği gibi, 1-güneş altında, tek eklemli güneş hücresinin verimi, %31’lik SQ teorik limiti ile sınırlıdır [48]. SQ sınırı belirlenirken yapılan yaklaşımlar [48,49]:

**i-)** Güneş hücre yapısı tek eklemli p-n eklem sahiptir yani tek tip yarıiletken malzemedan üretilmiştir.

**ii-)** Güneş hücresi üzerine gelen güneş ışınları yoğunlaştırılmamıştır (1-güneş=1000W/m<sup>2</sup>).

**iii-)** Güneş hücresini oluşturan yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığından büyük enerjiye sahip olan fotonların hepsi ısı enerjisine dönüştürülür.

Bu probleme en iyi çözüm, güneş radyasyon spektrumunu birkaç spektral bölgeye bölen çok eklemli hücrelerin geliştirilmesi ile sağlanmıştır [50].

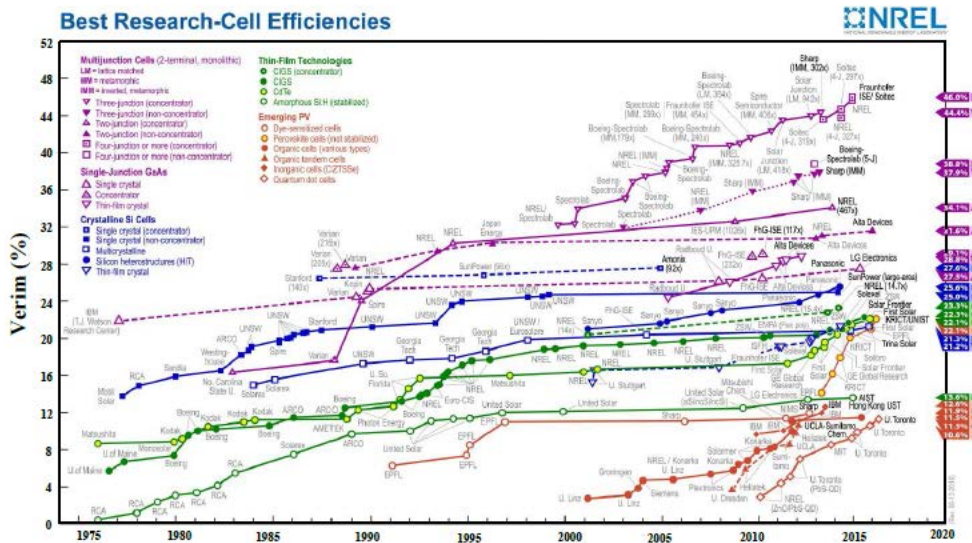
1970 yılında yaşanan enerji krizi, güneş enerjisi, alanında yapılan araştırma ve geliştirme çalışmalarına büyük ölçüde ivme kazandırmıştır. Çok eklemli güneş hücreleri için 1978 yılında Olsen ve arkadaşları tarafından yapılan ilk deneysel çalışmada, iki eklemli GaInP/GaAs güneş hücresinin verimi %14,00 olarak bulunmuştur [51]. Alexis tarafından yapılan çalışmada, Tablo 2.1’de görüldüğü gibi, sonsuz tabakadaki ve 46 300 konsantrasyon altındaki güneş hücresinin teorik maksimum verimi %86,8 olarak hesaplanmıştır [52,53]. Güneş hücre aygıtlarında yüksek verim değerinin elde edilebilmesi, yüksek kristal kalitesine sahip malzemelerin geliştirilmesi ile sağlanabilir [54].

**Tablo 2.1:** Farklı konsantrasyonlardaki güneş hücrelerin eklem sayısına göre maksimum teorik verimleri [52].

<b>Konsantrasyon Oranı (X)</b>	<b>Eklem Sayısı (n)</b>	<b>Maksimum Verim (%)</b>
<b>1</b>	1	31,0
	2	42,9
	3	49,3
	∞	68,2
<b>100</b>	1	35,2
	2	48,4
	3	55,6
	∞	76,2
<b>46 300</b>	1	40,8
	2	55,7
	3	63,9
	∞	86,8

Son yıllarda, hem uzay hem de karasal uygulamalarda kullanılan güneş hücrelerinin verimlerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu ilerlemeler, Birleşik devletlerde bulunan Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından, 1976'dan günümüze kadar, farklı güneş hücre yapılarının sahip olduğu en yüksek verim değerleri tek bir grafikte özetlenmiştir [55]. Günümüz fotovoltaik teknolojisinde, Şekil 2.7'de görüldüğü gibi, çok eklemlili III-V tabanlı güneş hücreleri, en yüksek verime sahiptir.

Karasal uygulamalar için, 508 güneş altında, iki eklemlili GaInP/GaAs güneş hücresinin verimi %46 olarak kayıtlara geçmiştir [56]. GaInP/GaAs/GaInAs/GaInAs güneş hücresinin AM1.5 güneş spektrumunda ve 234 güneş altında verimi %45,7 olarak kaydedilmiştir [56]. Üç eklemlili GaInP/GaAs/GaInAs güneş hücresinin AM1.5 güneş radyasyonunda ve 302 güneş altında verimi %44,4 bulunmuştur [56]. Bu verim değerlerini %50'nin üzerine çıkarmayı amaçlayan önemli araştırma ve geliştirmeler hızlı bir şekilde sürdürülmektedir [57].



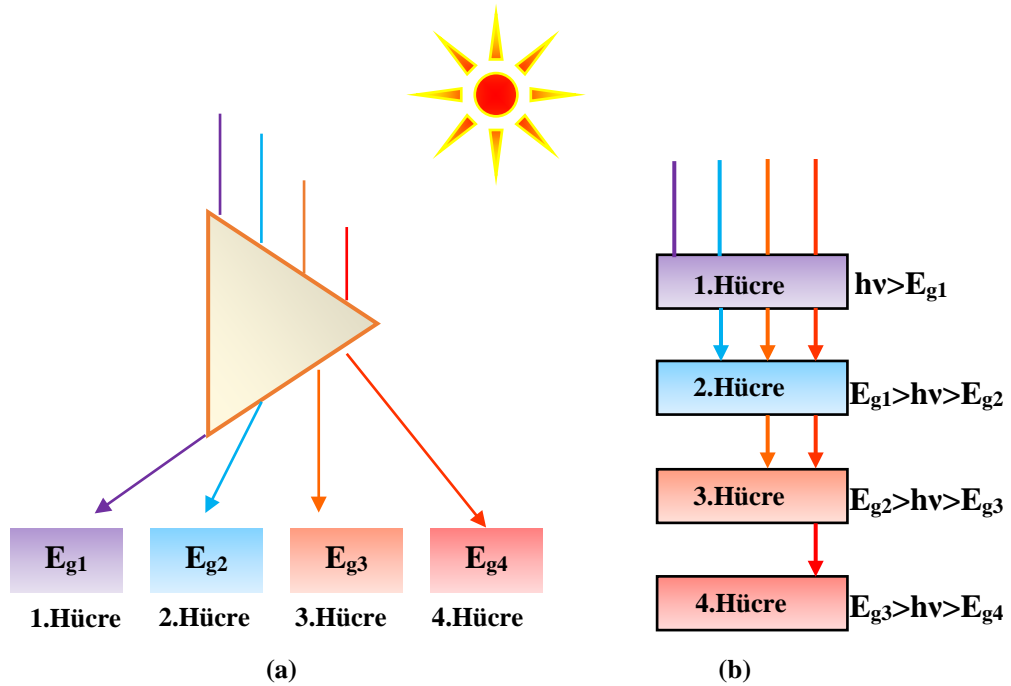
Şekil 2.7: Farklı türlerdeki güneş hücrelerinin verimlerinin karşılaştırılması [55].

## 2.5.2 Çok Eklemlili Güneş Hücre Yapısı

Çok eklemlili güneş hücreleri, güneş ışığını etkili bir şekilde toplamak için, her bir hücrede farklı yarıiletken malzemeye sahip, iki veya daha fazla p-n eklemi istiflenmesinden oluşur [54]. Bu güneş hücre yapısında kullanılan yarıiletken

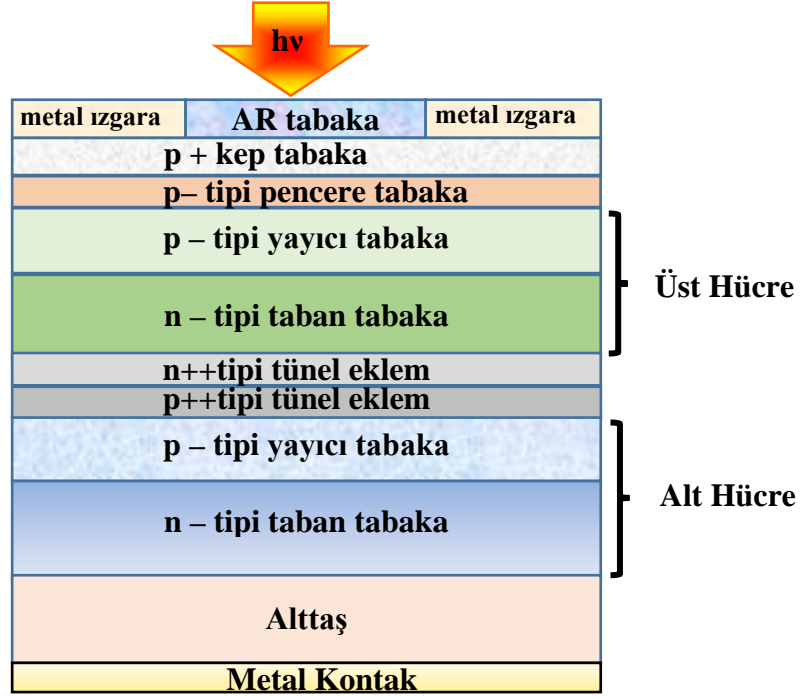
malzemenin yasak enerji aralıkları birbirlerinden farklı olduğundan güneş spektrumunun farklı bölgeleri soğurulur.

Çok eklemli güneş hücre tasarımının gelişmesinde öncelikli olarak, güneş spektrumunun yarılmaması, prizma gibi optik dağıtıcı bir donanım kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.8(a)). Etkin spektrum yarılmaması için geliştirilen hücre tasarımında ise hücreler birbirine optik, elektriksel ve mekanik olarak bağlıdır (Şekil 2.8(b)). Bu şekilde tasarlanan çok eklemli güneş hücrelerini oluşturan hücrelerin yasak enerji aralıkları güneş spektrumunu etkin şekilde kullanmak için üst hücreden alt hücreye doğru azalmaktadır. Böylece güneş hücresine gelen  $E_{g1}$  yasak enerji aralığından daha büyük ve eşit enerjiye sahip fotonlar 1. hücre tarafından soğurulur.  $E_{g1}$ 'den daha düşük enerjili ancak  $E_{g2}$ 'den daha büyük enerjili fotonlar ( $E_{g1} > h\nu > E_{g2}$ ) 2. hücre tarafından soğurulur. 3. hücre ise  $E_{g2}$ 'den daha düşük ancak  $E_{g3}$ 'den daha büyük enerjiye sahip fotonları ( $E_{g2} > h\nu > E_{g3}$ ) soğurur. Daha düşük enerjiye sahip fotonlar ise 4. hücre tarafından soğurulur.



Şekil 2.8: Çok eklemli güneş hücresinde spektrum yarılmaları

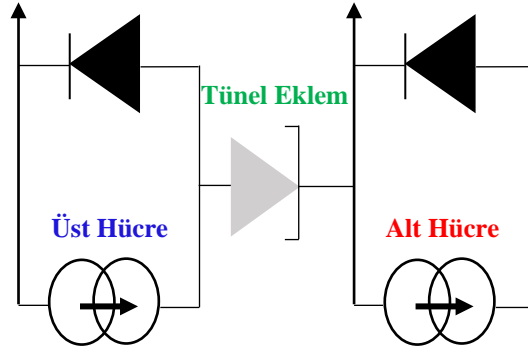
Güneş hücre yapısını incelemek için Şekil 2.7 'de görülen iki eklemli güneş hücre yapısını ele alalım. Bu güneş hücresi ön kontak, yansımaya önleyici (AR) tabaka, pencere tabaka, üst hücre, tünel eklem, alt hücre ve arka kontakten oluşmaktadır.



Şekil 2.9: Güneş hücre yapısı.

### (1) Tünel Eklem

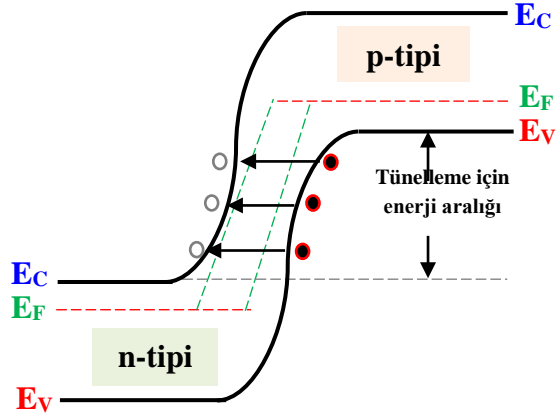
Güneş hücresinde, üst hücre ile alt hücre arasındaki iletimi sağlamak için yüksek katkılı bir tünel eklem yapısı büyütülür [58]. Bu tünel eklem temel işlevi, iki hücre arasında, optik olarak düşük kayıplı temas ve düşük elektriksel direnç oluşturmaktır [59]. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi, alt hücre  $n^{++}$ - $p^{++}$  ise, bu tünel eklem  $p^{++}$ - $n^{++}$  olacak şekilde tasarlanır. Böylece üst hücre ile alt hücre arasında ters bir p-n eklem oluşumu engellenir [60]. Bu durum üst hücrede üretilen foto-voltaja karşı, alt hücrede ters bir foto-voltaj üretilmesine engel olarak voltaj kayıplarını minimuma indirir [61]. Tünel eklem tasarımı güneş hücrelerinin performans değerlerini iyileştirmede önemli rol oynamaktadır.



Şekil 2.10: Güneş hücresinin eşdeğer devresi.

Tünel eklem, alt hücre tarafından soğrulan fotonlara karşı optik olarak geçirgen olması gerekir. Bundan dolayı tünel eklemde kullanılan yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığı, alt hücrenin yasak enerji aralığından büyük ve üst hücrenin yasak enerji aralığından küçük olmalıdır ( $E_{güst hücre} > E_{gTünel} > E_{gal hücre}$ ). III-V tabanlı güneş hücrelerinde, hücreler arası örgü uyumu ve düşük elektriksel direnç göz önüne alındığında, tünel eklem yapısında yaygın olarak kullanılan malzemeler arasında AlGaAs, GaInP ve GaAs bileşikleri yer alır [62]. Bu malzemelerden tasarlanan AlGaAs/GaAs ve AlGaAs/AlGaAs tünel eklem yapıları GaAs/GaAs ve AlGaAs/GaInP tünel eklem yapılarından güneş hücrelerinde iletim sağlaması açısından daha avantajlıdır [62,63].

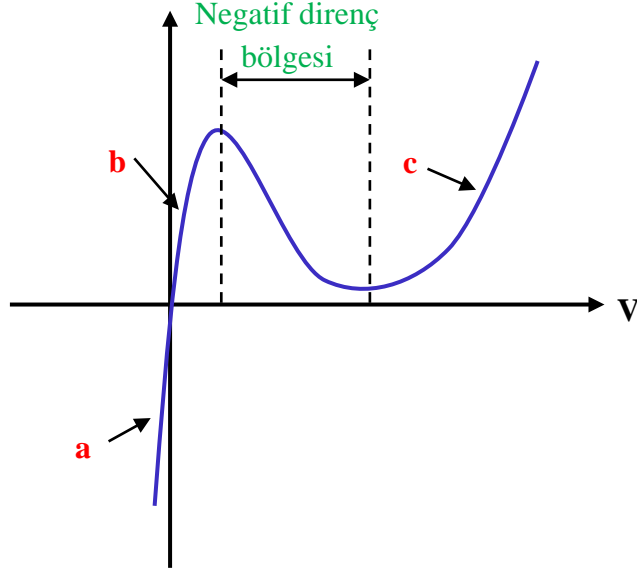
Tünel veya Esaki diyot olarak da adlandırılan tünel eklem, çalışma prensibi kuantum mekaniksel tünelleme olayına dayanır. Tünel eklem, yüksek katkı olacak şekilde tasarlanır ve üretilir. Yüksek katkılama işleminde, n-tipi için Si, Ge ve Sn ve p-tipi için ise, Zn, Be ve Mg gibi elementler kullanılır. Yüksek katkılama işlemi, tünel eklem yapısında ince bir bariyer oluşturularak, yaklaşık 10 nm kalınlığında, dar bir tüketim bölgesi oluşmasına neden olur. Yüksek katkı seviyesinden dolayı Fermi enerji seviyeleri p-tipi yarıiletkenin valans bandının ve n-tipi yarıiletkenin de iletkenlik bandının içine kadar genişler. Bu da, taşıyıcıların bariyeri aşmak yerine, bariyerin içinden tüketim bölgesinin diğer tarafına tünelleme yaparak geçmesini sağlar (Şekil 2.11).



Şekil 2.11: Tünel eklem bant yapısı.

Tünel diyota ters ve ileri besleme altında voltaj uygulandığında tünelleme akımı oluşur. İleri besleme durumunda uygulanan voltaj değeri artırılırsa tünelleme akımı maksimum değerine çıkar [46]. Ancak uygulanan voltaj değeri biraz daha artırılırsa, tünelleme akımı azalma eğilimi gösterir. Akım-voltaj eğrisinin bu bölgedeki eğimi negatif olduğundan diyot bu bölgede negatif direnç özelliği gösterir. (Şekil 2.12). Uygulanan voltaj değeri daha da artırılacak olunursa, tünel diyot artık tünelleme olayına göre değil, difüzyon olayına dayalı olarak çalışmaya başlar [64]. Yani tünel diyot, klasik p-n eklem bant yapısının çalışma mekanizmasını gösterir.

Tünel diyotun akım-voltaj grafiği Şekil 2.12’de görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi tünel diyota uygulanan voltaj değeri arttığında, akım değeri azalmaktadır. Bu durum diyot direncinin negatif olduğunu gösterir ve buna bağlı olarak da tünel diyot güç üretir [65]. Tünel diyotlar bu özelliklerinden dolayı hızlı anahtarlama ve osilatörlerde tercih edilmektedir.



Şekil 2.12: Tünel diyotun I-V karakteristiği (a) ters, (b) ileri, (c) daha büyük ileri besleme durumunda.

## **2-) Kontaklar**

Kontak noktaları, elektrik enerjisinin üretilmesi için bir yüke yönlendirilen çoğunluk ve azınlık taşıyıcıların akmasında görev yapar. Metal malzemeler düşük özdirence sahip olduklarından dolayı kontak malzemesi olarak tercih edilir. Güneş hücre yapısının ön ve arka yüzeylerinde olacak şekilde tasarlanan metal kontaklar omik özellik gösterir. Metal ile yarıiletken arasında yapılan ters ve ileri besleme altında akım ileten, düşük dirençli kontaklar omik kontak olarak adlandırılır. Bu tür kontaklarda, metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel engeli olmadığından, elektronlar kontak boyunca serbestçe akabilirler [65].

Güneş hücresinin ön yüzeyine oluşturulan omik kontakın işlevi, gelen güneş ışınının geçişini sağlamak ve ışığı soğurmaktır. Güneş hücresi üzerinde oluşabilecek gölgelenmeyi minimuma indirmek ve rekombinasyonu önlemek için kontaklar, hücrenin ön yüzeyine ince metal ızgara şeklinde kaplanır. Bu kontak hücre yüzeyinin yaklaşık %10'unu oluşturur. Böylece gelen güneş ışığının hücre içine maksimum girmesi sağlanarak, daha fazla foton soğrulmasına neden olur. Bu durum güneş hücresinin maksimum foto-akım üretmesine olanak sağlar.

Güneş hücresinin arka kısmına yapılan omik kontak, rekombinasyonu önlemek için yüzeye tamamen kaplanır. Bu kontaklar elektron-deşik çifti oluşturmadan geçen güneş ışığını, hücreye geri döndürmek için yansıtıcı bir yüzey olarak



kullanılmaktadır. Bu omik kontağın yansıtıcı bir yüzey olarak görev yapabilmesi için kantağa parlatma işlemleri uygulanır. Bu işlem sırasında elektron ve deşikler rekombinasyona uğrarlarsa üretilen foto-akım azalacağından güneş hücre performansında azalış meydana gelir. Bundan dolayı bu işlem çok dikkatli yapılması gerekir.

### **3-) Yansıma önleyici kaplama (AR)**

Güneş hücrelerinde kullanılan yarıiletken malzemeler yüksek kırılma indislerine sahiptir. Bu durum hücreye gelen güneş ışınlarının büyük bir kısmının yansımaya yani yansıma kayıplarına neden olmaktadır. Bu kayıpları minimuma indirmek için yansıma önleyici (AR) kaplama, güneş hücresinin üst kısmındaki metal ızgara kontakları arasına kaplanır [66]. Böylece güneş hücresi üzerine gelen güneş ışığını daha fazla soğurarak hücrenin ürettiği foto-üretimi artırır. Bu durum güneş hücre performansını iyileştirilmesine neden olur.

AR, tek katmanlı ya da iki katmanlı olarak kaplanabilir. AR kaplamada, yüksek şeffaflık ve geniş optik bant aralığı gibi optik özelliklere sahip malzemeler tercih edilmektedir [67]. Tek katmanlı kaplamada,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , iki katmanlı kaplamada ise,  $\text{MgF}_2/\text{ZnS}$ ,  $\text{MgF}_2/\text{TiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  dielektrik malzemeleri yaygın olarak kullanılır [67-69]. Tek katmanlı kaplamalar belirli bir dalgaboyunda düşük yansıtma özelliğine sahip oldukları için Si gibi tek eklemler güneş hücrelerinde kullanılır. İki katmanlı kaplamalar geniş dalgaboyunlarında düşük yansıtma özelliğine sahip olduklarından çok eklemler güneş hücrelerinde tercih edilir.

### **4-) Pencere Tabaka**

Güneş hücresinde yüksek rekombinasyon hızı, güneş spektrumunun mavi bölümünde bulunan güneş hücresinin foto-tepkisini azaltır. Bundan dolayı rekombinasyon hızını düşürmek için üst hücrenin üzerine pencere tabaka tasarlanır. Pencere tabaka, güneş hücresi üzerine gelen, güneş ışığının hücre içerisine maksimum girmesini sağladığından kalınlığı çok ince olarak tasarlanır. Bu tabakanın görevi, ön kontak bölgesine gelen azınlık taşıyıcıları yansıtmaktır [70]. Tasarlanan pencere tabakada malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken noktalar şunlardır [15,70]:

#### **1-) Güneş hücresini oluşturan yarıiletken malzemeler ile örgü uyumlu**

2-) Yasak enerji aralığı üst hücredeki malzemenin yasak enerji aralığından büyük

3-) Yüksek katkı konsantrasyona sahip

4-) Düşük ara yüzey rekombinasyon hızı üretmek için iyi malzeme kalitesine sahip

olmalıdır. Pencere tabakada bu özelliklere sahip olan bir yarıiletken kullanılması maksimum güneş radyasyonunun güneş hücresinin içine girmesine olanak sağlar. III-V tabanlı güneş hücre yapılarında pencere tabakasında GaInP, AlGaAs ve AlInP yarıiletken malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır [71].

### **5-) Kep Tabaka**

Pencere tabaka üzerine yüksek katkılı bir kep tabaka tasarlanır. Bu tabakanın görevi, pencere tabakasını üst kontağın kaplanması sırasında oluşabilecek etkilere karşı korumak ve kontağın omik özellik göstermesine katkıda bulunmasıdır. GaAs yarıiletken malzemesi, teknolojik açıdan III-V grubu ikili ve üçlü bileşik yarıiletken malzemelerin çoğu ile örgü uyumlu olduğundan kep tabaka malzemesi olarak genellikle tercih edilmektedir.

### **2.5.3 Çok Eklemlenmiş Güneş Hücrelerinin Optimizasyonu**

Yüksek verimli güneş hücrelerinin tasarımı ve geliştirilmesi çok önemli bir konudur. Güneş hücrelerinin tasarımı ve üretimi esnasında meydana gelen kayıplar, hücre performansının düşmesine neden olmaktadır. Bu kayıplar temel ve teknolojik kayıplar olmak üzere ikiye ayrılır. Temel kayıplar, iletim, termalizasyon ve voltaj gibi kayıplardır. Bu kayıplar temel limitlerin üstünde engellenemez ve minimize edilemezler [72]. Teknolojik kayıplar, optik ve elektriksel kayıplardır. Optik kayıplar, gelen güneş ışığının yansımaya ve gölgelendirmeye neden olmasından dolayı, elektron-deşik çifti üretilmesini engelleyen foton kayıplarıdır [73]. Elektriksel kayıplar, güneş hücresi tarafından soğrulan ancak rekombinasyon ve omik kayıplardan dolayı oluşan foton kayıplarıdır. Bu kayıplar, güneş hücresinin çıkış parametrelerinin düşmesine neden olurlar.

Bu kayıpları en aza indirmek için çok eklemli güneş hücre tasarımında üst ve alt hücreleri oluşturan yarıiletken malzeme seçiminde dikkat edilmesi gereken birkaç nokta vardır. İlk olarak hücreleri oluşturan yarıiletken malzemeler uygun yasak enerji aralığına sahip olmalıdır. İkinci olarak hücreler arasında örgü uyumu sağlanmalıdır. Üçüncü olarak da hücreler arasında akım uyumu olmalıdır. Malzeme seçimi yapıldıktan sonra, hücrelerin uygun kalınlıklarının belirlenmesi de güneş hücresinin performansını etkileyen önemli bir faktördür. Güneş hücre tasarımında bu şartların sağlanması, yüksek kaliteli güneş hücrelerin üretimine olanak sağlar.

### **2.5.3.1 Yasak Enerji Aralığı**

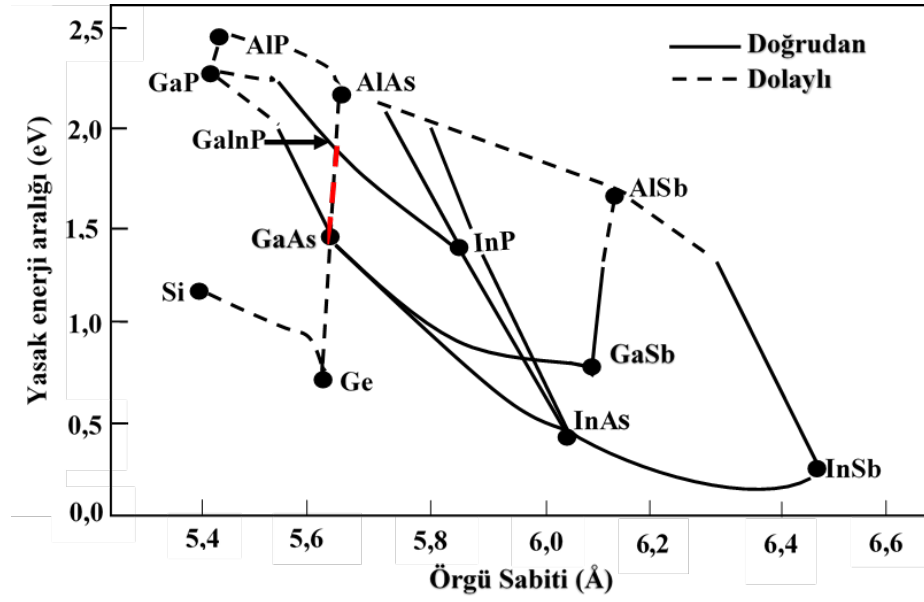
Güneş spektrumunun hangi bölgesindeki fotonların soğrulacağı, güneş hücresinde kullanılan malzemenin yasak enerji aralığına bağlıdır. Yüksek yasak enerji aralığına sahip malzemeler güneş hücrelerinde kullanıldıklarında, yüksek enerjili fotonları soğurur. Bundan dolayı, uygulanan voltaj değeri büyük iken, ürettikleri foto-akım değeri küçüktür. Bunun tersi olarak düşük yasak enerji aralıklı malzemeler düşük enerjili fotonları soğurmasından dolayı, uygulanan voltaj değeri düşerken, foto-akım değeri artar. Bu sebeple çok eklemli güneş hücrelerinin tasarımında, hücreleri oluşturan yarıiletken malzemelerin seçimi önemlidir [74,75].

Yasak enerji aralığı yarıiletken malzemenin elektriksel ve optik özelliklerini belirleyen önemli bir parametredir. III-V tabanlı bileşik yarıiletken malzemelerin yasak enerji aralıkları uygun değerlere ayarlanabilmesinden dolayı, çok eklemli güneş hücre tasarımlarında tercih edilmektedir. Bunlar arasında GaAs, InP, GaInAs, GaInP ve AlGaAs karasal ve uzay uygulamaları için tasarlanan güneş hücre yapılarında yaygın olarak kullanılan malzemelerdir [76,77]. Çok eklemli güneş hücrelerinde, üst hücre ile alt hücrede uygun yasak enerji aralıklı malzemelerin seçimi, güneş radyasyonunun etkin bir şekilde kullanılmasına olanak sağladığından, güneş hücrelerindeki verim kayıpları minimuma indirgenir.

### 2.5.3.2 Örgü Uyumu

Çok eklemlı güneş hücreleri aynı alttaş üzerine monolitik olarak büyütüldükleri için hücreler arasında örgü uyumu olmalıdır. Örgü sabiti, malzemedeki atomlar arasındaki uzaklığı gösterir. İki yarıiletken malzemenin örgü sabitleri birbirine yakın değerlerde ise bu malzemeler arasında örgü uyumu vardır. Bunun tam tersi olarak da, malzemelerin örgü sabitleri arasında büyük bir fark varsa bu durum örgü uyumsuzluğuna yol açar. Bu uyumsuzluk dislokasyon kusurlarına neden olduğundan foto-üretimde katkıda bulunan azınlık taşıyıcıların kayıplarına sebep olur [78]. Dislokasyon kusurları, güneş hücresinin performans değerini belirleyen, kısa devre akım yoğunluğunun ( $J_{sc}$ ), açık devre voltajının ( $V_{oc}$ ) ve dolum faktörünün (FF) azalmasına neden olur [79]. Bu durum, güneş hücresinin verim değerini düşürerek kalitesini bozar.

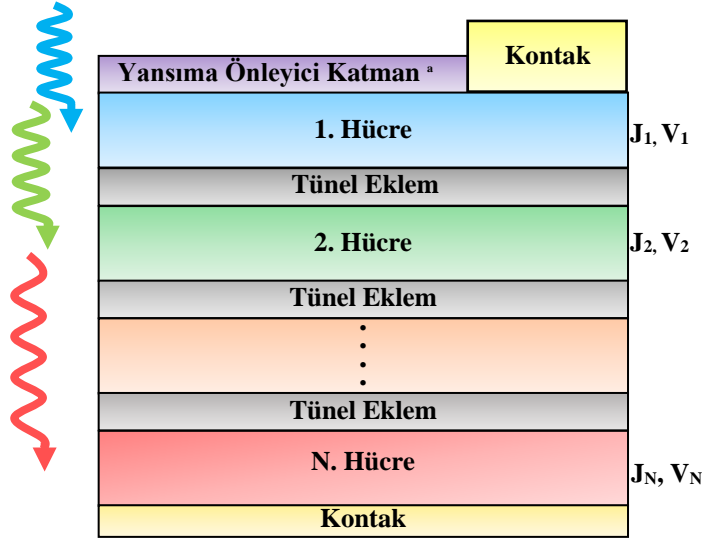
Yüksek kalitede çok eklemlı güneş hücresi tasarlanması ve büyütülmesi için, hücreler arasında örgü uyumu olmalıdır. Şekil 2.13'de III-V tabanlı güneş hücrelerinde kullanılan çeşitli yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı ile örgü sabiti arasındaki ilişkiyi göstermektedir. InP, AlAs, InAs, GaAs ve GaP örgü sabitleri birbirine yakın değerlerdedir. Bu yarıiletken malzemeler ile  $Ga_xIn_{1-x}P$  ve  $Al_xGa_{1-x}As$  gibi üçlü bileşikler oluşturulduğunda, daha geniş yasak enerji aralığına sahip yarıiletken bileşikler elde edilir. Yarıiletkenlerin bu şekilde bileşik oluşturulabilmesi, yüksek performanslı optoelektronik aygıtların temelini oluşturan çoklu yapıların geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. GaInP (~5,686Å) ve GaAs (5,65Å) yarıiletken malzemelerin örgü sabitleri birbirine yakın değer olduklarından, örgü uyumlu yüksek kristal kalitesine sahip iki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücre yapısı tasarlamak ve üretmek mümkündür.



Şekil 2.13: Yarıiletkenlerin yasak enerji aralığına karşı örgü sabiti diyagramı [45].

### 2.5.3.3 Akım Uyumu

Güneş hücrelerinin tasarımda uygun malzeme seçiminden sonra, dikkat edilmesi gereken diğer önemli bir husus ise, hücreler arasındaki akım uyumudur. Çok eklemlili güneş hücrelerinde çıkış voltajını artırmak için hücreler arasında seri bağlama tercih edilmektedir. Seri bağlama doğası gereği, Kirchoff yasasına uymaktadır [60]. Bu yasa, üst hücreye giren akım yoğunluğu ile alt hücrelerden çıkan akım yoğunluğunun eşit olduğunu ve voltaj değerlerinin lineer olarak toplandığını belirtir. Bu da, güneş hücrelerinde akım yoğunluğunun, Şekil 2.14’de görüldüğü gibi hücrelerde üretilen akım yoğunluklarının en küçüğü ile sınırlandırıldığı anlamına gelir [80,81]. Bundan dolayı akım kayıplarını en aza indirmek için, üst hücre ile alt hücrelerin akım yoğunluklarının eşit ya da yaklaşık eşit olması beklenir [82].



$$J = \min (J_1, J_2, \dots, J_N)$$

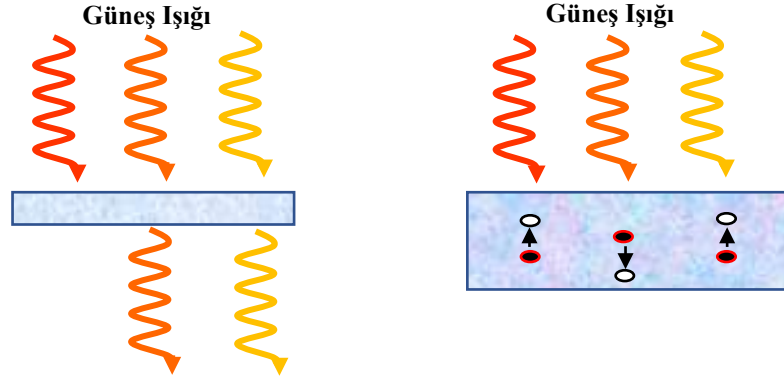
$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_N$$

**Şekil 2.14:** N tane hücreye sahip olan çok eklemli güneş hücresinin şematik yapısı.

Çok eklemli güneş hücrelerinde, hücreler arası akım yoğunluklarındaki fark, ısı kaybı olarak açığa çıkar [83]. Bu ısı kaybı güneş hücre performansı değerlerinin düşmesine neden olur. Sonuç olarak, çok eklemli güneş hücresinde, hücreler arasındaki akım uyumu kritik öneme sahiptir. Çok eklemli güneş hücrelerinde hücreler arasında aynı akım yoğunluğunun elde edilebilmesi için, her bir hücrenin güneş spektrumundan aynı oranda ışığı emmesi gerekir. Bu şart, güneş hücre yapısında kullanılacak yarıiletken malzemeye, üst ve alt hücre kalınlıklarına bağlı olarak sağlanabilir [2,84].

#### 2.5.3.4 Kalınlık Optimizasyonu

Gelen güneş ışığından verimli olarak yararlanmak için, üst hücre ile alt hücreler arasında kalınlık uyumu önemlidir. Hücre kalınlığı daha ince olursa, gelen ışığın küçük bir kısmı soğrulurken, büyük bir kısmı soğrulmadan geçip gider, hücre kalınlığı daha kalın olursa, güneşten soğrulan fotonların büyük bir kısmı rekombinasyona uğrar (Şekil 2.15). Bu iki faktör, güneş hücresinde üretilen elektrik enerjisinin kayıplara uğramasına neden olur. Bu nedenle, hücre kalınlıkları verimin maksimum olması için optimize edilmelidir.



Şekil 2.15: Güneş hüccresine gelen güneş ışığının kalınlığa göre soğurulması.

Güneş hüccresinin kalınlık optimizasyonu yapılırken hüccelerde kullanılacak yarıiletken malzemenin güneş spektrumundaki hangi fotonları soğuracağını belirleyecek olan, soğurma katsayısı da dikkate alınmalıdır. Malzemenin soğurma katsayısı büyükse, güneşten gelen fotonlar malzeme içerisinde kısa bir mesafede soğrulurken, soğurma katsayısı küçükse, fotonlar malzeme içinde daha uzun mesafelerde soğrulur. Bundan dolayı yüksek kaliteli güneş hüccelerinde üst ve alt hücre kalınlıklarının belirlenmesi çok önemli bir konudur.

Çok eklemli güneş hüccesinde üst hüccede yasak enerji aralığı büyük (dalga boyu küçük) olan malzeme olduğu için bu malzemenin soğurma katsayısı büyüktür. Burada soğrulmayan fotonların alt hüccelere geçebilmesi için kalınlığı ince olmalıdır. Alt hüccelerde, yasak enerji aralığı küçük (dalga boyu büyük) olan malzemeler kullanıldığı için bu malzemelerin soğurma katsayısı küçüktür. Hüccede üretilen elektron-deşik çiftinin rekombinasyona uğramaması için yani foto-akıma katkıda bulunabilmesi için hücre kalınlığı daha kalın olmalıdır.

## 2.6 İki Eklemli GaInP/GaAs Güneş Hücceleri

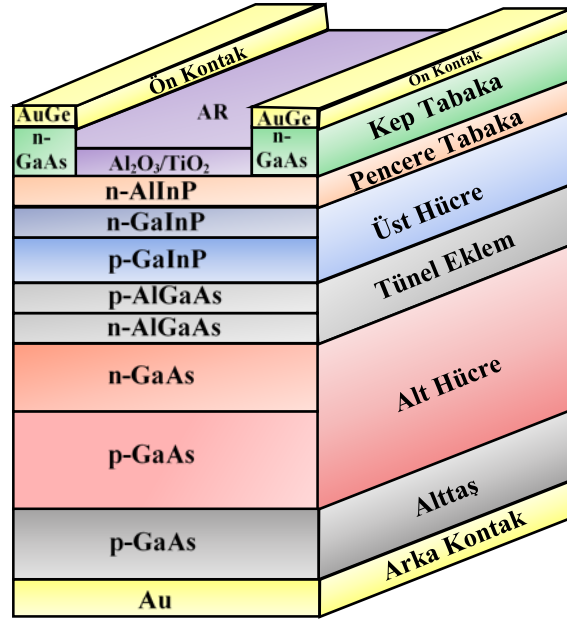
İki eklemli güneş hücceleri üst hücre ve alt hücre olarak iki eklemde meydana gelmektedir. Bu iki eklemde elektrik iletimi p-n eklem biribirine yüksek katkılı  $p^+-n^+$  tünel eklem ile bağlanmasıyla sağlanır. İki eklemli güneş hüccesinde üst hücre güneş spektrumunun mavi bölgesindeki fotonları soğururken, alt hücre ise üst hücre tarafından soğrulmayan fotonları, yani spektrumun kırmızı bölgesini soğurur [85]. İki eklemli güneş hüccelerinde maksimum verim sağlanması için yüksek elektronik

kaliteye sahip ve örgü uyumlu GaInP ve GaAs malzemeler yaygın olarak tercih edilmektedir [85]. İki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücreleri, Olson ve arkadaşları tarafından 1985 yılında tasarlandı [85]. O zamandan beri, bu tür hücrelerin, özellikle AlGaAs gibi diğere üçlü bileşiklerle karşılaştırıldığında, GaInP bileşiğı yüksek elektronik kalitesinin elde edilebilme kolaylığı nedeniyle yüksek verim elde etmek için başarılı bir yaklaşım olduğı kanıtlanmıştır [86-88].

GaInP yarıiletken bileşiğı, yüksek yasak enerji aralığına sahip olabilmesi ve GaAs ve Ge yarıiletkenleri ile örgü uyumlu olduğundan çok eklemlı güneş hücrelerinin üst hücresinde kullanılmaktadır [59]. Güneş hücresinde GaInP yarıiletken malzeme üst hücre olarak kullanıldığında, uygun yasak enerji aralığı sayesinde, güneş spektrumunun mor ötesi ve görünür bölgesindeki fotonları soğurur [89]. Bu durum çok eklemlı güneş hücrelerinin performans değerlerinin iyileştirilmesine imkân sağlar.

İki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücre yapısı Şekil 2.16'da görölmektedir. Bu iki eklemlı güneş hücresinin kısa devre akımının maksimum bir değere olması için GaInP üst hücrenin uygun bir kalınlığa optimize edilmesi gerekir [86]. Böylece, üst hücrede güneş spektrumundan minimum bir soğurma elde edilerek, alt hücreye foto-akım üretmek için fotonların yeterli bir kısmı geçer. Bu durumda, üst hücre ile alt hücre arasında akım uyum koşulu sağlanmış olur. Üst hücredeki örgü uyumlu GaInP malzemesi için ayarlanabilen yasak enerji aralığı, güneş hücresinin verimini etkilemektedir. GaInP malzemenin yasak enerji aralığının azalması, akım yoğunluğunu artırır, ancak taşıyıcılar daha düşük bir voltajda toplanır [90]. Bu durumda güneş hücresinin veriminin azalmasına neden olur. İki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücrelerinde maksimum verim elde etmek için, GaInP yarıiletken malzemesinin yasak enerji aralığının 1,86 ile 1,91 eV arasında olması istenir [91].





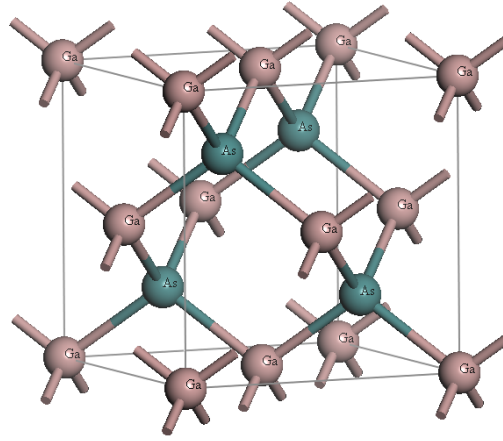
Şekil 2.16: İki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücre yapısı.

Literatürde, karasal uygulamalarda kullanılmak için AM1.5G güneş radyasyonunda bir güneş altında veya konsantrasyon altında ve uzay uygulamaları için ise AM0 güneş radyasyonu altında, güneş hücrelerin verimlerini artırmaya yönelik teorik ve deneysel bir çok çalışma yer almaktadır. Bertness ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada iki eklemlı Ga<sub>0.52</sub>In<sub>0.48</sub>P/GaAs güneş hücresinde verim AM1.5G ve AM0 güneş radyasyonlarında sırasıyla, %27,3 ve %25,7 olarak bulunmuştur [84]. Shao ve arkadaşlarının yapmış olduğu teorik çalışmada iki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücresinin verimini %33,3 olarak hesaplanmıştır [92]. Kayes ve arkadaşları tarafından geliştirilen iki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücresinin verimi 1-güneş ve AM1.5G spektrumu altında %30,8 olarak bulunmuştur [93]. Bu çalışma, günümüze kadar yapılan iki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücreleri içinde, 1-güneş ve AM1.5G güneş spektrumu altında en yüksek verim olarak kaydedilmiştir [56]. Uzay ve karasal uygulamalarda kullanılan güneş hücrelerinin performans değerlerini artırmaya yönelik deneysel ve teorik çalışmalar devam etmektedir [94,95].

## 2.7 GaInP ve GaAs Yarıiletkenlerin Malzeme Parametreleri

### 2.7.1 GaAs yarıiletken malzemenin özellikleri

GaAs yarıiletken malzeme, çinko sülfür (ZnS) kristal yapısına sahiptir. ZnS yapısının kristal yapısı elmas yapıya benzerdir (Şekil 2.17). ZnS kristal yapısı iki farklı atomdan oluşurken, elmas yapı tek tip atomdan meydana gelir. Elmas yapıda atomlar birbiriyle kovalent bağ oluştururlar. Bu yapı Bravais örgüsü (0,0,0) ve (1/4,1/4,1/4) örgü noktalarında birer atom bulunan iç içe geçmiş iki yüzey merkezli kübik (fcc) yapıya sahiptir [96].



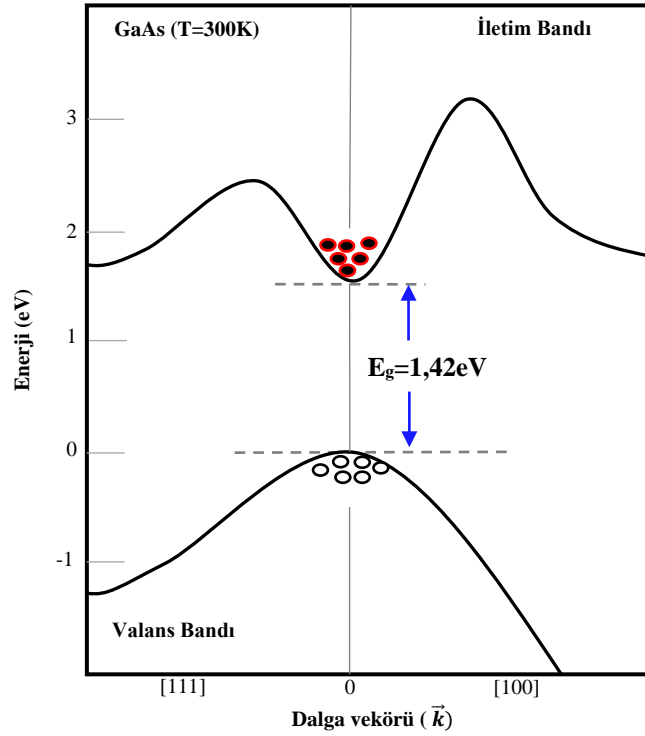
Şekil 2.17: GaAs bileşiğinin kristal yapısı

GaAs yarıiletken malzemenin oda sıcaklığındaki (300 K) bazı fiziksel parametreleri Tablo 2.2’de verildi.

**Tablo 2.2:** GaAs’ın 300 K’deki temel parametreleri [65,96].

Özellik	Parametre
Kristal Yapısı	Çinko Sülfür
Simetri grubu	$T_d^2$ -F43m
1 cm <sup>3</sup> ’deki atom sayısı	$4,42 \times 10^{22}$
Yoğunluk	5,32 g/cm <sup>3</sup>
Örgü Parametresi	5,65 Å
Elektron İlgisi	4,07 eV
Dielektrik Sabiti (yüksek frekans)	10,89
Dielektrik Sabiti (statik)	12,9

GaAs iletkenlik bandındaki minimum enerji ile valans bandındaki maksimum enerjinin aynı  $k$  değerinde ( $k=0$ ) oluşan doğrudan yasak enerji aralıklı bir yarıiletkendir. Bu tür yarıiletkenlerde iletkenlik bandındaki bir elektron momentum korunumu kanuna uyararak, valans bandına geçebilir. GaAs yarıiletkenin band yapısı Şekil 2.18’de verildi.



Şekil 2.18: GaAs bant yapısı.

GaAs, fotovoltaik teknolojisinde yaygın olarak kullanılan III-V grubu yarıiletken malzemedir. GaAs malzeme 3 özelliğinden dolayı güneş hücre yapılarında tercih edilmektedir [97]:

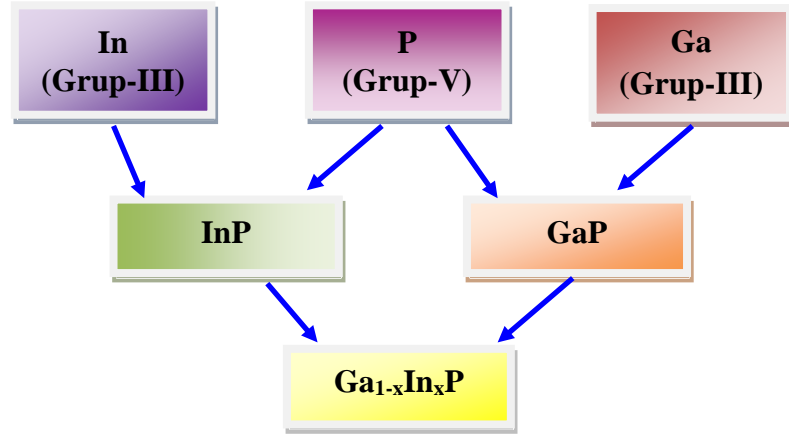
1-) GaAs oda sıcaklığında 1,42 eV yasak enerji aralığına sahiptir. Bu da GaAs tabanlı güneş hücrelerinin güneş spektrumunun yakın kızılötesi bölgesini etkili bir şekilde soğurmasına imkân sağlar.

2-) GaAs tabanlı güneş hücreleri Si tabanlı güneş hücrelerine göre daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilir.

3-) GaAs, güneş hücrelerinde yüksek radyasyon direnci sağlar.

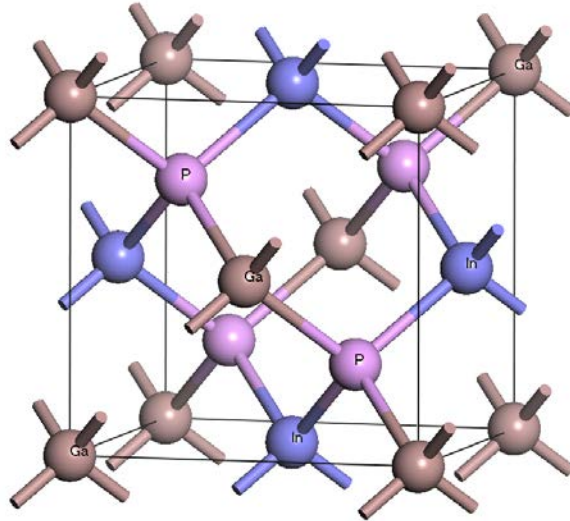
## 2.7.2 GaInP Yarıiletken malzemenin özellikleri

GaInP bileşiği, nitrat içermeyen III-V tabanlı yarıiletkenler arasında en büyük doğrudan yasak enerji aralığına sahip üçlü alaşımlardan biridir [98]. Bu alaşım çeşitli optoelektronik ve elektronik cihazlar için yaygın olarak kullanılmaktadır. GaInP bileşiği GaP ve InP yarıiletken bileşiklerinden meydana gelir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19: GaInP yarıiletken bileşiği.

Şekil 2.18’de görüldüğü gibi GaInP bileşiğinin kristal yapısı, çinko sülfür yapıya sahiptir. GaInP yarıiletken malzemenin oda sıcaklığındaki (300 K) bazı temel parametreleri Tablo 2.3’de verildi.



Şekil 2.20: GaInP bileşiğinin kristal yapısı.

**Tablo 2.3:** GaInP'nin 300 K'deki temel parametreleri [90,99].

Özellik	Parametre	
	Ga <sub>x</sub> In <sub>1-x</sub> P	Ga <sub>0,54</sub> In <sub>0,46</sub> P
Kristal Yapısı	Çinko Sülfür	Çinko Sülfür
Simetri grubu	T <sub>d</sub> <sup>2</sup> -F43m	T <sub>d</sub> <sup>2</sup> -F43m
cm <sup>3</sup> 'deki atom sayısı	(3,96+0,98x)10 <sup>22</sup>	4,48 10 <sup>22</sup>
Yoğunluk	(4,81-0,67x) g/cm <sup>3</sup>	4,44 g/cm <sup>3</sup>
Örgü Parametresi	(5,8687-0,418x) Å	5,642 Å
Elektron ilgisi	(4,38-0,58x) eV	4,06 eV
Dielektrik Sabiti (yüksek frekans)	(9,61-0,5x)	9,34
Dielektrik Sabiti (statik)	(12,5-1,4x)	11,74

Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>P üçlü bileşik yarıiletkeninde x alaşım oranının değiştirilmesi, yasak enerji aralığının ve örgü parametrelerinin ayarlanabilmesine olanak sağlar. Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>P üçlü bileşiğin x alaşım oranına bağlı örgü sabiti Vegard yasası olarak bilinen,

$$a_{\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}} = xa_{\text{GaP}} + (1-x)a_{\text{InP}} \quad (2.8)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikteki  $a_{\text{GaP}}$  ve  $a_{\text{InP}}$  sırasıyla, GaP ve InP yarıiletken bileşiklerin örgü sabitleridir.

Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>P bileşiğinin x alaşım oranına bağlı yasak enerji aralığında

$$E_g(x) = xE_g(\text{GaP}) + (1-x)E_g(\text{InP}) + bx(1-x) \quad (2.9)$$

şeklinde aynı yasa ile ifade edilir. Eşitlikteki  $E_g(\text{GaP})$  ve  $E_g(\text{InP})$  sırasıyla, GaP ve InP'nin yasak enerji aralıkları, b ise, Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>P bileşiğinin yasak enerji aralığının x alaşım oranına göre eğrilik (bowing) parametresidir [65].

### 3. GÜNEŞ HÜCRE TASARIMI

#### 3.1 Analitik Güneş Hücre Modeli

Analitik güneş hücre modeli, güneş hücresine gelen güneş spektrumunun dalgaboyu değerlerinden yararlanarak, güneş hücresinin elektriksel parametrelerinin hesaplanmasında kullanılır. Bu model, hem azınlık hem de çoğunluk taşıyıcılar için süreklilik ve akım denklemlerini ve Poisson denklemini içeren beş diferansiyel denklem kümesinin çözümünü içermektedir [49]. Bu çözüm güneş hücresinin teorik olarak, kısa devre akım yoğunluğunun ( $J_{sc}$ ), karanlık akım yoğunluğunun ( $J_d$ ), doyum akım yoğunluğunun ( $J_0$ ), açık devre voltajının ( $V_{oc}$ ), dolun faktörünün (FF) ve tüketim veriminin ( $\eta$ ) hesaplanmasında kullanılır. Böylece modellenen güneş hücrelerinin kalitesi hakkında bilgi edinilir. Tasarlanan bu güneş hücreleri üretimi yapılacak olan güneş hücrelerinin verim değerlerinin iyileştirilmesi için yol gösterici olur.

Güneş hücreleri yarıiletken p-n eklem tabanlı aygıtlar olduğundan, hücre tasarımında yarıiletken malzemenin özellikleri, hücre performansını etkileyen parametrelerdir. Bu parametrelerin en önemlileri arasında,

- 1-) Yarıiletkenin yavaş enerji aralığına bağlı olan soğurma katsayısı,
- 2-) Yüzeyin şekline ve yansıma önleyici kaplamaya bağlı olan yarıiletken yansıtma katsayısı,
- 3-) Serbest taşıyıcıların eklemeye doğru hareket etmesini kontrol eden sürüklenme difüzyon parametreleri (taşıyıcı mobilitesi ve yarı ömrü)
- 4-) Hücre yüzeyindeki azınlık taşıyıcılarının yüzey rekombinasyon hızı vardır.

Bir güneş hücresi güneş ışığına maruz kaldığında, foton soğrulması, soğrulan fotonların elektron-deşik çifti üretilmesi, üretilen serbest taşıyıcıların hareketi ve tüketim bölgesinde oluşan elektrik alan tarafından üretilen elektron-deşik çiftinin

birbirinden ayrılması gibi temel olaylar meydana gelir. Bu süreçlerin gerçekleşmesi yukarıda belirtilen parametrelere bağlı olarak farklılık gösterir.

### 3.1.1 Soğurma katsayısı

Soğurma katsayısı, yarıiletken malzeme içerisinde güneş ışığının soğrulmadan önce aldığı mesafenin bir ölçüsüdür [49]. Güneş hücresine gelen fotonlar Beer-Lambert yasasına göre soğrulduğundan güneş hücre tasarımında soğurma katsayısı önemli bir faktördür. Beer-Lambert yasasına göre, bir ışık demeti güneş hücre üzerine düştüğünde, hücreyi geçen ışık şiddeti,

$$I=I_0e^{-\alpha x} \quad (3.1)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikteki  $I_0$ , gelen ışığın şiddeti,  $\alpha$ , soğurma katsayısı ve  $x$ , hücre kalınlığıdır.

Soğurma katsayısı, yarıiletkenin yasak enerji aralığına ve bant türüne bağlıdır [100]. Doğrudan yasak enerji aralığına sahip bir yarıiletken malzemenin soğurma katsayısı[15],

$$\alpha(\lambda)=A(E-E_g)^{1/2} \quad (3.2)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikteki  $A$  bir sabit,  $E$  fotonun enerjisi ve  $E_g$  yarıiletkenin yasak enerji aralığıdır. Dolaylı yasak enerji aralığına sahip bir yarıiletken malzemenin soğurma katsayısı [100],

$$\alpha(\lambda)=B(E-E_g-\hbar\Omega)^2 \quad (3.3)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikteki  $B$  bir sabit,  $\Omega$  soğrulan veya yayınlanan fonon frekansı ve  $\hbar$  işareti dolaylı yasak enerji aralığındaki fononun soğrulmasına ve yayınlanmasına bağlı olarak değişir. Doğrudan yasak enerji aralığına sahip yarıiletken malzemeler daha yüksek soğurmaya sahip olduğundan dolaylı yasak enerji aralığına sahip malzemelerden daha avantajlıdır [100].

İki eklemli güneş hücresinde kullanılan  $Ga_{1-y}In_yP$  ve  $Ga_{1-x}In_xAs$  yarıiletken malzemeler doğrudan yasak enerji aralığına sahiptir.  $Ga_{1-x}In_xAs$  [15] ve  $Ga_{1-y}In_yP$  [39] yarıiletken malzemelerin soğurma katsayıları sırasıyla,

$$\alpha_{Ga_{1-x}In_xAs}(\lambda)=3,3\sqrt{(E-E_g)} \quad (3.4)$$

$$\alpha_{Ga_{1-y}In_yP}(\lambda)=5,5\sqrt{(E-E_g)}+1,5\sqrt{(E-E_g-0,1)} \quad (3.5)$$

eşitlikleri ile ifade edilir. Eşitlikteki  $E$ , foton enerjisi ve  $E_g$ , yasak enerji aralığı olup birimleri eV olarak kullanıldığında,  $\alpha$ 'nın birimi  $1/\mu m$  olarak bulunur. Eşitlik (3.4) ve (3.5)'den de görüldüğü gibi soğurma katsayısı yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığından büyük enerjili fotonlar için tanımlanır [50]. Yani güneş hücresine gelen düşük enerjili fotonlar elektron-deşik çifti oluşturamadığı için foto-üretime katkıda bulunamazlar.

### 3.1.2 Yansımaya Katsayısı

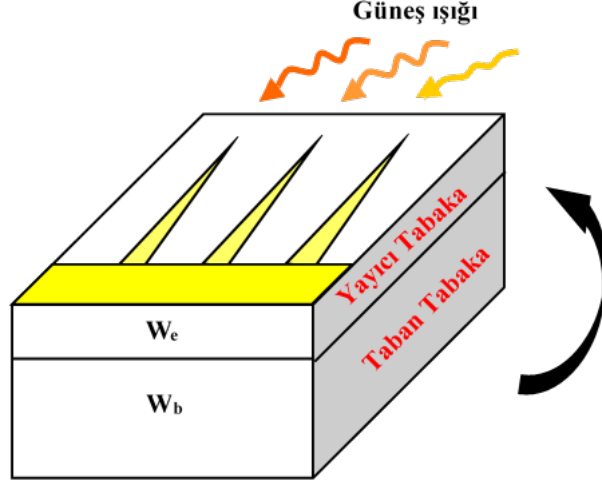
Bir güneş hücresinin yansımaya katsayısı, yüzeyin yapısına ve yansımaya önleyici kaplama ile güneş hücresinde kullanılan malzemelerin hava ile uyumuna bağlıdır. Bir dalgaboyundaki yansımaya oranını en aza indirmek için kırılma indisinin optimum değerinin iki bitişik tabakanın kırılma indislerinin geometrik ortalaması olması gerekir. Güneş hücre aygıtının ön yüzeyine uygun yansımaya önleyici kaplama yapıldığında, güneş hücre tarafından daha fazla foton soğrulmasına olanak sağlar. Bu durum güneş hücre aygıtının performans değerinin iyileşmesine neden olur.

### 3.1.3 Kısa Devre Akım Yoğunluğu

Güneş hücre modelinde elektriksel parametrelerin teorik olarak hesaplanmasının anlaşılabilmesi için öncelikle tek eklemli güneş hücre modeli ele alındı. Tek eklemli güneş hücresi bir p-n ekleminden oluşur. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi p-n eklem daha ince olan üst kısmı yayıcı (emitter) tabaka ve daha kalın olan alt kısmı ise, taban (base) tabaka olarak tanımlanan iki bölgeden meydana gelir. Güneş



ışınları, ince metal ızgara kontaklarla kaplı olan yayıcı bölge tarafından güneş hücresine gelir. Metal kontak dışında kalan bölgeler, düşük bir yansımaya katsayısına sahip olduğundan foto-akımının toplanmasına izin verir.



Şekil 3.1: Tek eklemli güneş hücre yapısı.

Yayıcı tabaka n-tipi ve taban tabaka p-tipi yarıiletken malzemeden oluşan tek eklemli güneş hücresine, güneş ışığı geldiğinde, Şekil 3.1’de gösterilen taban ve yayıcı tabakadaki azınlık taşıyıcılar tarafından ok yönünde bir foto-akım üretilir [49].

Güneş spektrumunun tüm dalgaboyları güneş hücresi üzerinden yansıdığından, güneş hücresi tarafından üretilen toplam kısa devre akım yoğunluğu, yayıcı ve taban tabakadaki kısa devre akım yoğunluklarının dalgaboyu integrali ile tanımlanır. Güneş hücresinin kısa devre akım yoğunluğu [49],

$$J_{SC}(\lambda) = \int_0^{\infty} J_{SC\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} (J_{SCE} + J_{SCB}) d\lambda \quad (3.6)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikteki  $J_{SCE}$  ve  $J_{SCB}$  sırasıyla, yayıcı ve taban tabakadaki kısa devre akım yoğunluğudur.

Yayıcı ve taban tabakadaki kısa devre akım yoğunluğu [101],

$$J_{SCE}(\lambda) = \frac{q\alpha\phi_0(1-R)L_p}{(\alpha L_p)^2 - 1} \left[ -\alpha L_p e^{-\alpha W_e} + \frac{S_e \frac{L_p}{D_p} + \alpha L_p e^{-\alpha W_e} \left( S_e \frac{L_p}{D_p} \cosh \frac{W_e}{L_p} + \sinh \frac{W_e}{L_p} \right)}{\cosh \frac{W_e}{L_p} + S_e \frac{L_p}{D_p} \sinh \frac{W_e}{L_p}} \right] \quad (3.7)$$

$$J_{SCB}(\lambda) = \frac{q\alpha\phi_0'(1-R)L_n}{(\alpha L_n)^2 - 1} \left[ \alpha L_n - \frac{S_b \frac{L_n}{D_n} \left( \cosh \frac{W_b}{L_n} - e^{-\alpha W_b} \right) + \sinh \frac{W_b}{L_n} + \alpha L_n e^{-\alpha W_b}}{\cosh \frac{W_b}{L_n} + S_b \frac{L_n}{D_n} \sinh \frac{W_b}{L_n}} \right] \quad (3.8)$$

eşitlikleri ile ifade edilir. Eşitliklerdeki temel parametreler Tablo 3.1’de verildi. Eşitlik (3.7) ve (3.8)’den görüldüğü gibi bir güneş hücresinde, elektron-deşik çiftinin ürettiği kısa devre akım yoğunluğu yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığına bağlı olan soğurma katsayısına ( $\alpha$ ) ve foton akısına ( $\phi_0$ ) bağlıdır [39].

**Tablo 3.1:** Analitik hücre modelindeki temel parametreler.

Sembol	İsim	Birimleri
$q$	Elektronun yükü	C
$\alpha$	Soğurma katsayısı	cm <sup>-1</sup>
$W_e$	Yayıcı tabaka kalınlığı	cm
$W_b$	Taban tabaka kalınlığı	cm
$\phi_0$	Yayıcı tabakadaki foton akısı	Foton/cm <sup>2</sup> μms
$\phi_0'$	Taban tabakadaki foton akısı	Foton/cm <sup>2</sup> μms
$L_n$	Taban tabakadaki elektron difüzyon uzunluğu	cm
$L_p$	Yayıcı tabakadaki deşik difüzyon uzunluğu	cm
$D_n$	Taban tabakadaki elektron difüzyon sabiti	cm <sup>2</sup> /s
$D_p$	Yayıcı tabakadaki deşik difüzyon sabiti	cm <sup>2</sup> /s
$S_e$	Yayıcı yüzey rekombinasyon hızı	cm/s
$S_b$	Taban yüzey rekombinasyon hızı	cm/s
$R$	Yansımaya katsayısı	-

Modellenen güneş hücresinin kısa devre akım yoğunluğunun teorik olarak hesaplanabilmesi için, öncelikle foton akısı ( $\phi_0$  ve  $\phi_0'$ ), difüzyon katsayısı ( $L_n$  ve  $L_p$ ) ve difüzyon uzunluğunun ( $D_n$  ve  $D_p$ ), hesaplanması gerekir. Bu parametrelerin hesaplanmasında kullanılan denklemler aşağıda sırasıyla verildi.

Foton akısı, bir güneş hücresinde üretilen kısa devre akım yoğunluğundaki elektronların sayısını belirlemek için kullanılan önemli bir parametredir. Yayıcı tabakadaki foton akısı [49,102],

$$\phi_0 = \frac{\lambda}{hc} I_\lambda \quad (3.9)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikteki  $\lambda$  dalga boyu,  $h$  Planck sabiti,  $c$  ışık hızı ve  $I_\lambda$  spektral parlaklıktır. Spektral parlaklık ( $I_\lambda$ ) Eşitlik (2.6)'da ifade edildi.

Güneş hücresi üzerine gelen güneş ışığının bir kısmı yayıcı tabakada soğrulduğu için, taban tabakadaki foton akısı yayıcı tabakadaki ile ilişkili olup,

$$\phi'_0 = \phi_0 e^{-\alpha W_e} \quad (3.10)$$

eşitliği ile ifade edilir [49]. Eşitlikteki  $\phi_0$  yayıcı tabakadaki foton akısı,  $W_e$  yayıcı tabaka kalınlığıdır.

Elektron ve deşik için difüzyon katsayısı

$$D_{n,p} = \mu_{n,p} \frac{kT}{q} \quad (3.11)$$

Einstein bağıntısı ile ifade edilir [103]. Eşitlikteki,  $\mu_n$  ve  $\mu_p$  sırasıyla, elektron ve deşik mobilitesi,  $k$  Boltzmann sabiti,  $T$  sıcaklık ve  $q$  elektron yüküdür.

Elektron ve deşik için difüzyon uzunluğu,

$$L_{n,p} = \sqrt{\tau_{n,p} D_{n,p}} \quad (3.12)$$

eşitliği ile ifade edilir [104]. Eşitlikteki  $\tau_n$  ve  $\tau_p$  sırası ile elektron ve deşik için azınlık taşıyıcı ömrüdür. Taşıyıcı ömrü  $\tau_{n,p} = [1/BN]$  eşitliği ile ifade edilir ve eşitlikteki  $B$  radyoaktif rekombinasyon katsayısı ve  $N$  katkı yoğunluğudur [104].

Bir güneş hücresinde, soğrulan ışık, doğrudan foto-akıma dönüştürülebildiği için, kısa devre akım yoğunluğu güneş ışığının soğrulmasına bağlıdır. Buna ek olarak, tüketim bölgesinin genişliği ve taşıyıcı difüzyon uzunlukları da kısa devre akım yoğunluğunu büyük ölçüde etkiler. Tüketim bölgesi daha geniş ve difüzyon uzunluğu daha uzun olursa, üretilen elektron-deşik çiftlerinin büyük bir kısmı tüketim bölgesinde oluşan elektrik alan sayesinde difüz ederler. Böylece bu elektron-deşik çifti kısa devre akım yoğunluğuna katkıda bulunur. Diğer taraftan tüketim bölgesi daha dar ve difüzyon uzunluğu daha kısa olursa, elektron-deşik çiftleri büyük bir rekombinasyona uğrar. Bu rekombinasyon olayı, p-tipi malzemedeki fazla

elektronun deşik ile yeniden birleşmesi veya n-tipi malzemedeki fazla deşikğin elektron ile yeniden birleşmesi sonucunda oluşur. Bundan dolayı güneş hücre tasarımıda, bu kayıpları en aza indirmek için hücre kalınlıkları kullanılan yarıiletken malzemenin difüzyon uzunluğuna göre optimize edilmelidir.

### 3.1.4 Harici Kuantum Verimi

Harici kuantum verimi, güneş radyasyonundan gelen her bir fotonun, güneş hücresi tarafından harici devre içinde, üretilen elektronların sayısı olarak tanımlanan önemli bir büyüklüktür. Bir güneş hücresinin harici kuantum verimi [49],

$$EQE = \frac{J_{SC}}{q\phi_0} \quad (3.13)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikteki  $J_{SC}$  kısa devre akım yoğunluğu,  $q$  elektron yükü,  $\phi_0$ , foton akısıdır. Kuantum verimi, kısa devre akım yoğunluğunun yayıcı ve taban tabakasına göre iki bileşene sahiptir. Kuantum verimi birimsiz bir büyüklük olup, genelde % cinsinden ifade edilir.

### 3.1.5 Karanlık Akım Yoğunluğu

Güneş hücresinin karanlık akım yoğunluğu doyum akımı yoğunluğu ile ilişkili olup [49],

$$J_d = J_0 (e^{-qV_{oc}/kT} - 1) \quad (3.14)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikteki  $J_0$  doyum akım yoğunluğu,  $V_{oc}$  açık devre voltajı,  $k$  Boltzmann sabiti ve  $T$  sıcaklıktır.

Bir güneş hücresinin doyum akım yoğunluğu ters besleme altında, eklem boyunca azınlık taşıyıcılarının sızıntısının bir ölçüsüdür. Bu sızıntı olayı, eklemin her iki tarafındaki, nötr bölgelerindeki taşıyıcıların rekombinasyonudur. Bu nedenle doyum akım yoğunluğu güneş hücresindeki  $V_{oc}$  değerini kontrol eder [74]. Bir güneş

hücresindeki doyum akım yoğunluğu yayıcı ve taban tabakadaki doyum akım yoğunluklarının toplamı olup [101],

$$J_0=J_{0e}+J_{0b} \quad (3.15)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikteki  $J_{0e}$  ve  $J_{0b}$  sırasıyla yayıcı ve taban tabakadaki doyum akım yoğunlukları olup [101],

$$J_{0E}=q \frac{n_i^2}{N_D} \frac{D_p}{L_p} \left[ \frac{\left( S_e \frac{L_p}{D_p} \cosh \frac{W_e}{L_p} + \sinh \frac{W_e}{L_p} \right)}{\cosh \frac{W_e}{L_p} + S_e \frac{L_p}{D_p} \sinh \frac{W_e}{L_p}} \right] \quad (3.16)$$

$$J_{0B}=q \frac{n_i^2}{N_A} \frac{D_n}{L_n} \left[ \frac{\left( S_b \frac{L_n}{D_n} \cosh \frac{W_b}{L_n} + \sinh \frac{W_b}{L_n} \right)}{\cosh \frac{W_b}{L_n} + S_b \frac{L_n}{D_n} \sinh \frac{W_b}{L_n}} \right] \quad (3.17)$$

eşitlikleri ile ifade edilir. Eşitlikteki  $n_i$ , saf taşıyıcı yoğunluğu olup,  $n_i = \sqrt{N_A N_D} e^{-E_g/kT}$  ifadesi ile bulunur [103]. Eşitlik (3.16) ve (3.17)'de görüldüğü gibi doyum akım yoğunluğu,  $n_i^2$  ile orantılıdır. Bundan dolayı saf taşıyıcı yoğunluğu, güneş hücrelerinin kalitesini ve performansını etkileyen önemli bir parametredir [49]. Güneş hücre tasarımında dikkat edilmesi gereken noktalardan biri ise, saf taşıyıcı yoğunluğunu belirleyen alıcı ( $N_A$ ) ve verici ( $N_D$ ) katkı yoğunluklarının belirlenmesidir.

### 3.1.6 J-V Karakteristiği

J-V karakteristik denklemi, güneş hücresinin akım yoğunluğu ve voltaj arasındaki ilişki ile hücrenin elektriksel parametrelerini açıklayan analitik bir ifade olup, bir güneş hücresinin J-V karakteristiği [49,105],

$$J=J_{SC}-J_d \quad (3.18)$$

eşitliği ile ifade edilir. Bu eşitlikteki karanlık akım yoğunluğu ( $J_d$ ) yerine, Eşitlik (3.14) ifadesi yazılırsa,

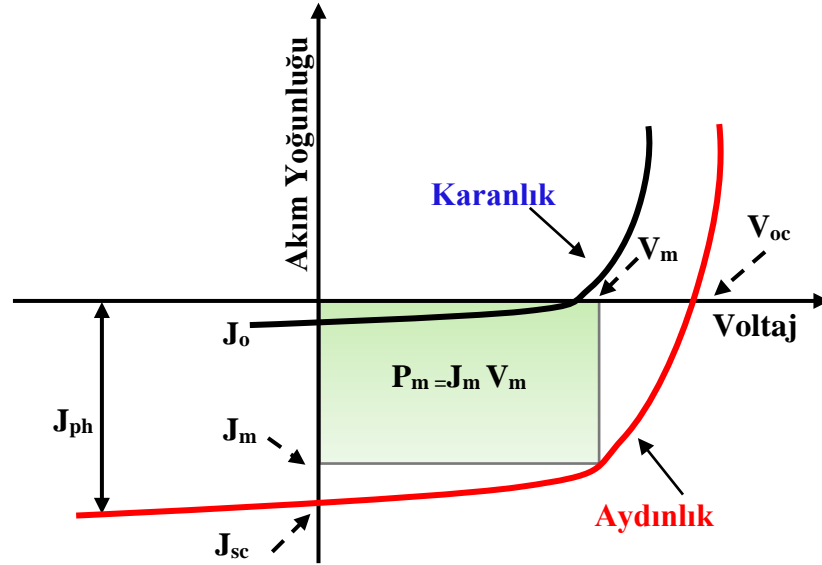
$$J = J_{SC} - J_0 \left( e^{\frac{qV_{oc}}{kT}} - 1 \right) \quad (3.19)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikteki  $V_{oc}$ , açık devre voltajı değeridir.

Güneş pilini karakterize eden parametreleri elde etmek için p-n eklemnin açık devre modunda çalıştığı göz önüne alınır. Bundan dolayı akım yoğunluğu ( $J$ ) sıfır olur ve bu değer Eşitlik (3.19)' da yerine yazılıp düzenlenirse,

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{J_{sc}}{J_0} + 1 \right) \quad (3.20)$$

eşitliği elde edilir.  $V_{oc}$  değeri, logaritmik olarak,  $J_{sc}/J_0$  oranına bağlıdır. Bu ifadeden de görüldüğü gibi açık devre voltajı hücrenin alanından bağımsızdır. Bundan dolayı açık devre voltajı, aynı aydınlatma ve sıcaklık koşullarında daima aynıdır [49]. Eşitlik (3.20)'den görüldüğü gibi açık devre voltajının ( $V_{oc}$ ) maksimum değer olabilmesi için doyum akım yoğunluğunun ( $J_0$ ) minimum değerinde olması gerekir.



Şekil 3.2: Güneş hücresinin J-V karakteristiği.

Bir güneş hücresinin J-V eğrisi, Şekil 3.2'de görüldüğü gibi, güneş altında üretilen akım yoğunluğu ile karanlıktaki J-V eğrisinin süperpozisyonudur [106]. Bir güneş hücresinin J-V karakteristiği hücrenin performansı ve kalitesi hakkında bilgi verir[107].

Bir malzemenin yasak enerji aralığı ne kadar büyükse, üreteceği  $V_{oc}$  değeri de o kadar büyüktür. Bunun sebebi ise, malzemenin yasak enerji aralığının büyük olması, soğrulan taşıyıcıların daha düşük termalizasyonuna neden olduğundan, Fermi seviyelerinin daha yüksek enerjilerde bölünmesine yol açar. Kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{sc}$ ) ise malzemenin yasak enerji aralığı artıka azalmaktadır. Bundan dolayı güneş hücre tasarımlarında maksimum verim değerinin elde edilebilmesi için güneş hücresinde kullanılan malzeme uygun yasak enerji aralığına sahip bir yarıiletken malzeme olmalıdır.

### 3.1.7 Tüketim Verimi

Tüketim verimi, güneş hücresinin kalitesini değerlendirmek için en önemli özelliktir. Bir güneş hücresinin tüketim verimi, hücrede kullanılan yarıiletken malzemenin soğurma katsayısına, yansıma katsayısına, saf taşıyıcı yoğunluğuna, mobilitesine ve taşıyıcı ömrü gibi birçok parametreye bağlıdır. Tüketim verimi,

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = FF \frac{V_{oc} J_{sc}}{P_{in}} \quad (3.21)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikteki FF, dolun faktörü,  $V_{oc}$  açık devre voltajı,  $J_{sc}$  kısa devre akım yoğunluğudur.  $P_{in}$  güneş hücresi üzerine gelen güneş spektrumuna bağlı güç değeri olup,  $P_{in} = G.A$  ile bulunur ve G, güneş spektrumunun radyasyon yoğunluğu ve A, güneş hücresinin yüzey alanıdır.

Dolum faktörü, bir güneş hücresinin kalitesini karakterize eden en önemli bir parametredir. Dolum faktörü güneş hücresinin seri direncinden kaynaklanan bir niceliktir. Güneş hücresinin seri direnci artıka dolun faktörü azalır. Bu da güneş hücresinin tüketim veriminin azalmasına neden olur. Dolum faktörü [105],

$$FF = \frac{V_m J_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (3.22)$$

eşitliği ile ifade edilir. Teorik olarak, dolun faktörü ise Green tarafından tanımlanan [108],

$$FF = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0,72)}{1 + v_{oc}} \quad (3.23)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikteki  $v_{oc}$  normalize edilmiş  $V_{oc}$  olup,  $v_{oc} = V_{oc}/V_T$  eşitliği ile bulunur ve  $V_T$  termal potansiyeli olup  $V_T = kT/q$  ile ifade edilir.

### 3.2 Sıcaklık Etkisi

Yarıiletken malzemeler, sahip oldukları yasak enerji aralıklarından dolayı, güneş hücresi gibi, teknolojik cihazların temelini oluşturmaktadır. Kuantum teorisine göre yarıiletken kristallerde yasak enerji aralığı, iletim bandının en alt noktası ile değerlik bandının en üst noktası arasındaki enerji farkıdır ( $E_g = E_c - E_v$ ) [109]. Basınç ve sıcaklık gibi dış etkenler altında, yasak enerji aralığının davranışı yarıiletken tabanlı güneş hücrelerinin performansını etkileyen belirleyici bir faktördür [110]. Bundan dolayı güneş hücrelerinin sıcaklığa bağlı olarak, yasak enerji aralığının incelenmesi, teknolojik uygulamalar için önemli bir görev oluşturmaktadır.

Yarıiletkenlerin yasak enerji aralığının sıcaklığa göre değişimi yarı-deneysel bir ifade olan Varshni bağıntısı ile [111,112],

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (3.24)$$

ifade edilir. Eşitlikteki  $E_g(0)$ , yarıiletken malzemenin 0K'deki doğrudan ya da dolaylı yasak enerji aralığı, T, Kelvin cinsinden sıcaklık ve  $\alpha$  ve  $\beta$  ise Varshni katsayıları olup, sırasıyla termal genişleme ve Debye sıcaklığı ile ilgili olan yarıiletkene özgü katsayılarıdır. Yarıiletken bir malzemenin sıcaklığı artırıldığında, artan termal enerji nedeniyle atomlar arasındaki titreşimler artar ve buna bağlı olarak da bağ enerjisi azalır [113]. Böylece yarıiletken malzemedeki ısıl genişleme meydana gelir. Elektron-fonon etkileşimlerinden dolayı elektronların yarıiletken içinde maruz kalacakları periyodik potansiyel büyüklüğü azalır. Bu durum yasak enerji aralığının azalmasına neden olur.

Bir güneş hücresinin performans değeri, kısa devre akım yoğunluğuna, açık devre voltajına ve dolum faktörüne bağlıdır. Bu değerler, güneş hücresinin sıcaklık

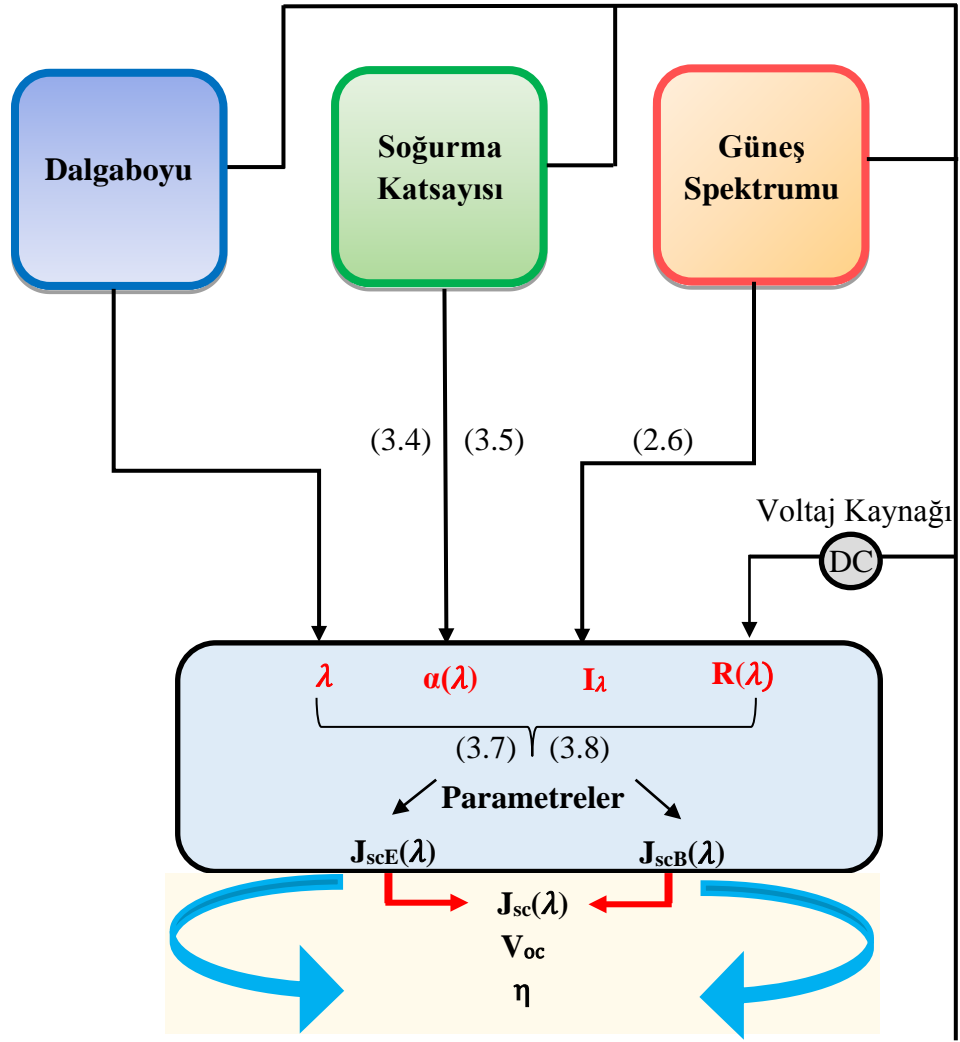


değişiminden farklı şekillerde etkilenir. Güneş hücresinin sıcaklığı artırıldığında, Eşitlik (3.24)'e göre yarıiletkenin yasak enerji aralığı daralır ve buna bağlı olarak, güneş spektrumundan soğrulan foton sayısı, yani soğurma katsayısı artar [114,115]. Böylece güneş hücresinde üretilen elektron-deşik çifti sayısı artmasından dolayı kısa devre akım yoğunluğu artar [116,117]. Artan sıcaklık değeri, daralan yasak enerji aralığına bağlı olarak, açık devre voltajının azalmasına neden olur [118,119]. Güneş hücresinde, artan sıcaklık ile akım yoğunluğundaki artış, voltaj değerindeki azalıştan çok küçük olduğu için, güneş hücresinin tüketim verimi azalır [120-122].

### 3.3 Numerik Analiz

Modellenen güneş hücrelerinin performans değerlerinin hesaplanmasında, analitik güneş hücre modeli kullanıldı. Buna göre, bir güneş hücresine güneş ışığı ulaştığı zaman, güneş spektrumundan gelen yeterli enerjiye sahip fotonlar foto-üretime katkıda bulunurlar. Şekil 3.3'deki algoritmadan yararlanılarak, modellenen tek eklemlili GaAs iki eklemlili GaInP/GaAs ve iki eklemlili  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin çıktı parametreleri ( $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , FF ve  $\eta$ ) teorik olarak hesaplandı.

Modellenen güneş hücrelerinin kısa devre akım yoğunluğunun maksimum değeri bulunurken öncelikli olarak güneş ışığının foton akısını hesaplanması gerekir. Belirli bir dalgaboyundaki foton akısı, bu dalgaboyundaki güneş ışığının enerjisini fotonun enerjisine bölünerek bulunur. Her dalgaboyu için bu işlem tekrar edilerek, foton akısının dalgaboyuna göre dağılımı elde edilir. Bu dağılımın elektron-deşik çifti oluşturan dalgaboyları arasında integrali alınarak foton akısı hesaplanır. Bu dalgaboyundaki her foton elektron-deşik çifti oluşturduğundan dış devrede bir elektron akışına neden olur. Bu da güneş hücresinin kısa devre akım yoğunluğuna karşılık gelir.



Şekil 3.3: Güneş hücre performansı hesaplama algoritması.

Modellenen tek eklemlerli GaAs güneş hücreleri karasal uygulamalarda kullanıldığından AM1.5G ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) spektrumları referans alındı. Güneş spektrumundan gelen fotonların enerjisi, Eşitlik (2.1)'den hesaplandı. Güneş spektrumundan gelen fotonlarının GaAs güneş hücre tarafından ne kadar soğrulacağını belirten soğurma katsayısı Eşitlik (3.4)'den hesaplandı. Eşitlik (2.6)'dan GaAs hücresi için spektral parlaklık bulundu. Spektral parlaklık Eşitlik (3.9) ve (3.10)'da yerlerine yazılarak her dalga boyuna karşılık gelen foton akısı hesaplandı. Bulunan bu değerler Eşitlik (3.7) ve (3.8)'de yerlerine yazılarak, her dalga boyuna karşılık gelen sırasıyla yayıcı ve taban tabakanın kısa devre akım yoğunlukları, GaAs hücresi için hesaplandı. Bulunan bu akım yoğunlukları Eşitlik (3.6)'de yerine yazılarak, GaAs güneş hücresinin toplam kısa devre akım yoğunluğu bulundu. Eşitlik (3.16) ve (3.17)'den yararlanılarak doyum akım yoğunlukları

bulundu. Eşitlik (3.20)'den GaAs güneş hücresi için açık devre voltajı hesaplandı. Eşitlik (3.23)'den dolum faktörü hesaplandı. Bulunan bu değerler Eşitlik (3.21)'de yerine yazılarak güneş hücresinin tüketim verim değeri bulundu.

Modellenen iki eklemlili  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücreleri uzay ve karasal uygulamalarda kullanılmak için tasarlandığından, sırasıyla, AM0 ( $1353 \text{ W/m}^2$ ) ve AM1.5G ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) spektrumları referans alındı [13, 38]. Güneş spektrumundan gelen fotonların enerjisi, Eşitlik (2.1)'den hesaplandı. Güneş spektrumundan gelen fotonların güneş hücresinin üst hücresinde bulunan  $Ga_{1-y}In_yP$  yarıiletken malzeme tarafından ne kadar soğrulacağını veren soğurma katsayısı Eşitlik (3.5)'den hesaplandı. Üst hücrede soğrulmayan küçük enerjili fotonlar  $Ga_{1-x}In_xAs$  hücre tarafından soğrulur. Bu fotonların ne kadarının soğrulacağını gösteren  $Ga_{1-x}In_xAs$  malzemenin soğurma katsayısı Eşitlik (3.4)'den hesaplandı. Eşitlik (2.6)'dan  $Ga_{1-y}In_yP$  ve  $Ga_{1-x}In_xAs$  hücreleri için spektral parlaklık hesaplandı. Spektral parlaklık Eşitlik (3.9) ve (3.10)'da yerlerine yazılarak her dalgaboyuna karşılık gelen foton akısı hesaplandı. Bulunan bu değerler Eşitlik (3.7) ve (3.8)'de yerlerine yazılarak, her dalgaboyuna karşılık gelen sırasıyla yayıcı ve taban tabakanın kısa devre akım yoğunlukları,  $Ga_{1-y}In_yP$  ve  $Ga_{1-x}In_xAs$  hücreleri için hesaplandı. Bulunan bu akım yoğunlukları Eşitlik (3.6)'da yerine yazılarak,  $Ga_{1-y}In_yP$  ve  $Ga_{1-x}In_xAs$  hücrelerinin toplam kısa devre akım yoğunluğu hesaplandı. Eşitlik (3.16) ve (3.17)'den yararlanılarak doyum akım yoğunlukları bulundu.

İki eklemlili  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücreleri birbirine seri bağlı oldukları için, güneş hücresinin toplam akım yoğunluğu, akım yoğunluğu küçük olan hücre ( $J=\min(J_{GaInP}, J_{GaAs})$ ) tarafından belirlendi. Eşitlik (3.20)'den  $Ga_{1-y}In_yP$  ve  $Ga_{1-x}In_xAs$  hücreleri için açık devre voltajları hesaplandı. İki eklemlili  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücresinin voltaj değeri,  $Ga_{1-y}In_yP$  ve  $Ga_{1-x}In_xAs$  hücreleri için hesaplanan voltajların toplamına ( $V_{oc}=V_{GaInP}+V_{GaAs}$ ) eşittir. Eşitlik (3.23)'den dolum faktörü hesaplandı. Eşitlik (3.21)'den iki eklemlili  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücresinin tüketim verim değerleri bulundu.

Çeşitli kullanım alanlarına sahip olan güneş hücrelerinin çalışma sıcaklığı, kullanılan yerlere bağlı olarak değişmektedir. Bundan dolayı güneş hücre tasarımında, sıcaklık etkisinin hücre performansı üzerindeki etkilerinin bilinmesi gerekir. AM0 ve AM1.5G güneş spektrumu altında, 200-450 K sıcaklıkları arasında

modellenen iki eklemlı  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hcresının performans değerleri hesaplandı. Bu hesaplamalardan yararlanılarak sıcaklığın güneş hücre performansı ( $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $\eta$ ) zerindeki etkisi incelendi.

## 4. NUMERİK MODELLEME VE SONUÇLARI

### 4.1 Tek Eklemlı GaAs Güneş Hücre Modellemesi

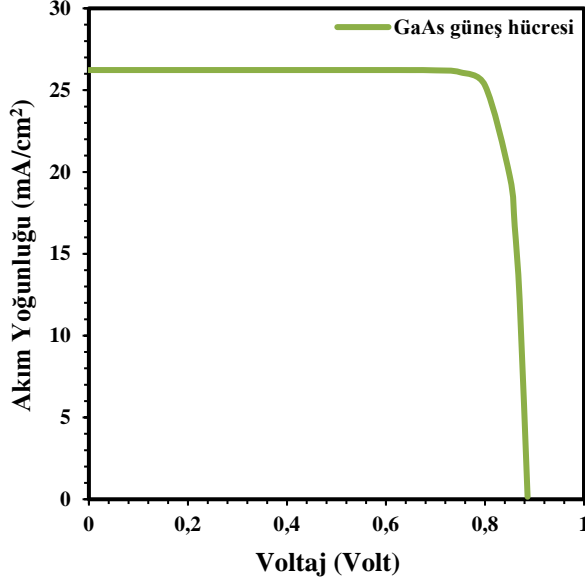
Tek eklemlı GaAs güneş hücre yapısı, karasal (AM1.5G) uygulamalarda kullanılmak için tasarlandı. Modellenen tek eklemlı GaAs güneş hücre yapısı Şekil 4.1'de şematik olarak verildi. Bu güneş hücresinde, yüksek verim sağlamak için ilk olarak, taban ve alt hücrenin kalınlıkları optimize edildi ve katkı yoğunlukları belirlendi. GaAs hücresinin taban tabakası (n-tipi) 3500 nm kalınlığında ve  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  katkı yoğunluğuna sahiptir. GaAs hücresinin yayıcı tabakası (p-tipi) ise 500 nm kalınlığında ve  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  katkı yoğunluğuna sahiptir.

<b>p-GaAs</b>	<b>20 nm</b>
<b>p-AlGaAs</b>	<b>30 nm</b>
<b>p-GaAs</b>	<b>500 nm</b>
<b>n-GaAs</b>	<b>3500 nm</b>
<b>n-GaAs Alttaş</b>	

Şekil 4.1: Tek eklemlı GaAs güneş hücre modeli.

#### 4.1.1 Tek Eklemlı GaAs Güneş Hücresinin J-V Karakteristiği

Tek eklemlı GaAs güneş hücresinin kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{SC}$ ) ve açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ) değerleri 300K'de AM1.5G güneş spektrumu referans alınarak analitik güneş hücre modeline dayanan eşitlikler yardımıyla hesaplandı. Hesaplamalardan yararlanılarak çizilen J-V karakteristiği Şekil 4.2'de verildi.



Şekil 4.2: Modellenen tek eklemlı GaAs güneş hücresinin J-V grafiği.

Tek eklemlı GaAs güneş hücresi için teorik olarak hesaplanan elektriksel parametreleri, Tablo 4.1’de verildi. J-V grafiğinden hesaplanan tek eklemlı güneş hücresinin teorik verim değeri %19,92 olarak bulundu.

**Tablo 4.1:** Tek eklemlı GaAs güneş hücresinin teorik olarak hesaplanan elektriksel parametreleri.

$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	$\eta$ (%)
26,23	0,88	19,92

## 4.2 İki Eklemlı GaInP/GaAs Güneş Hücre Modellemesi

Karasal (AM1.5G) uygulamalarda kullanılmak için örgü ve akım uyumuna sahip iki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücre yapısı tasarlandı. Modellenen iki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücre yapısı Şekil 4.3’de şematik olarak verildi. Bu güneş hücresinin, üst hücresinde GaInP yarıiletken malzemesi, alt hücresinde ise, GaAs yarıiletken malzemesi olacak şekilde modellendi. Bu alt ve üst hücrenin elektriksel iletimini ve performans değerini artırması için ince ve ultra yüksek katkılı tünel eklem ile birbirlerine bağlanır. Bu tünel eklemın işlevi güneş hücresine düşük direnç ve yüksek akım yoğunluğu sağlamaktadır.

<b>n-GaAs</b>	<b>200 nm</b>
<b>n-AlGaAs</b>	<b>50 nm</b>
<b>n-GaInP</b>	<b>170 nm</b>
<b>p-GaInP</b>	<b>800 nm</b>
<b>p++ AlGaAs</b>	<b>50 nm</b>
<b>n++ AlGaAs</b>	<b>50 nm</b>
<b>n-GaAs</b>	<b>150 nm</b>
<b>p-GaAs</b>	<b>1000 nm</b>
<b>p-GaAs Alttaş</b>	

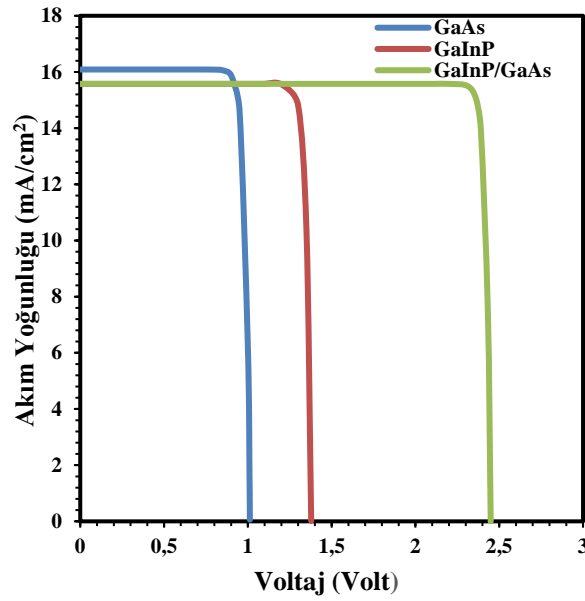
**Şekil 4.3:** İki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücre modeli.

Yüksek verimli güneş hücre tasarımı yapmak için öncelikli olarak, alt ve üst hücrenin kalınlıkları optimize edildi. GaAs hücresinin taban (p-tipi) ve yayıcı (n-tipi) tabakalarındaki kalınlık sırasıyla, 1000 nm ve 150 nm olarak belirlendi. GaInP hücresinin taban (p-tipi) ve yayıcı (n-tipi) tabakalarının kalınlıkları sırasıyla 800 nm ve 170 nm olarak belirlendi. Kalınlıkları belirlenen güneş hücresindeki alt ve üst hücrelerin alıcı ( $N_A$ ) ve verici ( $N_D$ ) katkı yoğunlukları belirlendi. GaAs hücresinin taban ve yayıcı tabakalarındaki katkı yoğunlukları sırasıyla,  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  ve  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  olarak belirlendi. GaInP hücresinin taban ve yayıcı tabakalarındaki katkı yoğunlukları sırasıyla,  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  ve  $7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  olarak belirlendi.

#### 4.2.1 İki Eklemlı GaInP/GaAs Güneş Hücresinin J-V Karakteristiği

Modellenen iki eklemlı güneş hücresinin üst hücresinde bulunan GaInP yarıiletkenin yasak enerji aralığı 1,93 eV'dur. Bu değer GaInP üst hücrenin güneş spektrumundaki UV ve görünür bölgedeki fotonları soğurduğunu gösterir. Alt hücrede bulunan GaAs yarıiletkeni ise 1,42 eV yasak enerji aralığına sahip olduğundan güneş spektrumunun yakın kızıl ötesindeki fotonları soğurur. Alt ve üst hücre tarafından soğrulan fotonlar güneş hücresinin kısa devre akım yoğunluğunu belirler.

Analitik güneş hücre modelindeki eşitliklerden yararlanılarak iki eklemli GaInP/GaAs güneş hücresinin AM1.5G güneş spektrumunda ve 300K’de kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{sc}$ ) ve açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ) değerleri hesaplandı. Modellenen GaInP/GaAs güneş hücresinin akım uyumunu görmek için GaInP/GaAs güneş hücresinin, GaInP ve GaAs hücrelerinin J-V grafikleri ayrı ayrı Şekil 4.4’de verildi. GaInP hücresinin akım yoğunluğu  $16,02 \text{ mA/cm}^2$  iken GaAs hücresinin akım yoğunluğu  $15,75 \text{ mA/cm}^2$  olarak hesaplandı. Bu verilere göre, GaInP hücresinin akım yoğunluğu GaAs hücresinin akım yoğunluğundan çok az küçüktür. Bundan dolayı birbirine seri bağlı olan bu hücrelerin arasında akım uyumu olduğu söylenebilir. İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücresinin akım yoğunluğu şekil 4.4’de görüldüğü gibi GaInP üst hücre tarafından sınırlandırıldı. İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücresinin voltaj değeri ise GaInP üst hücre ile GaAs alt hücrenin voltaj değerlerinin toplamına eşittir.



Şekil 4.4: Modellenen iki eklemli GaInP/GaAs güneş hücresinin J-V karakteristiği.

İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücresinin için teorik olarak hesaplanan elektriksel parametreleri, Tablo 4.2’de verildi. J-V grafiğinden hesaplanan iki eklemli güneş hücresinin teorik verim değeri %25,62 olarak bulundu.

Tablo 4.2: İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücresinin teorik olarak hesaplanan elektriksel parametreleri

$J_{sc} \text{ (mA/cm}^2\text{)}$	$V_{oc} \text{ (V)}$	$\eta \text{ (\%)} \text{)}$
15,57	2,39	%25,62



### 4.3 İki Eklemlı Ga<sub>1-y</sub>In<sub>y</sub>P/Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As Güneş Hücre Modellemesi

Örgü ve akım uyumuna sahip yüksek kaliteli iki eklemlı Ga<sub>1-y</sub>In<sub>y</sub>P/Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As güneş hücre yapıları, karasal (AM1.5G) ve uzay uygulamalarında (AM0) kullanılmak için tasarlandı. Modellenen iki eklemlı Ga<sub>1-y</sub>In<sub>y</sub>P/Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As güneş hücre yapısı Şekil 4.5’de şematik olarak verildi. Bu güneş hücresi, üst hücrede Ga<sub>1-y</sub>In<sub>y</sub>P malzeme, alt hücrede ise, Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As malzeme olacak şekilde tasarlandı. Bu alt ve üst hücre, ince ve ultra yüksek katkılı tünel eklemlı seri olarak birbirine bağlanır. Üst hücre ile alt hücre arasındaki tünel eklemlı kullanılan AlGaAs yarıiletken malzemesinde yüksek katkı sağlanması için sırasıyla, Si ve Be elementleri ile katkılama yapılabilir.

p – Ga <sub>1-y</sub> In <sub>y</sub> P	0,0550 µm	Üst Hücre
n – Ga <sub>1-y</sub> In <sub>y</sub> P	0,550 µm	
p++ AlGaAs	0,050 µm	Tünel Eklemlı
n++ AlGaAs	0,050 µm	
p – Ga <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> As	0,5 µm	Alt Hücre
n – Ga <sub>1-x</sub> In <sub>x</sub> As	2 µm	
n – GaAs Alttas		

Şekil 4.5: İki eklemlı Ga<sub>1-y</sub>In<sub>y</sub>P/Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As güneş hücre yapısı.

İki eklemlı Ga<sub>1-y</sub>In<sub>y</sub>P/Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As gibi hücrelerin tasarlanmasındaki ilk adım, örgü uyumunun ve uygun yasak enerji aralığının belirlenmesidir [123]. Yüksek kaliteli güneş hücre tasarımında, hücreler arasındaki örgü uyumunun yaklaşık %0,01 civarında olması beklenir. İki eklemlı Ga<sub>1-y</sub>In<sub>y</sub>P/Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As güneş hücrelerinde örgü uyumu tabakalardaki İndiyum (In) içeriklerinin değiştirilmesi ile sağlandı. Böylece değişen In içeriğine bağlı olarak, tabakaların yasak enerji aralığı da değişmektedir. Güneş hücrelerinin uygun In içerikleri belirlendikten sonra hücreler arasındaki akım uyumunu sağlamak için, her tabakanın kalınlıkları ve katkı konsantrasyonları belirlenmelidir.

Güneş hücresi tasarımında yüksek verim sağlamak için ilk olarak, Ga<sub>1-y</sub>In<sub>y</sub>P alt ve Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As üst hücrenin kalınlıkları optimize edildi ve katkı yoğunlukları belirlendi. Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As alt hücrenin taban tabakası (n-tipi) 2 µm kalınlığında ve

$2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  katkı yoğunluğuna ve yayıcı tabaka (p-tipi) ise  $0,5 \mu\text{m}$  kalınlığında ve  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  katkı yoğunluğuna sahiptir.  $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{P}$  üst hücrenin taban tabakası (n-tipi)  $0,55 \mu\text{m}$  kalınlığında ve  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  katkı yoğunluğuna ve yayıcı tabaka (p-tipi) ise  $0,05 \mu\text{m}$  kalınlığında ve  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  katkı yoğunluğuna sahiptir. İkinci olarak da, iki eklemli  $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{P}/\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$  güneş hücresinin alt ve üst hücresindeki İndiyum (In) oranları sırasıyla  $x=0, 0,01, 0,05$  ve  $0,30$  ve  $y=0,58, 0,58, 0,62, 0,72$  değiştirilerek, yasak enerji aralıkları ayarlandı. Bu hücreler,  $\text{Ga}_{0,42}\text{In}_{0,58}\text{P}/\text{GaAs}$  (SCs-1),  $\text{Ga}_{0,42}\text{In}_{0,58}\text{P} / \text{Ga}_{0,99}\text{In}_{0,01}\text{As}$  (SCs-2),  $\text{Ga}_{0,38}\text{In}_{0,62}\text{P} / \text{Ga}_{0,95}\text{In}_{0,05}\text{As}$  (SCs-3) ve  $\text{Ga}_{0,28}\text{In}_{0,72}\text{P} / \text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{As}$  (SCs-4) olarak adlandırıldı.

İki eklemli  $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{P}/\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$  güneş hücresinin In içeriklerine göre Vegard yasasından yararlanarak hesaplanan 300K'deki yasak enerji aralıkları Tablo 4.3'de verildi. Tablodan da görüldüğü gibi  $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{P}$  ve  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$  yarıiletken malzemelerin In değerleri arttıkça, yasak enerji aralıkları azalmaktadır.

**Tablo 4.3:** İki eklemli  $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{P}/\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$  güneş hücresinin hesaplanan yasak enerji aralıkları.

Güneş Hücresi	Üst Hücre $E_g(\text{eV})$	Alt Hücre $E_g(\text{eV})$
SCs-1	1,86	1,42
SCs-2	1,86	1,40
SCs-3	1,80	1,34
SCs-4	1,68	1,10

İki eklemli  $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{P}/\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$  güneş hücresinin performans değerlerinin hesaplanmasında kullanılan parametreler Tablo 4.4'de verildi.

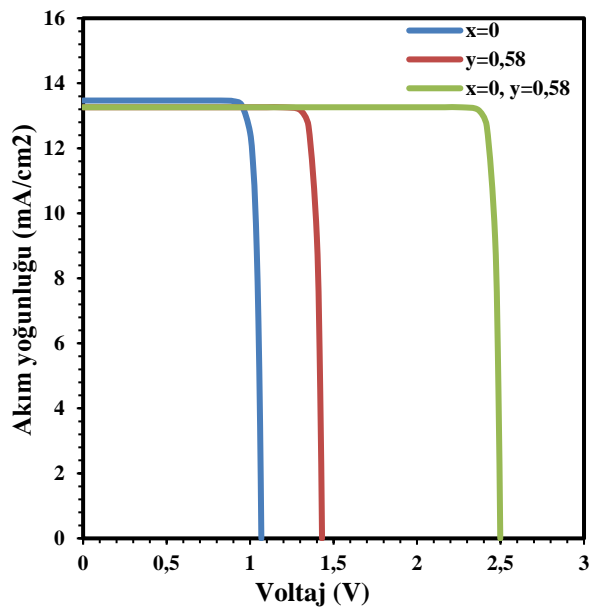
**Tablo 4.4:** Güneş hücre performansı hesaplanmasında kullanılan parametreler [99]\*.

Sembol	$\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$				GaInP
	$x=0$	$x=0.01$	$x=0.05$	$x=0.30$	
$\mu_n(\text{cm}^2/\text{Vs})^*$	8500	8327	7738	7618	4000
$\mu_p(\text{cm}^2/\text{Vs})^*$	400	200	200	200	200
$B_{n,p}(\text{cm}^3/\text{s})^*$	$7,50 \times 10^{-10}$	$9,60 \times 10^{-11}$	$9,60 \times 10^{-11}$	$9,60 \times 10^{-11}$	$7,50 \times 10^{-10}$
$D_n(\text{cm}^2/\text{s})$	219,93	215,46	200,22	197,11	103,5
$D_p(\text{cm}^2/\text{s})$	10,35	5,175	5,175	5,175	5,175
$L_n(\text{cm})$	$1,21 \times 10^{-3}$	$3,35 \times 10^{-3}$	$3,23 \times 10^{-3}$	$3,2 \times 10^{-3}$	$4,44 \times 10^{-4}$
$L_p(\text{cm})$	$8,31 \times 10^{-5}$	$1,64 \times 10^{-4}$	$1,64 \times 10^{-4}$	$1,64 \times 10^{-4}$	$5,87 \times 10^{-5}$
$S_{n,p}(\text{cm/s})^*$	5000	$8 \times 10^4$	$1 \times 10^5$	$1 \times 10^5$	$1 \times 10^6$

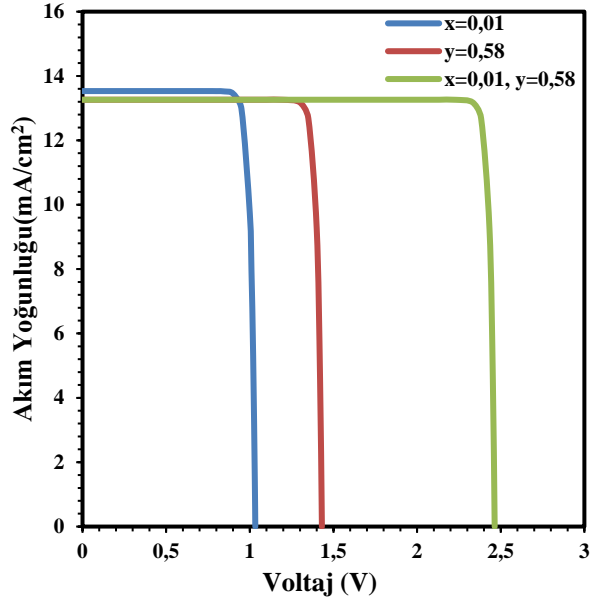
#### 4.4 İki Eklemlı Ga<sub>1-y</sub>In<sub>y</sub>P/Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As Güneş Hücre Performansı

##### 4.4.1 Modellenen Güneş Hücrelerinin J-V Karakteristiği

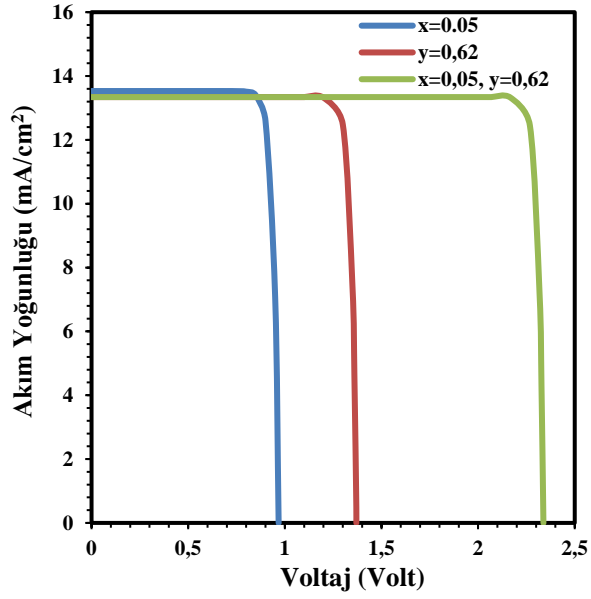
İki eklemlı Ga<sub>1-y</sub>In<sub>y</sub>P/Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As güneş hücresi için In içerikleri sırasıyla, x=0, 0,01, 0,05 ve 0,30 ve y=0,58, 0,58, 0,62, 0,72 olmak üzere dört adet güneş hücresi modellendi. Bu güneş hücrelerinin kısa devre akım yoğunluğu (J<sub>sc</sub>) ve açık devre voltajı (V<sub>oc</sub>) değerleri 300K'de AM0 ve AM1.5G güneş spektrumları referans alınarak hesaplandı. Modellenen iki eklemlı Ga<sub>0,42</sub>In<sub>0,58</sub>P/GaAs güneş hücresinin, alt ve üst hücrenin J-V grafiği detaylı olarak Şekil 4.6'da verildi. Ga<sub>0,42</sub>In<sub>0,58</sub>P/Ga<sub>0,99</sub>In<sub>0,01</sub>As güneş hücresinin, alt ve üst hücrenin J-V grafiği ayrı ayrı Şekil 4.7'de verildi. Ga<sub>0,42</sub>In<sub>0,58</sub>P/Ga<sub>0,95</sub>In<sub>0,05</sub>As güneş hücresinin, alt ve üst hücrenin J-V grafiği Şekil 4.8'de verildi. Ga<sub>0,28</sub>In<sub>0,72</sub>P/Ga<sub>0,7</sub>In<sub>0,3</sub>As güneş hücresinin, alt ve üst hücrenin J-V grafiği ayrı ayrı Şekil 4.9'da verildi. Grafiklerden de görüldüğu gibi, Ga<sub>1-y</sub>In<sub>y</sub>P üst hücrenin akım yoğunluğu Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As alt hücrenin akım yoğunluğundan çok az küçük olduğu için, monolitik kombinasyonu ile oluşturulan bu hücreler arasında akım uyumunun olduğu söylenebilir. Ga<sub>0,42</sub>In<sub>0,58</sub>P/GaAs, Ga<sub>0,42</sub>In<sub>0,58</sub>P/Ga<sub>0,99</sub>In<sub>0,01</sub>As, Ga<sub>0,38</sub>In<sub>0,62</sub>P/Ga<sub>0,95</sub>In<sub>0,05</sub>As ve Ga<sub>0,28</sub>In<sub>0,72</sub>P/Ga<sub>0,7</sub>In<sub>0,3</sub>As güneş hücrelerinin akım yoğunluğu üst hücre tarafından sınırlandırıldı.



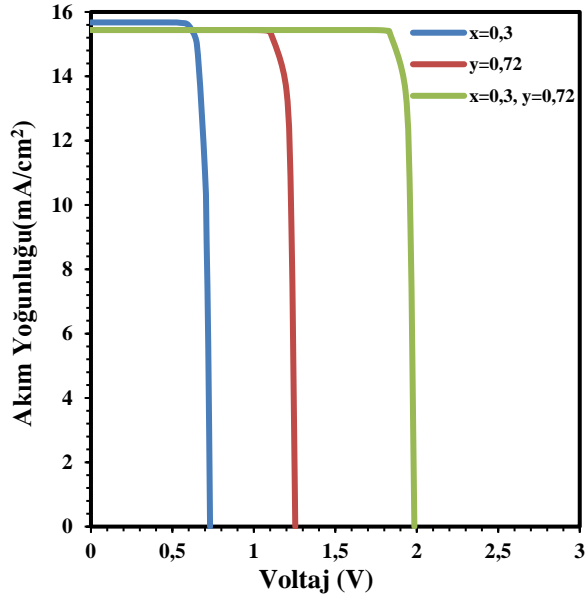
Şekil 4.6: Modellenen  $\text{Ga}_{0,42}\text{In}_{0,58}\text{P}/\text{GaAs}$  güneş hücresinin, alt ve üst hücrelerin akım uyumu.



Şekil 4.7: Modellenen  $\text{Ga}_{0,42}\text{In}_{0,58}\text{P}/\text{Ga}_{0,99}\text{In}_{0,01}\text{As}$  güneş hücresinin, alt ve üst hücrelerin akım uyumu.

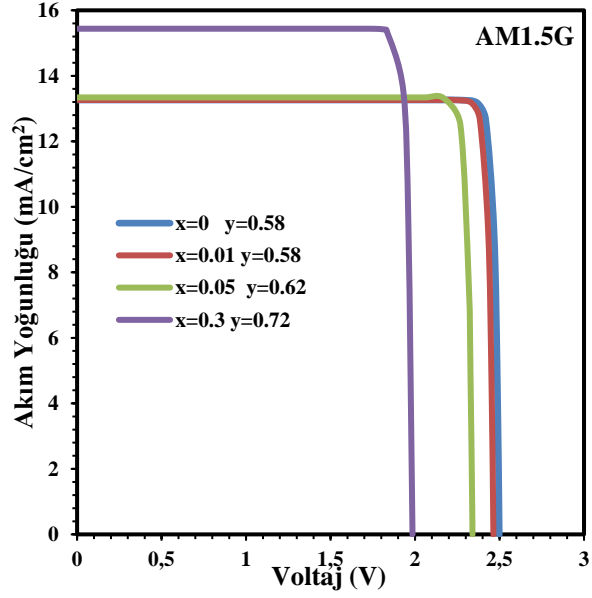


Şekil 4.8: Modellenen  $\text{Ga}_{0,38}\text{In}_{0,62}\text{P}/\text{Ga}_{0,95}\text{In}_{0,05}$  güneş hücresinin, alt ve üst hücrelerin akım uyumu.



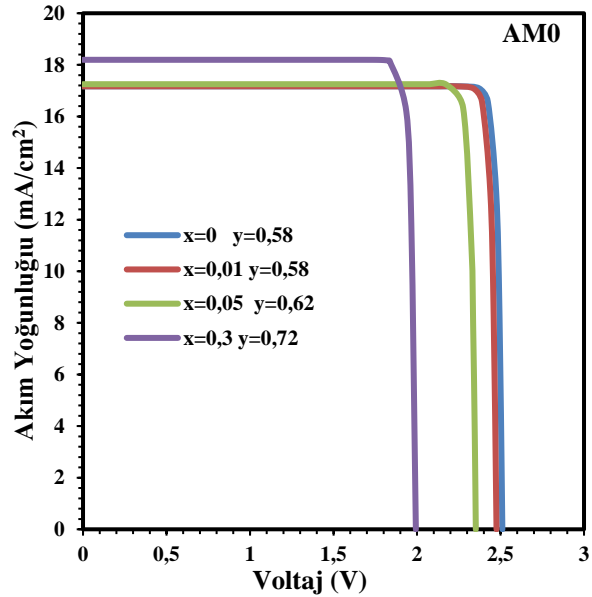
Şekil 4.9: Modellenen  $\text{Ga}_{0,28}\text{In}_{0,72}\text{P}/\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{As}$  güneş hücresinin, alt ve üst hücrelerin akım uyumu.

İki eklemli  $\text{Ga}_{1-y}\text{In}_y\text{P}/\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$  güneş hücrelerinin J-V karakteristiği 300K'de AM1.5G güneş spektrumu için detaylı olarak Şekil 4.10'da verildi. AM1.5G spektrumu için,  $\text{Ga}_{0,42}\text{In}_{0,58}\text{P}/\text{GaAs}$ ,  $\text{Ga}_{0,42}\text{In}_{0,58}\text{P}/\text{Ga}_{0,99}\text{In}_{0,01}\text{As}$ ,  $\text{Ga}_{0,38}\text{In}_{0,62}\text{P}/\text{Ga}_{0,95}\text{In}_{0,05}\text{As}$  ve  $\text{Ga}_{0,28}\text{In}_{0,72}\text{P}/\text{Ga}_{0,7}\text{In}_{0,3}\text{As}$  güneş hücrelerinin akım yoğunlukları sırasıyla, 13,26, 13,26, 13,91 ve 15,43  $\text{mA}/\text{cm}^2$  olarak hesaplandı. Grafiklerden de görüldüğü gibi Eşitlik (3.6), (3.7) ve (3.8) hesaplanan  $J_{sc}$  değeri  $\text{In}$  değeri artıkça azalan yasak enerji aralığına bağlı olarak artmaktadır. Eşitlik (3.20)'den yararlanılarak hesaplanan  $V_{oc}$  değerleri karşılaştırılırsa,  $\text{In}$  içeriği artıkça,  $V_{oc}$  değeri azalmaktadır. Örneğin  $\text{In}$  içeriği 0'dan 0,3'e artırıldığında,  $V_{oc}$  değeri 2,5V'dan 2V'da azaldı.



Şekil 4.10: İki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin AM0 spektrumundaki J-V grafiği.

İki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin J-V karakteristiği 300K'de AM0 güneş spektrumu için detaylı olarak Şekil 4.11'de verildi.  $Ga_{0,42}In_{0,58}P/GaAs$ ,  $Ga_{0,42}In_{0,58}P/Ga_{0,99}In_{0,01}As$ ,  $Ga_{0,38}In_{0,62}P/Ga_{0,95}In_{0,05}As$  ve  $Ga_{0,28}In_{0,72}P/Ga_{0,7}In_{0,3}As$  güneş hücrelerinin akım yoğunlukları sırasıyla, 17,16, 17,16, 17,25 ve 18,19 mA/cm<sup>2</sup> olarak bulundu. Bu değerlerden de görüldüğü  $J_{sc}$  değerleri In içeriği (hem x hem de y) artıkça artmaktadır.

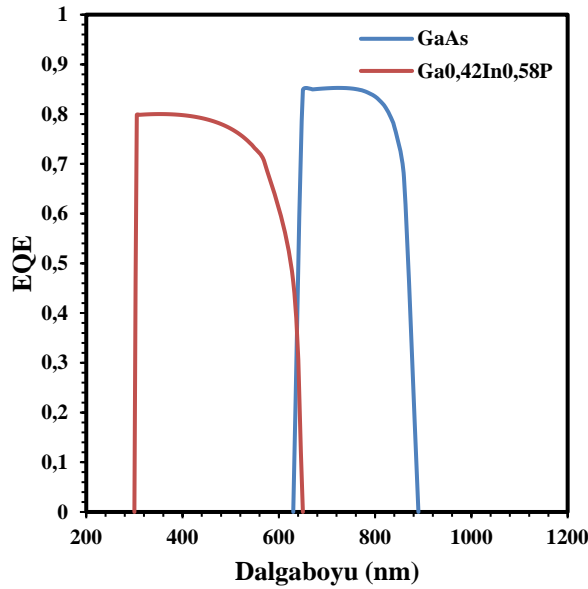


Şekil 4.11: İki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin AM0 spektrumundaki J-V grafiği.

#### 4.4.2 İki Eklemlı $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$ Güneş Hücresinin Harici Kuantum Verimliliği

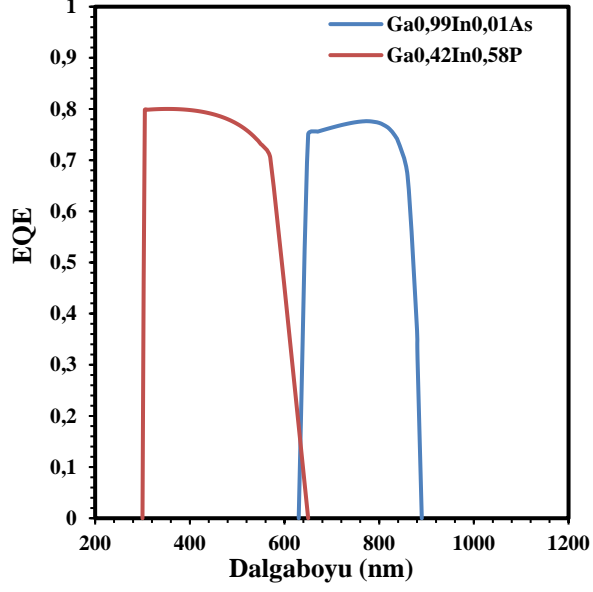
İki eklemlı  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücre tasarımı üst ve alt hücrede kullanılan yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığına bağılı olarak hücelere gelen uygun enerjiye sahip fotonların olduğu güneş spektrum bölgesi göz önüne alınır [124]. Güneş hücresinde foto-üretimine katkıda bulunan fotonların güneş spektrumunun hangi bölgesine denk geldiği harici kuantum verimi ile belirlenebilir. Bundan dolayı iki eklemlı  $Ga_{0,42}In_{0,58}P/GaAs$ ,  $Ga_{0,42}In_{0,58}P/Ga_{0,99}In_{0,01}As$ ,  $Ga_{0,38}In_{0,62}P/Ga_{0,95}In_{0,05}As$  ve  $Ga_{0,28}In_{0,72}P/Ga_{0,7}In_{0,3}As$  güneş hücrelerinin sırasıyla Eşitlik (3.13)'den yararlanarak harici kuantum verim değeri hesaplandı.

İki eklemlı  $Ga_{0,42}In_{0,58}P/GaAs$ , güneş hücresi Şekil 4.12'de görüldüğü gibi  $Ga_{0,42}In_{0,58}P$  üst hücre dalgaboyu 300 nm'den 630 nm'ye kadar ve GaAs alt hücre ise dalgaboyu 630 nm 860nm'ye kadar foto-akım üretir. İki eklemlı  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin In içerikleri artıka, EQE'nın altındaki toplam alan artmaktadır. Bu da, kısa devre akım yoğunluğunun arttığını ifade eder.



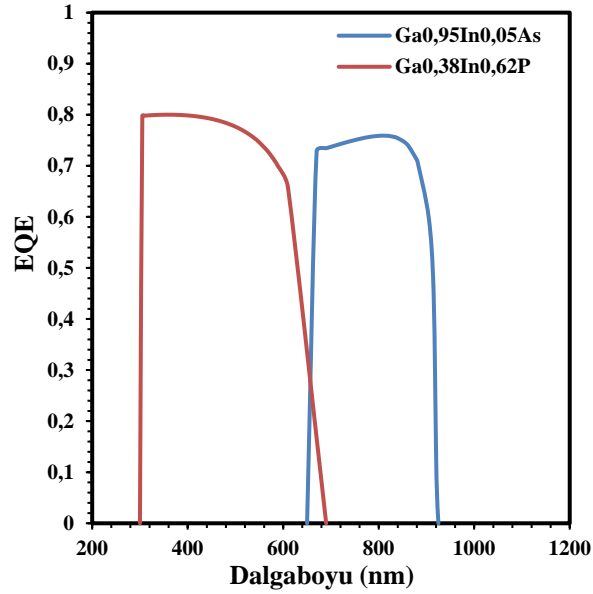
Şekil 4.12: İki eklemlı  $Ga_{0,42}In_{0,58}P/GaAs$  güneş hücresinin AM1.5G için, QE değeri.

İki eklemlı  $Ga_{0,42}In_{0,58}P/Ga_{0,99}In_{0,01}As$  güneş hücresi Şekil 4.13'de görüldüğü gibi  $Ga_{0,42}In_{0,58}P$  üst hücre dalgaboyu 300 nm ile 630 nm arasında ve  $Ga_{0,99}In_{0,01}As$  alt hücre ise dalga boyu 630 nm ile 890 nm arasında foto-akım üretir.



Şekil 4.13: İki eklemli Ga<sub>0,42</sub>In<sub>0,58</sub>P/Ga<sub>0,99</sub>In<sub>0,01</sub>As güneş hücresinin AM1.5G için, QE değerleri.

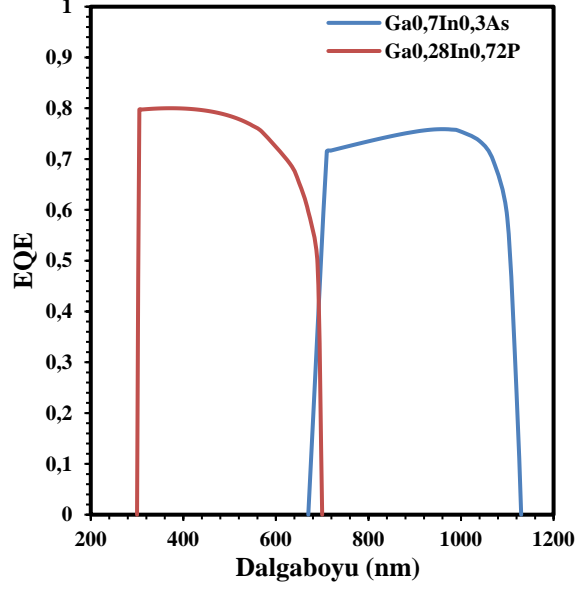
İki eklemli Ga<sub>0,38</sub>In<sub>0,62</sub>P/Ga<sub>0,95</sub>In<sub>0,05</sub>As güneş hücresi Şekil 4.14’de görüldüğü gibi Ga<sub>0,38</sub>In<sub>0,62</sub>P üst hücre 300 nm ile 650 nm dalgaboyu arasında ve Ga<sub>0,95</sub>In<sub>0,05</sub>As alt hücre ise 650 nm ile 925 nm dalgaboyu arasında foto-akım üretir.



Şekil 4.14: İki eklemli Ga<sub>0,38</sub>In<sub>0,62</sub>P/Ga<sub>0,95</sub>In<sub>0,05</sub>As güneş hücresinin AM1.5G için, QE değerleri.

İki eklemli Ga<sub>0,28</sub>In<sub>0,72</sub>P/Ga<sub>0,7</sub>In<sub>0,3</sub>As güneş hücresi Şekil 4.15’de görüldüğü gibi Ga<sub>0,28</sub>In<sub>0,72</sub>P üst hücre 300 nm ile 690 nm dalgaboyu arasında ve Ga<sub>0,7</sub>In<sub>0,3</sub>As alt hücre ise 690 nm ile 1120 nm dalgaboyu arasında foto-akım üretir.





Şekil 4.15: İki eklemli  $Ga_{0,28}In_{0,72}P/Ga_{0,7}In_{0,3}As$  güneş hücrelerinin AM1.5G için, QE değerleri.

Şekil 4.12, Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de görüldüğü gibi, iki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücresinin üst hücreyi oluşturan  $Ga_{1-y}In_yP$  malzemenin In içeriği arttıkça, görünür bölgede soğurduğu kısım artmaktadır. Alt hücreyi oluşturan  $Ga_{1-x}In_xAs$  malzemenin In içeriği arttıkça, yakın kızıl ötesindeki fotonlar soğrulur. Bundan dolayı In içeriği arttıkça daha fazla foton soğrulduğundan, güneş hücresinin ürettiği foto-akım artar.

#### 4.4.3 İki Eklemli $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$ Güneş Hücrelerinin Verim Değerlerinin Karşılaştırılması

İki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin In içeriklerine göre, bulunan akım yoğunluklarından ve açık devre voltajları kullanılarak, Eşitlik (3.21)’den yararlanılarak, tüketim verim değerleri hesaplandı. Güneş hücreleri için teorik olarak hesaplanan elektriksel parametreler, Tablo 4.5’de verildi. İki eklemli güneş hücrelerinin, In içeriği arttıkça, azalan yasak enerji aralıklarına bağlı olarak,  $J_{sc}$  değeri, minimum düzeyde artarken  $V_{oc}$  değeri azalış göstermektedir. Bu durumda güneş hücrelerin tüketim veriminin, In içeriğine bağlı olarak azalmasına neden olur. Bu azalış, verim değerinin  $V_{oc}$  değerindeki azalış ile kontrol edildiğini gösterir [125]. Tablo 4.5’in son iki sütununda verim değerlerinde, (1-güneş ile 300-güneş arasında)

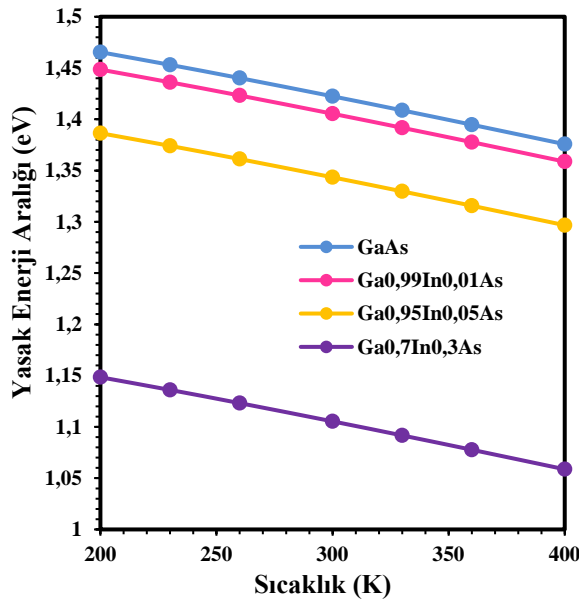
bir karşılaştırma yapıldığında, güneş hücrelerinin 300-güneş de verim değerlerinde %12,6'lık bir artış olduğu görülmektedir.

**Tablo 4.5:** Güneş hücrelerinin teorik olarak hesaplanan elektriksel parametreleri.

Güneş Hücreleri	AM0			AM1.5G			
	$J_{sc}$	$V_{oc}$	$\eta$ (%)	$J_{sc}$	$V_{oc}$	$\eta$ (%)	$\eta$ (%) (x300)
SCs-1	17,16	2,51	30,04	13,26	2,49	31,24	35,11
SCs-2	17,16	2,47	29,60	13,26	2,46	30,78	34,64
SCs-3	17,25	2,35	28,19	13,91	2,33	29,30	33,25
SCs-4	18,19	1,99	26,96	15,43	1,98	28,53	33,04

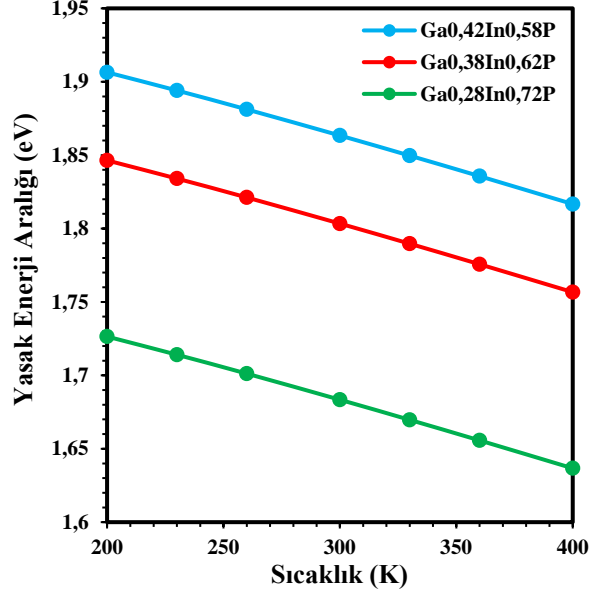
#### 4.5 İki Eklemlı $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$ Güneş Hücrelerine Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi

İki eklemlı  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücreleri sıcaklık değişiminin etkisi ile elektriksel parametrelerinin ( $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$  ve  $\eta$ ) üzerindeki değişimler incelendi. Bunun için güneş hücreleri 200 ile 400K arasında değişen sıcaklığa maruz bırakılarak,  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$  ve  $\eta$  değerleri teorik olarak hesaplandı. Öncelikli olarak iki eklemlı güneş hücresinde kullanılan  $Ga_{1-x}In_xAs$  yarıiletken malzemenin yasak enerji aralıklarının ( $E_g$ ) sıcaklıkla değişimi Eşitlik (3.24) kullanılarak hesaplandı. Şekil 4.16'da  $Ga_{1-x}In_xAs$  malzemenin yasak enerji aralığının sıcaklıkla değişim grafiği verildi. Sıcaklık artıkça, yasak enerji aralığının azaldığı grafikten görülmektedir.



**Şekil 4.16:**  $Ga_{1-x}In_xAs$  yarıiletken malzemenin  $E_g$  değerlerinin sıcaklık göre değişimi.

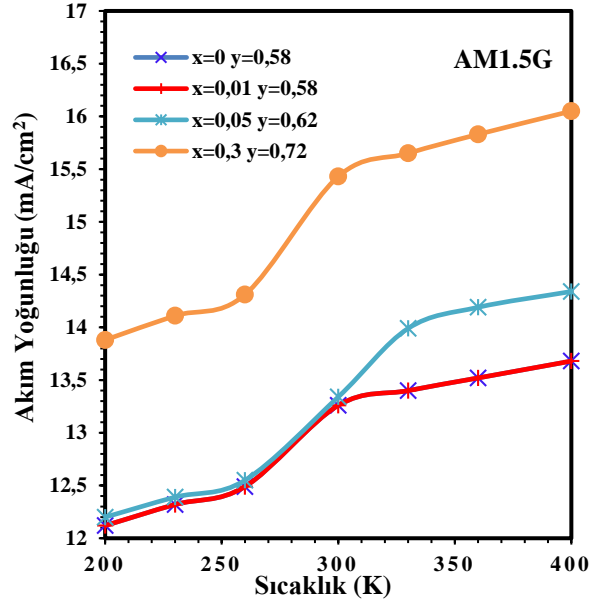
$Ga_{1-y}In_yP$  yarıiletken malzemenin yasak enerji aralıklarının ( $E_g$ ) sıcaklıkla değişimi Eşitlik (3.24) kullanılarak hesaplandı. Şekil 4.17’de  $Ga_{1-y}In_yP$  malzemenin yasak enerji aralığının sıcaklıkla değişim grafiği verildi. Sıcaklık arttıkça, yasak enerji aralığının azaldığı grafikten görülmektedir.



Şekil 4.17:  $Ga_{1-y}In_yP$  yarıiletken malzemenin  $E_g$  değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

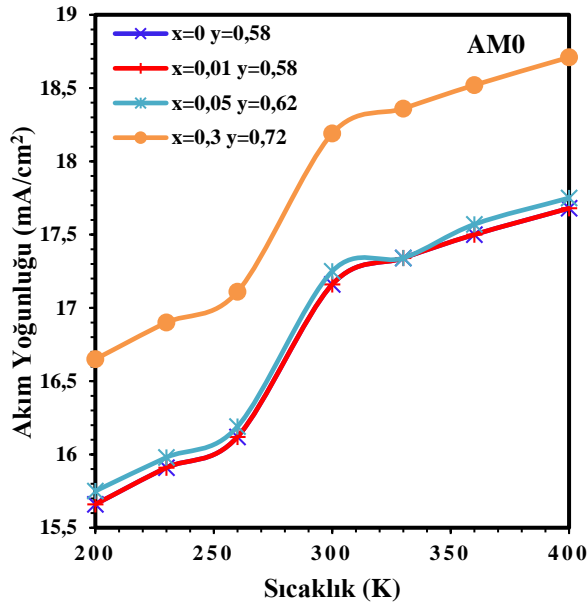
Güneş hücrelerinin kısa devre akım yoğunluğu, Eşitlik (3.7) ve (3.8)’den görüldüğü gibi, hücrelerde kullanılan yarıiletkenin yasak enerji aralığı ile ilişkili olan soğurma katsayısına bağlıdır. Sıcaklığın artması spektrumdaki optik soğurma katsayısının genişlemesi ile hücrenin yasak enerji aralığı daralır [126]. Böylece daralan yasak enerji aralığı daha fazla elektron-deşik çifti üretilerek akıma katkı sağlar ve bu da  $J_{sc}$  değerinin artmasına neden olur.

Şekil 4.18’de iki eklemlerli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin AM1.5G güneş spektrumu altında, hesaplanan  $J_{sc}$  değerlerinin sıcaklığa bağlı çizilen grafikleri verildi. Hücrelerin sıcaklığı arttıkça beklenildiği gibi, kısa devre akım yoğunlukları artmaktadır.



Şekil 4.18: İki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin AM1.5G için  $J_{sc}$ 'ye sıcaklık etkisi.

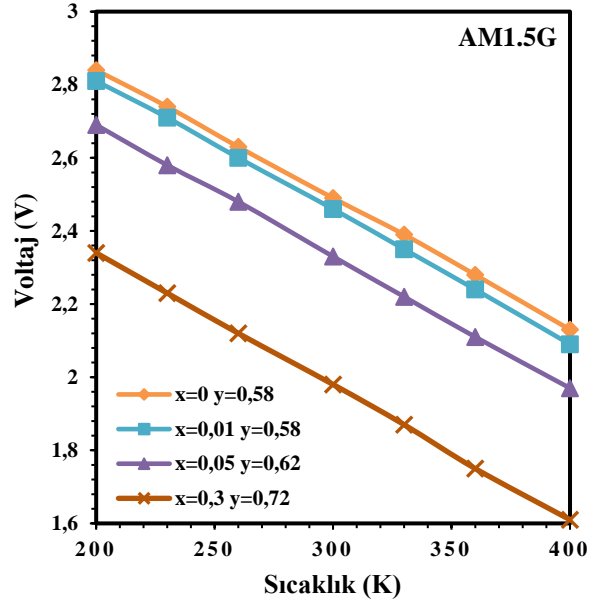
AM0 güneş spektrumu altında, iki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin hesaplanan  $J_{sc}$  değerlerinin sıcaklığa bağlı çizilen grafikleri Şekil 4.19'da verildi. Grafikten görüldüğü gibi artan sıcaklık ile azalan yasak enerji aralığına bağlı olarak hücrelerin kısa devre akım yoğunlukları artmaktadır.



Şekil 4.19: İki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin AM0 için  $J_{sc}$ 'ye sıcaklık etkisi.

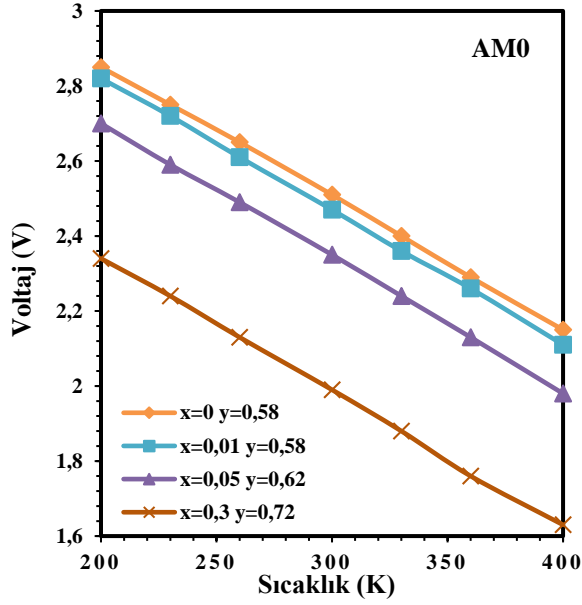
İki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin AM1.5G güneş spektrumu altındaki, 200K ile 400K arasında değişen sıcaklıktaki,  $V_{oc}$  değerlerinin

değişimi, Şekil 4.20’de verildi. Artan sıcaklık değerleri için,  $V_{oc}$  değerleri doğrusal olarak azalmaktadır.  $V_{oc}$  değerindeki azalış,  $J_{sc}$  değerindeki artıştan daha fazla olmasından dolayı, artan sıcaklık değerleri güneş hücre performansında olumsuz bir etkisi olduğu görülmektedir.



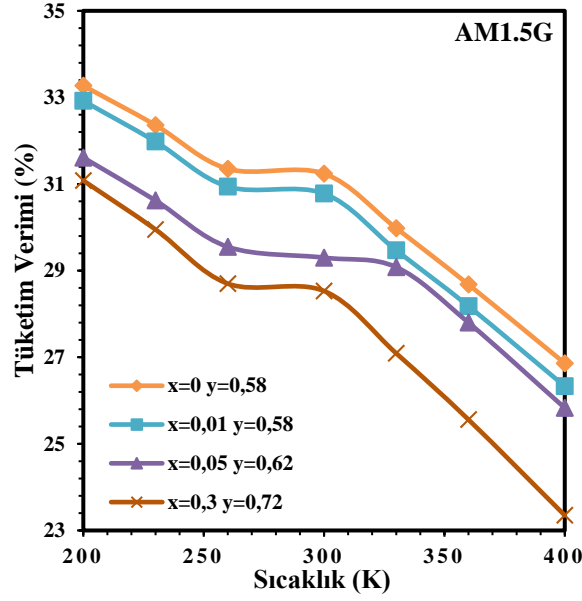
Şekil 4.20: İki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin AM1.5G için  $V_{oc}$ 'a sıcaklık etkisi.

Sıcaklık aralığı 200K ile 400K arasında değiştirilerek iki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin AM0 güneş spektrumu altında,  $V_{oc}$  değerlerinin değişimi, Şekil 4.21’de verildi. Grafikten de görüldüğü gibi artan sıcaklık değerlerinde,  $V_{oc}$  değerleri doğrusal olarak azalmaktadır.



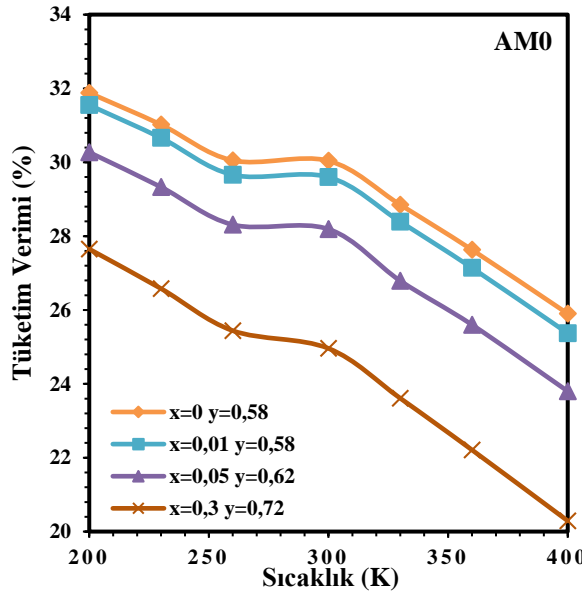
Şekil 4.21: İki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin  $V_{oc}$ 'un sıcaklığa göre değişimi.

Sıcaklık değişimine göre hesaplanan  $J_{SC}$  ve  $V_{oc}$  değerlerine göre, tüketim verimleri hesaplandı. AM1.5G güneş spektrumu altında, iki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin sıcaklığa bağlı verim değerlerinin grafiği Şekil 4.22'de verildi. Bu grafikten de görüldüğü gibi artan sıcaklık ile hücrelerin verim değerlerinde azalış olmaktadır. Artan sıcaklık ile daralan yasak enerji aralığına bağlı olarak, akım yoğunluğu artarken, voltaj değeri azalmaktadır [127]. Voltaj değerindeki azalış, akım yoğunluğu değerindeki artıştan daha büyüktür ve buna bağlı olarak, güneş hücresinin verimi artan sıcaklık ile azalır [128,129].



Şekil 4.22: İki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin AM1.5G için  $\eta$ 'ye sıcaklık etkisi.

AM0 güneş spektrumu altında, iki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin sıcaklığa bağlı verim değerlerinin grafiği Şekil 4.23'de verildi. Bu grafikten de görüldüğü gibi artan sıcaklık ile hücrelerin verim değerlerinde azalış olmaktadır.



Şekil 4.23: İki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin AM0 için  $\eta$ 'ye sıcaklık etkisi.

Şekil 4.22 ve 4.23'de görüldüğü gibi iki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin 300K üzerindeki sıcaklıklarda verim değeri azalırken, 300K'den daha

düşük sıcaklıklarda, verim değeri artmaktadır. Düşük sıcaklıklarda, elektron-fonon etkileşimlerinin zayıflaması ile elektron tuzaklarının minimum olmasından dolayı, fononlar malzemenin optik karakterizasyonunu etkiler [13].

İki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin 200, 300 ve 400 K'de performans değerleri ayrıntılı olarak Tablo 4.6'da verildi. Tablodan da görüldüğü gibi,  $J_{sc}$  ve  $V_{oc}$  değerleri AM0 spektrumunda AM1.5G spektrumuna göre daha büyüktür. AM0 spektrumunda  $J_{sc}$  ve  $V_{oc}$  değerlerinin büyük olmasına rağmen, verim değeri düşüktür. Bunun sebebi ise AM0 ( $1353 \text{ W/m}^2$ ) spektrumunun radyasyon yoğunluğunun AM1.5G ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) radyasyon yoğunluğundan daha büyük olmasıdır.

**Tablo 4.6:** İki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin performans değerleri.

T(K)	Güneş Hücreleri	AM0			AM1.5G		
		$J_{sc}$	$V_{oc}$	$\eta(\%)$	$J_{sc}$	$V_{oc}$	$\eta(\%)$
200	SCs-1	15,66	2,85	31,88	12,12	2,84	33,27
	SCs-2	15,66	2,82	31,55	12,12	2,81	32,92
	SCs-3	15,75	2,70	30,27	12,20	2,69	31,61
	SCs-4	16,65	2,34	27,65	13,88	2,34	31,08
300	SCs-1	17,16	2,51	30,04	13,26	2,49	31,24
	SCs-2	17,16	2,47	29,60	13,26	2,46	30,78
	SCs-3	17,25	2,35	28,19	13,34	2,33	29,33
	SCs-4	18,19	1,99	24,96	15,43	1,98	28,53
400	SCs-1	17,68	2,15	25,90	13,68	2,13	26,86
	SCs-2	17,68	2,11	25,37	13,68	2,09	26,33
	SCs-3	17,75	1,98	23,80	14,34	1,97	25,83
	SCs-4	18,71	1,63	20,29	16,05	1,61	23,35

Bu çalışma, tasarlanan iki eklemli  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin İndiyum (In) içeriklerine göre, elektriksel parametrelerinin ( $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$  ve  $\eta$ ) optimizasyonu ile ilgilidir. Monolitik güneş hücre yapılarının GaAs alttaş ile örgü ve akım uyumlu epitaksiyel büyütülmelerinde yol göstermeyi amaçlamaktadır. Tasarlanan bu güneş hücreleri mekanik entegrasyon veya tasarlanan güneş hücresinin alt hücresinden daha küçük yasak enerji aralığına sahip hücreye yapıştirılarak, tünel eklemli hibrit güneş hücreleri üretilebilir [130]. Buna ek olarak, düşük maliyetli güneş hücrelerinin büyütülmesi için, Si gibi GaAs'den daha uygun olan alttaş üzerine



epitaksiyel kaldırma tekniği ile aktarılabilir [131,132]. Bu teknik için hücre yapısı, GaAs alttaş üzerine ters çevrilmiş olarak bağlandıktan sonra büyütölür ve böylece alttaş diğer güneş hücrelerinde kullanılabilir. Bu prosedürde, tasarlanan güneş hücreleri, plastik alttaş gibi düşük maliyetli, III-V monokristal ince film güneş hücrelerin üretimi için esnek alttaş üzerine yapıştırılır [133]. Bu tip güneş hücreleri, hafif ve yüksek tüketim verimine sahip oldukları için, hava ve uzay araçlarında tercih edilmesi beklenmektedir.

## 5. KULLANILAN YÖNTEMLER VE DENEYSEL SİSTEMLER

Bu tez çalışmasında geliştirilen tek eklemlı GaAs ve iki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücre yapıları MBE yöntemi ile büyütüldü. MBE yöntemi, güneş hücre yapılarının yüksek kalitede büyütülmesine olanak sağlayan kristal büyütme tekniğidir. MBE sistemi ile büyütülen güneş hücre yapılarının Yüksek Çözünürlüklü X-ışınları Kırınım yöntemi (HR-XRD) ile yapısal analizi ve Fotoluminesans (PL) ölçüm sistemi ile de optik analizi yapıldı. Daha sonra güneş hücrelerinin elektriksel parametrelerini değerlendirmek için hücre fabrikasyonları gerçekleştirildi. I-V ölçüm sisteminde karanlık ve AM1.5 güneş simülatörü altında aydınlık akım-gerilim grafikleri elde edilerek güneş hücrelerinin elektriksel karakterizasyonları yapıldı. Fabrikasyonu tamamlanan güneş hücresinin verim değerlerini artırmak için püskürtme sisteminde yansıma önleyici kaplama yapıldı. Yansıma önleyici kaplamanın optik geçirgenlik ve yansıma spektrumları UV-VIS spektrometresinde belirlendi.

### 5.1 Güneş Hücresi Büyütme Teknikleri

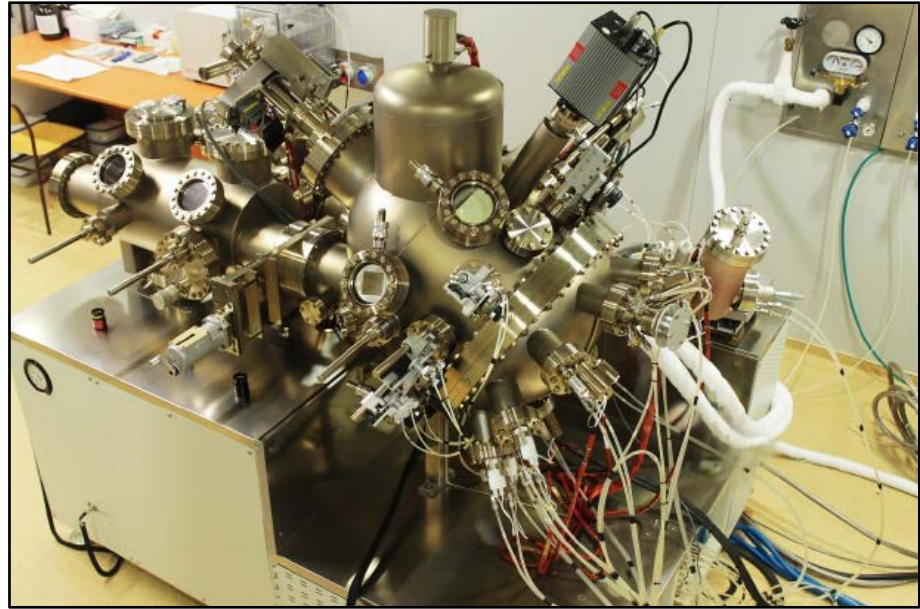
#### 5.1.1 Moleküler Demet Epitaksi (MBE) Yöntemi

MBE sistemi, yüksek kaliteli yarıiletken malzemelerin büyütülmesine imkân vermesinden dolayı 1970'lerden günümüze kadar yaygın olarak kullanılmaktadır [134]. Günümüz çağında MBE sistemleri, bilgisayar yardımıyla büyütme parametreleri kontrol edilebildiğinden, yüksek performanslı aygıtlar için tek kristal ince film yarıiletken yapıların üretimine imkân vermektedir. Bu yapılardan üretilen ileri teknolojiye sahip olan aygıtlar, günlük hayatımızın birçok alanında yaygın olarak kullanılmaktadır.

MBE, ultra yüksek vakum ( $10^{-8}$ - $10^{-11}$  Torr) altında ince filmlerin büyütülmesinde kullanılan bir vakum buharlaştırma tekniğidir. MBE tekniği ile ultra yüksek vakum (UHV) altında büyütülen numuneler, tek kristal özelliğine sahiptir.

MBE tekniği,  $1\mu\text{m}/\text{sa}$ 'lık kristal büyütme oranına sahiptir [135]. Böylece, büyütülecek numunelerin katkı ve birleşme oranları belirlenerek, yüksek performanslı aygıt yapılarının üretilmesine olanak sağlar [136]. Buna ek olarak, bu oranların ayarlanmasında, MBE sisteminin hızlı hareket eden kaynak kesicilere sahip olması da önemli bir faktördür. MBE sisteminde büyütme sıcaklığının düşük olması, alttaş üzerine bytlen tabakalar arasında oluşabilecek difüzyonları en aza indirmek ve soğuma sürecinde ısıl gerilmelerin oluşumunu azaltmaktadır. [137]. MBE tekniğinin diğer avantajlarından biri de, Yüksek Enerjili Elektronların Kırınımının Yansıması (RHEED) ve Auger Elektron Spektroskopisi (AES) gibi sistemler eklenerek, bytlen tabakaların yapısal ve kimyasal analizlerinin büyütme sürecinde yapılabilmesidir.

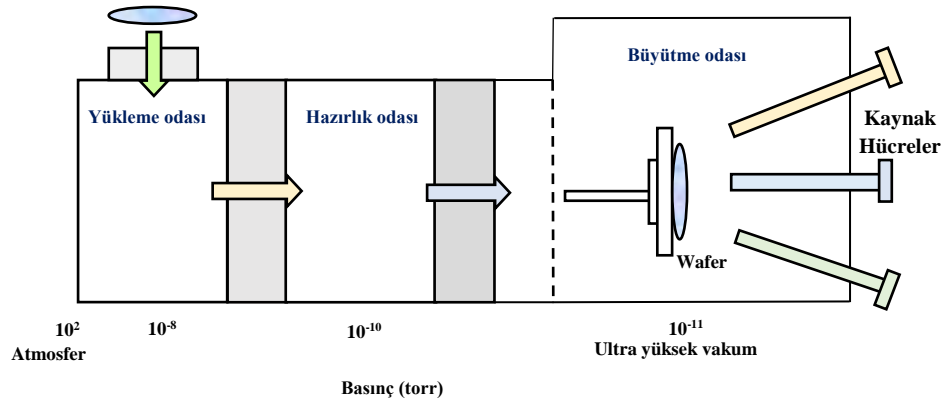
Gazi Fotonik Araştırma ve Uygulama Merkezi (Gazi-Fotonik) bünyesinde bulunan ve bu tez çalışmasında geliştirilen güneş hücre yapılarının büyütülmesinde kullanılan VG Semicon V80H MBE sistemi Şekil 5.1'de grlmektedir. MBE sisteminde, IIIA gurubundan Al, In, Ga ve VA grubundan ise P, As, N ve p-tipi ve n-tipi katkı için sırasıyla, Be ve Si kaynakları mevcuttur.



**Şekil 5.1:** Gazi-Fotonik'de kurulu olan VG-Semicon V80H MBE sistemi.

MBE sistemi genel olarak, yükleme odası, hazırlık odası, büyütme odası, transfer mekanizması ve bilgisayara bağlı olan elektronik kontrol ünitesinden

meydana gelmektedir. MBE sisteminin yükleme, hazırlık ve büyütme odalarının şematik gösterimi Şekil 5.2’de görülmektedir.



Şekil 5.2: MBE sisteminin vakum odalarının şematik gösterimi.

Yükleme odası alttaşın sisteme ilk alındığı yerdir. Bu oda turbo moleküler pompa yardımıyla  $10^{-8}$  Torr'luk vakuma sahiptir. Böylece diğer odalar ile vakum bütünlüğü korunmuş olunur. Bu oda da alttaşların konulduğu 5 bölmeli ve asansörlü kaset sistemi vardır. Bu sayede, kasete birkaç alttaşın aynı anda yüklenebilmesi, sistemin atmosfere devamlı açılmasını engelleyerek, sistem içerisinde oluşabilecek kirlilikleri minimuma indirir. Bu kasete yerleştirilen alttaşlar asansör yardımıyla, hazırlık odasına transfer edilir.

Hazırlık odası, büyütme odasına transfer edilmeden önce alttaşın hazırlanması ve saklanması için kullanılan odadır. Bu oda da alttaş  $450^{\circ}\text{C}$ 'de ısıtılarak su ve yağ gibi buharlaşabilen kirliliklerden temizlenir. Bu oda iyon pompası ile  $10^{-10}$  Torr'luk vakuma sahiptir.

Büyütme odası, alttaşın yükleme ve transferini sağlayan hareketli magnetler, alttaş ısıtıcı, homojenlik oluşturması için alttaş döndürücü, RHEED sisteminin bileşenleri, kaynak hücreler, akı yoğunluğu hakkında bilgi veren iyon sayacı, kaynak kesiciler, yalıtım kontrolünde kullanılan dört kutuplu kütle spektrometresi ve gözlem pencerelerinden oluşmaktadır. Bu oda iyon pompası, soğuk pompası, titanyum süblimleşme pompası ve turbo moleküler pompa yardımıyla  $10^{-11}$  Torr'luk UHV altına alınır. Ayrıca, büyütme odasının dış kısmı sıvı azot ile soğutulur ve böylece soğutulan yüzeyler tuzaklama yardımı ile vakumun artmasına yardımcı olur. MBE sisteminde, alttaşın döndürülmesi, kaynak kesicilerin hareketi, ısıtıcı ve kaynakların

sıcaklıkları bilgisayara bağlı olan elektronik kontrol ünitesinden sürekli olarak kontrol altında tutulur.

RHEED cihazı, MBE sisteminde en önemli kısımlardan biridir. Bu cihaz, 15 keV'luk elektron tabancası ve oluşan deseni gözlemlemek için fosfor ekranından oluşmaktadır. Bu elektron tabancasından çıkan elektron demeti, doğrudan örnek üzerine birkaç derecelik açıyla düşer. Böylece birkaç derecelik açıyla numune üzerine gelen elektronlar simetrik olarak yerleştirilmiş fosfor ekran üzerinde kırınım deseni oluşturur. Bu kırınım deseni, büyütme işlemi yapılmadan önce ve büyütme işlemi esnasında, yüzeyin durumu hakkında bilgi verir.

## 5.2 Güneş Hücresi Karakterizasyon Teknikleri

### 5.2.1 Yüksek Çözünürlüklü X-ışını Kırınımı (HR-XRD)

X-ışını, nötron ve elektron kırınımı kristal yapı analizlerinde kullanılan üç önemli yöntemdir. Kırınım olayı, belirli bir düzlemden saçılan dalgaların yapıcı girişim meydana getirmesidir. Bu üç teknik arasında kristal yapı analizde atomik yerleşim, X-ışınlarının dalga boyu olan  $\sim 10^{-10}$  m ( $1\text{\AA}$ ) mertebesinde olduğundan, X-ışınları kırınım (XRD) tekniği tercih edilmektedir. XRD tekniği, kristaldeki örgü parametreleri ile aynı dalga boyuna sahip X-ışınlarının kırınımına uğraması olayıdır. XRD tekniğinin çalışma prensibi Bragg Yasası temeline dayanmaktadır[138].

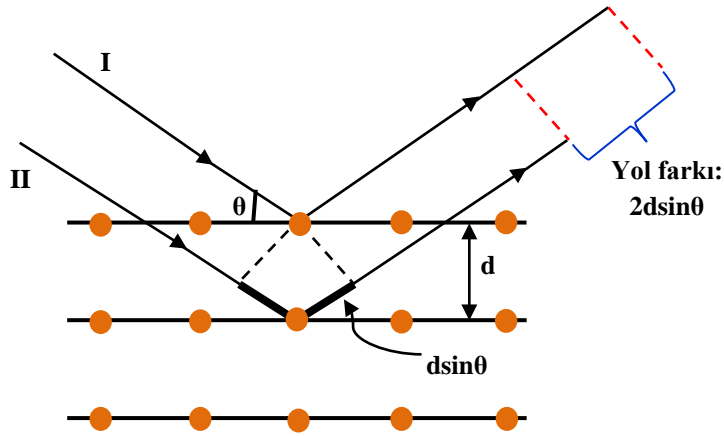
Kristal atomlarınca saçılmaya uğratılan ışınının, yapıcı girişim olayı gerçekleştirmelidir. Yapıcı girişim olayının gerçekleşmesi için Şekil 5.3'deki gibi bir diyagram olması gerekir. Yapıcı girişim, sadece yolları tam olarak  $\lambda$ ,  $2\lambda$  ve  $3\lambda$  gibi birbirinden farklı olan paralel ışınlar arasında gerçekleşir. Yani yol farkı  $n\lambda$ 'ye eşit olmalıdır. Bragg yasasının gerçekleşmesi için iki şart vardır [139]:

1-) Saçılma açılarının, başlangıçtaki hüzmünün  $\theta$  gelme açısına eşit olması,

2-) II numaralı ışının I numaralı ışına göre  $2d\sin\theta$  kadar daha fazla yol alması gerekir. Bu şartlara göre Bragg yasası,

$$2d\sin\theta=n\lambda \quad (5.1)$$

eşitliği ile ifade edilir. Eşitlikteki  $d$ , düzlemler arası mesafe,  $\theta$ , gelme açısı,  $n$ , bir tamsayı ve  $\lambda$ , dalgaboyudur.



Şekil 5.3: Kübik bir kristal düzleminde X-ışını saçılması.

Bragg yasasına göre, kristal düzlemdeki atomların yerleşimi özdeş kabul edildiğinden, kırınım şartı sadece kristal düzlemler arasındaki  $d$  uzaklığına göre değişir. XRD tekniğinde, kullanılan X-ışınlarının dalgaboyu bilindiği için, bu teknik ile  $\theta$  açısı belirlenerek Eşitlik (5.1)'den düzlemler arasındaki  $d$  uzaklığı bulunur. XRD tekniği ile yapıdaki kristallerin örgü parametreleri belirlenerek, kristal yapıdaki atomların yerleri, atomlar arası uzaklık, simetri kusurları, tabaka kalınlıkları, bileşik yarıiletkenlerin  $x$  alaşım oranları ve ince filmlerde oluşan gerginlik gibi birçok konu hakkında bilgi sahibi olunur.

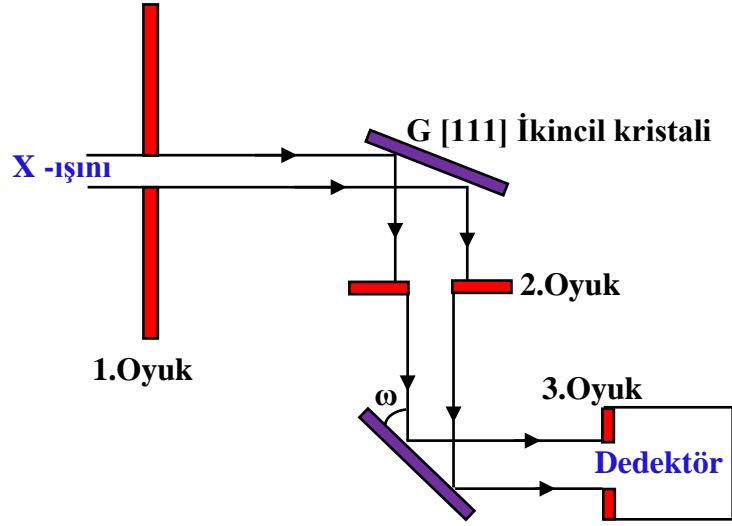
Kübik sistemlerde, düzlemler arasındaki mesafe ( $d$ ), örgü sabiti ( $a$ ) ile orantılı olup,

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (5.2)$$

eşitliği ile ifade edilir ve eşitlikteki  $h$ ,  $k$ , ve  $l$  miller indisleridir.

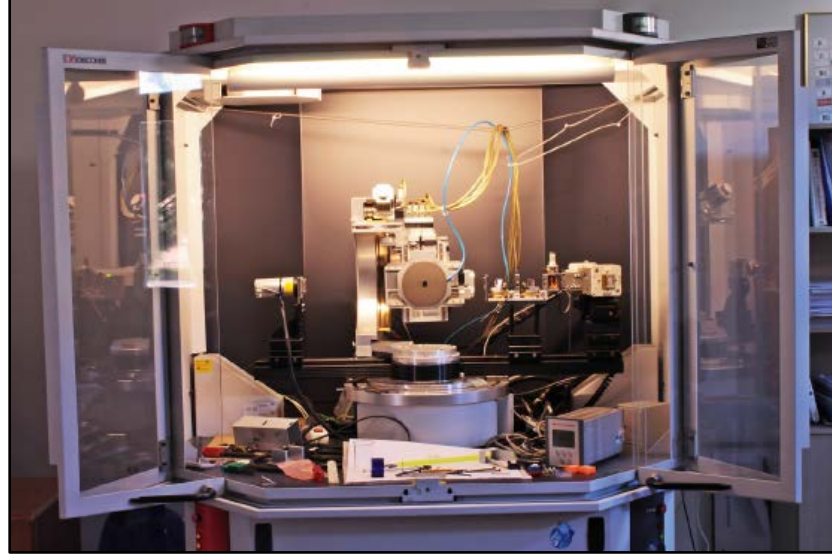
Çoklu yapıların XRD analizinde, çift ve dört kristalli monokromatör yaygın olarak kullanılmaktadır. X-ışınları Şekil 5.4'de görüldüğü gibi, ilk olarak monokromatördeki yüksek kaliteli bir kristale çarpması sonucu kırınıma uğramaktadır. Böylece kırınıma uğrayan X-ışınları demeti örnek numune üzerine düşer. Bu iki kristal düzlemdeki Bragg açıları eşit olduğunda dar bir kırınım deseni

oluştururlar. Kristal dar bir  $\omega$  açısı ile döndürüldüğünde, kırınan demet şiddeti kaydedilerek, kalite analiz (rocking) eğrileri elde edilir. Bu eğriler kristalin geniş aralıktaki yapısal dizilimi hakkında bilgi verir. Bu elde edilen bilgiler ışığında, yapıların tabakalar arasındaki kalınlık farklılıklarını, ince katman oluşturulmamış bölgeleri ve gerginlik bölgeleri belirlenebilir.



Şekil 5.4: Yüksek çözünürlüklü X-ışınları kırınım düzeneği.

Bu tez çalışmasında, Gazi-Fotonik bünyesinde bulunan Ge(022) yönelimli dört kristal monokromatöre ve  $\text{CuK}\alpha 1$  ( $1,540\text{\AA}$ ) X-ışını kaynağına sahip Bruker D8 Discover XRD cihazı kullanıldı. Cihazın genel görünümü Şekil 5.5’de görülmektedir. Bu cihaz yardımıyla geliştirilen güneş hücre yapılarının X-ışınları kırınım desenleri belirlendi. Elde edilen kırınım desenleri değerlendirilerek güneş hücre yapılarının yapısal analizleri yapıldı. Güneş hücre yapılarının kristal kalitesi hakkında bilgi edinildi.

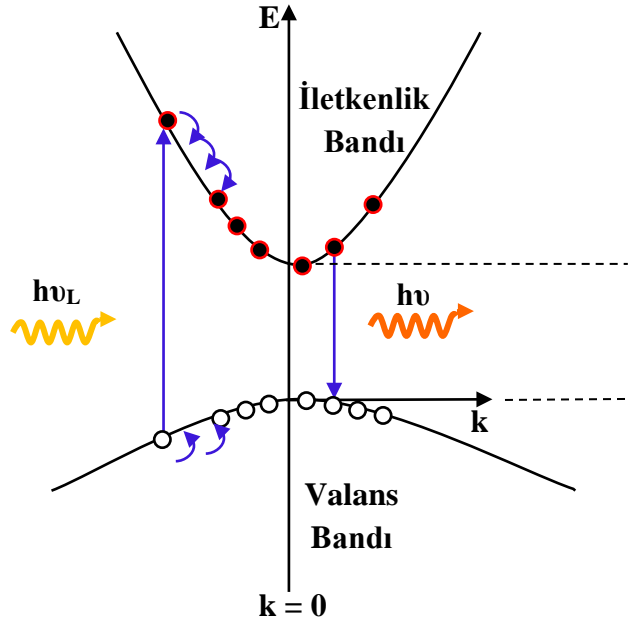


Şekil 5.5: XRD cihazının genel görünümü.

### 5.2.2 Fotolüminesans (PL)

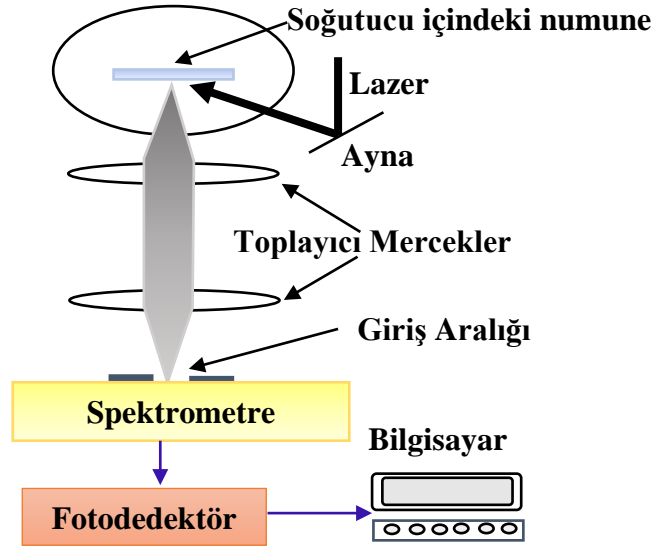
Fotolüminesans (PL) spektroskopisi, numuneye zarar vermeden yarıiletken malzemelerin tanı ve gelişimi için kullanılan deneysel bir tekniktir [100]. PL numunenin optik olarak uyarılması ile yarıiletken malzemeden görünür veya görünüre yakın ışınımın kendiliğinden yayınlanma (emisyon) sürecini içermektedir. Numune tek dalgaboyuna sahip optik uyarma kaynağı ile uyarılır. Optik uyarılma ile yarıiletken malzemeden kopan elektronlar valans bandından iletkenlik bandındaki yüksek uyarılma hallerine geçerler. Bu elektronlar, çok hızlı bir şekilde foton yayımlayarak enerji kaybettikleri için uzun süre bu yüksek uyarılma hallerinde bulunamazlar. Bu işlem Şekil 5.6'da görülen iletkenlik bandı içindeki kademeli geçişleri içermektedir. Buradaki her adım enerjideki fonon emisyonuna ve korunum yasalarını içeren momentuma karşılık gelir. Optik uyarılma kaldırıldığında, denge durumuna geçişte enerji farkına eşit ışığın yayılması ile elektronlar taban durumuna geri dönerler. Bu yayılan ışık odaklanıp, fotodedektör ile toplanır. Daha sonra fotodedektör sayesinde oluşan optik sinyal elektriksel sinyale çevrilir. Bu sinyal malzemenin lüminesans ışımaya karşılık gelmektedir. PL spektrumu, bu sinyalin dalgaboyuna karşılık şiddet grafiği çizilerek oluşturulur.





Şekil 5.6: Yarıiletkeni  $\nu_L$  frekansında uyardıktan sonra fotoluminesans sırasında oluşan geçişler.

Şekil 5.7’de fotoluminesans spektrumunun gözlenmesi için kullanılan deneysel düzenek verildi. Elde edilen bu spektrumun analizinden malzemenin kalitesi, yasak enerji aralığı ve ara yüzey pürüzlülüğü hakkında bilgi edinilir.



Şekil 5.7: PL sistemin deneysel düzeneği.

Gazi-Fotonik bünyesinde bulunan ve geliştirilen güneş hücrelerinin PL ölçümlerinde kullanılan Jobin Yvon Florog-550 sistemi ile 50 mW gücündeki He-Cd lazer sahip fotoluminesans sistemi Şekil 5.8’de verildi. PL ölçüm sistemi, iki

fotodedektör (morötesi görünür ve yakın kızılötesi bölgelerini dedekte edebilen), düşük sıcaklık ölçümlerinin gerçekleştirilmesinde kullanılan soğutucu, sıcaklık kontrol ünitesi, optik dalgaboyu seçici ve mekanik pompa donamından oluşmaktadır. Elde edilen PL spektrumu ile hücreleri oluşturan yarıiletken malzemelerin analizleri yapıldı.



Şekil 5.8: Fotoluminesans ölçüm sistemi.

### 5.3 Fabrikasyon Sistemleri

#### 5.3.1 Termal Buharlaştırma (Evaporasyon) Sistemi

Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen numunelerin üzerine Au ve Ti metali ve AuZn alaşımlı metal kontaklar, Gazi-Fotonik bünyesinde bulunan Şekil 5.9'da gösterilen BesTec marka vakum buharlaştırma sistemi ile oluşturuldu. Sistem dönebilen numune tutucuya sahiptir. Böylece uygulanan kaplama işleminin homojen bir katman oluşturulmasına olanak sağlar. Bu sistemde turbo moleküler pompa yardımı ile  $10^{-7}$  mbar başlangıç basıncına ulaşıldıktan sonra buharlaşma işlemi gerçekleşir. Sistemde, Au, Al, Ti, Pt ve Ni gibi metaller ve AuZn, AuGe ve AuNiGe gibi alaşımlar uygulanan elektriksel güç ile buharlaştırılarak numune yüzeyine kaplanabilmektedir.



Şekil 5.9: Termal buharlaştırma sistemi.

### 5.3.2 Dönel Kaplama Cihazı

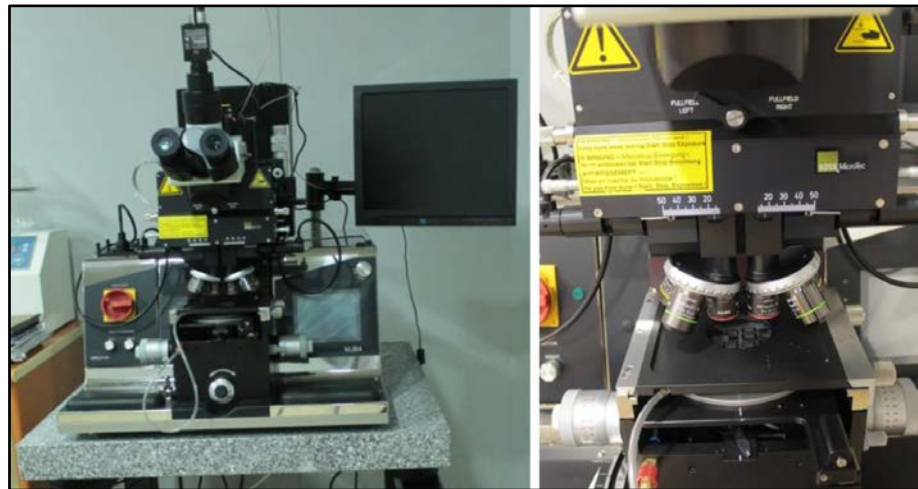
Bu tez çalışmasında üretilen güneş hücrelerinin litografi aşamasında gerekli olan foto-direnç (PR) kaplama işlemi, Gazi-Fotonik’de bulunan Şekil 5.10’da görülen dönel kaplama cihazı ile gerçekleştirildi. Bu cihaz numune yüzeyine foto-direnç (PR) gibi özel dalgaboyu duyarlılığına sahip olan malzemelerin damlatılıp, yüksek hızlarda döndürülerek kaplanmasını sağlar. Damlatılan malzemenin özelliğine bağlı olarak, cihazın dönme hızı 6000 rpm’e kadar arttırılabilir. Yüksek hızlarda dönme sırasında, numunelerin sabit tutulması vakum tutucu ile sağlanmaktadır.



Şekil 5.10: Dönel Kaplama Cihazı.

### 5.3.3 Maske Hizalama Sistemi

Gazi-Fotonik bünyesinde bulunan Şekil 5.11’de verilen Karl-Suss marka, Suss Microtech MJB4 model olan maske hizalama sistemi görülmektedir. Sistem 350 ile 450 nm arasındaki dalgalınlara sahip Hg-Ark lambaya (UV400) sahiptir. Maske ile numune uyumu sistemde bulunan mikroskop ile sağlanır. Sistemde kalınlığı 0,1 mm’den 0,7 mm’ye kadar, çapı 2”, 3” ve 100 mm dilimli numunelerin konulduğu yumuşak, sert ve vakum kontaklı tutucular vardır. Bu numune tutucular x, y ve z doğrultusunda hareket edebildiğinden hizalama işlemi gerçekleştirilir.



Şekil 5.11: Maske hizalama sistemi.

Maske hizalama sistemi ile güneş hücre yapılarının litografi aşamalarında uygun foto-maskeler kullanılarak, pozlama işlemi gerçekleştirilir. Pozlama, PR kaplı numuneyi belirli bir dalgaboyuna sahip olan UV ışığa maruz bırakılması olayıdır. Böylece foto-maske üzerinde bulunan desen numune yüzeyine aktarılır.

#### 5.3.4 Hızlı Isıl Tavlama (RTA) sistemi

Hızlı Isıl Tavlama (RTA) Sistemi, N ve Ar gibi çeşitli gaz ortamlarına sahip olan halojen lambalı ısıtıcı ile 1000°C gibi yüksek sıcaklıklara hızla ulaşabilen ve aniden soğumaya olanak sağlamaktadır. Tavlama işlemi, turbo moleküler pompa yardımıyla,  $10^{-8}$  mbar'lık vakum altında yapılmaktadır.

Gazi-Fotonik bünyesinde bulunan Hızlı Isıl Tavlama (RTA) Sistemi Şekil 5.12'de görülmektedir. Bu tez çalışmasında güneş hücre yapılarına oluşturulan metal kontaklarının omik özellik sağlanması için güneş fabrikasyonu tamamlanmış numuneler RTA sisteminde tavlandı.



Şekil 5.12: Hızlı ısıtılma (RTA) sistemi.

## 5.4 Yansıma Önleyici Oluşturma

### 5.4.1 Püskürtme Sistemi

Püskürtme tekniği, genellikle Argon (Ar) işlem gazı kullanılarak oluşturulan plazma ile hedef malzemeden (target) püskürtülen atomların veya moleküllerin alttaşa ince film biriktirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu teknik, yarıiletken, metal ve metal oksit hedeflerin kullanılarak çeşitli ince film üretilmesine olanak sağlar.

Püskürtme tekniği, reaktif ve reaktif olmayan püskürtme süreçlerini içerir. Reaktif püskürtme sürecinde, geliştirilen malzemeye bağlı olarak, biriktirme odasına Azot (N<sub>2</sub>) veya Oksijen (O<sub>2</sub>) gazı gönderilir. Bu gaz, moleküllerin alttaş üzerinde hedef malzemeden püskürtülerek alttaşa ulaşan atomların birbiriyle reaksiyonu sonucu birleşik ince film oluşturur.

Bu tez çalışmasında geliştirilen güneş hücresi yüzeyine yapılan yansıma önleyici kaplamalar Gazi-Fotonik bünyesinde bulunan Şekil 5.13’de verilen Bestec marka püskürtme sistemi ile gerçekleştirildi. Bu sistem giriş ve biriktirme odası olmak üzere iki vakum odasına sahiptir. Giriş odasında yükleme kasetliği ve ters püskürtme sistemi vardır. Biriktirme odası silindir biçimindedir ve silindirik koordinatlara göre harekete edebilen numune tutucu ve püskürtme kaynakları bulunmaktadır. Sistemde 2 adet RF ve 3 adet DC güç kaynağı vardır. Sistemin temel basıncı, yaklaşık olarak 10<sup>-8</sup> mbar’lık vakum oluşturabilmektedir.



Şekil 5.13: Bestec marka püskürtme sistemi.

#### 5.4.2 Morötesi-Görünür Bölge (UV-VIS) Spektroskopisi

Morötesi-görünür bölge (UV-VIS) spektroskopisi ile ışığın numuneden geçtikten sonra, numunenin geçirgenliği ve yansımaya özelliği incelenir. Güneş hücresi üzerine kaplanan yansımaya önleyicinin geçirgenlik değişimi Gazi-Fotonik bünyesinde bulunan Şekil 5.14’de verilen Perkin Elmer Lambda 2S spektrometresi kullanılarak belirlendi. Bu sistemde iki farklı numune tutucu, silikon diyot dedektör, halojen lamba ve döteryum lamba vardır.

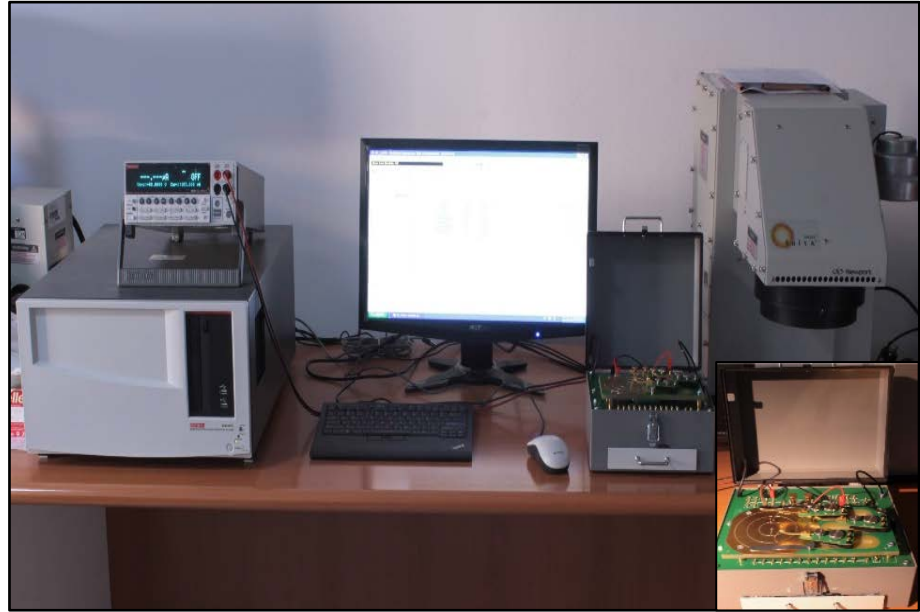


Şekil 5.14: UV-VIS spektrometresi.

## 5.5 Güneş Hücrelerinin Elektriksel Karakterizasyonu

### 5.5.1 Akım-Gerilim (I-V) Sistemi

Bu tez çalışmasında fabrikasyonları tanımlanan tek eklemlili ve iki eklemlili güneş hücrelerinin akım-gerilim (I-V) ölçümleri Gazi-Fotonik’de bulunan Şekil 5.15’de verilen Keithley 4200 I-V ölçüm sisteminde gerçekleştirildi. Bu sistem Keithley 2602B güç ölçüm ünitesine ve AM1.5 standardın da ölçüm yapan Newport Oriel Sol1A güneş simülatörüne sahiptir. Bu güneş simülatörü ölçüm esnasında, 1-güneş altındaki güneş radyasyon yoğunluğu  $1000 \text{ W/m}^2$  olacak şekilde kalibrasyonu sağlandı. Bu sistem ile malzemeye farklı gerilimler uygulanarak, malzemelerin doyum akımı, seri direnci, idealite faktörü ve öz direnç gibi birçok elektriksel parametreleri hakkında bilgi edinilebilir. Elde edilen veriler kullanılarak güneş hücrelerinin dolum faktörleri ve tüketim verimleri belirlenebilmektedir.



Şekil 5.15: I-V ölçüm sistemi.



## 6. GÜNEŞ HÜCRELERİNİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONLARI

### 6.1 Güneş Hücrelerinin Büyütülmesi

Bu tez çalışmasında geliştirilen tek eklemli GaAs ve iki eklemli GaInP/GaAs güneş hücre yapıları Gazi-Fotonik bünyesinde bulunan Vg-Semicon 80H katı kaynaklı MBE cihazı ile büyütüldü.

#### 6.1.1 Tek Eklemli GaAs Güneş Hücre Yapısının Büyütülmesi

Tek eklemli GaAs güneş hücre yapısı MBE tekniği ile büyütüldü. Büyütülen pn-eklem GaAs güneş hücre yapısı Şekil 6.1’de verildi. Epitaksiyel tabakaların kalitesini belirlemek için GaAs alttaş üzerine n-GaAs tampon tabakası büyütüldü. p-n- eklem GaAs tabakası büyütüldükten sonra üzerine gelen güneş ışınlarının hücre içine maksimum girmesini sağlamak için p-AlGaAs pencere tabakası büyütüldü. Hücre yüzeyinde oluşabilecek oksitlenmeyi önlemek ve kontakların omikleştirilmesi sürecinde alt katmanlara metal difüzyonu engellemek amacıyla pencere tabakası üzerine yüksek katkılı p+GaAs kep tabaka büyütüldü.

<b>p+GaAs (kep)</b>	<b>20 nm</b>	<b>GaAs hücre</b>
<b>p-AlGaAs (pencere)</b>	<b>30 nm</b>	
<b>p-GaAs</b>	<b>500 nm</b>	
<b>n-GaAs</b>	<b>3000 nm</b>	
<b>n+GaAs (tampon)</b>	<b>500 nm</b>	
<b>3" n-GaAs (100)</b>		

Şekil 6.1: Tek eklemli GaAs güneş hücre yapısı.

MBE sisteminde tek eklemli GaAs güneş hücre yapısı büyütülürken, şu adımlar takip edildi;

1-) (100) yönelimli n-GaAs alttaş üzerinde oluşabilecek oksit tabakasını kaldırmak için, kimyasal işlem uygulandı. Bu işlemten sonra, alttaş alkol ve DI-H<sub>2</sub>O ile yıkanıp, N<sub>2</sub> ile kurutuldu.

2-) Alttaş dış ortamda tutulmadan, hemen MBE sistemindeki yükleme odasına alındı.

3-) Yükleme odasındaki alttaş hazırlık odasına alınarak, 400°C’de 1,5 saat ısıtılarak, su ve yağ gibi buharlaşabilen kirliliklerden temizlendi.

4-) Alttaş büyütme odasına transfer edilerek, burada bulunan manipülatöre yerleştirildi.

5-) Sıvı azot paneli doldurulup, büyütme esnasında sıvı azot akışı sabit olacak şekilde ayarlandı.

6-) Tek eklemli GaAs güneş hücre yapısı büyütme sırasında kullanılacak olan Galyum (Ga), Arsenik (As), Alüminyum (Al), Silisyum (Si) ve Berilyum (Be) kaynak hücreleri düşük sıcaklık artışları (6°C/dakika) ile Tablo 6.1’de verilen sıcaklık değerlerine kadar ısıtılmaya başlandı.

7-) MBE sisteminde bağlı olan bilgisayarda bulunan Crystal programına büyütme esnasında takip edilecek adımlar yüklendi.

8-) Alttaş %10 rpm hızında döndürülerek, alttaş üzerinde oluşabilecek oksit tabakası kaldırıldı ve alttaş 600°C’ye kadar ısıtılmaya başlandı.

9-) Alttaş sıcaklığı 600°C’ye ulaştıktan sonra RHEED cihazının gözlem penceresinden bakıldığında, RHEED desenindeki belirginleşmeden dolayı oksit tabakasının kalkmaya başladığı anlaşıldı. Oksit tabakasının tamamen kalkması için alttaş sıcaklığı kontrollü olarak 670°C’ye yükseltip, 10 dk bu sıcaklıkta bekletildi. RHEED deseni iyice netleştiğinde, kristal yapı düzeni görüldü.

10-) Oksit tabakasının tamamen kaldırılmasından sonra, alttaş sıcaklığı tampon tabakasının büyütülmesi için 650°C’ye düşürüldü. Ga ve Si akı kesicileri açılarak, 500 nm n-tipi GaAs tampon tabakası büyütüldü.

11-) Tampon tabakası büyütüldükten sonra alttaş sıcaklığı 640°C'ye düşürüldü. Ga ve Si akı kesicileri açılarak, 3000 nm n-tipi GaAs tabakası büyütüldü.

12-) Ga ve Be akı kesicileri açılarak, 500 nm p-tipi GaAs tabakası büyütüldü.

13-) Ga, Al ve Be akı kesicileri açılarak, 30 nm p-tipi AlGaAs pencere tabakası büyütüldü.

14-) Büyütme işlemi, Ga ve Be kaynak kesicileri açılarak, 30 nm yüksek katkılı p-tipi GaAs kep tabakasının büyütülmesi ile sona erdi.

15-) Büyütme işlemi tamamlandıktan sonra, numune sıcaklığı 250°C'ye kadar düşürüldü. As kaynak kesici sıcaklık 250°C'ye ulaştığında kapatıldı. Alttaşın döndürülmesi durduruldu. Daha sonra numune büyütme odasından hazırlık odasına ve oradan da yükleme odasına alındı.

**Tablo 6.1:** Tek eklemli güneş hücresi yapısının büyütme sıcaklık değerleri.

	670°C (oksit kaldırma)
$T_{alttaş}$	650°C (n-GaAs tampon)
	640°C (diğer tabakalar)
$T_{Ga}$	859,65°C
$T_{Al}$	1173°C
	1150°C (n-GaAs tampon)
$T_{Si}$	1075°C (n-GaAs)
	850°C (p-AlGaAs)
$T_{Be}$	875 °C (p-GaAs Kep)
	340°C (bulk)
$T_{As}$	950°C (kırılma)

### 6.1.2 İki Eklemli GaInP/GaAs Güneş Hücre Yapısının Büyütülmesi

İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücre yapısı MBE tekniği ile büyütüldü. GaInP/GaAs güneş hücre yapısı Şekil 6.2'de verildi. İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücre yapısında, GaAs hücre (alt hücre) ile GaInP hücre (üst hücre) arasında elektriksel iletimi sağlamak için yüksek katkılı AlGaAs tünel eklem tabakası büyütüldü.

n+GaAs	200 nm	
n-AlGaAs	50 nm	
n-GaInP	170 nm	GaInP hücre
p-GaInP	800 nm	
p++ AlGaAs	50 nm	Tünel Eklem
n++ AlGaAs	50 nm	
n-GaAs	150 nm	GaAs hücre
p-GaAs	1000 nm	
3" p-GaAs (100)		

Şekil 6.2: İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücre yapısı.

MBE sisteminde iki eklemli GaInP/GaAs güneş hücre yapısı büyütülürken, takip edilen adımlar,

1-) (100) yönelimli p-GaAs alttaş üzerinde oluşabilecek oksit tabakası kimyasal işlem uygulanarak kaldırıldı. Daha sonra, alttaş alkol ve DI-H<sub>2</sub>O ile yıkanıp, N<sub>2</sub> ile kurutuldu.

2-) Alttaş temizledikten hemen sonra, MBE sistemindeki yükleme odasına yüklendi.

3-) Yükleme odasındaki alttaş hazırlık odasına alınarak, 400°C'de 1,5 saat ısıtılarak, su ve yağ gibi buharlaşabilen kirliliklerden temizlendi.

4-) Alttaş büyütme odasına transfer edilerek, manipülatöre yerleştirildi.

5-) Sıvı azot paneli doldurulup, büyütme esnasında sıvı azot akışı sabit olacak şekilde ayarlandı.

6-) İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücre yapısı büyütme sırasında kullanılacak olan Arsenik (As), Galyum (Ga), İndiyum (In), Galyum-fosfat (GaP) Alüminyum (Al), Silisyum (Si) ve Berilyum (Be) kaynak hücreleri Tablo 6.2'de verilen sıcaklık değerleri için ısıtılmaya başlandı.

7-) MBE sistemine bağlı olan bilgisayardaki Crystal programına, büyütme esnasında takip edilecek adımlar yüklendi.

**8-)** Alttaş %10 rpm hızında döndürülerek, alttaş üzerinde oluşabilecek oksit tabakası kaldırıldı ve alttaş 600°C'ye kadar ısıtmaya başlandı.

**9-)** Alttaş sıcaklığı 600°C'ye ulaştıktan sonra RHEED cihazının gözlem penceresinden bakıldığında, RHEED desenindeki belirginleşmeden dolayı oksit tabakasının kalkmaya başlanıldığı anlaşıldı. Oksit tabakasının tamamen kalkması için alttaş sıcaklığı kontrollü olarak 670°C'ye yükseltip, 10 dk bu sıcaklıkta bekletildi. RHEED deseni iyice netleştğinde, kristal yapı düzeni görüldü.

**10-)** Oksit tabakasının tamamen kaldırılmasından sonra, alttaş sıcaklığı tampon tabakasının büyütülmesi için 650°C'ye düşürüldü. Ga ve Be akı kesicileri açılarak, 1000 nm p-tipi GaAs tabakası büyütüldü. Daha sonra alttaş sıcaklığı 640°C'ye düşürülerek, Ga ve Si akı kesicileri açılıp, 150 nm n-tipi GaAs tabakası büyütüldü (GaAs alt hücre).

**11-)** Ga Al ve Si akı kesicileri açılarak 50 nm yüksek katkılı n<sup>++</sup>AlGaAs tabakası büyütüldü. Daha sonra Ga Al ve Be akı kesicileri açılarak 50 nm p<sup>++</sup>AlGaAs tabakası büyütüldü (AlGaAs tünel eklem).

**12-)** Alttaş sıcaklığı 530°C'ye düşürülerek, Ga, In GaP ve Be akı kesicileri açılarak, 800 nm p-tipi GaInP tabakası büyütüldü. Daha sonra Ga, In GaP ve Si akı kesicileri açılarak, 170 nm n-tipi GaInP tabakaları büyütüldü (GaInP üst hücre).

**13-)** Ga, Al ve Si akı kesicileri açılarak, 50 nm n-tipi AlGaAs pencere tabakası büyütüldü.

**14-)** Son olarak, Ga ve Si kaynak kesicileri açılarak, 200 nm yüksek katkılı GaAs kep tabakası büyütülerek, büyütme işlemi tamamlandı.

**15-)** Büyütme işlemi tamamlandıktan sonra, numune sıcaklığı 250°C'ye kadar düşürüldü. As kaynak kesici sıcaklık 250°C'ye ulaştığında kapatıldı. Alttaşın döndürülmesi durduruldu. Daha sonra numune büyütme odasından hazırlık odasına ve oradan da yükleme odasına alındı.

**Tablo 6.2:** İki eklemli güneş hücre yapısının büyüme sıcaklık değerleri.

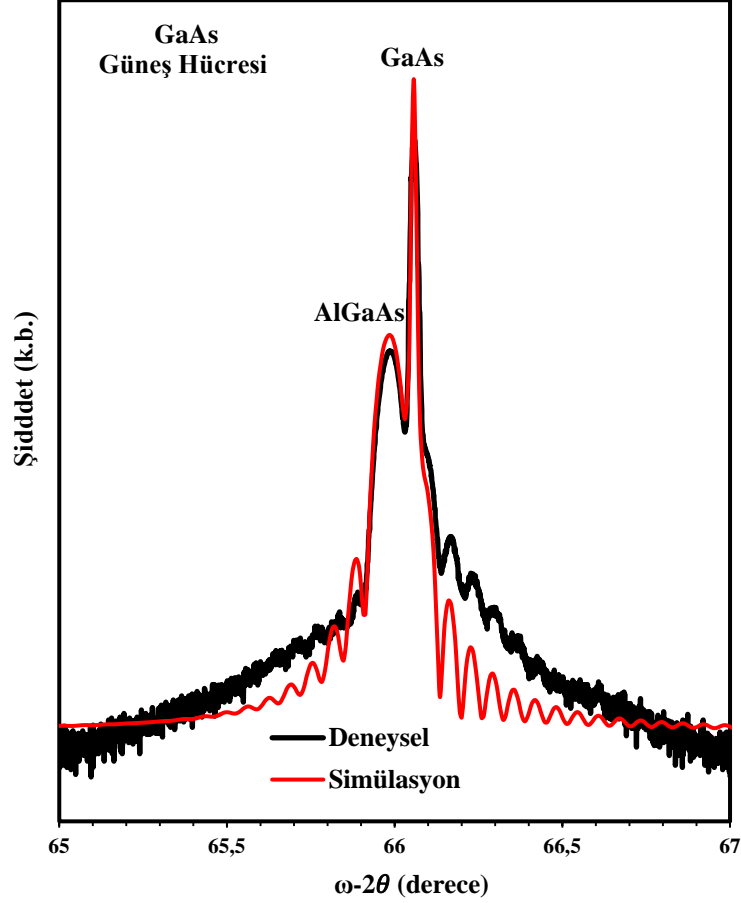
	670°C (oksit kaldırma)
	650°C (p-GaAs tampon)
$T_{\text{alttaş}}$	640°C (n-GaAs, n++AlGaAs, p++AlGaAs)
	530°C (p-GaInP, n-GaInP, n-AlGaAs, n+GaAs)
	858°C (p-GaAs tampon, n-GaAs)
$T_{\text{Ga}}$	854°C (n++AlGaAs, p++AlGaAs)
	803°C (p-GaInP, n-GaInP, n-AlGaAs, n+GaAs)
$T_{\text{In}}$	754°C
	1095°C (n++AlGaAs, p++AlGaAs)
$T_{\text{Al}}$	1050°C (n-AlGaAs)
	1100°C (n-GaAs, n-AlGaAs, n-GaInP)
$T_{\text{Si}}$	1075°C (n++AlGaAs, n+GaAs)
	850°C (p-GaAs tampon, p-GaInP)
$T_{\text{Be}}$	875°C (p++GaInP)
$T_{\text{GaP}}$	1040°C
	325°C (bulk)
$T_{\text{As}}$	950°C (kırılma)

## 6.2 Güneş Hücre Yapılarının Karakterizasyonları

MBE tekniği ile büyütülen tek eklemli GaAs ve iki eklemli GaInP/GaAs güneş hücrelerinin yüksek çözünürlüklü X-ışınları kırınım (HR-XRD) yöntemiyle yapısal analizi ve optik karakterizasyonları fotoluminesans (PL) spektrometresi ile yapıldı.

### 6.2.1 Yüksek Çözünürlüklü X-ışınları Kırınım Analiz Bulguları

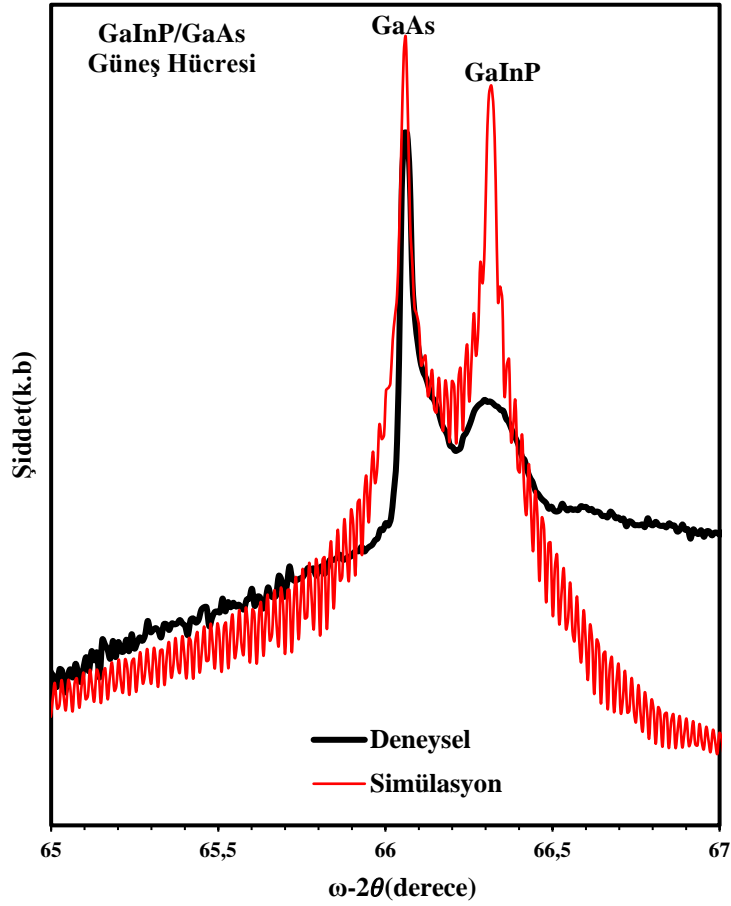
Tek eklemli GaAs güneş hücre yapısının HR-XRD yöntemiyle elde edilen  $\omega$ -2 $\theta$  kırınım desenleri Şekil 6.3'de verildi. Tek eklemli GaAs güneş hücresinde 66,03°'de gözlenen pik, GaAs alttaştan gelen GaAs (004) kırınımına aittir. GaAs pikinin sol tarafında oluşan 66,00°'daki pik, literatür ile uyumlu AlGaAs pencere tabakasına ait olduğu düşünülmektedir [140].



Şekil 6.3: Tek eklemlı GaAs güneş hücreşının HR-XRD desenleri.

Tek eklemlı GaAs güneş hücre yapısının HR-XRD ölçüm sonuçları LEPTOS adlı simülasyon programı ile simüle edildi. Şekil 6.3’de güneş hücre yapısının simüle edilen HR-XRD kırınım deseni verildi. GaAs güneş hücre yapısında düşük ara yüzey pürüzlülüğünden dolayı GaAs ve AlGaAs piklerinin yakınında girişim pikleri oluşmuştur. Bu piklerden  $Al_xGa_{1-x}As$ , alaşımındaki alüminyum kompozisyon oranı, Vegard temelli ( $x = \frac{|\theta_{AlGaAs} - \theta_{GaAs}|}{|\theta_{AlAs} - \theta_{GaAs}|}$ ) eşitliği kullanılarak, %36,22 olarak bulundu. Bu x alaşım oranına göre, Vegard yasasından yararlanılarak yasak enerji aralığı 1,86 eV olarak hesaplandı.

İki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücre yapısının HR-XRD yöntemiyle elde edilen  $\omega$ -2 $\theta$  kırınım desenleri Şekil 6.4’de verildi. İki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücre yapısında, en şiddetli pik 66,02°’de gözlenmektedir. Bu pik GaAs alttaştan gelen GaAs (004) kırınımına aittir. GaAs pikinin sağında meydana gelen 66,30°’deki pik GaInP tabakasına ait olduğu düşünölmektedir.



Şekil 6.4: İki Eklemlı GaInP/GaAs güneş hücreşının HR-XRD desenleri.

İki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücre yapısındaki GaInP malzemesinin x alaşıml oranı, HR-XRD ölçüm sonuçlarına uygulananan LEPTOS adlı simülasyon programı ile belirlendi. Şekil 6.4'de güneş hücre yapılarının simüle edilen HR-XRD kırınım desenleri verildi. GaInP/GaAs güneş hücre yapısının GaAs ve GaInP piklerinin yanında girişim pikleri meydana gelmiştir. Bu piklerden  $Ga_{1-x}In_xP$ , alaşımlındaki indiyum alaşıml oranı, Vegard temelli  $(x = \frac{|\theta_{GaInP} - \theta_{InP}|}{|\theta_{GaP} - \theta_{InP}|})$  eşitliğı kullanarak, %45,91 olarak bulundu. Bu x alaşıml oranına göre, Vegard yasasından yararlanılarak yasak enerji aralığı 1,93 eV olarak hesaplandı. Eşitlik (5.1) ve (5.2)'den yararlanılarak GaInP ve GaAs örgü sabitleri sırasıyla, 5,655805 Å ve 5,655045 Å olarak hesaplandı. Bu GaInP ve GaAs hücreler arasındaki örgü uyumsuzluğu  $(\frac{\alpha_{GaInP} - \alpha_{GaAs}}{\alpha_{GaAs}} \times 100)$  eşitliğı kullanarak, %0,02 olarak bulundu. Elde edilen yapısal parametre değerleri literatürle uyumlu olup, büyütölen iki eklemlı



güneş hücre yapısının düşük gerilmeli ve yüksek kristal kalitesine sahip olduğunu göstermektedir [141].

Tek eklemli GaAs ve iki eklemli GaInP/GaAs güneş hücre yapılarının HR-XRD piklerinden yararlanılarak, parçacık boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve gerilimi Scherrer denkleminden,

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (6.1)$$

$$\delta = \frac{n}{D^2} \quad (6.2)$$

$$\varepsilon = \left[ \frac{\lambda}{D \cos\theta} - \beta \right] \frac{1}{\tan\theta} \quad (6.3)$$

hesaplandı. Eşitliklerdeki  $k=0,9$ ,  $\beta$  pikin yarı genişliği ve  $\lambda$  dalgaboyudur. Güneş hücre yapıları için hesaplanan parçacık boyutu, dislokasyon yoğunluğu ve gerilimi Tablo 6.3’de verildi. Tek eklemli GaAs güneş hücre yapısının parçacık boyutu, iki eklemli GaInP/GaAs güneş hücre yapısının parçacık boyutuna göre daha büyüktür. Bu durum tek eklemli GaAs güneş hücre yapısının daha kristalize yapıya sahip olduğunu gösterir. Tek eklemli GaAs güneş hücre yapısında dislokasyon yoğunluğunun iki eklemli GaInP/GaAs güneş hücre yapısının dislokasyon yoğunluğuna göre daha küçük olması, yapının düşük gerilmeli olmasına neden olur.

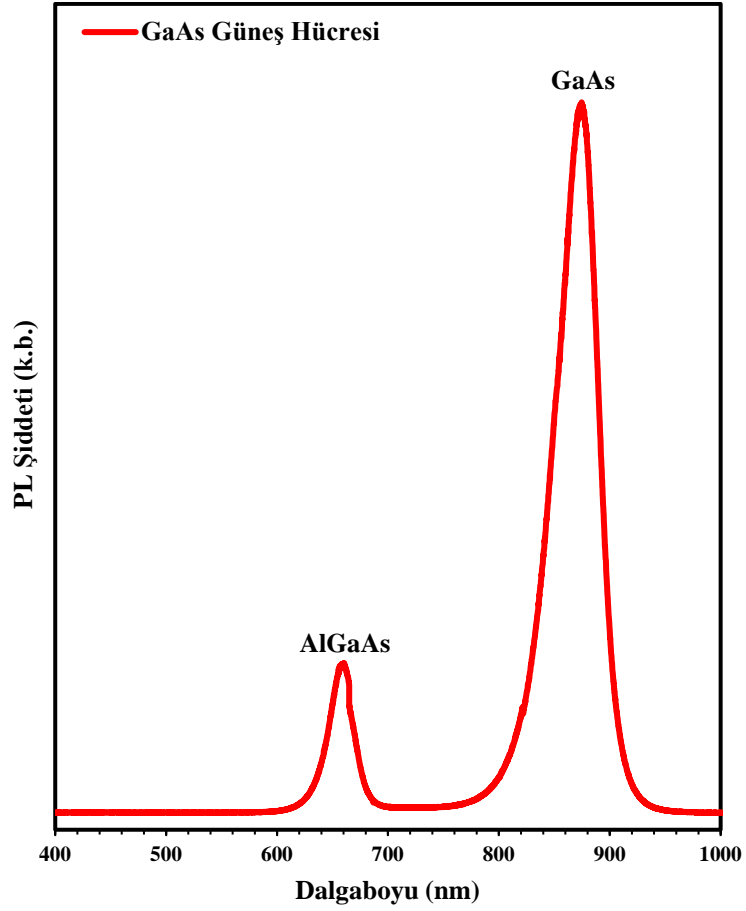
**Tablo 6.3:** Parçacık boyutu, dislokasyonu ve gerilim.

Numune	D(nm)	$\delta(\text{cm}^{-2})$	$\varepsilon$
GaAs güneş hücresi	210,53	$2,26 \times 10^9$	$1,34 \times 10^{-4}$
GaInP/GaAs güneş hücresi	74,65	$1,79 \times 10^{10}$	$3,79 \times 10^{-4}$

### 6.2.1 Fotoluminesans (PL) Ölçümlerinin Analiz Bulguları

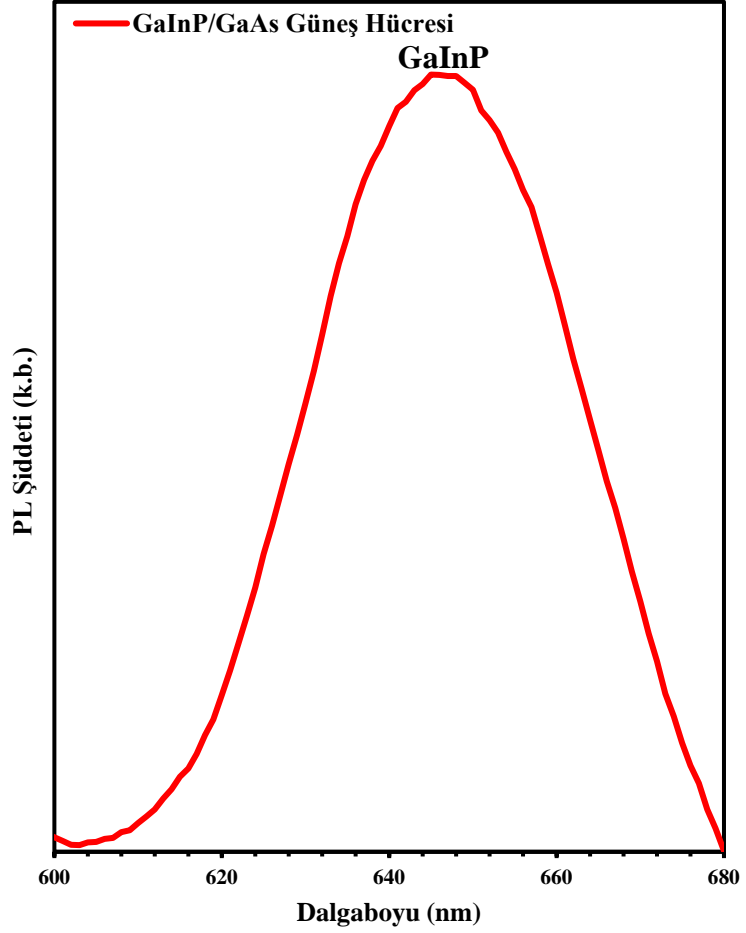
Geliştirilen tek eklemli GaAs ve iki eklemli GaInP/GaAs güneş hücrelerinin 300K’de (oda sıcaklığında) PL ölçümleri alındı. Güneş hücrelerini oluşturan yarıiletken malzemelerin yasak enerji aralıkları ve alayım oranları (x) PL spektrumunun pik pozisyonlarından elde edildi.

Tek eklemlı GaAs güneş hücre yapısının PL şıddetının dalga boyuna göre değişim grafiği Şekil 6.5’de verildi. Bu pik pozisyonlarından GaAs yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığı 1,42 eV olarak hesaplandı. Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As pencere tabakasının yasak enerji aralığı 1,865 eV olarak bulundu. Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As, alaşımındaki alüminyum kompozisyon oranı, belirlenen yasak enerji aralığından yararlanılarak %36,00 olarak bulundu. Bu x kompozisyon oranının, HRXRD ölçüm sonuçlarından LEPTOS simülasyon programı kullanılarak elde edilen x alaşım oranı ile uyumlu olduğu görüldü.



Şekil 6.5: Tek eklemlı GaAs güneş hücre yapısının PL spektrumu.

İki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücre yapısının şıddetının dalgaboyuna göre değişim grafiği Şekil 6.6’da verildi. Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>P yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığı 1,939 eV olarak bulundu. Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>P, alaşımındaki indiyum alaşım oranı Vegard yasasından yararlanılarak %46,09 olarak bulundu. Bu x kompozisyon oranının, HRXRD ölçüm sonuçlarından LEPTOS simülasyon programı kullanılarak hesaplanan x alaşım oranı ile uyumlu olduğu görüldü.



Şekil 6.6: İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücre yapısının PL spektrumu.

### 6.3 Güneş Hücre Fabrikasyonu

Güneş hücre fabrikasyonu için ilk olarak, büyütülen tek eklemli ve iki eklemli güneş hücre yapılarından  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 'lik alanlar olacak şekilde parçalar kesildi. Tek eklemli GaAs güneş hücresi yapısından kesilen parça A1 numunesi olarak adlandırıldı. İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücre yapısından kesilen parçalardan farklı fabrikasyon süreçleri uygulanmak için 2 adet alındı. Bu numuneler B1 ve B2 numunesi olarak isimlendirildi.

A1, B1 ve B2 numunelerine fabrikasyon işlemleri uygulanmadan önce numunelerin temizliği yapıldı. Temizlik işlemi için asidik solüsyon ( $\text{HF} + \text{DI-H}_2\text{O}$ ) çözeltisi hazırlandı. Numuneler bu çözelti içinde 1 dakika bekletildi. Numuneler çözelti içinden çıkarılıp, aseton ve alkol ile yıkanıp,  $\text{DI-H}_2\text{O}$  ile yıkandı. Numuneler  $\text{N}_2$  ile kurutuldu. Bu temizleme işlemi öncelikli olarak, numune yüzeyinde oluşabilecek oksit tabakasının temizlenmesini sağlar. İkinci olarak da, litografi

aşamasında yapılan fotodirencin (PR) temiz yüzeye daha iyi şekilde kaplanması sağlanır. Bu durum, numunelerin yüzeylerine oluşturulacak metal kontakların kalitesinin artmasına neden olur.

Temizlik işlemleri yapılan numunelerin kep tabakasının kaldırılması için  $2\text{HCl}:1\text{HNO}_3:2\text{H}_2\text{O}$  çözeltisi hazırlandı. Numuneler bu çözelti içinde bekletildi. Böylece GaAs kep tabakası kimyasal aşındırma ile kaldırıldı.

A1, B1 ve B2 numunelerin ön ve arka kontakları litografi tekniği kullanılarak oluşturuldu. Bu tekniğin gerçekleşmesinde takip edilen adımlar şu şekildedir:

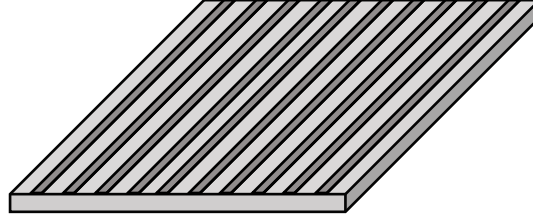
### **(1) Litografi Aşaması**

1. Litografi Aşaması ile numunelerin ön yüzeyine mesa yapıları gerçekleştirilir. Numune dönel kaplama cihazına yerleştirildikten sonra, numunelerin ön yüzeyine AZ-5214E foto-direnç (PR) damlatıldı. Dönel kaplama cihazı ile 4000 rpm'de 40 saniye döndürülerek, PR numunelerin ön yüzeyine homojen olacak şekilde kaplandı. PR kaplama işleminden sonra, numuneler  $110^\circ\text{C}$ 'de 55 saniye ısıtıcı tablada tavlандılar. Bu numunelere, UV pozlama işlemi maske hizalama sisteminde Şekil 6.7'de görülen foto-maske 20 saniye uygulanarak gerçekleştirildi.



**Şekil 6.7:** Mesa yapısında kullanılan foto-maske.

Pozlama sürecinde UV ışığa maruz kalan bölgeleri kaldırmak için kimyasal bir çözelti hazırlandı. Bu çözelti AZ400K ile DI-H<sub>2</sub>O 1:4 oranında karıştırılarak oluşturuldu ve 40 saniye numuneler çözelti içinde tutuldu. Numuneler çözüldükten sonra çıkarılıp DI-H<sub>2</sub>O ile yıkandı ve N<sub>2</sub> ile kurutuldu. Numuneler bu işlemden sonra PR'ın temizlenmesi için 3 saat asetonda bekletildi. Böylece numune yüzeyine litografi tekniği ile Şekil 6.8'de görülen mesa yapıları oluşturuldu.



Şekil 6.8: Oluşturulan mesa yapısı.

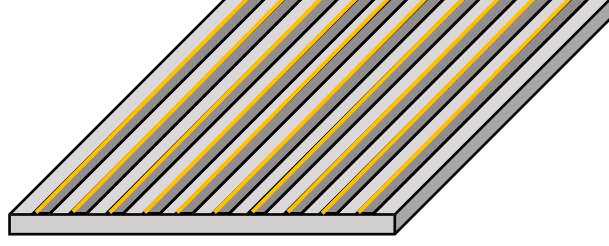
## (2) Litografi Aşaması

1.litografi aşaması ile numunelerin ön yüzeyine mesa yapıları oluşturulduktan sonra, 2.litografi aşaması ile ince ızgara yapılar oluşturulur. İnce ızgara yapılar Şekil 6.9'da görülen foto-maske kullanılarak gerçekleştirildi. Bu maskenin genişliği mesa yapılarında kullanılan foto-maskesinden daha incedir. Böylece ince ızgara yapıların genişliği mesa yapılarınkine göre daha ince olur. Bu durum, aktif hücre yüzeyine ince ızgara yapıların temas etmesine engel olur.



Şekil 6.9: İnce ızgara foto-maskesi.

1. adımda uygulanan işlemler tekrarlanarak, AZ5214E PR kaplama işlemi gerçekleştirildi. Numunelere UV pozlama işlemi maske hizalama sisteminde Şekil 6.10'da görülen ince ızgara foto-maskesi kullanılarak oluşturuldu. Numune yüzeyindeki pozlama sürecinde UV ışığa maruz kalan bölgeleri kaldırmak için hazırlanan kimyasal çözelti içinde, numuneler 40 saniye bekletildi. Numuneler çözüldüden çıkarılıp DI-H<sub>2</sub>O ile yıkanıp, N<sub>2</sub> ile kurutuldu. Daha sonra, A1ve B1 numunelerine Au metali ortam sıcaklığında kalınlığı 2000Å olacak şekilde termal buharlaştırma sisteminde kaplandı. B2 numunesine ise ortam sıcaklığında kalınlığı 1000Å olacak şekilde Ti ve kalınlığı 1000Å olacak şekilde Au metali termal buharlaştırma sisteminde kaplandı. Numunelerin yüzeyinde kalan PR'ın temizlenmesi için 3 saat asetonda tutuldu. Böylece litografi tekniği ile numunelerin ön yüzeylerine Şekil 6.10'da verilen ince ızgara yapılar gerçekleştirildi.



Şekil 6.10: Oluşturulan ince ızgara yapısı.

### (3) Litografi Aşaması

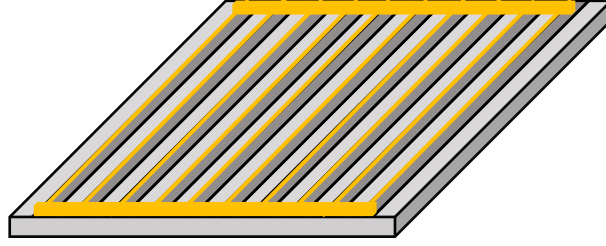
Numunelerin ön yüzeyine mesa ve ince ızgara yapıları oluşturulduktan sonra, litografinin 3. adımı olan toplayıcı ızgara yapıları gerçekleştirildi. 1. adımda uygulanan PR kaplama işlemleri tekrarlandı. Daha sonra, UV pozlama işlemi maske hizalama sisteminde numunelere Şekil 6.11' de verilen foto-maske ile oluşturuldu. PR'ın kaldırmak için hazırlanan çözelti içinde numuneler uygun şartlar altında bekletildi.



Şekil 6.11: Toplayıcı ızgara foto-maskesi.

Toplayıcı ızgara maskesi oluşturulan numunelerin metalizasyonun sağlanması için termal buharlaştırma sisteminde A1 ve B1 numunelerine Au metali ortam sıcaklığında, kalınlığı  $2000\text{Å}$  olacak şekilde kaplandı. B2 numunesine ortam sıcaklığında  $1000\text{Å}$  Ti ve  $1000\text{Å}$  Au metalleri termal buharlaştırma sisteminde kaplandı.

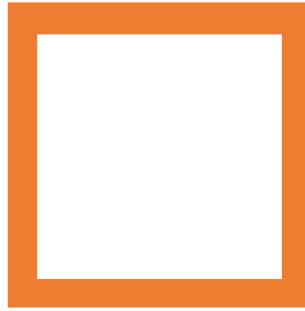
Bu işlem gerçekleştirildikten sonra numunelerin yüzeyinde kalan PR'ın ve toplayıcı ızgara dışında kalan metallerin kaldırılması için numuneler, 3 saat asetonda bekletildi. Böylece Şekil 6.12'de görülen toplayıcı ızgaralar oluşturularak, numunelerin ön yüzeyindeki fabrikasyon işlemi gerçekleştirildi.



Şekil 6.12: Oluşturulan toplayıcı ızgara yapısı.

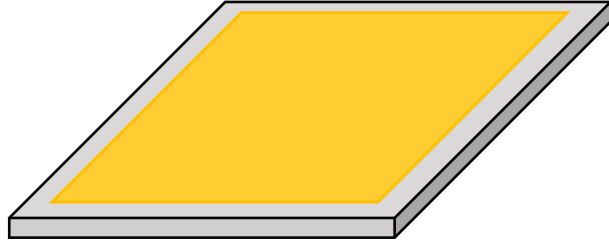
#### (4) Litografi Aşaması

Numunelerin arka yüzeylerine 4. litografi aşaması ile arka kontak yapıları gerçekleştirildi. 1. adımda uygulanan PR kaplama işlemleri uygun şartlar altında yeniden oluşturuldu. Daha sonra, UV pozlama işlemi maske hizalama sisteminde numunelere Şekil 6.13' de verilen foto-maske uygulandı. PR kaldırma işlemi ise hazırlanan kimyasal çözelti içinde numuneler 40 saniye bekletildi. Çözelti içinden çıkarılan numuneler, DI-H<sub>2</sub>O ile yıkanıp, N<sub>2</sub> ile kurutuldu.



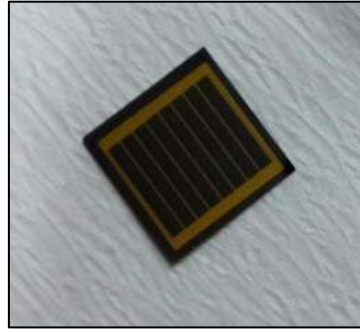
Şekil 6.13: Arka kontak foto-maskesi.

Arka kontak maskeleri oluşturulan numunelere metalizasyon işlemi uygulandı. Termal buharlaştırma sisteminde A1 ve B1 numunelerine Au metali ve B2 numunesine ise AuZn alaşımı ortam sıcaklığında kalınlığı 2500Å olacak şekilde kaplandı. Bu işlemde sonra numune yüzeyindeki PR'ın kaldırılması ve arka kontak yapıları dışında kalan kısımların temizlenmesi için, numuneler 3 saat asetonda bekletildi. Böylece numunelerin Şekil 6.14'de görülen arka kontakları oluşturuldu. Ön ve arka yüzeye kaplanan metallerin omik özellik göstermesi için numuneler azot ortamında RTA sisteminde 380°C'de 50 saniye süreyle tavlandı.



Şekil 6.14: Oluşturulan arka kontak yapısı.

Güneş hücrelerine 4 aşamalı litografi tekniği uygulanarak, hücre fabrikasyonları gerçekleştirildi. Fabrikasyon işlemleri tamamlanan iki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücre yapısı Şekil 6.15’de görülmektedir.



Şekil 6.15: Fabrikasyon işlemi tamamlanmış iki eklemlı güneş hücre yapısı.

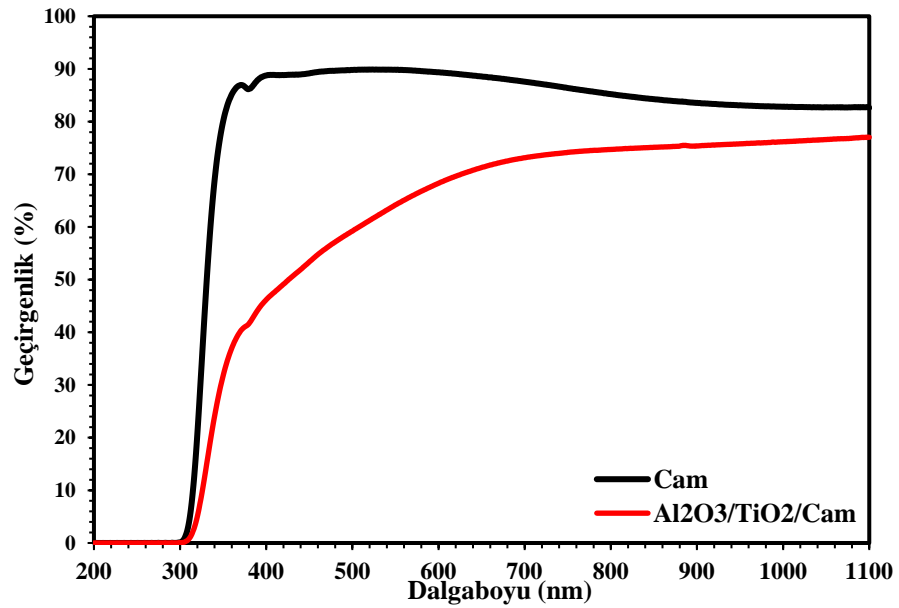
#### 6.4 Güneş Hücrelerine Yansıma Önleyici Katmanın Oluşturulması

Geliştirilen iki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücresinin yüzeyi yansıma önleyici ile kaplanarak, hücre içerisine daha fazla ışınımın girmesinin sağlanması hedeflendi. Fabrikasyonu yapılan hücre yüzeylerinde metal toplayıcılar arasında kalan AlGaAs pencere katman güneş hücresine gelen güneş ışınlarını etkili bir şekilde soğurabilmektedir. Bununla birlikte güneş ışınlarının bir kısmı yansıdığından hücre verimi azalmaktadır. Fabrikasyonu yapılan iki eklemlı B1 ve B2 GaInP/GaAs güneş hücrelerinin verim değerini artırmak için ön yüzeylerine oluşturulan ince metal ızgaraların aralarına, püskürtme sisteminde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> ince filmleri ardışık şekilde biriktirilerek yansıma önleyici kaplama yapıldı. Bu kaplama işlemi esnasında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> yansıma önleyici katmanın geçirgenlik özelliklerinin belirlenmesi için cam alttaş üzerine de yapıldı.



#### 6.4.1 UV-VIS Analiz Bulguları

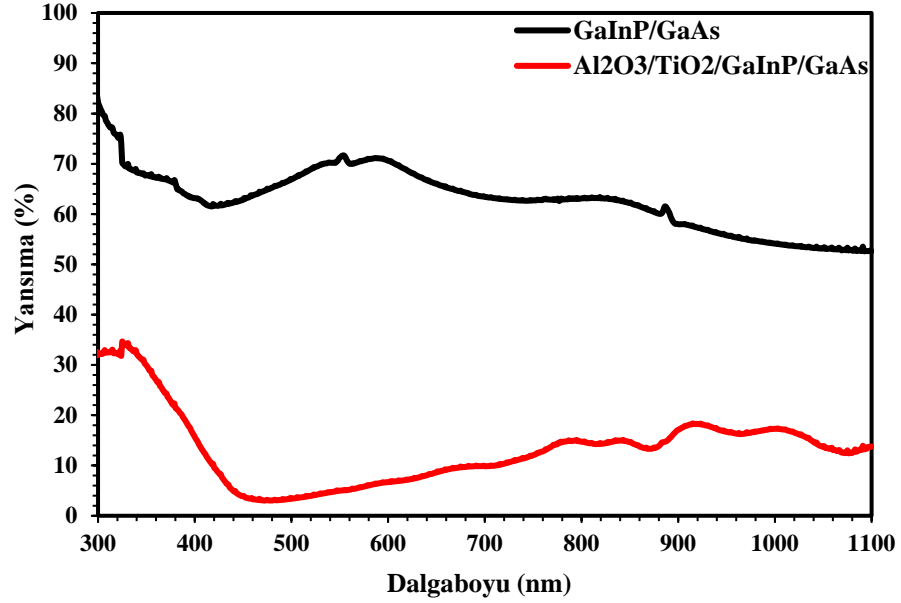
Cam alttaş üzerine kaplanan  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  yansıtma önleyici katmanın optik geçirgenliği UV-VIS spektrometresi kullanılarak 200-1100 nm aralığında belirlendi. Şekil 6.16'da görüldüğü gibi  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  yansıtma önleyici kaplama >600 nm dalgaboylarında %70 civarında geçirgenliğe sahiptir. UV bölgeye doğru ise optik geçirgenlikte bir düşüş sergilenmektedir. Bu düşüş  $\text{TiO}_2$  filminin bant enerji kenarı ve yasak enerji aralığı içerisindeki kusur seviyelerinden kaynaklanan soğurmalarından kaynaklanmaktadır. Cam üzerine oluşturulan kaplamanın yansıtma önleyici niteliğinden ziyade film özelliğinin sağlanmasının değerlendirilmesi açısından önem taşımaktadır. Elde edilen geçirgenlik spektrumu,  $\text{TiO}_2$ 'nin literatürde var olan geçirgenlik spektrumuna benzerliği, hedeflenen film kaplamanın gerçekleştirildiğini göstermektedir.



Şekil 6.16:  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  yansıtma önleyici katmanın geçirgenlik spektrumu.

Şekil 6.17'de güneş hücreleri üzerine kaplanan  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  yansıtma önleyici katmanın 300-1100 nm spektral bölgede yansıtma eğrileri verildi.  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  yansıtma önleyici katmanın yansıtma spektrumu incelendiğinde yansıtma yüzdesinde önemli bir azalma olduğu gözlemlendi. Görünür bölgedeki (400-780 nm) yansıtıcılık incelendiğinde, ortalama %65,70 yansıtıcılık özelliğine sahip olan alttaş,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  yansıtma önleyici kaplama sayesinde % 7,98 yansıtıcılık gösterdi. >780 nm bölgesinde %60 civarında yansıtmanın ise kaplanan film sayesinde %15 civarına

düştüğü görülmektedir. Elde edilen yansımaya verileri, güneş hücreleri üzerine  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  filmlerinin kaplanması ile hücre içerisine giren ışınım miktarını önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Bu artışın hücre verimine olumlu katkı sağlaması öngörülmektedir.



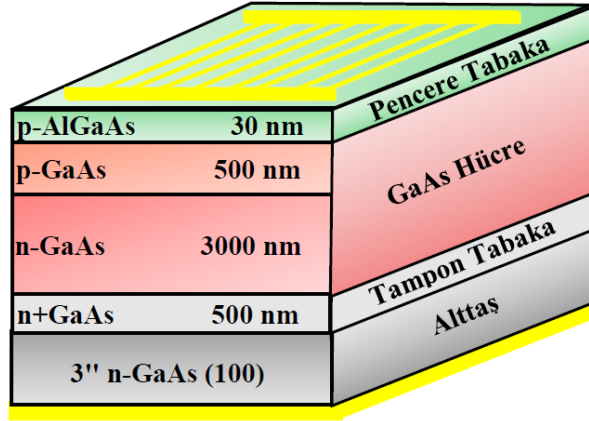
Şekil 6.17:  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$  yansımaya önleyici katmanının yansımaya spektrumu

## 6.5 Güneş Hücrelerinin Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri

Fabrikasyon işlemleri tamamlanan tek eklemlili GaAs ve iki eklemlili GaInP/GaAs güneş hücrelerinin elektriksel karakterizasyonları için akım-gerilim (I-V) ölçümleri alındı.

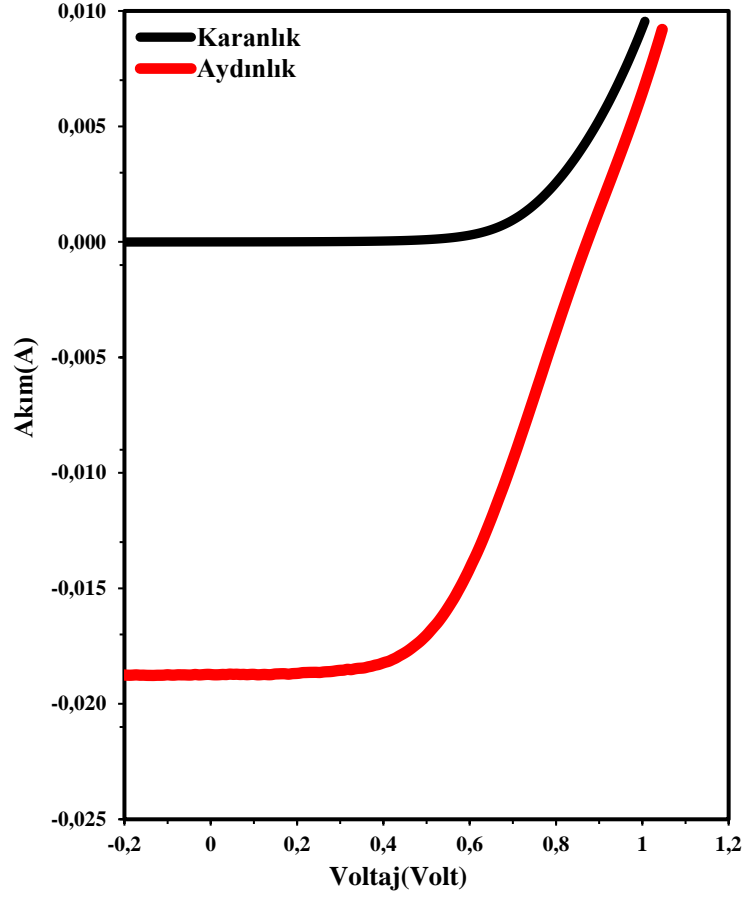
### 6.5.1 Tek Eklemlili Güneş Hücre Yapısının Analizi

Fabrikasyon süreci tamamlanan tek eklemlili pn-GaAs güneş hücre yapısı Şekil 6.18'de verildi.



Şekil 6.18: GaAs güneş hücre yapısı.

GaAs güneş hücre yapısının karanlık ve aydınlık altındaki akım-voltaj ölçümlerinden elde edilen I-V grafiği Şekil 6.19'da verildi. Bu grafikten yararlanılarak güneş hücresinin analizinde kullanılan kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ), açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ), dolun faktörü (FF) ve tüketim verimi ( $\eta$ ) değerleri hesaplandı. Hesaplanan güneş hücresinin elektriksel parametreleri Tablo 6.4'de sunuldu. Tablodan da görüldüğü gibi dolun faktörü %55,53 verim değeri ise %12,11 olarak elde edildi. Elde edilen hücre çıktı değerlerinin GaAs güneş hücresi için yapılan teorik değerlerden daha düşük olduğu görülmektedir. Bu olumsuzluklar büyütülen kristaldeki kusur seviyelerinin yük taşıyıcılarını tuzaklaması ve metalizasyon kaynaklı seri direnç artışından kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte yapılan yapısal karakterizasyonlar üretilen epi-katmaların kristal kalitesinin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum dikkate alındığında, hücre verimini olumsuz etkileyen en önemli taşıyıcı tuzaklanmasının, kullanılan alttaşlardaki kusurluluktan kaynaklandığı düşünülmektedir.



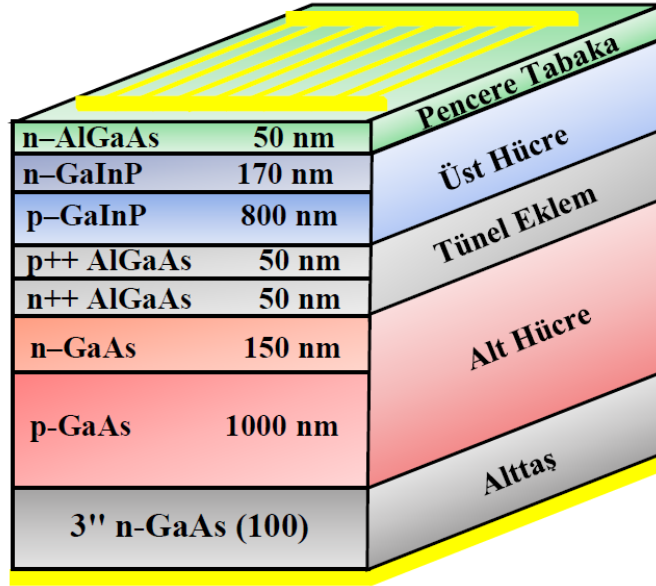
Şekil 6.19: Tek eklemlı güneş hücre yapısının I-V grafiği.

**Tablo 6.4:** GaAs güneş hücresinin elektriksel parametreleri.

Numune	$I_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (V)	FF(%)	$\eta$ (%)
GaAs Güneş Hücresi	18,73	0,83	55,53	12,11

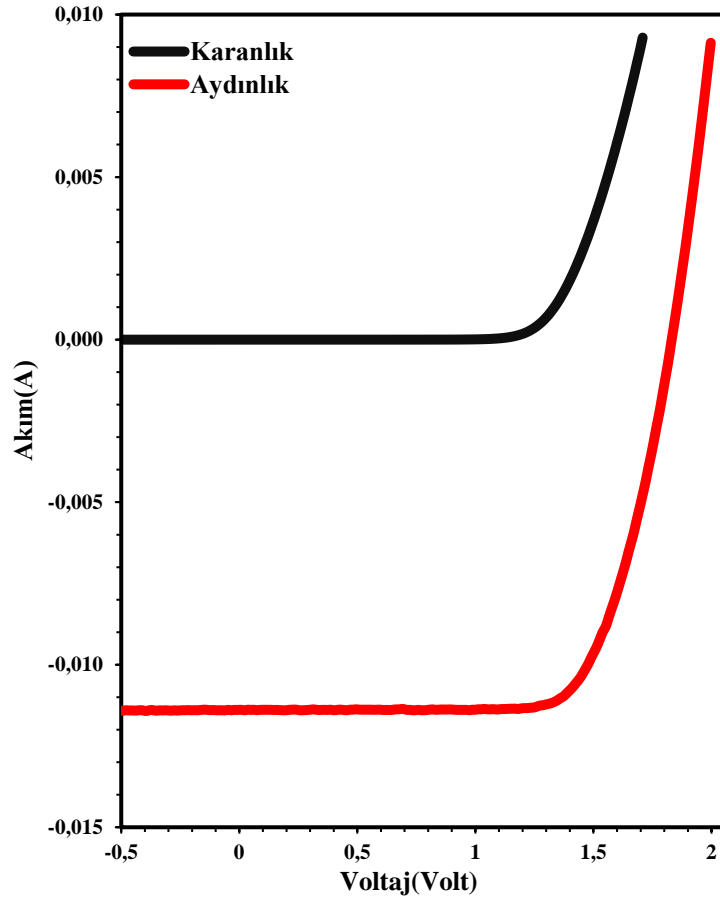
### 6.5.2 İki Eklemlı Güneş Hücre Yapısının Analizi

İki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücre yapısı Şekil 6.20’de görölmektedir. Bu güneş hücre yapısından iki parça alınarak farklı fabrikasyon işlemleri uygulandı. Bu numuneler B1 ve B2 numunesi olarak adlandırıldı. B1 numunesinin ön ve arka kontaktarı sırasıyla, kalınlığı 2000Å ve 2500Å olacak şekilde Au metali kaplandı. B2 numunesinin ön kontağına Au/Ti (1000Å/1000Å) metali ve arka kontağına AuZn (2500Å) alaşımı kaplandı.



Şekil 6.20: GaInP/GaAs güneş hücre yapısı.

Fabrikasyon işlemi tamamlanan B1 numunesinin aydınlık ve karanlık altında akım-gerilim ölçümleri alındı. Bu ölçümden elde edilen I-V grafiği Şekil 6.21’de verildi. Grafikten yararlanılarak güneş hücresinin hesaplanan elektriksel parametreleri (kısa devre akımı ( $I_{SC}$ ), açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ), dolun faktörü (FF) ve tüketim verimi ( $\eta$ )) hesaplandı. Hesaplanan güneş hücresinin çıkı parametreleri Tablo 6.5’de sunuldu.

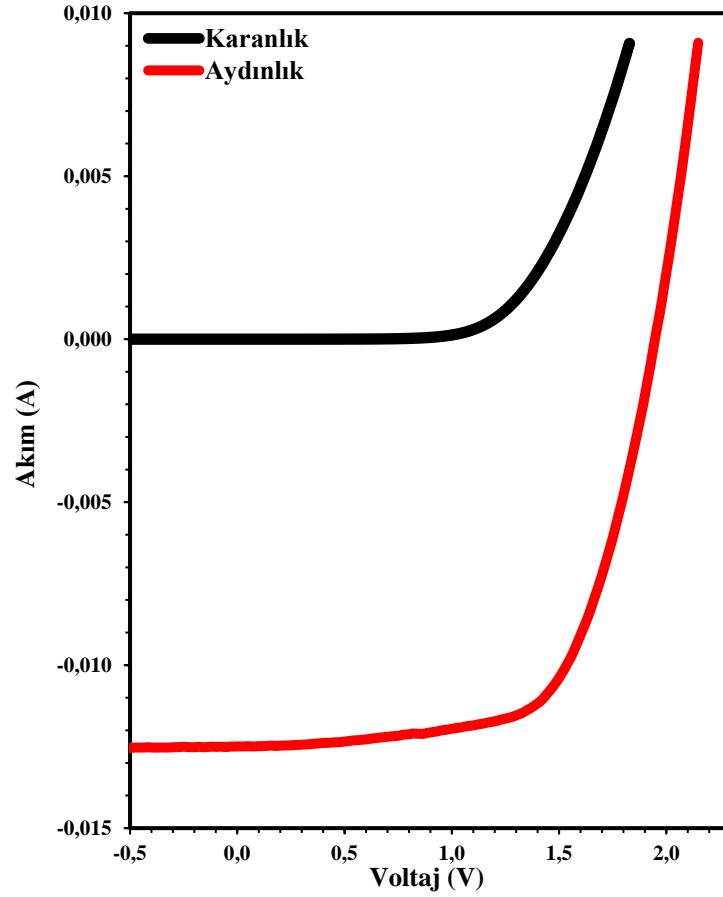


Şekil 6.21: B1 numunesinin I-V grafiği.

**Tablo 6.5:** B1 numunesinin elektriksel parametreleri.

Numune	$I_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (V)	FF(%)	$\eta$ (%)
B1 numunesi	11,38	1,82	72,52	14,65

Fabrikasyonu yapılan B2 numunesinin aydınlık ve karanlık altında akım-gerilim ölçümleri alındı. Bu ölçümden elde edilen I-V grafiği Şekil 6.22’de verildi. Grafikten yararlanılarak güneş hücresinin hesaplanan  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ , FF ve  $\eta$  değerleri Tablo 6.5’de verildi.



Şekil 6.22: B2 numunesinin I-V grafiği.

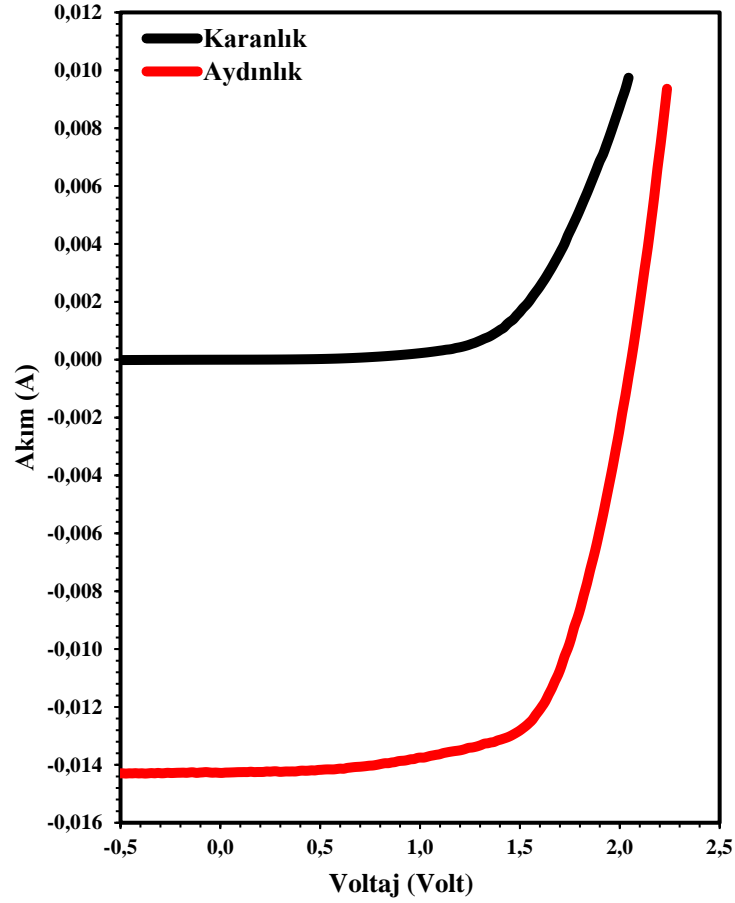
**Tablo 6.6:** B2 numunesinin elektriksel parametreleri.

Numune	$I_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (V)	FF(%)	$\eta$ (%)
<b>B2 numunesi</b>	12,49	1,94	66,48	15,26

B1 ve B2 numunelerinin değerleri karşılaştırıldığında, B2 numunesinin verim değeri daha yüksek çıkmıştır. Bu fark, uygulanan farklı fabrikasyon süreçlerinden kaynaklanmaktadır. B2 numunesinin ön kontağı oluştururken kullanılan Ti metali beklenildiği gibi iletme daha fazla katkı sağladığı gözlemlendi [45]. Bu durum B2 güneş hücresinin verim değerinin iyileşmesine neden oldu. Hücre verimlerinin beklenen değerden düşük çıkması, tek eklemlili hücre için tartışılan nedenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Tek eklemlili GaAs ve iki eklemlili GaInP/GaAs güneş hücrelerinin verim değerleri kıyaslandığında, beklenildiği gibi iki eklemlili GaInP/GaAs güneş hücresinin verim değeri daha yüksek olarak elde edildi.

B1 ve B2 numunelerin ön yüzeyinde oluşturulan ince metal ızgara şeklinde oluşturulan kontakların aralarına  $Al_2O_3/TiO_2$  yansıma önleyici kaplama yapıldı. Bu

numunelerin tekrar aydınlık ve karanlık akım-gerilim (I-V) ölçümleri yapıldı. B1 numunesine yansıma önleyici kaplama yapıldıktan sonra elde edilen grafiği Şekil 6.23’de verildi. Bu grafikten hesaplanan elektriksel parametreler Tablo 6.7’de verildi.



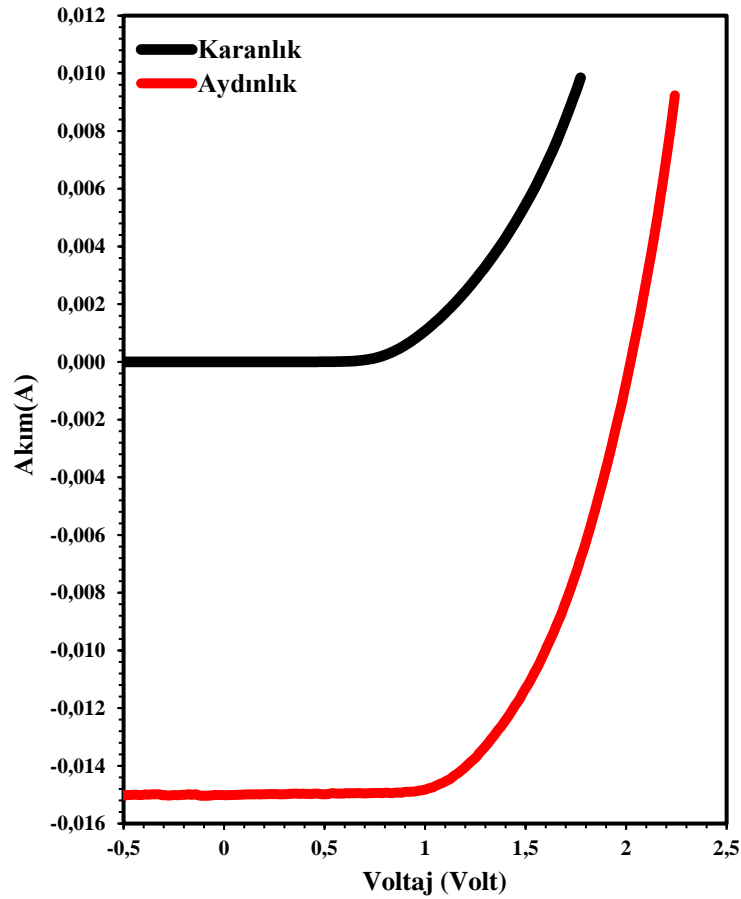
Şekil 6.23: AR kaplanmış B1 numunesinin I-V grafiği.

**Tablo 6.7:** AR kaplanmış B1 numunesinin elektriksel parametreleri.

Numune	$I_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (V)	FF(%)	$\eta$ (%)
B1 numunesi	11,89	2,04	66,63	15,72

B2 numunesine  $Al_2O_3/TiO_2$  yansıma önleyici kaplama yapıldıktan sonra elde edilen grafiği Şekil 6.24’de verildi. Bu grafikten hesaplanan elektriksel parametreler Tablo 6.8’de verildi.





Şekil 6.24: AR kaplanmış B2 numunesinin I-V grafiği.

**Tablo 6.8:** AR kaplanmış B2 numunesinin elektriksel parametreleri.

Numune	$I_{sc}$ (mA)	$V_{oc}$ (V)	FF(%)	$\eta$ (%)
<b>B2 numunesi</b>	15,01	2,01	57,59	16,90

B1 ve B2 numunelerinin ön yüzeyindeki kontakların aralarına yansıma önleyici  $Al_2O_3/TiO_2$  kaplandığında, beklenildiği gibi kısa devre akım yoğunluğu değerinde bir artış gözlemlenmiştir [142]. Buna bağlı olarak da B1 ve B2 verim değerlerinde sırasıyla, %7,30 ve %10,74'lük bir artış olduğu görülmektedir. Yansıma önleyici kaplama güneş hücresine gelen ışınların yansımını engelleyerek, hücrenin daha fazla foton soğurmasına olanak sağlamıştır [143]. Böylece güneş hücresinin ürettiği akım yoğunluğu artarak hücrenin verim değerinin artmasına yol açmıştır. Yansıma önleyici kaplama, bu tezin amaçlarından biri olan güneş hücresinin performans değerlerinin artırılmasına önemli katkı sağlamıştır.

## 7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında III-V gurubu tek ve iki eklemlı güneş hücre yapılarının analitik güneş hücre modeline göre tasarımları yapıldı. Modellenen güneş hücrelerinin performans değerlerinin iyileştirilmesi için gereken optimize şartları belirlenerek, elektriksel parametreleri olan kısa devre akım yoğunluğu ( $J_{sc}$ ), açık devre voltajı ( $V_{oc}$ ), dolım faktörü (FF) ve tüketim verimi ( $\eta$ ) hesaplandı.

Tek eklemlı GaAs ve iki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücreleri karasal uygulamalarda kullanılmak (AM1.5G) için tasarımları yapıldı. Tek eklemlı GaAs güneş hücrelerinin teorik verimi %19,92 hesaplandı. İki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücrelerinin teorik verimi % 25,62 olarak bulundu. Bu tez çalışması için geliştirilen tek eklemlı GaAs ve iki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücrelerinin büyütme esnasında, güneş hücre tasarımlarında belirlenen optimizasyon şartları göz öne alındı. Güneş hücrelerinin tasarım süreci, büyütme esnasında kaybedilen zaman ve maliyetin en aza indirgenmesine katkı sağladı.

İki eklemlı  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücreleri In içeriklerine göre, karasal (AM1.5G) ve uzay uygulamaları (AM0) için tasarlandı. Güneş hücrelerindeki In içeriği arttıkça, kısa devre akım yoğunluğunun arttığı, açık devre voltajının da azaldığı görüldü. Buna bağılı olarak da güneş hücrelerinin veriminin azaldığı görüldü. Verimdeki bu azalış açık devre voltajına bağılı olduğundan, verim değerinin açık devre voltajı ile kontrol edildiğini gösterir. Güneş hücreleri pek çok alanda kullanılmasından dolayı sıcaklığın performans değerleri üzerindeki etkisi incelendi. Güneş hücrelerinin sıcaklığı arttıkça, kısa devre akım yoğunluğunun arttığı, açık devre voltajının da azaldığı görüldü. Voltaj değerindeki azalış, akım yoğunluğunun artışından daha büyük olduğundan verim değeri azalış gösterdi. Tasarlanan iki eklemlı  $Ga_{1-y}In_yP/Ga_{1-x}In_xAs$  güneş hücrelerinin amacı, monolitik güneş hücre yapılarının GaAs alttaş ile örgü ve akım uyumlu epitaksiyel büyütölmelerine yol göstermektir. GaAs alttaş üzerine büyütölen güneş hücreleri epitaksiyel kaldırma tekniğı ile düşük maliyetli esnek alttaş üzerine yapıştırılabilir. Böylece elde edilen güneş hücreleri hafif ve yüksek verime sahip olduklarından uzay ve hava araçlarında kullanılmaları beklenilmektedir.

Bu tez çalışmasında tasarımı yapılan tek eklemli GaAs ve iki eklemli GaInP/GaAs güneş hücre yapıları, MBE tekniği ile büyütüldü. Güneş hücre yapılarının yapısal analizi HR-XRD desenleri ile optik analizi ise PL spektrumu ile yapıldı. Fotolitografi ve termal buharlaştırma sistemi ile güneş hücrelerinin fabrikasyonları gerçekleştirildi. Güneş hücrelerinin I-V ölçüm sisteminde elektriksel ölçümleri yapıldı. Bu tezin temel amacı güneş hücrelerinin verimini artırmaktır. Bu doğrultuda ilk olarak iki eklemli GaInP/GaAs güneş hücresine farklı fabrikasyonlar uygulanarak verimlerdeki değişimler gözlemlendi. İkinci olarak güneş hücrelerine yansıma önleyici kaplama yapılarak verim değerine etkisi incelendi.

Geliştirilen güneş hücre yapılarının HR-XRD ölçümlerinden elde edilen  $\omega$ -2 $\theta$  taramasından kaliteli bir yapı elde edildiği belirlendi. Elde edilen veriler kullanılarak hücrelerin x alaşım oranları ve buna bağlı yasak enerji aralıkları hesaplandı. Geliştirilen güneş hücrelerin PL spektrumundan yasak enerji aralıkları ve buna bağlı olarak da x alaşım oranları hesaplandı. Tek eklemli güneş hücresinin pencere tabakasındaki AlGaAs ve iki eklemli güneş hücresinin üst hücresindeki GaInP yarıiletken malzemeleri için bulunan x alaşım oranlarının ve yasak enerji aralıklarının HR-XRD ve PL ölçümlerinin birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlendi.

Güneş hücrelerinden 1x1 cm<sup>2</sup>'lik parçalar kesildi. A1 numunesi olarak adlandırılan tek eklemli GaAs güneş hücresinin ön ve arka kontağına Au metali kaplandı. İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücresinden iki parça alınarak B1 ve B2 olarak adlandırıldı. B1 numunesinin ön ve arka kontağına Au metali kaplandı. B2 numunesinin ön kontağına Au/Ti ve arka kontağına ise AuZn alaşımı kaplandı. Bu numunelerin I-V ölçüm sisteminden verim değerleri elde edildikten sonra numunelere yansıma önleyici (AR) kaplama yapılarak tekrar I-V ölçümleri alındı.

Tek eklemli GaAs güneş hücresinin verim değeri %12,11 olarak elde edildi. B1 numunesinin verim değeri %14,65, B2 numunesinin verim değeri ise % 15,26 olarak elde edildi. İki eklemli GaInP/GaAs güneş hücresine uygulanan farklı metalizasyon malzemesi %4,16'lık verim artışına neden oldu. B2 numunesinin fabrikasyonunda kullanılan Ti metalinin, Au metalinin yüzeye daha iyi tutulmasının yanında omik kontak oluşumu sürecinde hücre katmanına metal difüzyonunu önlemesi ve bu sayede seri direnç etkisinin azalmasına katkı sağladığı değerlendirilmektedir. Böylece güneş hücresinde foto-akım kayıplarını azaltarak

verim değerinin artmasına neden olmaktadır. B1 ve B2 numunelerine AR kaplama olarak  $Al_2O_3/TiO_2$  uygulandığında, verim değerleri sırasıyla %15,72 ve %16,90 olarak elde edildi. Yansıma önleyici kaplama yapıldıktan sonra B1 ve B2 numunelerinin verim değerlerinde sırasıyla, %7,30 ve %10,74'lük bir artış olduğu görüldü. Güneş hücresi yüzeyinin metal kontaklar arasına kaplanan AR kaplama, güneş ışığından daha fazla foton soğurulmasına neden olduğundan, güneş hücrelerinin verim değerlerini artırdı.

Tek eklemlı GaAs ve iki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücrelerinin teorik hesaplarının öngördüğü değerlerden düşük çıkmasının birçok nedenden kaynaklandığı düşünölmektedir. Bu nedenler güneş enerjisinin bir kısmının ısı enerjisine dönüşmesi, yarıiletken yasak enerji aralığından küçük enerjili fotonların elektron-deşik çiftine katkıda bulunamaması, üretilen elektron-deşik çiftlerinin küçük bir kısmının rekombinasyona uğramasından dolayı foto-üretim katkıda bulunamamasıdır. Büyütölen kristaldeki kusur seviyelerinin yük taşıyıcılarını tuzaklaması ve metalizasyon kaynaklı seri direnç artışından kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir. Bununla birlikte yapılan yapısal karakterizasyonlar üretilen epi-katmaların kristal kalitesinin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu durum dikkate alındığında, hücre verimini olumsuz etkileyen en önemli taşıyıcı tuzaklanmasının, kullanılan alttaşlardaki kusurluluktan kaynaklandığı düşünölmektedir.

Kalkınma Bakanlığı tarafından 2011K120290 ve 2016K121220 nolu projeler ile desteklenen ve Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan cihazlar kullanılarak günümüz teknolojisi açısından önemli olan, bu tez kapsamındaki tek ve iki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücre yapılarının tasarımı, büyütölmeleri, karakterizasyonları ve hücre fabrikasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir. Güneş hücre fabrikasyonları tamamlanan güneş hücrelerinden elde ettiğimiz sonuçlar değerlendirildiğinde, tek ve iki eklemlı güneş hücrelerinin üretimlerinin başarılı olarak gerçekleştirildiği görölmektedir. Bu tez çalışmasında geliştirilen iki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücrelerinin geliştirilerek konsantre fotovoltaiik ve uzay uygulamaları teknolojilerinde kullanılması beklenilmektedir. İleriki çalışmalarda, iki eklemlı GaInP/GaAs güneş hücre yapılarının geliştirilerek verimlilik değerlerinin artırılmasına yönelik çalışmalara devam edilmesi hedeflenmektedir.

## 8. KAYNAKLAR

- [1] Wai, R.J., Member, S., Wang W. H., and Lin, C. Y., “High-performance stand-alone photovoltaic generation system”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(1), (2008).
- [2] Mohammed, S. S., “Modeling and simulation of photovoltaic module using MATLAB/Simulink”, *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*, 2(5), 350-355, (2011).
- [3] Kumar, A., Kumar, K., Kaushik, N., Sharma, S. and Mishra, S., “Renewable energy in India: current status and future potentials”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2434-2442, (2010).
- [4] King, R. R., Law, D. C., Edmondson, K. M., Fetzer, C. M., Kinsey, G S., Yoon, H., et al., "40% efficient metamorphic GaInP/GaInAs/Ge multijunction solar cells," *Applied Physics Letters*, 90, (183516), 1-3, (2007).
- [5] Crabtree, G. W. and Lewis N. S., “Solar energy conversion”, *Physics Today*, 60(3), 37-42, (2007).
- [6] Lewis, N. S. “Toward cost-effective solar energy use”, *Science*, 315 (5813), 798-801, (2007).
- [7] Kannan, N. and Vakeesan, D., “Solar energy for future world: - A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092-1105, (2016).
- [8] Melikoglu M. “Pumped hydroelectric energy storage: Analysing global development and assessing potential applications in Turkey based on Vision 2023 hydroelectricity wind and solar energy targets”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 146-153, (2017).
- [9] Kaya, D., “Renewable energy policies in Turkey”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10, 152-163, (2006).
- [10] Demirbas A., “Turkey’s energy overview beginning in the twenty-first century”,

*Energy Conversion and Management*, 43, 1877-1887, (2002).

- [11] Melikoglu M., “The role of renewables and nuclear energy in Turkey's Vision 2023 energy targets: Economic and technical scrutiny”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1-12, (2016).
- [12] Sonmez M., Akgüngör A. P. and Bektas S., “Estimating transportation energy demand in Turkey using the artificial bee colony algorithm”, *Energy*, 122, 301-310, (2017).
- [13] Fonash, S. J., *Solar Cell Device Physics*, Oxford: Elsevier, (2010).
- [14] Tanabe, K., “A Review of ultrahigh efficiency III-V semiconductor compound solar cells: Multijunction tandem, lower dimensional, photonic up/down conversion and plasmonic nanometallic structures”, *Energies*, 2, 504-530, (2009).
- [15] Luque, A. and Hegedus, S., *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, England: John Wiley and Sons, (2002).
- [16] Li, Z. Q., Xiao, Y. G., and Simon Li, Z. M., “Two-dimensional simulation of GaInP/GaAs/Ge triple junction solar cell”, *Physics State solid (c)*, 4 (5), 1637-1640, (2007).
- [17] Kumar, S., Nehra, M., Deep, A., Kedia, D., Dilbaghi, N. and Kim, K. H., “Quantum-sized nanomaterials for solar cell applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 821-839, (2017).
- [18] Gordon, I., Vallon, S., Mayolet, A., Beaucarne, G. and Poortmans, J., “Thin-film monocrystalline-silicon solar cells made by a seed layer approach on glass-ceramic substrates”, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 94, 381-385, (2010).
- [19] Yadav, P., Tripath, B., Pandey, K. and Kumar, M., “Investigating the charge transport kinetics in poly-crystalline silicon solar cells for low-concentration illumination by impedance spectroscopy”, *Solar Energy Materials Solar Cells*, 133, 105-112, (2015).

- [20] Wu, X., “High-efficiency polycrystalline CdTe thin-film solar cells”, *Solar Energy*, 77, 803-814, (2004).
- [21] James, S. and Pa, J., “Strategies to increase CdTe solar-cell voltage”, *Thin Solid Films*, 515, 6099-6102, (2007).
- [22] Minemoto, T. and Murata, M., “Theoretical analysis on effect of band off sets in perovskite solar cells”, *Solar Energy Materials Solar Cells*, 133, 8-14, (2015).
- [23] Ke, J. C., Wang, Y. H., Chen, K. L. and Jung H. C., “Effect of open-circuit voltage in organic solar cells based on various electron donor materials by inserting molybdenum trioxide anode buffer layer”, *Solar Energy Materials. Solar Cells*, 133, 248-254, (2015).
- [24] Zahler, J.M., Tanabe K., Ladous, C., Pinnington, T., Newman, F.D. and Atwater, H.A., “High efficiency InGaAs solar cells on Si by InP layer transfer”, *Applied Physics Letters*, 91(012108), (2007).
- [25] Law, D.C., King, R.R., Yoon, H., Archer, M.J., Boca, A., Fetzer, C.M., et al., “Future technology pathways of terrestrial III–V multijunction solar cells for concentrator photovoltaic systems”, *Solar Energy Materials Solar Cells*, 94, 1314-1318, (2010).
- [26] Huang, X., Han, S. Huang W. and Liu, X., “Enhancing solar cell efficiency: the search for luminescent materials as spectral converters”, *Chemical Society Reviews*, 42, 173-201, (2013).
- [27] Khanna, K. M., Ekai, R., Ronno, C. K., Rotich, S. K. and Torongey, P. K., “Theory of multilayer solar cells”, *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, 43, 432-438, (2005).
- [28] Green, M. A., “Third generation photovoltaics: solar cells for 2020 and beyond”, *Physica E*, 14, 65-70, (2002).
- [29] Dimroth F., “High-efficiency solar cells from III-V compound semiconductors”, *Physics States Solid*, 3, 373-379, (2006).

- [30] Acevedo, A. M. and Cruz, G. C., “Forecasting the development of different solar cell technologies”, *International Journal of Photoenergy*, 2013, 1-5, (2013).
- [31] Bedair, S. M., Lamorte, M. F., and Hauser, J. R., “A two-junction cascade solar-cell structure”, *Applied Physics Letters*, 34, 38-39, (1979).
- [32] Leite, M. S., Woo, R. L., Munday, J. N., Hong, W. D., Mesropian, S. Law, D. C., et al., “Towards an optimized all lattice-matched InAlAs/InGaAsP/InGaAs multijunction solar cell with efficiency >50%”, *Applied Physics Letters*, 102, 1-5, (2013).
- [33] Takamoto, T., Ikeda, E., and Ohmori, H. K. M., “Over 30% efficient InGaP/GaAs tandem solar cells”, *Applied Physics Letters*, 70, 381-383, (1997).
- [34] Sharma, S., Jain, K. K. and Sharma A., “Solar Cells: In Research and Applications A Review”, *Materials Sciences and Applications*, 6, 1145-1155, (2015).
- [35] Messenger, R. A. and Ventre, J., “*Photovoltaic systems engineering*”, Boca Raton, London, New York, Washington: CRC Press 2005.
- [36] A. Guechi and M. Chegaar, “Effects of diffuse spectral illumination on microcrystalline solar cells,” *Journal of Electron Devices*, 5, 116-121, (2007).
- [37] Villalva, M. G., Gazoli, J. R. and Filho, E. R., “Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24 (5), 1198-1208, (2009).
- [38] Goetzberger, A., Knobloch, J. and VoB, B., *Crystalline Silicon Solar Cells*, England: John Wiley and Sons, (1998).
- [39] Sze, S. M. and Kwok K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*, Canada: John Wiley and Sons, (2007).
- [40] C. H. Henry, “Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells”, *Journal of Applied Physics*, 51(8), 4494-4500, (1980).



- [41] Trupke, T. and Würfel, M. A. G.P., “Improving solar cell efficiencies by up-conversion of sub-band-gap light”, *Journal of Applied Physics*, 92(7), 4117-4122, (2002).
- [42] Das, N., Wongsodihardjo, H. and Islam, S., “Modeling of multi-junction photovoltaic cell using MATLAB/Simulink to improve the conversion efficiency”, *Renewable Energy*, 74, 917-924, (2015).
- [43] Green, M.A., “Photovoltaics: technology overview” *Energy Policy*, 28, 989-998, (2000).
- [44] Durbin, S. M. and Gray, J. L., “Numerical modeling of photon recycling in solar cells” *IEEE Transactions on Electron Devices*, 41(2), 239-245, (1994).
- [45] Cotal, H., Fetzer, C. Boisvert, J., Kinsey, G., King, R. and Hebert, P., et al., “III–V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics”, *Energy Environmental Science*, 2, 174-192, (2009).
- [46] Fraas L. and Partain L., *Solar Cells and Their Applications*, Canada: John Wiley and Sons, (2010).
- [47] Loferski J. J., “Theoretical considerations governing the choice of the optimum semiconductor for photovoltaic solar energy conversion”, *Journal of Applied Physics*, 27, 777-784, (1956).
- [48] Shockley, W. and Queisser, H. J., “Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells”, *Journal of Physics Letters*, 32, 510-519, (1961).
- [49] Castafier, L. and Silvestre, S., *Modelling Photovoltaic Systems using PSpice*, England: John Wiley and Sons, (2002).
- [50] Nell, M.E. and Barnett, A. M., “The spectral p-n junction model for tandem solar-cell design”, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 34(2), 257-266, (1987).
- [51] Olsen, G.H., Ettenberg, M., and D'Aiello, R. V., “Vapor-grown InGaP/GaAs solar cells”, *Applied Physics Letters*, 33(7), 606-608, (1978).

- [52] Castañer, A., and Markvart, L., *Solar cells: materials, manufacture and operation*, Elsevier: Oxford, 66, (2005).
- [53] Vos, A. D., “Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells”, *Journal of Applied Physics*, 13, 839-846, (1980).
- [54] Cooke, M., “Moving forward from 44% to 50% conversion for III–V solar cells”, Technology focus: photovoltaics, *Compounds Advanced Silicon*, 7, 72-77, (2013).
- [55] National Renewable Energy Laboratory (NREL), National Center for Photovoltaics, “Best research-cell efficiencies chart [online]”, (13 January 2017), [http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency\\_chart.jpg](http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg), (2015).
- [56] Green, M. A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W. and Dunlop, E. D., “Solar cell efficiency tables (version 49),” *Progress In Photovoltaics: Research Applications*, 25, 3-13, (2017).
- [57] King, R. R., Bhusari, D., Larrabee, D., Liu, X.-Q., Rehder, E., Edmondson, K., et al., “Solar cell generations over 40% efficiency”, *Progress In Photovoltaics: Research Applications*, 20, 801-815, (2012).
- [58] Garcia, I, Rey-Stolle, I. and Algora, C., “Performance analysis of AlGaAs/GaAs tunnel junctions for ultra-high concentration photovoltaics”, *Journal of Applied Physics Letters*, 45 (045101), 1-8, (2012).
- [59] Nayak, P.P., Dutta, J.P. and Mishra, G.P., “Efficient InGaP/GaAs DJ solar cell with double back surface field layer”, *Engineering Science and Technology*, an International Journal 18, 325-335, (2015).
- [60] Singh, K. J. and Sarkar, S. K., “Highly efficient ARC less InGaP/GaAs DJ solar cell numerical modeling using optimized InAlGaP BSF layers”, *Optimum Quantum Electron*, 43, 1-21, (2012).
- [61] Zide, J. M. O., Kleiman-Shwarsstein, A., Strandwitz, N. C., Zimmerman, J. D., Steenblock-Smith T., Gossard, A. C., et al., “Increased efficiency in multijunction solar cells through the incorporation of semimetallic ErAs

- nanoparticles into the tunnel junction”, *Applied Physics Letters*, 88 (162103), 1-3, (2006).
- [62] Siyu, L. and Xiaosheng, Q. “AlGaAs/GaAs tunnel junctions in a 4-J tandem solar cell”, *Journal of Semiconductors*, 32(11), 1-4, (2011).
- [63] Wheeldon, J. F., Valdivia, C. E., Walker, A. W., Kolhatkar, G., Jaouad, A., Turala, A., et al., “Performance comparison of AlGaAs, GaAs and InGaP tunnel junctions for concentrated multijunction solar cells”, *Progress In Photovoltaics: Research. Applications*, 19, 442-452, (2011).
- [64] Neamen, D. A. (2003). *Semiconductor physics and devices: basic principles*. Newyork: McGraw-Hill, 268-318.
- [65] Aydoğan Ş. (2011). *Katıhal Fiziği*. Ankara: Nobel Yayın Dağıtım.
- [66] Saylan, S., Milakovich, T., Hadi, S. A., Nayfeh, A., Fitzgerald, E., A. and Dahlem, M. S., “Multilayer antireflection coating design for GaAs<sub>0.69</sub>P<sub>0.31</sub>/Si dual-junction solar cells”, *Solar Energy*, 122, 76-86, (2015).
- [67] Bouhafs, D., Moussi, A., Chikouche, A. and Ruiz, J.M. “Design and simulation of antireflection coating systems for optoelectronic devices: Application to silicon solar cells”, *Solar Energy Materials Solar Cells*, 52, 79-93, (1998).
- [68] Bett, A.W., Adelhelm, R., Agert, C., Beckert, R., Dimroth, F. and Schubert, U., “Advanced III-V solar cell structures grown by MOVPE”, *Solar Energy Materials Solar Cells*, 66, 541-550, (2001).
- [69] Wu, D. S., Lin, C. C., Chen, C. N., Lee, H. H. and Huang, J. J., “Properties of double-layer Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> antireflection coatings by liquid phase deposition”, *Thin Solid Films*, 584, 248-252, (2015).
- [70] Sahoo, G.S., Nayak, P.P. and Mishra, G.P., “An ARC less InGaP/GaAs DJ solar cell with hetero tunnel junction”, *Superlattices and Microstructures*, 95, 115-127, (2016).

- [71] Pla, J., Barrera, M. and Rubinelli, F., “The influence of the InGaP window layer on the optical and electrical performance of GaAs solar cells”, *Semiconductor Science and Technology*, 22, 1122-1130, (2007).
- [72] Hirst, L. C. and Ekins-Daukes, N. J., “Fundamental losses in solar cells” *Progress In Photovoltaics: Research Applications*, 19, 286-293, (2011).
- [73]. Shivaganaik H and Jangamshetti S. H., “Modeling and analysis of multi-junction solar cells,” in *Proceedings of the International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology*, 174-179, (2011).
- [74] Singh, P. and Ravindra, N. M., “Temperature dependence of solar cell performance—an analysis”, *Solar Energy Materials Solar Cells*, 101, 36-45, (2012).
- [75] Yamaguchia, M., Takamotob, T. and Araki, K.,” Super high-efficiency multi-junction and concentrator solar cells” ”, *Solar Energy Materials Solar Cells*, 90, 3068-3077, (2006).
- [76] Bett, A.W., Dimroth, F., Stollwerck, G. and Sulima, O.V., “III-V compounds for solar cell applications”, *Applied Physics A*, 69(2), 119-129, (1999).
- [77] Kao, Y. C., Ou, S. L., Wu, F. L. and Horng, R.H., “Performance enhancement of III–V multi-junction solar cells using indium-tin-oxide electrodes”, *Thin Solid Films* 612, 36-40, (2016).
- [78] Das, N., Wongsodihardjo, H. and Islam S., “Modeling of multi-junction photovoltaic cell using MATLAB/Simulink to improve the conversion efficiency”, *Renewable Energy*, 74, 917-924, (2015).
- [79] Yamaguchi, M., Takamoto, T., Araki, K. and Ekins-Daukes, N., “Multi-junction III–V solar cells: current status and future potential”, *Solar Energy*, 79, 78-85, (2005).
- [80] Feng, S. W., Lai C. M., Tsai, C. Y. and Tu, L. W., “Numerical simulations of the current-matching effect and operation mechanisms on the performance of InGaN/Si tandem cells”, *Nanoscale Research Letters*, 9(1), 1-10 (2014).

- [81] Braun, A., Szabó, N., Schwarzburg, K., Hannappel, T., Katz, E. A., and Gordon, J. M., “Current-limiting behavior in multijunction solar cells”, *Applied Physics Letters*, 98(223506), 1-3, (2011).
- [82] Feitknecht, L., “Evaluations on Current-matching of Multi-junction Photovoltaics under Outdoor Conditions”, *Energy Procedia*, 15, 396-402, (2012).
- [83] Hossain, M. J., Tiwari, B. and Indranil, B., “ Novel high efficiency quadruple junction solar cell with current matching and quantum efficiency simulations”, *Solar Energy* , 139, 100-107, (2016).
- [84] Bertness, K. A., Friedman, D. J., Kibbler, A. E., Kramer, C., Kurtz, S. R., and Olson, J. M. (1994), “High efficiency GaInP/GaAs tandem solar cells”, *AIP Conference Proceedings*, 306, 100-110.
- [85] Olson, J. M., Kurtz, S. R., Kibbler, A. E. and Faine, P., “A 27.3% efficient Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P/GaAs tandem solar cell”, *Applied Physics Letters*, 56, 623-625 (1990).
- [86] García, I., Rey-Stolle, I., Galiana, B., and Algora, C., “A 32.6% efficient lattice matched dual-junction solar cell working at 1000 suns”, *Applied Physics Letters*, 94 (053509), 1-3, (2009).
- [87] Bertness, K. A., Friedman, D. J., Kibbler, A. E., Kramer, C., Kurtz, S. R., and Olson, J. M., “29.5%-efficient GaInP/GaAs tandem solar cells”, *Applied Physics Letters*, 65, 989-991, (1994).
- [88] Yamaguchi, M., “III–V compound multi-junction solar cells: present and future”, *Solar Energy Materials Solar Cells*, 75, 261-269, (2003).
- [89] Vurgaftman I., Meyer J. R., and Ram-Mohan L. R., “Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys”, *Journal of Applied Physics*, 89, 5815-5875, (2001).
- [90] Haas, A. W., Wilcox, J. R., Gray, J. L. and Schwartz, R. J., “Design of a GaInP/GaAs tandem solar cell for maximum daily, monthly, and yearly energy

- output” *Journal of Photonics for Energy*, 1, 1-23, (2011).
- [91] DeLong, M. C., Mowbray, D. J., Hogg, R. A., Skolnick, M. S., Williams, J. E., Meehan, K., et al., “Band gap of ‘‘completely disordered’’ Ga<sub>0.52</sub>In<sub>0.48</sub>P”, *Applied Physics Letters*, 66, 3185-3187, (1995).
- [92] Sahoo, G. S. and Mishra G. P., “Effect of wideband gap tunnel diode and thickness of the window layer on the performance of a dual junction solar cell”, *Procedia Technology*, 25, 684-691, (2016).
- [93] Kayes, B. M., Zhang, L., Twist, R., Ding, I-K. and Higashi, G. S., “Flexible thin-film tandem solar cells with >30% efficiency”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4 (2), 729-733, (2014).
- [94] Xiong, K., Lu, S., Dong, J., Zhou T., Jiang D., Wang, R., et al., “Light-splitting photovoltaic system utilizing two dual-junction solar cells”, *Solar Energy*, 84, 1975–1978, (2010).
- [95] Dutta, J.P., Nayak, P.P. and G.P. Mishra, “Design and evaluation of ARC less InGaP/GaAs DJ solar cell with InGaP tunnel junction and optimized double top BSF layer” *Optics*, 127, 4156-4161, (2016).
- [96] Blakemore, J. S., “Semiconducting and other major properties of gallium arsenide”, *Journal of Applied Physics Letters*, 53(10), 123-181, (1982).
- [97] Anspaugh B. E. (1996). “*GaAs solar cell radiation handbook*”.California: National Aeronautics and Space Administration 1-20.
- [98] Adachi, S. (2009). “*Properties of semiconductor alloys:group-IV, III–V and II–VI semiconductors*”, United Kingdom: John Wiley and Sons.
- [99] Web: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/>
- [100] Fox, M., (2014). *Katıların optik özellikleri*. (Çev: Ş. Aydoğan), Nobel akademik yayıncılık, 49-75.

- [101] Guijiang, L., Jyhchiarng, W., and Meichun, H. “Theoretical modeling of the interface recombination effect on the performance of III–V tandem solar cells”, *Journal of Semiconductors*, 31(8), 1-6, (2010).
- [102] Murphy, A.B., Barnes, P.R.F., Randeniya, L.K., Plumb, I.C., Grey, I.E., Horne, M.D., et al., “Efficiency of solar water splitting using semiconductor electrodes” *International Journal of Hydrogen Energy*, 31, 1999-2017, (2006).
- [103] Kurtz, S. R., Faine, P. and Olson, J. M., “Modeling of two junction, series connected tandem solar cells using top cell thickness as an adjustable parameter”, *Journal of Applied Physics*, 68, 1890-1895, (1990).
- [104] Han, Z., Nuofu, C., Yu, W., Zhigang, Y., Xingwang, Z., Huiwei S., et al., “Design and optimization of a monolithic GaInP/GaInAs tandem solar cell”, *Journal of Semiconductors*, 31(8), 1-4, (2010).
- [105] Or, A. B. and Appelbaum, J., “Dependence of multi-junction solar cells parameters on concentration and temperature” *Solar Energy Materials Solid Cells*, 130, 234-240, (2014).
- [106] Lindholm, F.A., Fossum, J.G. and Burgess, E.L., “Application of the superposition principle to solar-cell analysis”, *IEEE Transactions Electron Devices*, 26(3), 165-171, (1979).
- [107] Amine, A., Mir, Y., and Zazoui, M., “Modelling of dual-junction solar cells including tunnel junction”, *Advances in Condensed Matter Physics*, 2013, 1-5, (2013).
- [108] Green, M. A. (1982). *Solar cell operating principles, technology and system applications*. United States of America: Prentice-Hall, 62-84.
- [109] Kittel C., (2014). *Katı Hal Fiziğine Giriş*. (Çev: G. Önengüt ve D. Önengüt), Palme yayıncılık, 187-219.
- [110] Bensalem, S., Chegaar, M. and Herguth, A., “Band gap dependence with temperature of semiconductors from solar cells electrical parameters”, *Current Applied Physics*, 17, 55-59, (2017).

- [111] Varshni, Y.P., “Temperature dependence of the energy gap in semiconductors”, *Physica*, 34(1), 149-154, (1967).
- [112] Panish, M. B. and Jr. Casey, H. C., “Temperature dependence of the energy gap in GaAs and GaP”, *Journal of Applied Physics*, 40, 163-167, (1969).
- [113] Erol A. ve Balkan N. (2013). *Yarıiletkenler ve optoelektronik uygulamaları*. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- [114] Green M. A., “General temperature dependence of solar cell performance and implications for device modelling”, *Progress In Photovoltaics: Research. Applications*, 11, 333-340, (2003).
- [115] Min, C., Nuofu, C., Xiaoli, Y., and Han, Z., “Fabrication and temperature dependence of a GaInP/GaAs/Ge tandem solar cell”, *Journal of Semiconductors*, 33(2), 1-4 (2012).
- [116] Ponce-Alcantara, S., Connolly, J. P., Sanchez, G., Miguez, J. M., Hoffmann, V. and Ordas, R., “A statistical analysis of the temperature coefficients of industrial silicon solar cells”, *Energy Procedia*, 55, 578-588, (2014).
- [117] Dubey, S., Sarvaiya, J. N. and Seshadri, B., “Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world a review”, *Energy Procedia*, 33, 311-321, (2013).
- [118] Wang Z., Zhang, H., Zhao, W., Zhou, Z. and Chen, M., “The effect of concentrated light intensity on temperature coefficient of the InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell”, *The Open Fuels and Energy Science Journal*, 8, 106-111, (2015).
- [119] Braun, A., Katz, E. A., and Gordon, J. M., “Basic aspects of the temperature coefficients of concentrator solar cell performance parameters”, *Progress In Photovoltaics: Research. Applications*, 21, 1087-1094, (2013).
- [120] Laudani, A., Mancilla-David F., Riganti-Fulginei F. and Salvini, A. “Reduced-form of the photovoltaic five-parameter model for efficient computation of parameters”, *Solar Energy*, 97, 122-127, (2013).



- [121] Feteha, M.Y. and Eldallal, G.M., “The effects of temperature and light concentration on the GaInP/GaAs multijunction solar cell’s performance”, *Renewable Energy*, 28, 1097-1104, (2003).
- [122] Wysocki, J. J. and Rappaport, P., “Effect of temperature on photovoltaic solar energy conversion”, *Journal of Applied Physics*, 31(3), 571-578, (1960).
- [123] Friedman, D.J., “Progress and challenges for next-generation high-efficiency multijunction solar cells”, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 14, 131-138, (2010).
- [124] Roensch S., Hoheisel, R., Dimroth, F. and Bett A. W., “Subcell I-V characteristic analysis of GaInP/GaInAs/Ge solar cells using electroluminescence measurements”, *Applied Physics Letters*, 98, 1-3, (2011).
- [125] Nishioka, K., Sueto, T., Uchida, M. and Ota, Y., “Detailed analysis of temperature characteristics of an InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cell”, *Journal of Electronic Materials*, 39 (6), 704-708, (2010).
- [126] Lei, L., NuoFu, C., YiMing, B., Ming, C., Han, Z., FuBao, G., ZhiGang, Y., et al., “Quantum efficiency and temperature coefficients of GaInP/GaAs dual-junction solar cell”, *Science in China Series E: Technological Sciences*, 52 (5), 1176-1180, (2009).
- [127] Singh, P., Singh, S. N., Lal, M. and Husain, M., “Temperature dependence of I–V characteristics and performance parameters of silicon solar cell”, *Solid Energy Materials Solar Cells*, 92, 1611-1616, (2008).
- [128] Steiner, M. A., Geisz, J. F., Friedman, D. J. Olavarria, W. J., Duda, A., and Moriarty, T. E., (2011) “Temperature-dependent measurements of an inverted metamorphic multijunction (IMM) solar cell”, *Presented at the 37<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1-6.
- [129] Da Y. and Xuan, Y., “Effect of temperature on performance of nanostructured silicon thin-film solar cells”, *Solar Energy*, 115, 109-119, (2015).

- [130] Ataser, T., Akın, N., Zeybek, O. and Ozcelik, S., “Effects of band gap alignment and temperature on device performance of GaInP/Ga(In)As monolithic tandem solar cells”, *Jornal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 18, 785-792, (2016).
- [131] Yang, J., Peng, Z., Cheong, D., and Kleiman, R., "Fabrication of high-efficiency III-V on silicon multijunction solar cells by direct metal interconnect," *IEEE Journal of Photovoltaics*, 4, 1149-1155, (2014).
- [132] Derendorf K., Essig, S., Oliva, E., Klinger, V., Roesener, T, Philipps, S. P., "Fabrication of GaInP/GaAs//Si solar cells by surface activated direct wafer bonding," *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3, 1423-1428, (2013).
- [133] Youtsey, C., Adams, J., Chan, R., Elarde, V., Hillier, G., Osowski, M., et al., (2012) “Epitaxial lift-off of large-area GaAs thin-film multi-junction solar cells” *CS MANTECH Conference*, Boston, Massachusetts, USA.
- [134] Furuya, M., Soga, M. and Takano, H., “Comparison of MOCVD and MBE semiconductor superlattices for the evaluation of depth resolution in AES and SIMS”, *Applied Surface Science*, 100-101, 508-512, (1996).
- [135] Herman, M. A. and Sitter H., “*Molecular beam epitaxy fundamentals and current status*”, Berlin: Springer, (1996).
- [136] Sonoda, T., Ito M., Segawa, K., Takamiya, S. and Mitsui S., “Ultra-high throughput of GaAs and (AlGa) as layers grown by molecular beam epitaxy (MBE) with a specially designed MBE system”, *Japanse Journal of Applied Physics*, 27 (3), 337-343, (1988).
- [137] Herman, M. A., “Approaches to understanding MBE growth phenomena”, *Thin Solid Films*, 267, 1-14, (1995).
- [138] Hook, J. R. ve Hall, H. E., (1999). *Kathal Fiziği*. (Çev: F. Köksal, M. Altuntaş, M. Dinçer ve E. Başaran), Literatür Yayıncılık, 1-32.
- [139] Beiser, A. (1997). *Modern fiziğin kavramları*. (Çev: G. Önengüt ve Ö. Aktüz), Akademi Yayıncılık, 48-89.

- [140] Zhang, C., Kim, Y., Ebert, Chris, Faleev, N. N. and Honsberg, C. (2015). Influence of High Growth Rate on GaAs-based Solar Cells Grown by Metalorganic Chemical Vapor Deposition. *Photovoltaic Specialist Conference 2015, IEEE 42nd*.
- [141] Olson J.M., McMahon, W.E. and Kurtz S. (2006). Effect of Sb on the Properties of GaInP Top Cells. *Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on*, 1-4.
- [142] Liu J. J., Ho, W. J., Lee, Y. Y. and Chang, C. M., “Simulation and fabrication of SiO<sub>2</sub>/graded-index TiO<sub>2</sub> antireflection coating for triple-junction GaAs solar cells by using the hybrid”, *Thin Solid Films*, 570, 585-590, (2014).
- [143] Homier, R., Jaouad, A., Turala, A., Valdivia, C. E., Masson, D., Wallace, S. G., et al., “Antireflection coating design for triple-junction III–V/Ge high-efficiency solar cells using low absorption PECVD silicon nitride”, *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2 (3), 393-397, (2012).