



**III-V GRUBU GÜNEŞ HÜCRESİ GELİŞTİRİLMESİ VE PROTOTİP
YOĞUNLAŞTIRICILI FOTOVOLTAİK MODÜL ÜRETİMİ**

Yunus ÖZEN

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2015

Yunus ÖZEN tarafından hazırlanan “III-V GRUBU GÜNEŞ HÜCRESİ GELİŞTİRİLMESİ VE PROTOTİP YOĞUNLAŞTIRICILI FOTOVOLTAİK MODÜL ÜRETİMİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fizik Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Fizik, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan : Prof. Dr. Güven ÇANKAYA

Malzeme Mühendisliği, Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Prof. Dr. Mehmet KASAP

Fizik, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç. Dr. Adem TATAROĞLU

Fizik, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç. Dr. Halit ALTUNTAŞ

Fizik, Çankırı Karatekin Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 10/12/2015

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Metin GÜRÜ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

.....
Yunus ÖZEN

10/12/2015

III-V GRUBU GÜNEŞ HÜCRESİ GELİŞTİRİLMESİ VE PROTOTİP YOĞUNLAŞTIRICILI FOTOVOLTAİK MODÜL ÜRETİMİ

(Doktora Tezi)

Yunus ÖZEN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2015

ÖZET

Bu çalışmada, tek eklemli Ge, iki eklemli GaAs/Ge, GaInP/GaAs ve üç eklemli GaInP/GaAs/Ge fotovoltaik (PV) hücre yapıları, örgü ve akım uyumlu olacak şekilde tasarlandı. Bu yapılar MBE tekniği ile büyütüldü. PV hücre aygıt fabrikasyonları litografi ve metalizasyon işlemleri ile tamamlandı. Bu hücreler arasında GaInP/GaAs/Ge üç eklemli güneş hücresinin yoğunlaştırılmış PV (CPV) modülleri üretildi. CPV modülün önemli bileşenlerinden olan parabolik ayna ve konik şekilli ikincil optik elemanların tasarımları yapılarak üretimleri gerçekleştirildi. Yoğunlaştırıcı sistem olarak Fresnel mercekle, tekli büyük alan parabolik ayna ve 16 parabolik aynadan oluşan yoğunlaştırıcı olmak üzere üç adet modül sistemi geliştirildi. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcı sistemden 500 güneş elde edildi. Yüksek yoğunlaştırma etkisiyle oluşabilecek sıcaklığı düşürmek için alıcı sistem ve ısı tankı tasarımı yapıldı ve hücre bu sistem üzerine yerleştirildi. Yoğunlaştırıcı ayna-ikincil optik-hücre alıcısı ve ısı tankı entegrasyonu yapılarak 16 aynadan oluşan CPV modül prototipi üretildi. GaInP/GaAs/Ge üç eklemli yapının güneş hücre parametrelerini belirlemek için akım-voltaj karakteristikleri AM1,5'e kalibre solar simülatör kullanılarak 1 güneş ve CPV sistem ile 500 güneş altında hücre ve modül verimlilikleri belirlendi. GaInP/GaAs/Ge üç eklemli hücrenin 500 güneş altında elde edilen verimlilik değerinin, 1 güneşten elde edilen değerden %23,50 fazla olduğu belirlendi.

Bilim Kodu : 202.1.147

Anahtar Kelimeler : Yoğunlaştırılmış güneş hücresi, Yoğunlaştırıcı optik sistem, CPV modül, GaAs, Ge, GaInP, III-V çok eklemli güneş hücresi.

Sayfa Adedi : 145

Danışman : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

DEVELOPMENT OF III-V GROUP SOLAR CELLS AND PRODUCTION OF
CONCENTRATORS PHOTOVOLTAIC MODULES PTOTOTYPE

(Ph. D. Thesis)

Yunus ÖZEN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2015

ABSTRACT

In this study, one junction Ge, two junction GaAs/Ge, GaInP/GaAs and three junction GaInP/GaAs/Ge Photovoltaic (PV) structures have been designed as lattice and current matching. These structures were grown using MBE technology. PV cell device fabrications have been completed with lithography and metallization process. Among these structures, Concentrated PV (CPV) modules were manufactured for GaInP/GaAs/Ge triple junction solar cell. Parabolic mirror and cone-shaped secondary optical elements which are important components of CPV modules were designed and its production was performed. It was developed three systems which were Fresnel lens system, the parabolic dish mirror system and 16 parabolic concentrators as concentrator system. 500 solar were obtained from 16 parabolic concentrators system. Receiver system and heat tank were designed to reduce the temperatures that can occur with high concentration effect and the cell was placed on the system. Concentrating mirrors-secondary optics-cell receptor and heat tank integration were produced and CPV module prototype which has 16 mirrors was produced. Efficiencies of solar cell and modules were obtained under 1 sun and CPV system with 500 sun with using current-voltage characteristics which calibrate to AM1,5 solar simulator to determine solar cell parameters of three junction GaInP/GaAs/Ge solar cells. The value of the efficiency of three junction GaInP/GaAs/Ge solar cells under 500 sun was obtained more than 23,50% the value was determined from 1 sun.

Science Code : 202.1.147

Key Words : Concentrated solar cell, Concentrate optic system, CPV module, GaAs, Ge, GaInP, Multi-junction solar cell

Page Number : 145

Supervisor : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmalarım süresince bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, her türlü imkânı sağlayan tez danışmanın değerli hocam Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e teşekkür eder, sevgi ve saygılarımı sunarım.

Benden bilgisini ve desteğini hiç esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Mehmet KASAP ve Prof. Dr. Güven ÇANKAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Daima yanımda olan bilgisi, tecrübesi ve deneyimleri ile beni yönlendiren Yrd. Doç. Dr. Barış KINACI ve Yrd. Doç. Dr. Gökhan SÜRÜCÜ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini hiç esirgemeyen, bana olan inancını ve güvenini hiç kaybetmeyen Annem ve Babam başta olmak üzere tüm Aileme sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmalarım esnasında bilgi ve deneyim paylaşımında bulunarak birlikte güzel işlere imza attığımız Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi araştırmacılarının her birine ayrı ayrı teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez, Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı tarafından 00587.STZ.2010-1 kodlu SANTEZ ve Kalkınma Bakanlığı tarafından 2011K120290 nolu projeler ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xviii
1. GİRİŞ.....	1
2. GÜNEŞ ENERJİSİ VE GÜNEŞ HÜCRELERİ	9
2.1. Güneş Enerjisi.....	9
2.1.1. Hava kütle (Air Mass:AM) sabiti	11
2.2. Güneş Hücresi.....	14
2.2.1. Güneş hücrelerinin gelişimi	18
2.3. Güneş Hücre Çalışma Prensipleri	19
2.4. PV Hücre Türleri.....	22
2.4.1. Kristal silikon güneş hücreleri	22
2.4.2. İnce film PV hücreler.....	24
2.4.3. Galyum arsenit (GaAs)	28
2.4.4. Organik ve boya duyarlı güneş hücreleri	29
2.4.5. III-V grubu PV hücreler.....	30
2.5. Güneş Hücrelerinin Çalışmasını Etkileyen Dış Faktörler	37
2.5.1. Sıcaklığın etkisi.....	37

	Sayfa
2.4.2. Işınım etkisi.....	38
2.6. Güneş Hücre Sistemleri	40
3. GÜNEŞ HÜCRE ÜRETİMİ VE FABRİKASYONU	43
3.1. Güneş Hücre Üretimi	43
3.1.1. MBE sistemi.....	43
3.1.2. Kalibrasyon numunelerinin büyütülmesi ve optimizasyonu.....	45
3.2. Güneş Hücre Fabrikasyonu.....	52
3.2.1. Fotolitografi	52
3.2.2. Temel fotolitografi işlemleri	55
3.2.3. GaInP/GaAs/Ge üç eklemli güneş hücre fabrikasyonu	62
4. CPV ALICI SİSTEMİ	75
4.1. Soğutma Sistemi	76
4.2. Pasif Soğutma	81
4.3. Aktif Soğutma.....	84
4.4. Alıcı Sistemin Önemi.....	86
4.5. Kullanılan Alıcı Sistemi.....	88
4.5.1. Alıcı tasarımı.....	90
5. YOĞUNLAŞTIRICI SİSTEMLER	97
5.1. Yoğunlaştırma Neden Yapılır?	97
5.2. CPV Modül Tasarımı Ve Prototip Üretimi	103
5.2.1. Fresnel mercek sistemi.....	104
5.2.2. Parabolik çanak ayna sistemi	106
5.2.3. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcı modül sistemi	108

6. ARAŞTIRMA VE BULGULAR	117
	Sayfa
6.1. Tek Eklemlı Ge Güneş Hücre Yapısının Analizi.....	117
6.2. İki Eklemlı Güneş Hücre Yapılarının Analizi	119
6.2.1. GaAs/Ge iki eklemlı güneş hücre yapısının analizi.....	119
6.2.2. GaInP/GaAs iki eklemlı güneş hücre yapısının analizi	120
6.3. GaInP/GaAs/Ge Üç Eklemlı Güneş Hücre Yapısının Analizi.....	122
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	127
KAYNAKLAR	129
ÖZGEÇMİŞ	139

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Yenilenebilir enerji kaynakları	2
Çizelge 2.1. Farklı hava koşullarında toplam ışınım ve dolaylı ışınım miktarları.....	14
Çizelge 2.2. Bazı yarıiletkenlerin enerji bant aralığının sıcaklık ile değişimi	38
Çizelge 3.1. Oda sıcaklığında Ge'a ait bazı fiziksel parametreler	46
Çizelge 3.2. Oda sıcaklığında GaAs'e ait bazı fiziksel parametreler	47
Çizelge 3.3. Oda sıcaklığında $Ga_xIn_{1-x}P$ ve $Ga_{0,51}In_{0,49}P$ 'a ait bazı fiziksel parametreler	49
Çizelge 3.4. Üç eklemlili güneş hücre yapısının katman kalınlıkları ve taşıyıcı yoğunlukları	50
Çizelge 3.5. Litografi çeşitleri	53
Çizelge 4.1. Yoğunlaştırma oranına bağlı kullanılan soğutucu sistemler.....	81
Çizelge 4.2. Kullanılan yapıştırıcı özellikleri	88
Çizelge 4.3. Kullanılan malzemelerin termal iletkenlik değerleri	89
Çizelge 5.1. Farklı güneş dönüştürücü sistemler için kullanılan güneş hücrelerine bağlı olarak yoğunlaştırma değerleri	100
Çizelge 5.2. Fresnel mercek ile elde edilen bir günlük sıcaklık değerleri	106
Çizelge 6.1. Ge güneş hücresinin temel parametreleri	118
Çizelge 6.2. GaAs/Ge güneş hücresinin temel parametreleri	120
Çizelge 6.3. GaInP/GaAs güneş hücresinin temel parametreleri.....	122
Çizelge 6.4. GaInP/GaAs/Ge güneş hücresinin temel parametreleri	124
Çizelge 6.5. Eklem sayısına bağlı olarak hücre verimlilik değerleri	125
Çizelge 6.6. GaInP/GaAs/Ge güneş hücresinin 1 güneş ve 500 güneş için temel parametreleri	126

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Türkiye'nin Güneş enerji haritası (kWh/m ² -a)	3
Şekil 1.2. CPV sistem şeması	5
Şekil 2.1. Güneş ışınım spektrumu	11
Şekil 2.2. Hava kütlesi	12
Şekil 2.3. Güneşlenme süresi (PS) grafiği	13
Şekil 2.4. Güneş ışınlarının dünyaya düşme şekilleri	14
Şekil 2.5. Basit bir güneş hüce yapısı	15
Şekil 2.6. Aygıt içinde elektromanyetik dalga ilerlerken (a) soğurma ve (b) bant aralığından büyük enerjili fotonların soğurulması ile elektron boşluk çiftinin yaratılması.....	20
Şekil 2.7. Bir güneş hücresinin akım ve voltaj karakteristiği	21
Şekil 2.8. Tek kristal Si.....	23
Şekil 2.9. Çok kristal Si	24
Şekil 2.10. CdTe/CdS, CIGS ve a-Si güneş hüceleri.....	25
Şekil 2.11. İnce film güneş hücresi	25
Şekil 2.12. Amorf Si hücre paneli.....	26
Şekil 2.13. CdTe güneş hücre paneli	27
Şekil 2.14. CuInSe ₂ ince film güneş hücresi.....	27
Şekil 2.15. CuInSe ₂ güneş hücre paneli	28
Şekil 2.16. GaAs güneş hücresi	28
Şekil 2.17. Esneklik özelliğine sahip organik güneş hücreleri	29
Şekil 2.18. Boya duyarlı güneş hücresinin işleyiş prensibi	30
Şekil 2.19. Kuantum kuyulu p-i-n yapısı	31
Şekil 2.20. Güneş ışığını yoğunlaştırmak için kullanılan lens.....	32
Şekil 2.21. Üç eklemlili güneş hücresinin şematik gösterimi	32
Şekil 2.22. GaInP/GaAs/Ge için güneş spektrumu.....	33

Şekil	Sayfa
Şekil 2.23. Bazı yarıiletkenlerin bandgap değeri ile elektromanyetik spektrumu	35
Şekil 2.24. Örgü sabiti-yasak enerji bant diyagramı	35
Şekil 2.25. PV hücrenin güç-gerilim eğrisi.....	39
Şekil 2.26. PV hücrenin güneş ışınımına bağlı güç-gerilim eğrisi	39
Şekil 2.27. PV hücrenin ışınımına bağlı I-V eğrisi	40
Şekil 2.28. Güneş hücresi, modül ve panel	40
Şekil 2.29. Seri bağlı PV hücrelerin I-V eğrisi	41
Şekil 2.30. Paralel bağlı PV hücrelerin I-V eğrisi	41
Şekil 3.1. MBE sisteminin şematik gösterimi.....	44
Şekil 3.2. Ge p-n eklemi	46
Şekil 3.3. GaAs/Ge iki eklemli güneş hücre yapısının şematik gösterimi.....	48
Şekil 3.4. GaInP/GaAs iki eklemli güneş hücre yapısının şematik gösterimi	49
Şekil 3.5. GaInP/GaAs/Ge üç eklemli güneş hücre yapısının şematik gösterimi.....	51
Şekil 3.6. Fotolitografi işlemi	53
Şekil 3.7. Pozlama sistemleri	54
Şekil 3.8. Çizgi ve alan genişliği	55
Şekil 3.9. Pozitif ve negatif PR için desenin geliştirilmesi.....	58
Şekil 3.10. Döner kaplama süreci	59
Şekil 3.11. Alttaş üzerine PR'ın ; (a) döner kaplama, (b) püskürterek kaplama, (c) döküm ve (d) rulo üzerinden sererek kaplanması	59
Şekil 3.12. Fotorezist tabaka kalınlığının dönme hızına bağlı değişimi	60
Şekil 3.13. (a) Pozitif ve (b) negatif motiflerin genişlemesi.....	61
Şekil 3.14. Güneş hücre fabrikasyon süreci (a) fotorezist (PR) kaplama, (b) maskeleme ve pozlandırma, (c) PR aşındırma-uzaklaştırma, (d) yüzeye metal kaplama-metalizasyon ve (e) PR uzaklaştırma	62
Şekil 3.15. Çapı 3" (76mm) olan üç eklemli güneş hücresi yapısından üretilecek 1cm ² alanlı hücreler.....	63

Şekil	Sayfa
Şekil 3.16. Ön yüzey metalizasyon şematığı	63
Şekil 3.17. Oluşturulan mesa yapılar	64
Şekil 3.18. PR kalınlık grafiği.....	65
Şekil 3.19. Mesa litografi adımı foto-maskesi	66
Şekil 3.20. PR kaplama ve aşındırmayı içeren toplam derinlik grafiği	67
Şekil 3.21. Aşındırma derinliği grafiği.....	67
Şekil 3.22. Şematize edilmiş ince ızgara yapılar	68
Şekil 3.23. İnce ızgara foto-maskesi	68
Şekil 3.24. Toplayıcı ızgara yapıları	69
Şekil 3.25. Toplayıcı ızgara foto-maskesi.....	69
Şekil 3.26. Arka kontak yapıları	70
Şekil 3.27. Arka kontak foto-maskesi.....	70
Şekil 3.28. GaInP/GaAs/Ge üç eklemlı güneş hücre yapılarının alt ve üst yüzeylerinin hem yapısal hem de şematik gösterimi	71
Şekil 3.29. Yansıma önleyici tabaka kaplama süreci: (a) metalizasyonu tamamlanmış hücre üzerine PR kaplama ve aşındırılacak bölgeden PR kaldırma, (b) kep tabakanın aşındırılması, (c) yansıma önleyici tabakanın kaplanması ve PR'ın yüzeyden kaldırılması	72
Şekil 4.1. Alıcı sistemi	75
Şekil 4.2. Sıcaklığa bağılı enerji verimliliği	77
Şekil 4.3. Yoğunlaştırma altında soğutma systemsiz güneş hücresi.....	78
Şekil 4.4. Yoğunlaştırma oranına bağılı hücre üzerine düşen ısı sıcaklığı	78
Şekil 4.5. Yoğunlaştırma altındaki bir soğutucu sistemli güneş hücresinin şematik diyagramı	79
Şekil 4.6. Hücre yüzey alanında, ısı yayılım yüzey alan oranının hücre sıcaklığına bağılılığı	79
Şekil 4.7. Yoğunlaştırma oranı için ısı yayılım alanının ilişkisi.....	80
Şekil 4.8. Pasif soğutuculu fresnel mercek odaklı güneş hücre modülleri	82

Şekil	Sayfa
Şekil 4.9. Edenburn önerdiği gibi tek bir hücre için pasif soğutucu.....	83
Şekil 4.10. Isı borusu bazlı soğutma sisteminin şematik gösterimi	83
Şekil 4.11. Aktif soğutucu	84
Şekil 4.12. Aktif soğutuculu alıcı sistem	84
Şekil 4.13. Russell tarafından önerilen ısı borulu soğutma sistemi	85
Şekil 4.14. By-pass diyot bağlantılı güneş hücre şematığı	88
Şekil 4.15. Alıcı tasarımı	89
Şekil 4.16. Düz ızgaralı Al soğutucu şematığı.....	90
Şekil 4.17. Oluklu Al soğutucu şematik çizimi	91
Şekil 4.18. 16 adet alıcıdan oluşan sistemin ön yüzey çizimi.....	92
Şekil 4.19. 16 adet alıcıdan oluşan sistemin arka yüzey çizimi.....	92
Şekil 4.20. Güneş hücresi ve by-pass diyot yerleştirilen Al soğutucunun şematik çizimi ...	93
Şekil 4.21. Hücre üzerine düşen ışığın şematik çizimi	94
Şekil 5.1. ABD Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL).....	97
Şekil 5.2. Si ve üç eklemlili güneş hücrelerinin spektral ışınımı	98
Şekil 5.3. Yoğunlaştırma oranlarına göre güneş hücre verimleri	99
Şekil 5.4. Yoğunlaşmış güneş ışığı altında çalışan güneş hücresi ve yoğunlaştırıcı optik sistem	100
Şekil 5.5. Bir CPV aygıt şeması.....	101
Şekil 5.6. Yoğunlaştırıcı sisteminde kullanılan ikincil optik sistem şematığı	102
Şekil 5.7. İkincil optik eleman	103
Şekil 5.8. Fresnel mercek sistem tasarımı.....	104
Şekil 5.9. Birincil ve ikincil sistemden oluşan yoğunlaştırıcı modül tasarımı	109
Şekil 5.10. Çukur ve tümsek ayna sistem şematığı.....	110
Şekil 5.11. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcı optik modülün ön yüzey tasarımı.....	111
Şekil 5.12. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcı optik modülün arka yüzey tasarımı.....	111

Şekil	Sayfa
Şekil 5.13. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcılı optik modülün ışık yolu tasarımı	113
Şekil 5.14. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcılı optik modülün ışığı yoğunlaştırması tasarımı.....	113
Şekil 5.15. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcılı prototip tasarımı	114
Şekil 5.16. 500 güneş yoğunluğu altında bir güneş hücresinin zamanla sıcaklık değişimi.....	116
Şekil 6.1. Ge güneş hücresinin şeması.....	117
Şekil 6.2. Ge güneş hücre yapısının karanlık ve 1 güneş altındaki I-V grafiği	118
Şekil 6.3. GaAs/Ge güneş hücresinin şematik gösterimi.....	119
Şekil 6.4. GaAs/Ge güneş hücre yapısının karanlık ve 1 güneş altındaki I-V grafiği	120
Şekil 6.5. GaInP/GaAs güneş hücresinin şematik gösterimi	121
Şekil 6.6. GaInP/GaAs güneş hücre yapısının karanlık ve 1 güneş altındaki I-V grafiği..	121
Şekil 6.7. GaInP/GaAs/Ge üç eklemlı güneş hücresinin şematik gösterimi.....	123
Şekil 6.8. GaInP/GaAs/Ge üç eklemlı güneş hücre yapısının karanlık ve 1 güneş altındaki I-V grafiği	124
Şekil 6.9. GaInP/GaAs/Ge üç eklemlı güneş hücre yapısının karanlık ve 500 güneş altındaki I-V grafiği	125

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. 27 Nisan 2000’de Yakoh uydusundan X-ışınlarıyla alınan Güneş’in bir görüntüsü	9
Resim 3.1. V80H model MBE sistemi (Gazi Fotonik).....	43
Resim 3.2. Dönel kaplama cihazı (Gazi Fotonik).....	64
Resim 3.3. Yüzey Profilometresi cihazı (Gazi Fotonik).....	65
Resim 3.4. SUSS Micro Tech-MJB4 model Maske Hizalama Sistemi (Gazi Fotonik) .	66
Resim 3.5. Termal buharlaştırma sistemi (Gazi Fotonik).....	69
Resim 3.6. Hızlı tavlama sistemi (RTA) (Gazi Fotonik).....	71
Resim 3.7. Fabrikasyonu tamamlanan 1x1 cm ² boyutlu 16 adet GaInP/GaAs/Ge güneş hücreleri	73
Resim 4.1. Düz ızgaralı Al soğutucu	90
Resim 4.2. Oluklu Al soğutucu.....	91
Resim 4.3. Pertinakları yapıştırılmış Al soğutucu.....	93
Resim 4.4. Güneş hücresi ve by-pass diyot monte edilmiş Al soğutucu	94
Resim 4.5. Al levhaya monte edilen 16 adet alıcı.....	95
Resim 5.1. Fresnel mercek prototipi	105
Resim 5.2. Fresnel merceğin odak noktasında oluşan sıcaklık değeri.....	105
Resim 5.3. Parabolik çanak ayna sistemi.....	107
Resim 5.4. İkincil optik sistemin; (a) iç gösterimi, (b) dış gösterimi, (c) alıcı eklenmiş gösterimi	107
Resim 5.5. Parabolik çanak ayna CPV modülü	108
Resim 5.6. Bir güneş hücresi için oluşturulan modül	110
Resim 5.7. 16’lı parabolik yoğunlaştırıcı optik modülün ön yüzeyi	112
Resim 5.8. 16’lı parabolik yoğunlaştırıcı optik modülün arka yüzeyi	112
Resim 5.9. 16’lı parabolik yoğunlaştırıcı prototip sistemin ön yüzey görünüşü.....	114

Resim	Sayfa
Resim 5.10. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcılı prototip sistemin arka yüzey görünüşü	115
Resim 5.11. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcılı prototip sistemin kutulanmış görünüşü.....	115
Resim 6.1. I-V ölçüm düzeneği (Keithley 4200 ve Newport Oriel Sol1A)	117
Resim 6.2. Fabrikasyonu tamamlanmış üç eklemlili hücre	123

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Diyotun etkin alanı
a	Örgü sabiti
A*	Richardson sabiti
Å	Angstrom
Ag	Gümüş
Al	Alüminyum
As	Arsenik
α	Soğurma katsayısı
Au	Altın
B	Bor
Be	Berilyum
Cl	Klor
Co	Kobalt
c-Si	Tek kristal silisyum
Cu	Bakır
E_c	İletim bandı enerjisi
E_f	Fermi enerji seviyesi
E_g	Yasak enerji aralığı
E_v	Valans bandı enerjisi
eV	Elektron volt
F	Flor
Fe	Demir
FF	Dolum faktörü
Ga	Galyum
G_{SC}	Güneş sabiti
H₂	Hidrojen
H₂O	Su

Simgeler**Açıklamalar**

Hz	Hertz
I	Akım
I_{Işık}	Işık altında oluşan fotoakım
I_{karanlık}	Işıksız ortamda oluşan fotoakım
In	İndiyum
I₀	Doyum akımı
I_{sc}	Kısa devre akımı
K	Potasyum
κ	Isısal iletkenlik
x	Alaşım kompozisyonu (konsantrasyonu)
k_b	Boltzman sabiti
λ	Dalga boyu
k. b.	Keyfi birim
Li	Lityum
Mg	Magnezyum
MgO	Magnezyum oksit
Mn	Mangan
MO	Metal oksit
N	Azot
n	İletkenlik bandında birim hacimdeki elektron sayısı
η	Verim değeri
Na	Sodyum
Ni	Nikel
nm	Nanometre
O₂	Oksijen
P	Fosfor
p	Valans bandında birim hacimdeki deşik sayısı
R	Direnç
Si	Silisyum
SiC	Silisyum karbür
SnO₂	Kalay dioksit

Simgeler**Açıklamalar**

T	Sıcaklık
T_s	Altaş büyüme sıcaklığı
TiO₂	Titanyum dioksit
V	Voltaj
V_{oc}	Açık devre gerilimi
W	Watt
ZnO	Çinko oksit

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AC	Alternatif akım
AlGaAs	Alüminyum galyum arsenik
AlGaP	Alüminyum galyum fosfat
AM0	Hava kütle sıfır
AM1,5	Hava kütle 1,5
AR	Yansıma önleyici
a-Si	Amorf silisyum
BDGH	Boya duyarlı güneş hücreleri
BSF	Arka yüzey alanı
CdO	Kadmiyum oksit
CdS	Kadmiyum sülfür
CdTe	Kadmiyum tellür
CIGS	Bakır indiyum galyum selenyum
CO₂	Karbon dioksit
CVD	Kimyasal buhar birikimi
DC	Doğru akım
DI	De-iyonize
DJSC	İki eklemlili güneş hücresi
EPIA	Avrupa fotovoltaik endüstri kuruluşu
GaAs	Galyum arsenik
GaInP	Galyum indiyum fosfat

Kısaltmalar**Açıklamalar**

GaN	Galyum nitür
GaP	Galyum fosfat
IEA	Uluslararası enerji kurumu
InAlAs	İndiyum alüminyum arsenik
InGaAs	İndiyum galyum arsenik
InP	İndiyum fosfat
ITO	İndiyum kalay oksit
I-V	Akım-voltaj
KÖ	Kızılötesi
MBE	Moleküler demet epitaksi
mc-Si	Çok kristal silisyum
MJ	Çok eklem
MOCVD	Moleküler organik kimyasal buhar birikimi
MOVPE	Moleküler organik buhar faz epitaksi
MS	Metal-yarıiletken
MQW	Çoklu kuantum kuyusu
OKF-MSM	Omik kontaklı fotoiletken metal yarıiletken metal
PS	Güneşlenme süresi
PV	Fotovoltaik
PVD	Fiziksel buhar birikimi
R	Foto-cevap
RTA	Hızlı termal tavlama
SC	Güneş hücresi
SI	Yarı yalıtkan
TCO	Geçirgen iletken oksit
TD	Tünel diyot
TJSC	Üç eklemli güneş hücresi
UHV	Ultra yüksek vakum
UV	Ultraviyole

1. GİRİŞ

İş yapma yeteneğine “Enerji” denir. Dünya’da yaşam, evrendeki enerji sayesinde sürdürülebilmektedir [1,2]. 18. yüzyılda Dünya nüfusundaki hızlı artış, sanayileşme ve teknolojinin gelişmesi ile enerji ihtiyacını artırmıştır. Dünya Enerji Forumu’nun tahminlerine göre; çevre kirliliği oluşturan petrol, doğalgaz, kömür gibi fosil enerji kaynaklarının rezervleri önümüzdeki yüzyıl içinde tükenecektir [3].

Dünya 2006’daki 6,5 milyar nüfustan yıllık % 1 artışla, 2030’da 8,2 milyar nüfusa doğru gitmektedir. İnsanlığın refah düzeyi için bir gösterge kabul edilen enerji ihtiyacı, hem bu nüfus artışı hem de yeni teknolojilerin ışığında insan ve toplum davranışlarındaki değişimin etkisiyle hızla artmaktadır. 2006’da yaklaşık 19 000 TWh olan küresel elektrik üretimi, 2015’de 25 000 TWh’e, 2030’da ise 33 000 TWh’e yükselecektir. Türkiye’nin elektrik tüketimi, 2020 yılında 259-500 TWh arasındaki miktarda olacağı tahmin edilmektedir [4,5].

Yaklaşık 200 yıl ömrü kalan kömür rezervleri ile 30 yıl dayanacak olan petrol rezervlerinin kalması, çevreye verdikleri zarar sebebiyle de alternatif enerji kaynaklarına olan ihtiyacı daha önemli kılmaktadır [2,6,7]. Bu sorunun çözümü ise yenilenebilir enerji kaynaklarını yararlı kullanmak ve enerji verimliliğini artırmak ile mümkündür [8]. Yenilenebilir enerji; kendini tekrar eden ve tükenmeyen enerji anlamına gelmektedir [9]. Ülke olarak enerji üretimimiz tüketimimizin yaklaşık üçte birini karşılamaktadır. Bu yüzden bir an önce yüksek potansiyele sahip olduğumuz yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmemiz gerekmektedir [10]. Yenilenebilir enerji kaynakları Çizelge 1.1’deki gibi sınıflandırılabilir [11].

Güneş yeryüzündeki canlı hayatının temel kaynağıdır [12]. Aslında, nükleer, jeotermal ve gelgit enerjisi haricinde, bugün yeryüzünde kullanılan bütün enerji, Güneş’ten kaynaklanır. Diğer enerji kaynakları direkt ya da dolaylı olarak güneş enerjisinden türemiştir [13]. Türkiye, yenilenebilir enerji kaynaklarının çeşitliliği ve potansiyeli bakımından zengin bir ülkedir. Fosil kaynaklı eski teknolojilerden vazgeçilmesinin temel sebeplerinden biri de enerji üretimi ve tüketiminde yaşanan çevre sorunlarıdır.

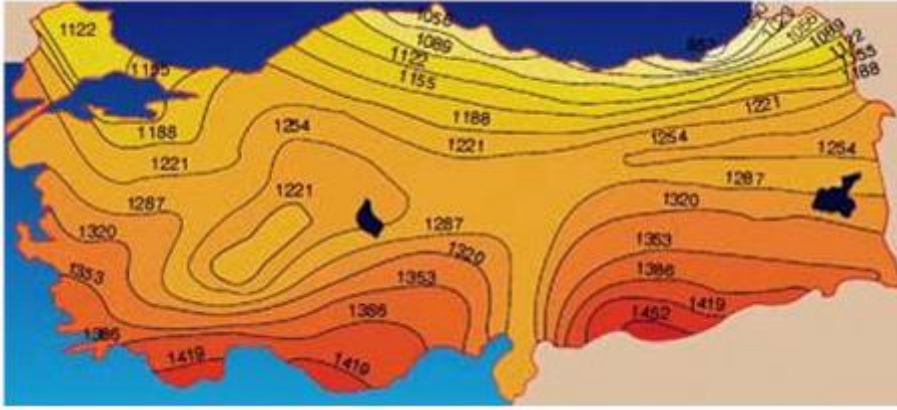
Çizelge 1.1. Yenilenebilir enerji kaynakları [13]

	Yenilenebilir Enerji Kaynakları	Kaynak veya Yakıtı
1	Güneş Enerjisi	Güneş
2	Rüzgar Enerjisi	Rüzgar
3	Dalga Enerjisi	Okyanus ve Denizler
4	Biyokütle Enerjisi	Biyolojik artıklar
5	Jeotermal Enerji	Yer altı suları
6	Hidrolik Enerji	Nehirler
7	Hidrojen Enerjisi	Su ve Hidroksitler

Türkiye’de, enerji tüketimi açısından incelendiğinde, yenilenebilir enerji kaynaklarının ne kadar önemli olduğu görülmektedir. Fakat ülkemizde yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı henüz yeterli düzeyde değildir. Avrupa Birliği'nin aldığı kararlar değerlendirildiğinde 2020 yılında kullanılan enerjinin %30'unun yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması planlandığı görülmektedir. Ayrıca, Kyoto protokolü bu kaynaklara yönelmeyi zorunlu kılmaktadır.

Türkiye'nin 2023 yenilenebilir enerji kaynağı üretim hedefleri arasında; 36 000 MW hidroelektrik, 20 000 MW rüzgar, 3 000 MW'lık güneş, 600 MW'lık jeotermal, 2 000 MW biyokütle enerjisi vardır [14]. Bu hedefler, güneşten elektrik enerjisi elde edilebilen sistemlerin pazar payının ülkemizde artarak devam edeceğini göstermektedir.

Türkiye 26°–45° doğu meridyenleri ve 36°–42° kuzey enlemleri arasında ve güneş bandında yer almaktadır. Yıllık ortalama 1303 kWh/m²-yıl güneş ışınımı ve 2623 saat güneşlenme süresine sahiptir. Bu ise günde 3,6 kWh/m² güce, 7 saate ve 110 günlük bir güneşlenme süresine karşılık gelmektedir. Ülke olarak ısıl uygulamalara 9,8 milyon Ton Eşdeğer Petrol (TEP) olmak üzere yıllık 36,2 milyon TEP enerji tüketmektedir. Şekil 1.1’de güneş enerji haritası verilmektedir.



Şekil 1.1. Türkiye'nin Güneş enerji haritası (kWh/m²-a) [15].

Yenilenebilir enerji kaynaklarından; temiz ve güvenilir olması, tehlikesiz ve sonsuz olması, çevre sorunlarına neden olmaması, tükenme olasılığının az olması gibi sebeplerden dolayı güneş enerjisi, elektrik enerjisi elde etmek için oldukça uygundur. Dünya'da kullanılan yenilenebilir enerji kaynakları arasında en umut verici olanlarından biri olan güneş enerjisinden faydalanma gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır [16,17]. Son 10 yılda rüzgar enerjisi kullanımı %25 artarken, güneş enerjisi kullanımı ise %300 oranında artmıştır. 1970'lerden sonra güneş enerjisinden yararlanma çalışmaları hız kazanmıştır. Güneş enerjisi sistemleri teknolojik olarak ilerleme göstermiş ve bu yüzden maliyeti düşmüştür. Maliyetlerin düşmesi ile enerji geri dönüşüm verimliliğindeki sürenin kısalması Fotovoltaik (PV) santrallerin gelişmesi ve yaygınlaşmasını sağlamıştır.

Dünyadaki PV güneş enerjisi kurulu kapasitesi son yıllarda hızla artmaktadır. 2009 yılı sonu itibariyle dünya PV kümülatif kurulu kapasitesi 23 GW'ye ulaşmıştır. 2010 yılında ise bu rakamın 40 GW'ye çıktığı görülmektedir. 2011 yılında 69 GW'ye ulaşan bu rakam, 2012 yılında 100 GW'ye ulaştı. Dünya genelinde 2013 yılında toplam güneş enerjisi kurulu gücü 37 GW arttı. Bu artış ile birlikte toplam kurulu güç 137 GW oldu. 2013 yılında artan bu gücün % 62'si Çin (11,3 GW), Japonya (6,9 GW) ve Amerika (4,8 GW) tarafından gerçekleştirildi. 2014 yılı güneş enerjisi kurulu güç artışı 49 GW ve 2015 yılı güneş enerjisi kurulu güç artış 65 GW olarak tahmin edilmektedir [18,19].

Yöntem, malzeme ve teknolojik düzey açısından güneş enerji teknolojileri çok çeşitlilik göstermekle birlikte genel olarak iki ana gruba ayrılabilir:

- Isıl Güneş Teknolojileri: Güneş enerjisinden faydalanılarak ısı enerjisi elde edilir. Üretilen ısı, ısınma ve elektrik üretimi şeklinde kullanılır.

- Güneş Hücreleri: Güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren yarıiletken aygıtlardır. Güneş hücrelerine Fotovoltaik (PV) hücreler de denilmektedir [20,21].

Güneş hücreleri ile elektrik üretiminde yoğunlaştırıcısız ve yoğunlaştırıcı sistem olmak üzere iki PV sistem kullanılmıştır. Birincisi, güneş enerjisini direkt olarak elektrik enerjisine dönüştüren PV sistemlerdir. PV sistem uygulamalarında oluşan artışa rağmen, hücre geliştirme teknolojisinin karmaşıklığı ve maliyetinin yüksek oluşu, yüksek kapsamlı elektrik üretimi için yetersiz olduğunu göstermiştir. Günümüzde ticari ürün olarak pazar payı en yüksek olan Si tabanlı PV paneller birinci grupta yer almaktadır. İkincisi, yoğunlaştırıcı sistemler kullanılarak güneş ışığının odaklanması sonucunda elektrik üretimidir. Bu teknolojiye hücre aktif alanını oluşturan yarıiletken kristallerin miktarı oldukça azalmaktadır. Bu avantajın yanında, yoğunlaştırıcı sistemlerin direkt ışınla enerji üretmeleri nedeniyle ihtiyaç duyulan takip sistemi, maliyetlerini olumsuz etkilemektedir. Bununla birlikte yüksek verimlilikleri nedeniyle gelecek için bir alternatif olarak değerlendirilmektedir.

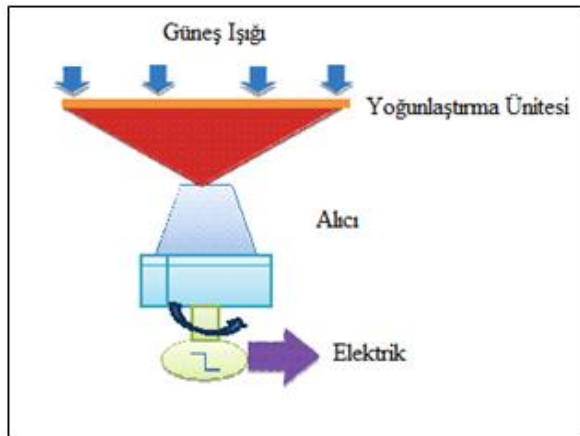
Yoğunlaştırıcı Fotovoltaik (CPV) teknolojisi günümüzde kullanılan düz plakalı PV modüllerinden farklı, yoğunlaştırılmış güneş enerjisi ve gün boyunca güneşi takip etmesi ile yüksek enerji üreten sistemlerdir. CPV teknolojileri pazar payı gittikçe artacak duruma gelmektedir. Elektrik enerjisi üretmek için güneş enerjisini yoğunlaştırarak küçük alanlı güneş hücresi üzerine odaklanması için reflektör veya merceklerin tasarlanması ile ortaya çıkan yoğunlaştırıcı optik kavramı Andreev VM grubu tarafından geliştirilmiştir [22]. Modül halinde güç elde edilebilecek CPV' ler 2004 yılında kullanılmaya başlanmış; CPV modüller dünyada son yıllarda hem üretim hem de Ar-Ge düzeyinde geliştirilmektedir.

Piyasada bilinen güneş panellerine göre eşdeğer güç çok daha küçük alanlara sahip CPV modüllerle elde edilebilecektir. Bir $1m^2$ büyüklüğündeki yoğunlaştırıcı sistemle bir konutun enerji ihtiyacının büyük bir kısmını karşılayabilecek güce ulaşılacaktır. Ayrıca birkaç MW mertebesinde kurulacak güç santralleri için dekarlık arazilerin kullanılmasına gerek kalmayacak daha küçük alanlarda eşdeğer güç elde edilebilecektir. Böylece hem modül maliyeti azaltılabilecek hem de arazi tasarrufu sağlanabilecektir.

Yoğunlaştırılan güneş ışığı ile birlikte güneş hücre verimleri de artmaktadır. Güneş ışınlarını toplayıcı-odaklayıcı sistemler üzerinde yoğun olarak çalışılmaktadır. Bunun

sonucu olarak güneş hücre verimlerinin de artırılması hedeflenmektedir. 250 güneş yoğunlaştırıcı bir sistemde, hücre tek güneş uygulamalarına göre yaklaşık %20 daha verimlidir [23]. Ayrıca maliyeti düşürerek üretimin artırılması amaçlanmıştır.

CPV hücre sistemleri; yoğunlaştırma ünitesi, alıcı-ısı tankı kısımlarından oluşur. Ayrıca sisteme güneş takip sistemi ve sistemi soğutmak amacıyla pasif soğutucu yanında aktif soğutma sistemleri de eklenebilir. Şekil 1.2' de basit bir CPV sistem şeması görülmektedir.



Şekil 1.2. CPV sistem şeması

Son zamanlarda, güneş spektrumunun daha büyük bölümünü soğurabilen III-V grubu yarıiletken p-n eklemlerin ardışık olarak büyütülmesiyle oluşturulan çok eklemlili hücreler üzerindeki araştırmalar hız kazanmıştır. Bu hücreler farklı yasak enerji aralıklı p-n eklemlili yarıiletken katmanların ardışık olarak büyütülmesiyle oluşturulur. CPV kristal yapıları yüksek kristal kalitesinde metal-organik kimyasal buhar birikimi (MOCVD) ve moleküler demet epitaksi (MBE) teknikleriyle büyütülmektedirler. Gelen güneş ışığının soğurulmasını maksimuma çıkarma veya yüksek ışık-tuzaklama etkisi, yüksek güneş hücre dönüşüm verimliliğini başarmada önemli bir konudur. Güneş ışığının soğurulması veya ışık-tuzaklama etkisini başarmak için çok eklemlili güneş hücreleri [24], çoklu kuantum kuyulu güneş hücreleri [25] ve yüksek soğurma katsayılı materyal güneş hücreleri [26] gibi pek çok yeni tasarlanmış güneş hücreleri literatürde rapor edilmiştir. III-V grubu güneş hücreleri doğası gereği doğrudan ve elementlerin bileşimleri sonucunda niteliği değişmiş yasak enerji aralığından dolayı güneş spektrumu boyunca güçlü bir soğurma gösterir [27]. Bir güneş hücresinin dönüşüm verimliliği gelen güneş ışığının yoğunluğuna bağlıdır. Bu yüzden III-V grubu güneş hücrelerinden Si temelli güneş hücrelerine göre daha fazla verim

elde edilebilir. Si temelli güneş hücre verimleri yaklaşık %25 iken, CPV hücrelerin verimleri yaklaşık % 50 civarındadır [28]. Modül verimlilikleri ise CPV sistemlerde verim yaklaşık %35 değerlerindedir. Bu yüksek modül verimliliğini Si temelli güneş hücrelerinde elde etmek mümkün değildir.

CPV sistemlerin yüksek verimlerinin yanı sıra bir dezavantajı vardır. Yüksek konsantrasyon hücre sıcaklığının artmasına sebep olur. Üretilmiş Joule ısı PV performansında potansiyel düşmesine sebep olabilir. Bu yüzden, bu sistemler soğutulmaya ihtiyaç duyar [27]. CPV sistemlerde hücreyi soğutmak için aktif ve pasif soğutma kullanılır. Aktif soğutma hücre sıcaklığını hareketli bir soğutucu vasıtasıyla sabit bir sıcaklık değerinde tutmaya yarayan sistemdir. Pasif soğutmada ise atmosferik soğutma etkisinden yararlanır ve ek bir soğutma enerjisine ihtiyaç duyulmaz. Güneş hücreleri genellikle alüminyum ya da bakır disklerle gümüş epoksilerle bağlanır. Böylece ısı değişim alanının artırılmasıyla güneş hücre sıcaklığının azaltılması amaçlanır.

Bu tez çalışması, Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın 00587.STZ.2010–1 kodlu SANTEZ projesi tarafında desteklenen iki tezdten ikincisidir. İlk tez çalışma kapsamında, "III-V Grubu Güneş Hücre Yapılarının Epitaksiyel Büyütülmesi ve Karakterizasyonu" adlı tez çalışması yapıldı [29]. Bu tez kapsamında çok eklemlili güneş hücreleri için Ar-Ge çıktılarına dayalı yoğunlaştırıcı optik tasarımı, hücrelerin yerleştirileceği soğutucu ısı tankına sahip hücre yerleştirme birimi (hücre alıcısı tasarımı), tüm bileşenleri ile prototip CPV modül tasarımı ve prototip üretimi amaçlanmıştır.

Bu tez çalışması aşağıdaki şekilde organize edildi.

- MBE sistemi ile büyütülen ve analizleri gerçekleştirilen GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücre yapıları, güneş hücre modül prototipinde kullanılabilir şekilde 1x1 cm² lik parçalara ayrıldı.
- Parçalara ayrılan güneş hücre yapıları; kimyasal temizleme, litografi, aşındırma, metalizasyon ve yansıma önleyici kaplama süreçleri ile PV hücre fabrikasyonları yapıldı.
- Fabrikasyonları tamamlanarak birer güneş hücresi haline gelen numunelerin temel elektriksel parametreleri olan kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), dolun

faktörü (FF), enerji dönüşüm verimlilik değeri (η) analizleri, karanlıkta ve 1 Güneş altında yapılan akım-gerilim (I-V) ölçümlerinden elde edildi.

- Üç farklı prototip modül üretimi gerçekleştirildi. Birincisi 70 cm çap uzunluğuna sahip bir çukur ayna, ikincisi $28 \times 14 \text{ cm}^2$ alana sahip bir Fresnel mercek ve üçüncüsü 30 cm çapında çukur-parabolik, 5 cm çapında tümsek-parabolik aynalar ve konik şekilli ikincil optik elemandan oluşan birleşik sistem vasıtasıyla yoğunlaştırma sistemleri yapıldı.
- PV hücreler soğutmaya uygun alt plaka (alıcı) üzerine monte edildi ve by-pass diyot bağlantıları, tel bağlantıları gerçekleştirilerek paketlenildi. Alıcı sistemin sıcaklık analizleri ve bağlantılı hücrelerin testleri yapıldı.
- PV hücreler seri/paralel bağlanarak, yoğunlaştırıcı optik sistem özelliklerine göre dizinler oluşturuldu.
- Modül paketlemesi yapıldı.

Tez çalışmasının genel düzeni aşağıdaki şekilde tasarlandı:

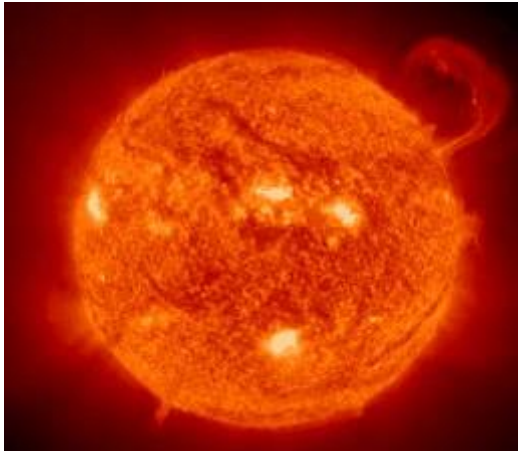
- Birinci bölümde; Yenilenebilir enerji, güneş enerjisi ve güneş enerji sistemlerinden PV enerjinin önemi hakkında bilgi verildi. PV enerji sistemlerinden CPV hücrelerinin verimleri hakkında bilgiler sunuldu.
- İkinci bölümde; Güneş enerjisi nedir, PV hücrelerin tarihsel gelişimi, avantaj ve dezavantajları, PV hücre türlerine yer verildi. CPV güneş hücrelerinin önemi ve güneş hücre parametreleri hakkında bilgi verildi.
- Üçüncü bölümde; Güneş hücresinin üretimi ve fabrikasyonu hakkında bilgiler verildi.
- Dördüncü bölümde; Yoğunlaştırıcı sistemler hakkında bilgi verildi.
- Beşinci bölümde; Alıcı sistemler hakkında bilgi verildi.
- Altıncı bölümde; Elde edilen hücrelerin verim analizleri ve oluşturulan prototipin çıktı parametreleri verildi.
- Yedinci bölümde; Yapılan çalışmalar özetlenerek ileriye yönelik çalışmalar için öneriler sunuldu.

Bu tez çalışmasında kullanılan hücreler Gazi Üniversitesi FOTONİK Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan MBE sistemi ile büyütüldü. Hücrelerin ölçüm ve analizleri aynı merkez bünyesinde bulunan ölçüm sistemleriyle gerçekleştirildi.

2. GÜNEŞ ENERJİSİ VE GÜNEŞ HÜCRELERİ

2.1. Güneş Enerjisi

Diğer enerji kaynaklarının oluşumuna da katkıda bulunan güneş enerjisi dünyamızın en önemli enerji kaynağıdır. Resim 2.1’de 27 Nisan 2000 de Yakoh uydusundan X-ışınlarıyla alınan Güneş’in görüntüsü verilmiştir [30].



Resim 2.1. 27 Nisan 2000’de Yakoh uydusundan X-ışınlarıyla alınan Güneş’in bir görüntüsü

Güneş çok sıcak ve çok yoğun gazlardan meydana gelmektedir. Yer küreden $1,5 \cdot 10^{11}$ m uzaklıkta olan güneşin çapı $1,39 \cdot 10^9$ m (dünya çapının yaklaşık 110 katı) ve kütlesi $2 \cdot 10^{30}$ kg (dünya kütlesinin yaklaşık 330 000 katı) olan bir yıldızdır [31]. Güneş merkezinde $8-40 \cdot 10^6$ K sıcaklığa, 340 milyar atm basınca, 10^5 kg/m³ yoğunluğu sahiptir. Enerjinin %90’ı güneşin merkezi ile $0,23r$ (r : güneşin yarıçapı) arasındaki bölgede üretilir. Burada güneşin toplam kütlesinin %40’ı bulunur. Merkezden $0,7r$ uzaklıktaki bölgede sıcaklık 130 000 K ve yoğunluk 70 kg/m³ değerine düşer. Merkezden $0,7r$ ile $1,0r$ arasındaki konvektif bölgede ise sıcaklık 6000 K, yoğunluk 10^{-5} kg/m³ düzeyindedir. Güneş radyasyonunun asıl kaynağını fotosfer tabakası oluşturur. Bu tabaka konvektif bölgenin dış kabuğudur. Fotosfer tabakasının üzerinde yüzlerce kilometre kalınlığındaki inversiyon tabakası yer alır. Bu tabakanın dışında kalınlığı yaklaşık $10 \cdot 10^6$ m olan kromosfer tabakası bulunur. En dış tabaka olarak da korona tabakası bulunmaktadır. Korona tabakası 10^6 K sıcaklıkta ve düşük yoğunluktadır [32].

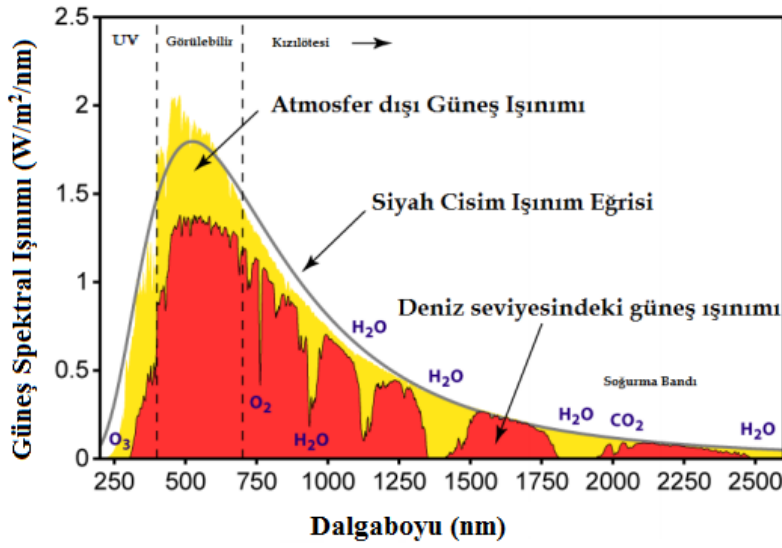
Güneş büyük bir nükleer reaktördür. Güneşten gelen ısı ve ışık, Einstein'ın $E = mc^2$ ile ifade ettiği kütle kaybı neticesinde ortaya çıkan enerjidir. Yani güneş enerjisi Eş.1'de verilen, güneşteki hidrojen (H) gazının helyuma (He) dönüşümü ile oluşan füzyon sürecinden açığa çıkan ışıma enerjisidir:



Burada dört protonun He çekirdeğine dönüştüğü çekirdek tepkimesi ile oluşur. Tepkime sonucu ısı ortaya çıkar. H atomlarının çok yüksek sıcaklıklarda daha ağır bir element olan helyuma dönüşmesi sırasında çok küçük miktarda kütle kaybı meydana gelir. Günümüzden yaklaşık 4 buçuk milyar yıl önce başlayan bu dönüşüm, güneşin çekirdeğinde bulunan tüm hidrojenlerin helyuma dönüşmesine kadar, yani yaklaşık 5 milyar yıl daha devam edecektir [33]. Her He çekirdeği için $1,5 \cdot 10^8$ kcal/g enerji açığa çıkar. Güneş $1,99 \cdot 10^{33}$ erg/saniye hızıyla enerji üretir, yani saniyede yaklaşık 650 milyon ton H He'a dönüşürken, 5 milyon ton madde enerjiye dönüşür [34].

Güneşten, farklı dalga boylarında (62 MW/m^2) enerji yayılmaktadır. Güneşin yüzeyinden yayılan bütün enerjinin sadece iki milyarda biri yeryüzüne ulaşmaktadır [35]. Güneşten yayılan enerji atmosferin dış yüzeyinde 173 kW değerindedir. Yeryüzüne ulaşan değer ise 1,355 kW'a düşmektedir. Atmosferde yer alan su buharı, CO₂ ve ozon gibi gazların güneş ışığını absorbe etmeleri ve kat edilen yolun uzunluğu, yeryüzüne ulaşabilen güneş ışığı değerinin düşük olmasına neden olur [36]. Güneş ışınlarının yeryüzüne ulaşması yaklaşık 8,44 dakikadır. Dünya'da bilinen bütün enerji kaynaklarından elde edilecek enerji güneşin sadece üç günde yaymış olduğu enerjiye eşittir. Güneşten 150 milyon km yol alarak dünyaya gelen enerji dünyada bir yılda kullanılan enerjinin 15 bin katı civarındadır. Güneşin dünyaya bir yılda gönderdiği enerji miktarının sadece %1'inin %10 verimle enerjiye dönüştürüldüğü düşünülürse dünyadaki toplam enerji üretim kapasitesinin dört katı kadar enerji üretilmesi mümkün olur [13,37,38].

Güneşin yayınladığı ışınımın spektrumu yaklaşık 6000 K sıcaklığında bulunan bir kara cismin yayınladığı spektrum gibidir. Güneşten yayılan enerji yeryüzüne farklı şiddetlerde ve farklı dalga boylarında ulaşmaktadır. Şekil 2.1'de güneş enerjisinin dalga boyuna göre ışıma şiddeti görülmektedir. Güneş spektrumu yaklaşık 0,5 eV'dan 3,5 eV'ye kadar enerjili fotonları içerir [39].



Şekil 2.1. Güneş ışınım spektrumu

Güneş enerjisi yeryüzüne elektromanyetik ışınım yolu ile ulaşırken yaklaşık %30'unu atmosferde kaybetmektedir. Bunun nedenleri:

- ✓ Atmosferdeki kısa dalga boylarında olan Rayleigh saçılması (atmosfer moleküllerince saçılma),
- ✓ Atmosferdeki Aerosol ve toz parçacıklarından dolayı meydana gelen saçılma,
- ✓ Atmosferdeki oksijen, ozon, su buharı ve CO₂ den meydana gelen soğurulmadır.

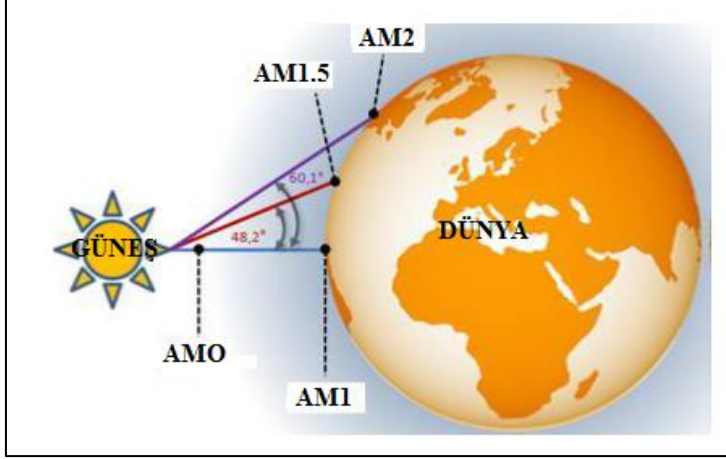
2.1.1. Hava kütle (Air Mass: AM) sabiti

Güneş ışınlarının soğurulması birçok parametreye bağlı olmakla birlikte en etkili olanı güneş ışınlarının atmosferi geçerken aldığı yoldur. Bu yol güneş tam tepemizde olduğunda en kısadır. Güneş ışınlarının atmosferden geçerken aldığı yolu anlatmak için "Hava Kütle (AM)" kavramı kullanılır ve yaklaşık olarak $1/\cos\theta$ 'dır. Burada θ düşeyle güneşin yaptığı açıdır. Hava Kütle Eş. 2.2'den elde edilir.

$$AM = \frac{\text{Güneş ışınlarının atmosferde aldığı yol}}{\text{Güneş ışınlarının atmosferde aldığı en kısa yol}} \quad (2.2)$$

Güneş ışığının yoğunluğu veya birim alana gelen güneş gücü miktarı ışınım olarak ifade edilir ve birimi W/m^2 'dir. Güneşten atmosfere gelen güneş ışınımı şiddeti günlere göre değişmektedir. Atmosfer dışında birim alana dikey olarak gelen güneş ışınlarının tüm dalga

boylarını içeren birim zamandaki toplam güneş ışınım enerjisi şiddetine güneş sabiti denir. Güneş sabiti G_{sc} ile gösterilmektedir. Güneş sabiti değeri 1971 yılında NASA tarafından 1353 W/m^2 olarak kabul edilmiştir. Dünya ışınım merkezi (WRC) ise 1367 W/m^2 olarak almıştır. Işınım hesaplamalarında WRC'nin değeri sabit değer olarak alınmaktadır [40].

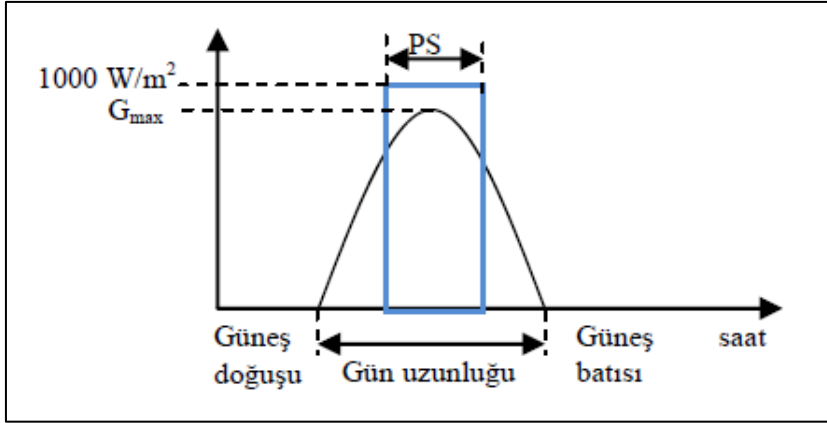


Şekil 2.2. Hava kütlesi

“Hava Kütle 0” ya da “AM0” (Air-Mass 0) güneş ışığının atmosfer dışındaki spektral dağılımıdır ve 1367 W/m^2 değerine sahiptir. Bu değer “güneş değişmezi” olarak kullanılır. Güneşin yeryüzüne deniz seviyesinde en dik bulunduğu açı, güneş ışınlarının yeryüzüne en çabuk ulaştığı açı olduğundan bu ışınım “tam güneş”, “tepe güneş” ya da “AM1” olarak adlandırılır.

Güneş ışınları atmosferden geçerek yeryüzüne ulaşmaya kadar fiziksel engellerden dolayı zayıflar ve yaklaşık olarak enerjisinin %30'unu kaybeder. Böylece yeryüzüne ulaşan güneş ışınlarının enerji yoğunluğu AM1,5 için 970 W/m^2 olur. Bununla birlikte PV kapsamında AM1,5 için 1000 W/m^2 olarak standart haline getirilmiştir. Bu sebeple PV sistemler için yapılan ölçümlerde AM0 değeri yerine AM1,5 değeri normal koşul olarak kabul edilir [11,41].

Bir gün boyunca $25 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığında panel üzerine düşen 1 Güneşlik (1 Güneş = 1 sun = 1000 W/m^2) ortalama (aylık ya da yıllık) güneşlenme süresi (PS) denir. Şekil 2.3'te güneşlenme süresi grafiği verildi [42]. PS'in hesaplanması açıların hesaplanması kadar önemlidir. Aylara ve hava durumuna göre PS değeri değişir [11].



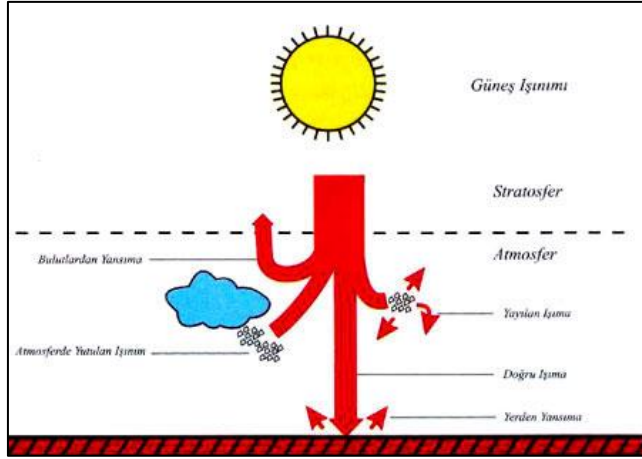
Şekil 2.3. Güneşlenme süresi (PS) grafiği [42].

Güneş enerjisi ile ilgili hesaplamalar yapılırken güneş ışığının dünyaya düşme şekline göre değişik şekillerde isimlendirmeler yapılmaktadır. Bunlar, doğrudan ışınım, yayılmış ışınım, küresel ışınım.

Doğrudan Işınım: Güneşten doğrudan gelen ışınımdır. Özellikle yoğunlaştırılmış güneş enerjisi sistemleri ve güneş enerjisinden ısı edilmesi hesaplamalarında kullanılmaktadır. [43].

Yayılmış Işınım: Belirli bir yönü ve doğrultusu olmayan güneş ışınımına dolaylı ışınım denir [43]. Dolaylı ışınımın sebebi güneş ışınımının atmosferden geçerken su buharı ya da toz parçacıkları tarafından saçılmasıdır [44]. Bu ışınım değeri ise atmosferden yansıyan ışınım ile yer yüzeyinden yansıyan ışınım miktarını içermektedir [44].

Küresel Işınım: Doğrudan ve yayılmış ışınımın toplamı olup PV sistem hesaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [45].



Şekil 2.4. Güneş ışınlarının dünyaya düşme şekilleri

Çizelge 2.1’ de değişik hava durumları için toplam ışınım ve bu toplam içindeki dolaylı ışınım yüzdeleri verilmiştir [46].

Çizelge 2.1. Farklı hava koşullarında toplam ışınım ve dolaylı ışınım miktarları

Hava Durumu	Toplam ışınım (W/m^2)	Dolaylı ışınım
Açık	600 – 1000	% 10 - 20
Puslu	200 – 400	% 20 - 80
Tam kapalı	50 – 150	% 80 - 100

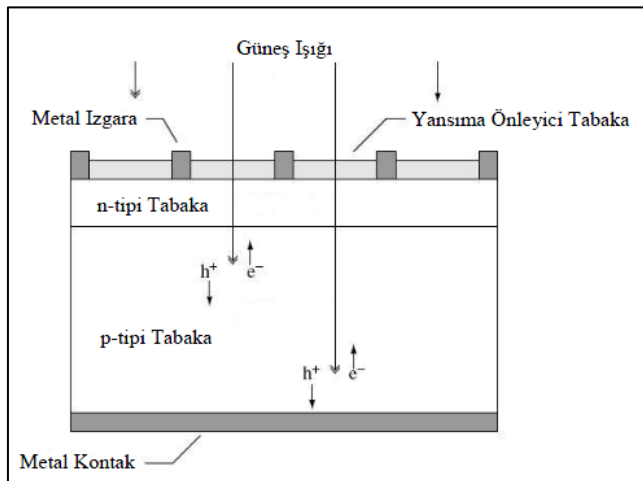
2.2. Güneş Hücresi

Güneş enerjisini kullanılabilir hale getiren aygıtlardan biri de güneş hücreleridir. Güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren opto-elektronik aygıtlar fotovoltaik (PV) hücre olarak adlandırılır. PV etki birbirinden farklı iki malzemenin ortak temas bölgesinin foton radyasyonu ile aydınlatılması sonucunda bu iki malzeme arasında oluşan elektriksel potansiyel olarak adlandırılır. PV terimi temelde Yunanca iki kelimenin birleşmesinden oluşmaktadır: Işık anlamına gelen “Phos” kelimesi ve elektrik anlamına gelen “voltaic” kelimesinin birleşimidir.

Dönüşümü sağlayan yapı p ve n-tipi taşıyıcı yoğunluğuna sahip en az iki katmandan oluşan yarıiletken malzemelerdir (Şekil 2.5). Ana malzemenin içerisine gerekli katkı maddelerinin katılması ile p ya da n tipi iletkenliğe sahip yarıiletken eklemler oluşturulur. Burada p tipi yarıiletkende deşikler, n tipi yarıiletkende elektronlar çoğunluk taşıyıcısı olmaktadır. p ve n

tipi yarıiletkenler birleştirilmeden önce elektriksel bakımdan nötr yapıdadır. Yani n tipinde pozitif enerji seviyeleri ile elektron sayıları eşit iken, p tipinde de negatif enerji seviyeleri ile deşik sayıları birbirine eşittir. Bu yapılar p-n eklem oluşturulduğunda, n tipindeki çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar p tipine doğru akım oluşturmaktadırlar. Burada gerçekleşen olay her iki tarafta da yük dengesi eşitlenene kadar devam etmektedir. p-n tipi yarıiletken maddenin eklem bölgesinde (ara yüzeyinde) n bölgesi tarafında pozitif yük, p bölgesi tarafında ise negatif yük birikmektedir. Bu eklem bölgesi "geçiş bölgesi" ya da "yükten arındırılmış bölge" diye de adlandırılmaktadır. Eklem bölgesinde oluşan elektrik alanına "yapısal elektrik alan" denir. Yapının güneş hücresi olarak çalışması için eklem bölgesinde PV dönüşümün olması şarttır. PV dönüşüm iki aşamada olmaktadır. Önce eklem bölgesine ışık düşürülerek elektron-deşik çiftleri oluşturulur. Sonra bunlar bölgedeki elektrik alan yardımıyla birbirlerinden ayrılır.

Eklemli yarıiletken malzemenin bant aralığından daha büyük enerjiye sahip olan fotonlar elektron-deşik çiftleri üreterek fotoakımı oluştururlar [47]. PV hücrelerde, üretilen gücün güneşten gelen güce oranı olarak tarif edilen dönüşüm verimini sınırlayan en önemli etken güneş spektrumunun tam olarak soğurulamamasıdır. Şekil 2.5'te tek eklemli PV hücrenin şeması görülmektedir.



Şekil 2.5. Basit bir güneş hücre yapısı

Güneş ışığı farklı enerji seviyelerinde ve dalga boylarında olan fotonlardan oluşur. Güneş ışınlarının büyük bölümü 1 eV altında bir enerjiye veya 1240 nm dalga boyundan büyük dalga boyuna sahiptir. Ancak güneşin bu enerji spektrumunun tamamı PV hücre tarafından

kullanılmaz. PV hücre yapı malzemesi olarak kullanılan yarıiletkenin yasak enerji bandından daha fazla enerjiye sahip fotonlar ($E > E_g$) buradaki elektronları iletkenlik bandına çıkarabilirler. Dolayısıyla güneş enerji spektrumunun yalnızca belirli bir kısmı PV hücrelerde enerji çevrimine katılabilir [48].

PV hücre kullanılma amacına bağlı olarak güç çıkışını artırmak için çok sayıda güneş hücresi birbirine seri ya da paralel bağlanır ve bir yüzey üzerine monte edilir. Bu yapıya güneş hücresi modülü ya da PV modül adı verilmektedir. PV modüllerin laminasyonu genellikle güneş hücrelerinin arka yüzeylerinde EVA (ethlene viny acetate) ve ön yüzeyinde yüksek optiksel geçirgenliğe sahip cam kullanılarak elde edilmektedir. Buradaki camı korumak sağlam bir yapıya sokmak ve sistemi daha kullanılabilir hale getirmek için modül metal çerçeve ile paketlenmektedir.

PV modüller elektrik enerjisinin gerekli olduğu her alanda kullanılabilir. PV modüller uygulamaya bağlı olarak invertörler, akümülatör, akü şarj kontrol cihazları ve çeşitli elektronik devreler ile birlikte kullanılarak bir PV sistem oluşturulur. PV sistemler özellikle yerleşim yerlerine uzak alanlarda, elektrik şebekesi olmayan yörelerde, jeneratöre yakıt taşımanın zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılır. Bu sistemler dizel jeneratörlerle ya da başka güç sistemleri ile birlikte birleşik olarak da kullanılmaları mümkün olmaktadır. Bu tür uygulamalar, şebeke-bağımsız sistem olarak adlandırılır.

PV sistemlerin diğer enerji kaynaklarından farklı olarak çevre üzerindeki etkisi çok azdır. Buna bağlı olarak PV hücrelerinin avantajları ve dezavantajları aşağıdaki gibidir [49].

Avantajları

- Güneş enerjisi sonsuz ve sınırsız enerji kaynağıdır. Teorik de sonsuz olsalar da ortalama ömürleri 25–30 yıl kadardır.
- Güneş enerjisi radyasyonunu elektrik enerjisine çeviren doğrudan enerji dönüştürücüleri sırasında en yüksek verime sahip olanıdır.
- Güneş enerjisi hava kirliliğine neden olmaz.
- Sessiz çalışmaları için gürültü kirliliğine neden olmazlar.
- Uzun iletim hatları kullanımına gerek yoktur. Hiçbir ulaştırma harcaması olmaksızın her yerde sağlanabilir.

- Güneş enerjisi sistemleri enerji ihtiyacına göre kolay kurulabilir sistemlerdir. Ayrıca enerji ihtiyacının artması durumunda hızlı ve kolay bir şekilde sistemler genişletilebilir.
- Güneş enerjisi sistemlerinde üretim ve kurulum maliyetlerinden sonra kullanımda çok fazla bakım maliyeti oluşmaz.
- Güneş sistemlerinin ilk kurulum ve üretim maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen uzun dönemde düşünüldüğünde fosil yakıtlara göre başlangıçtaki ödenen maliyetin geri dönüşümü vardır.
- Özellikle PV güneş hücrelerinin araştırma, geliştirme ve üretim çalışmaları yapıldığı ülkeye ciddi bilimsel ve teknolojik altyapıyı sağlamaktadır. Aynı zamanda bu ülkelerdeki güneş enerjisi sistemleri kurulum ve yatırım maliyetlerini ciddi oranda azaltmaktadır.

Dezavantajları

- En önemli dezavantajı PV panellerin ve takip sistemli yoğunlaştırıcıların üretim ve kurulum maliyetlerinin yüksek olmasıdır.
- Güneş enerjisi sistemlerinin verimi güneşin durumuna bağlıdır. Bulutlu havalar, çevre kirliliği, güneşin yönü bazı sistemlerde verimi direkt etkilemektedir.
- Özellikle elektrik üretimi yapan yoğunlaştırıcı tiplerde birbiri üzerinde gölgelemeyi önlemek için geniş alanlara ihtiyaç duyulmaktadır.
- Güneş enerjisi sistemlerinin gece enerji sürekliliği sağlayabilmesi için depolama sistemlerine ihtiyaç duyar.
- Güneş enerji sistemlerinde üretilen akım doğru akım olduğundan çeviriciler kullanılmalıdır.
- Yapısındaki yarıiletken malzemenin yaşlanma faktöründen ötürü PV sistemlerin performansı zamanla azalmaktadır.
- PV hücrelerde kullanılan yarıiletken maddeler kullanım ömrü bittikten sonra çevre kirliliğine neden olabilmektedirler.
- PV modülün güneş ışığını belli oranda yansıtma etkisinden ötürü ek kayıplar da söz konusudur.
- Yoğunlaştırıcılı PV sistemlerin sıcaklık problemi vardır.

2.2.1. Güneş hücrelerinin gelişimi

İnsanların güneş enerjisini teknolojik olarak kullanması çok eskilere dayanır. İnsanlar bu enerjiyi kendi geliştirdiği yöntemlerle başka enerjilere dönüştürmüştür. Tarih içinde PV etkiye dayalı güneş hücre teknolojisi aşağıdaki şekilde gelişmiştir.

1839: Fransız bilim adamı Edmond Becquerel PV etkiyi keşfetti. Elektrolit içerisine konulan elektrotların gerilimi, elektrolit üzerine düşen ışığa bağımlı olduğunu gözlemlemesi ile PV olayı keşfetmiştir [50].

1905: Ünlü fizikçi Albert Einstein izafiyet teoremi ile birlikte PV etki teoremini ispatlamıştır [22].

1951: Germanyum (Ge) malzemesinden geliştirilen tek kristalli bir yapı üretildi [22].

1970: İlk GaAs heteroyapılı güneş hücresi Alferov, Andreev ve arkadaşları tarafından oluşturuldu [51].

1994: Üç eklemler GaInP/GaAs/Ge güneş hücrelerinde % 29,5'lik rekor verimliliğe ulaşıldı [52].

1995: NREL AM1.5D spektrumu altında 160 güneşte GaInP/GaAs güneş hücresinden % 30,2'lik verim elde etti [53].

2006: Spectrolab %40 verimli üç-eklemler PV hücreler geliştirdi. İlk başarılı katı-hibrid boyaya duyarlı güneş hücreleri üretildi [54].

2008: NREL %40,8 verimli üç-eklemler PV hücre geliştirerek dünya rekoruna imza attı. Çok eklemler güneş hücrelerinde 4, 5 ve hatta 6 eklem ile gelecek nesil III-V hücreleri için iyi bir başlangıç oldu. Çok eklemler güneş hücre verimlerinin, Masafumi ve arkadaşları ile Law ve arkadaşları tarafından %50'ye yakın olabileceği belirtildi [55,56]

2009: New South Wales Üniversitesi güneş hücresi araştırmacıları tarafından yapılan araştırmayla güneş hücresindeki verim %43'e çıkarak dünya rekoruna imza atmıştır.

Fraunhofer Enstitüsü 454 güneş konsantrasyon faktörü altında 5,09 mm² üç eklemlili güneş hücresi ile %41,1 rekor verimliliği duyurdu [57].

2012: Güneş Solar Junction tarafından üretilen üç eklemlili hücre 947 güneş konsantrasyon faktörü altında %44 rekor verimliliği göstermiştir (NREL doğruladı) [57].

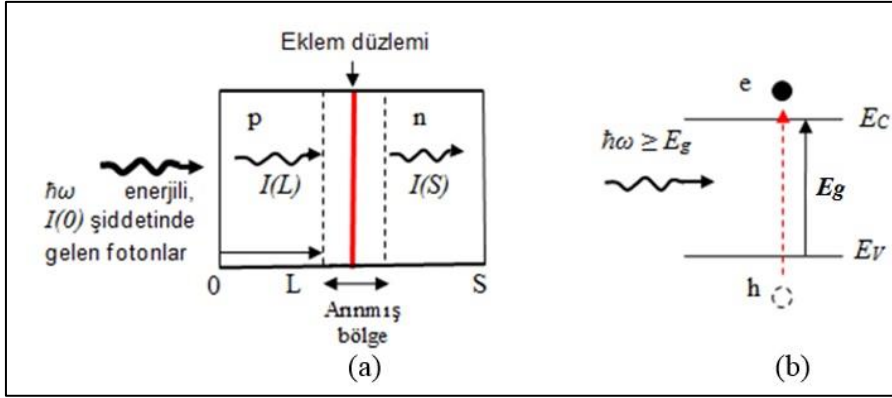
2013: Mayıs ayında CPV güneş hücre veriminde %43,6'lık bir değere ulaşıldı [58]. Eylül ayında Fraunhofer Güneş Enerji Sistemleri Enstitüsü, CEA-Leti, Soitec ve Berlin Helmholtz Merkezi'nin yaptığı ortak açıklamada güneş hücre verimi %44,7 değerinde yeni bir dünya rekoru kırıldığını bildirdiler. Bu başarımın ultraviyolede kızılötesine (infrared) kadar olan güneş tayfındaki (spektrum) enerjinin %50'sinin elektrik enerjisine çevrilmesindeki hedef için önemli bir aşama olduğunu vurguladılar [58].

2014: New South Wales Üniversitesi araştırmacılarının güneş panellerinden elde edilen verimde %40'ı aşarak rekor kırdı [59].

2.3. Güneş Hücre Çalışma Prensipleri

Güneş hücresinin çalışması fotonların soğurulmasıyla elektron-ışık çiftlerinin oluşması ve oluşan elektron ve ışıkların elektrik enerjisi sağlamak üzere dış devrede akımlarına dayandığından, güneş hücresi malzemesinde hem soğurma hem de üretim süreçleri gerçekleşmektedir. Bu nedenle malzeme seçiminde dikkate alınması gereken unsurlar yarıiletkenin yasak bant aralığı ve spektral soğurma katsayısıdır. İdeal bir güneş hücresi tasarlanırken bütün fotonların aygıtın aktif bölgesinde soğurulması istenir.

Bir güneş hücresinde aktif bölge azınlık elektron ve ışıkların difüzyon uzunluğu ile belirlenir. Bu durum aygıtın yüzeyinden itibaren aktif bölgenin derinliğine ve aktif bölgenin kalınlığına sınırlama getirir. Aynı zamanda elektromanyetik spektrumun elektrik enerjisi yaratımında yararlı olabilecek bölgesini belirler. Aygıt içerisinde elektromanyetik dalganın ilerlemesi Şekil 2.6'da verildi [60].



Şekil 2.6. Aygıt içinde elektromanyetik dalga ilerlerken (a) soğurma ve (b) bant aralığından büyük enerjili fotonların soğurulması ile elektron boşluk çiftinin yaratılması

Eğer foton enerjisi yarıiletkenin yasak bant aralığından çok daha büyükse ($\hbar\omega \gg E_g$), soğurma katsayısı α büyük olup, fotonların çoğu yüzeye yakın bölgede soğurulur ve elektron boşluk çiftlerinin çoğu yüzeye yakın bölgede yaratılır. Bu durumda eğer aktif bölge yarıiletkenin yüzeyinden uzaksa, fotonlar aktif bölge içine ilerleyemez, soğurma ve sonrasında elektron boşluk çiftlerinin üretimi gerçekleşmez. Aynı zamanda $\hbar\omega \gg E_g$ ise elektron boşluk çiftleri iletkenlik ve valans bandı kenarları arasındaki enerjiden çok daha büyük enerjilerde yaratılır ve bu fazla enerjilerini fonon emisyonu ile kaybederler. Dolayısıyla elektromanyetik enerji ısı olarak kaybedilir [60].

Bir güneş hücresini ifade etmek için genellikle dört parametre kullanılır. Bunlar I_{sc} , V_{oc} , FF ve η dir. İdeal olarak kısa devre akımın maksimum akıma eşit olması beklenir ($I_{sc} = I_{max}$). V_{oc} değeri Eş. 2.3'den yararlanarak elde edilir. V_{oc} değeri I_0 bağlı olduğunda yarıiletkenin özelliklerince belirlenir.

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{e} \ln \left(1 + \frac{I_L}{I_0} \right) \quad (2.3)$$

Güneş hücresi için diğer önemli bir parametre dolum faktörüdür. Açık devre voltajı ve kısa devre akımı sırasıyla bir güneş hücresindeki en yüksek voltaj ve akım değerleridir (Şekil 2.6). Ancak bu ikisinin değerlerine bakıldığında biri maksimumken diğeri sıfır olduğundan güneş hücresinden elde edilen güç sıfır olacaktır. Dolum faktörü bir güneş hücresinden elde edilecek en yüksek verimi belirleyen bir faktördür;

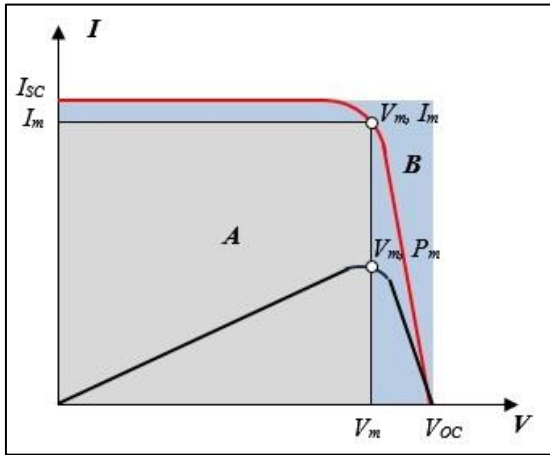
$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{OC}} \quad (2.4)$$

Grafiksel olarak FF güneş hücresinin akım-voltaj (I-V) karakteristiğinin kare şekline ne kadar yaklaştığının bir ölçüsüdür ve I-V eğrisi içinde kalan en büyük alandır. Tipik ticari güneş hücreleri için $FF > \%70$ 'tir. Yüksek dolum faktörlü güneş hücreleri düşük seri dirençlere sahiptir, bu sayede ışıkla üretilen akımın çok azı ısı olarak kaybolacaktır [60].

Bir güneş hücresinin “güç dönüşüm verimi” çıkıştaki elektrik gücünün girişteki optik güce (P_{in}) oranı olarak tanımlanır. Dolayısıyla, güneş hücresi maksimum güç durumunda çalışırken dönüşüm verimi

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100 = \frac{I_m V_m}{P_{in}} \times 100 \quad (2.5)$$

ifadesi ile elde edilir.



Şekil 2.7. Bir güneş hücresinin akım ve voltaj karakteristiği

Güneş hücresini üreteceği gücün maksimum olması için aşağıdaki şartlar sağlanmalıdır [60]:

- I_{sc} maksimum olmalıdır. Bu şartın sağlanması için foton şiddeti yoğunlaştırıcı sistem kullanılarak artırılmalıdır.
- Sızıntı akımı (I_0) V_{oc} 'yi yükseltmek için küçük olmalıdır.
- Seri direnç azaltılarak FF artırılabilir.

2.4. PV Hücre Türleri

Güneş hücresinin verimini arttırabilmek için hücrelerin teknolojisi, yapımında kullanılan maddeler ve yapım türleri zaman içerisinde gelişim göstermiştir. Güneş hücreleri pek çok farklı maddeden üretilirler.

2.4.1. Kristal silikon güneş hücreleri

Si yarıiletken özellikleri gösteren ve güneş hücre yapımında en çok kullanılan maddedir. Si atomunun optik, yapısal ve elektriksel özelliklerinin uzun süre değişmemesi ve üretim teknolojisindeki gelişmeler bu malzemenin güneş hücresi üretimindeki kullanılabilirliğini artıran etmenlerdir. PV özellikleri daha üstün olan başka maddeler de olmasına rağmen, teknolojisinin üstünlüğü ve ekonomik nedenlerden dolayı tercih edilmektedirler. Çok ince bir kalınlıkta (50 μm gibi) bile düşük değerdeki güneş ışınlarını soğurduğundan dolayı genel olarak güneş hücrelerinde kullanılırlar. Üretici firmaların en çok tercih ettiği seçenektir. Bu yapılar pazar payının %93 ünü oluştururlar. Kristal Si güneş hücrelerine genel olarak 25 yıllık garanti ömrü sunulur.

Kristal silikon güneş hücreleri;

- Tek-kristal (mono kristal) güneş hücreleri
- Çoklu-kristal (Polikristal) güneş hücreleri'dir.

Tek kristal silisyum PV hücreler (c-Si)

Yarıiletken endüstrisinin çoğu tek kristal Si'a dayandırılmış olduğundan, üretim sürecine ilişkin büyük bir teknoloji tabanı bulunmaktadır. Ancak saf tek kristal Si üretimi pahalı ve çok zor teknoloji gerektirmektedir. İlk ticari PV hücrelerinde Czochralski kristal büyütme tekniği ile büyütülen tek kristal Si kullanılmıştır. Literatürde tek kristal Si PV hücrelerin araştırılması ve geliştirilmesi ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [48,61]. Tek kristal Si kristalinin büyütülmesi için en çok kullanılan yöntemler CZ (Czochralski), FZ (Float Zone) ve Bridgman yöntemleridir [48,62]. Tek kristal hücrelerin yapıları homojendir ve renkleri karakteristik olarak koyu mavi-siyah aralığındadır.



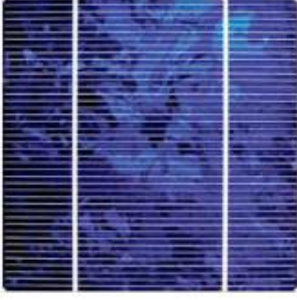
Şekil 2.8. Tek kristal Si [63].

- Tek kristal Si güneş hücrelerinden %24 laboratuvar ortamında, %15 in üzerinde ticari modüllerde verim elde edilir. Yüksek verimlere sahip olmalarından dolayı uzun vadeli yatırımlar için ideal güneş hücreleridir.
- 4-6 yıl arasında geri ödeme maliyeti süresidir. Bu yapılarda 20 yıllık bir sürede %7 verim kaybı oluşur.
- Saf kristal gereksinimi nedeniyle pahalıdır.

Çok kristal silisyum PV hücreler (mc-Si)

Çoklu kristal PV hücre üretiminde en çok tercih edilen yöntemlerden biri dökme yöntemidir. Literatürde çoklu kristal Si PV hücrelerin araştırılması ve geliştirilmesi ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır [64]. Çok kristal Si güneş hücreleri tek kristal Si güneş hücrelerine göre daha ucuza üretilmekte olup verimleri ise daha düşük olmaktadır [31,48,65]. Hücre üzerine koyulan yansımayı engelleyici camdan dolayı hücrenin rengi mavi olarak gözükmeyle birlikte yansısız cam kaplaması olmayan hücre gümüş rengindedir.

- Verim laboratuvar şartlarında %18, ticari modüllerde ise %14 civarındadır.
- İlk yatırım maliyetini geri ödeme süresi 2-5 yıl arasındadır. 20 yıllık bir sürede %14 verim kaybı meydana gelir.
- Üretim süreci tek kristale göre daha ucuzdur.



Şekil 2.9. Çok kristal Si [63].

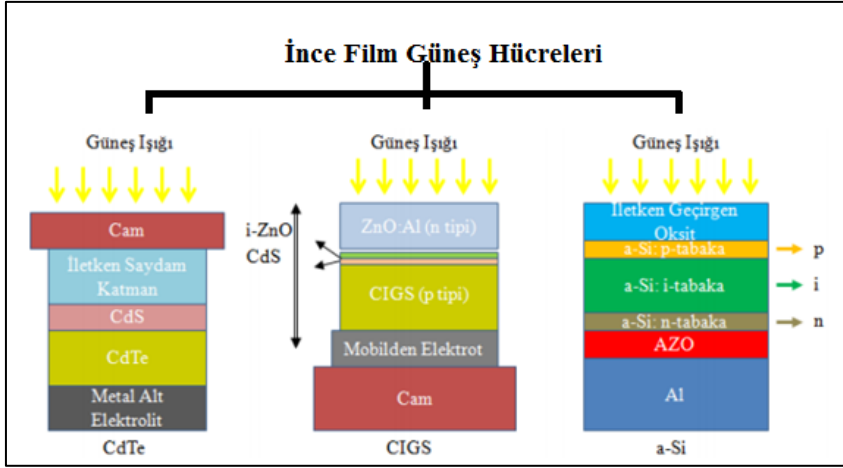
2.4.2. İnce film PV hücreler

İnce film PV hücre tekniğinde, absorbans özelliği yüksek malzemeler kullanılarak daha az kalınlıkta (1-4 μm kalınlığında) güneş hücreleri elde edilebilir [66]. Bu hücreler, güneş hücre piyasasının %7'sini oluştururlar. Oldukça ince yapıda ki bu paneller %7-14 arasında verimlilik sunmaktadırlar.

Yarıiletken malzemelerin geniş yüzeyler üzerine kaplanması mantığına dayanan bu yöntem farklı karakteristik özelliklere sahip hücrelerin üretilmesine olanak sağlamıştır. Bu alanda yapılan araştırmalara göre güneş hücresi üretiminde kullanılacak birçok yarıiletken malzeme düşük maliyetlerle cam ya da plastik folyo gibi yüzeyler üzerine geniş alanlara kaplanabildiğini göstermiştir. Ayrıca hücreler arası elektriksel bağlantıların daha basit olması, seri üretime ve büyük boyutlarda üretime yatkınlığı gibi avantajları nedeniyle ticari olarak yaygın bir teknolojidir [67].

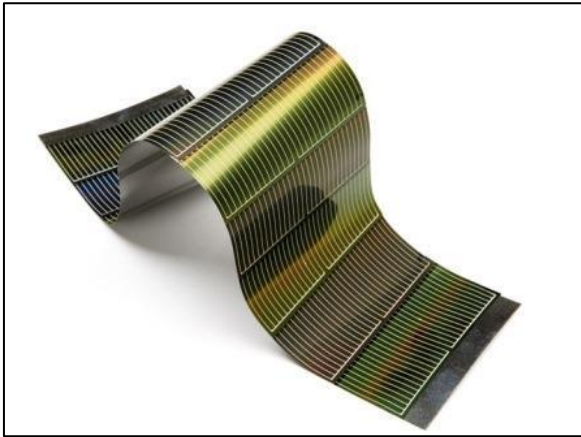
Genellikle çok kristalli yapıdadır [31]. Yapısı itibariyle geniş yüzeylere kolay uygulanabilmektedir. İnce film güneş hücreleri;

- Amorf Silisyum Güneş Hücreleri (a-Si)
- Kadmiyum Tellür (CdTe) Güneş Hücreleri
- Bakır İndiyum Galyum (de) Selenyum (CIGS) Güneş Hücreleri [68].



Şekil 2.10. CdTe/CdS, CIGS ve a-Si güneş hücreleri

Şekil 2.11' de ince film yapıda güneş hücrelerinin esnek bir yüzey üzerine kaplanmış hali görülmektedir.



Şekil 2.11. İnce film güneş hücresi

Amorf silikon hücreler

Amorf yapıda Si atomları gelişigüzel dizildiğinden iletkenliği düşüktür. Malzeme içerisinde yapı taşlarının gelişigüzel dizilmesi amorf Si'un elektriksel iletim kalitesini düşürmektedir. Bu yarıiletken malzemesine %5–10 oranında H katılarak elektriksel özellikleri PV çevrime uygun düzeyde tutulabilir. Amorf Si yapımına en uygun teknoloji Işımalı Boşaltım (Glow discharge) yöntemidir [48,69].

Şekil 2.12'de Sharp, Firstsolar ve Bosch firmalarına ait amorf silikon ince film güneş paneli gösterilmektedir [70].



Şekil 2.12. Amorf Si hücre paneli

- Ticari modüllerde %5 ile 7 civarında olan verim, laboratuvar ortamında maksimum %10'a kadar çıkabilmektedir [71].
- Düşük verim nedeniyle büyük güç sistemlerinde tercih edilmez. Daha çok küçük elektronik cihazlarda güç kaynağı olarak kullanılır.
- Kısa zamanda bozunuma uğrayarak verim çıkışları azalır. Zaman içerisinde verim kaybı yaklaşık olarak %21 civarındadır.
- 1,5-3,5 yıl arasında geri ödeme maliyeti süresidir.

Kadmiyum tellür (CdTe) güneş hücreleri

Kadmiyum (Cd) elementi ve Tellür (Te) elementinin birleştirilmesi ile oluşan bu hücreler, yüksek soğurma katsayısına sahiptirler. İnce film büyütme teknolojisi ile kolayca üretilebilmesi bu hücreler için bir avantajdır. Çok kristal yapıya sahip CdTe malzemesi ile güneş hücre maliyeti daha düşük değerlere çekileceği tahmin edilmektedir. Şekil 2.13'de Sharp, First Solar ve Bosch firmalarına ait CdTe ince film güneş paneli gösterilmektedir [70].

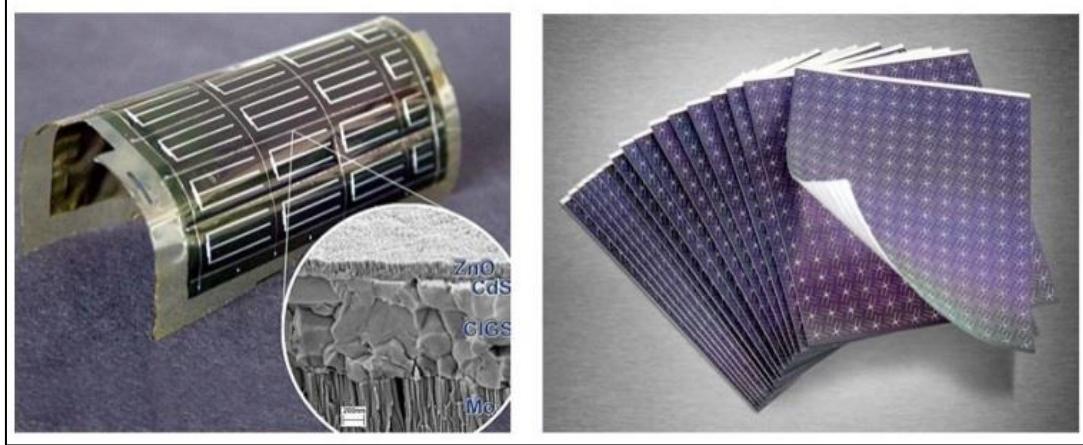


Şekil 2.13. CdTe güneş hücre paneli

- Laboratuvar ortamında %16, ticari tip modüllerde ise %7 maksimum hücre verimi elde edilmektedir [72].
- Üretim maliyeti düşüktür.
- Sadece rijit cam ile kullanılabilir [73].

Bakır indiyum galyum (de) Selenyum (CIGS) güneş hücreleri

Bakır (Cu), indiyum (In) ve selenyum (Se) elementlerinden oluşan üçlü bileşik yarıiletken ile başlayan bu çoklu grup yapıları malzemeler CIS (CuInSe_2) ince filmler olarak adlandırılır. Bu CIS güneş hücrelerinin yasak enerji bant aralığı, bir güneş hücresi için ideal olduğu düşünülen (1,4-1,5 eV) yasak enerji bant aralığından düşük olması en büyük dezavantajdır. Bu problemin çözümü ise CIS güneş hücrelerinden CIGS (CuInGaSe_2) güneş hücreleri türetilerek giderildi. CIS ince filmlere Ga katkılanması yapılarak, bu ince filmlerinin yasak enerji bant aralıkları artırılır. Ga katkılanması ile artan yasak enerji bant aralığından dolayı CIS güneş hücrelerinin açık devre geriliminin de arttığı bilinmektedir.



Şekil 2.14. CuInSe_2 ince film güneş hücresi

Şekil 2.15’de Sharp, Firstsolar ve Bosch firmalarına ait CuInSe_2 ince film güneş hücresi paneli gösterilmektedir [70].

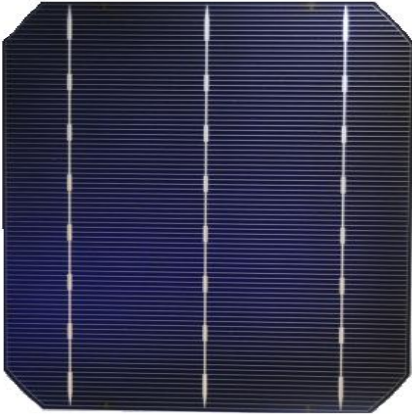


Şekil 2.15. CuInSe₂ güneş hücre paneli

- Bu hücrelerden %17,7 laboratuvar şartlarında verim elde edilmektedir. Ayrıca enerji üretim amacı ile geliştirilen prototip bir modülde %10,2 verim elde edilmiştir. [74,75].
- Pazar payı zamanla artmaktadır.
- Geniş alan gereksinimine ihtiyaç vardır ve üretimi pahalıdır.
- Cam veya esnek yüzey ile kullanılabilir.

2.4.3. Galyum Arsenit (GaAs)

GaAs güneş hücrelerinden laboratuvar çalışmalarında %25 verim elde edilir. Uygun yarıiletkenler ile oluşturulan çok eklemler GaAs hücrelerinde %30 verim elde edilebilir. GaAs güneş hücreleri genellikle uzay uygulamalarında ve optik yoğunlaştırıcı sistemlerde kullanılır.

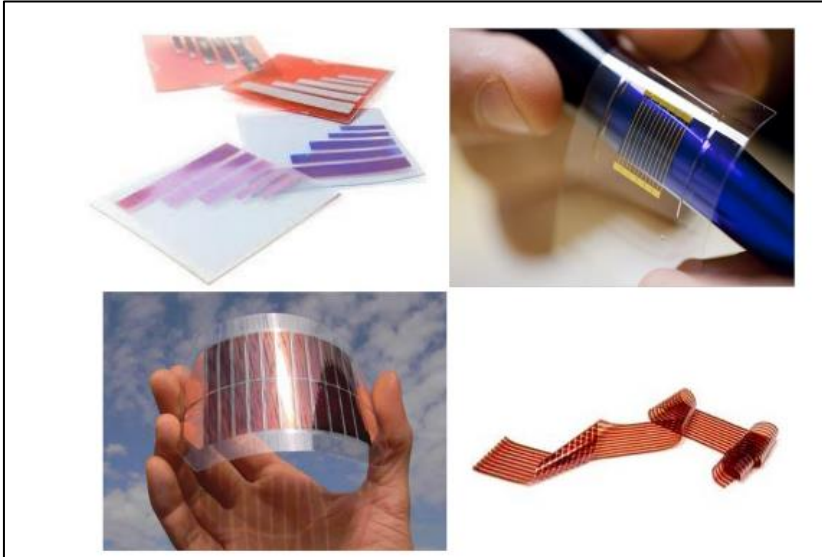


Şekil 2.16. GaAs güneş hücresi [63].

2.4.4. Organik ve boya duyarlı güneş hücreleri

Organik güneş hücreleri

Organik tabanlı malzemeler iki metal elektrot arasına yerleştirilerek bu tip güneş hücreleri elde edilir. Örnekleri Şekil 2.17’de gösterilen bu güneş hücrelerinde organik temelli malzemeler olarak yarıiletken polimerler malzemelerin kullanılmasıyla önemli gelişmeler sağlanmıştır. İletken olmaları, ucuz olmaları, üretim tekniklerinin kolay olması, yüksek molekül ağırlığına sahip organik moleküller istenilen özelliğe göre kolayca değiştirilebilmeleri ve hafif olmaları gibi avantajlarından dolayı gelecek için umut vermektedir [76].

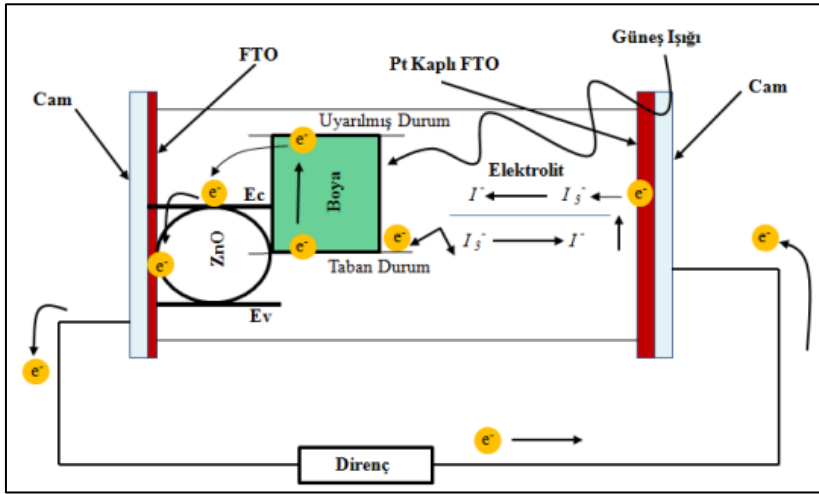


Şekil 2.17. Esneklik özelliğine sahip organik güneş hücreleri

Bu malzemelerin kimyasal yapılarının kolay bir şekilde değiştirilmesi en büyük avantajlarıdır. Böylece malzeme istenilen soğurma aralığına ayarlanarak güneş spektrumuna daha uygun hale getirilir ve daha fazla foton enerjisi soğurabilmesi sağlanır. Bu güneş hücrelerinin verimleri anorganik malzemelerin kullanıldığı güneş hücrelerine göre daha düşüktür. Ayrıca verimin dışında bu tip hücrelerde kararlılık problemi de mevcuttur. Özellikle ışık altında, oksijende ve su buharında hızlı bir şekilde kalitesi düşmektedir. Organik güneş hücrelerini uzun ömürlü olarak kullanabilmemiz için hava ve nemli ortamlardan saklamamız gerekmektedir [77].

Boya duyarlı güneş hücreleri (BDGH)

Boya duyarlı güneş hücreleri, fotosentez benzeri bir prensip ile çalışırlar. Güneş ışınları bitki yapraklarında klorofil tarafından absorbe edilen karbondioksit gazını, su yardımıyla karbonhidrat (glukoz) ve oksijene elementlerine çevirir. Fotosentez olayı örnek alınarak BDGH sistemler geliştirildi. Işığı absorbe eden BDGH sistemlerden boyar maddeler yardımı ile enerji üretimi gerçekleşir. Yüzeysel fotosentez olayında ışık absorbe eden organik ve ya doğal boya molekülleri geniş enerji bant aralığına sahip yarıiletkenlerde değerlik bandından iletkenlik bandına elektron geçişini sağlar. Böylece içyapıda elektron akışı gerçekleşir.



Şekil 2.18. Boya duyarlı güneş hücresinin işleyiş prensibi [78].

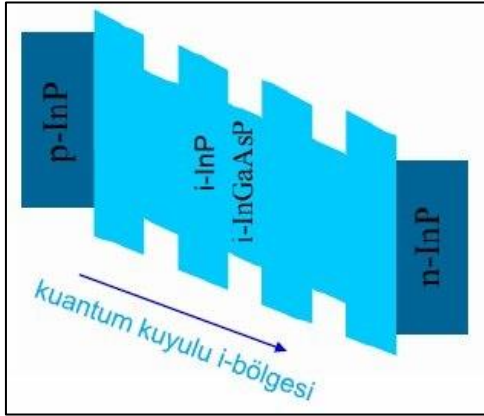
BDGH güneş hücreleri düşük ışıpta verimli olmaları, daha ekonomik olmaları ve esnek malzemelere uygulanabilir olması nedeniyle önemli avantajlar sağlamaktadır.

2.4.5. III–V Grubu PV hücreler

Periyodik tablonun III. grubunda (Al, Ga, In) ve V. grubunda (N, P, As, Sb) bulunan yarıiletkenlerin uygun bir biçimde birleşmesi ile ikili ve üçlü yarıiletken yapılar oluşturulmaktadır.

Kuantum kuyulu güneş hücreleri (QWSC)

Büyük bant aralığına sahip yarıiletken malzeme içerisinde küçük bant aralığına sahip malzemenin çok ince katmanlar halinde üretilmesi ile elde edilir. Küçük bant aralığına sahip malzemenin soğurma özelliği ile fotoakımın artması, çıkış geriliminin ise azalmaması hedeflenir. Kuantum kuyulu güneş hücrelerinde (QWSC) teorik verim sınırı %44 civarındadır. Kuantum kuyuları, özellikle PV cihazların performansını artırmak amacıyla solar spektrumun iyi uyumunu elde etmek için çok katmanlı yapı içerisine (p-n eklem içerisine) yerleştirilir. QWSC teknolojisi yüksek dönüşüm verimliliğine sahip cihazların geliştirilmesine önemli bir adaydır.

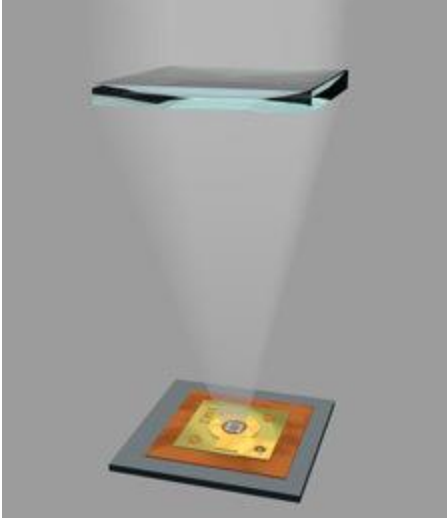


Şekil 2.19. Kuantum kuyulu p-i-n yapısı

Yoğunlaştırıcılı fotovoltaik hücreler (CPV)

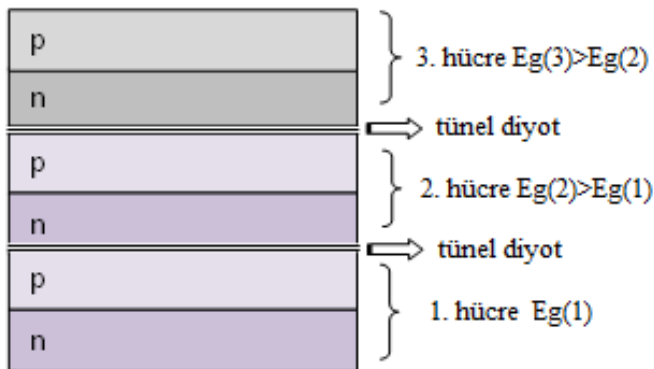
Güneş hücreleriyle elektrik üretimi aşamasında iki sistem kullanılır. Bu sistemlerden ilki güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren PV sistemlerdir. Ancak bu sistemlerin maliyetinin yüksek oluşu, teknolojisinin karmaşıklığı ve yüksek kapasitede elektrik üretimi için yetersiz olduğu ortaya çıkmıştır. İkinci sistem ise, güneş enerjisinin yoğunlaştırıcı sistemler ile kullanarak yüksek yoğunlaştırma altında yüksek verim elde edilmesidir. Yoğunlaştırılan güneş ışığıyla birlikte güneş hücre verimleri de artmaktadır. Güneş ışınlarını toplayıcı-odaklayıcı sistemler üzerinde yoğun olarak çalışılmaktadır. Bunun sonucu olarak güneş hücre verimlerinin de artırılması hedeflenmektedir. 250 güneş yoğunlaştırıcı bir sistemde, hücre tek-güneş uygulamalarına göre yaklaşık %20 daha verimlidir [23]. Ayrıca maliyeti düşürerek üretimin artırılması amaçlanmıştır.

Optik yoğunlaştırıcı üniteler, gelen ışığı kullanılan sisteme göre 2-1000 kat oranlarda yoğunlaştıran mercekli veya yansıtıcı araçlardan oluşmaktadır. Güneş ışığını yoğunlaştırmak için plastik lensler ve cam aynalar gibi ucuz materyaller kullanılır.



Şekil 2.20. Güneş ışığını yoğunlaştırmak için kullanılan lens

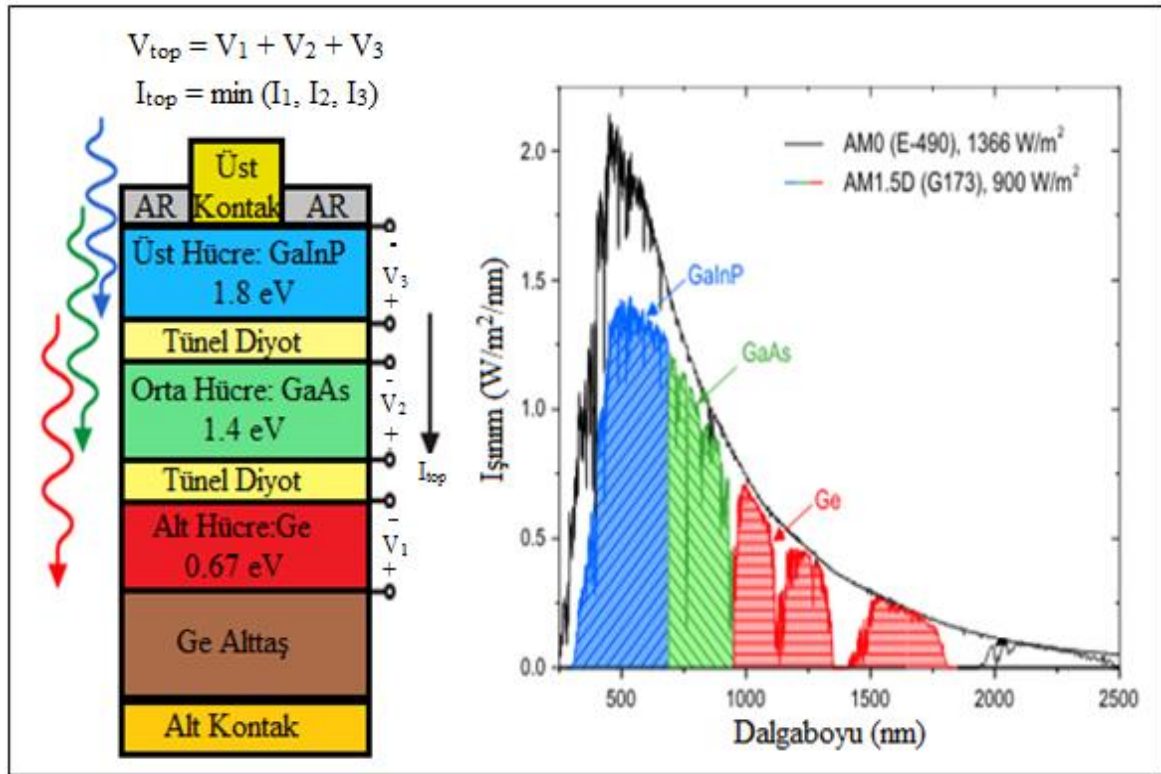
CPV hücreler tek eklemliler, iki eklemliler ve daha çok eklemliler olarak üretilebilmektedir. Çok eklemliler genellikle, birden fazla güneş hücresinin üst üste büyütülmesi ile ardışık eklemlilerden oluşmaktadır. Üç eklemlilerde güneş spektrumunun daha fazla bölgesinden yararlanmak amaçlanmaktadır. Bu nedenle enerji aralığı $E_g(1)$ olan bir hücre üzerine enerji aralığı $E_g(2) > E_g(1)$ ve onun üzerine $E_g(3) > E_g(2)$ olan hücrelerin büyütülmesiyle oluşturulabilir. Üç eklemliler güneş hücre yapısı ve her hücreye ait yasak enerji aralıkları arasındaki ilişki Şekil 2.21’de görülmektedir.



Şekil 2.21. Üç eklemliler güneş hücresinin şematik gösterimi

Çok eklemli yapılarda GaAs alttaş yerine Ge kullanılması maliyet açısından daha uygundur. Ayrıca düşük bant aralıklı Ge'dan taban hücrenin yapılması, çok eklemli hücrenin bir bütün olarak foto-akım oluşturmada verimli olarak kullanılabilir. Çok eklemli güneş hücresi yapılarında her bir hücre yüksek katkılı bir tünel diyotla (p+-n+ eklemi) birleştirilir. Tünel eklem normal hücrelerden daha incedir ve hücre akımını artırarak ışığın absorpsiyonunu minimuma indirmek amacıyla büyütülür. Eklemler farklı bant aralığına sahip uygun iletim sağlayacak oranda katkı içeren yapılardan oluşmalıdır. Hücre verimliliğini etkileyen bir parametre de kristal kalitesidir. PV kristallerinin büyüme sonrası yapıların tavlama ya da kristal yapısında iyileşmeler olduğu gözlenmiştir [79].

III-V grubu malzemeler kullanılarak elde edilen hücrelerden oldukça yüksek verim elde edilmesi bu konuda yapılan araştırmaları arttırmıştır [27]. Üç eklemli hücrelerden elde edilen verimlilik değerleri oldukça ilgi çekicidir. Günümüzde bu hücrelerin verimliliğinin artırılması ile ilgili çalışmalar hala güncelliğini korumakta ve devam etmektedir.



Şekil 2.22. GaInP/GaAs/Ge için güneş spektrumu

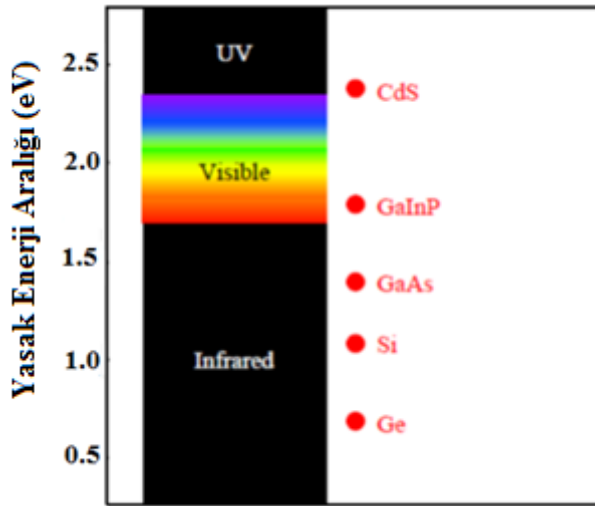
Örneğin, GaInP üçlü alaşımı güneş spektrumunun görünür bölgesini soğurduğundan dolayı yüksek verimli güneş hücreleri için en uygun malzemelerden biridir. Özellikle GaAs altta üzerine örgü uyumlu büyütülen $Ga_{0,51}In_{0,49}P$ yapısı teknolojik olarak büyük öneme sahiptir. Günümüzde üretilen üç eklemli yapılarda; GaInP (1,9 eV), GaAs (1,4 eV) ve Ge (0,7 eV) kullanılmaktadır.

Çok eklemli güneş hücrelerinde verim optimizasyonu için aşağıdaki parametreler dikkate alınır [80]:

i) Bant aralığı: PV hücrelerde verimin optimum değeri için, PV hücrenin güneş spektrumunun mümkün olduğu kadar büyük bölümünü soğurması amacıyla, çok eklemli yapıyı oluşturan hücrelerin bant aralıklarının bu büyük spektrumu kapsamaları istenir. Ayrıca, komşu katmanların bant aralıklarının birbirine yakın olması gerekir. Çünkü fotonun bant aralığının üzerindeki fazlalık enerjisi ısı ile kaybolur [81].

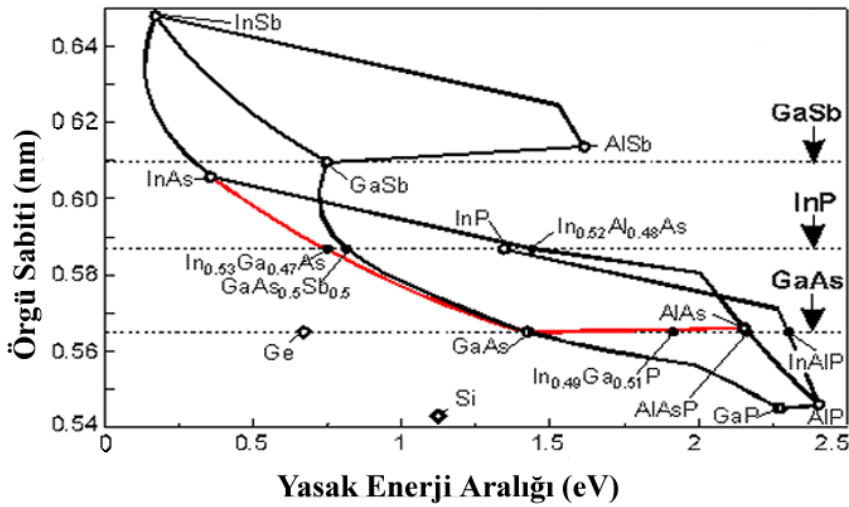
1,2-1,4 eV bant aralıklı tek eklemli yapılar için Shockley-Queisser tarafından yapılan analize göre dönüşüm verimliliğini %32'ye sınırlayan faktör, E_g 'den büyük enerjili fotonların yutulması nedeniyle, elektron-fonon saçılması ve bunu takip eden fonon yayınlanması, kendi bant kenarlarına (elektronlar için iletkenlik bandının altı, deşikler için valans bandının üstü) taşıyıcıların gevşemesi gibi kayıplara neden olur [82]. Bu kayıpları azaltmak ve verimi %30'un üzerine çıkartmak için temel yaklaşım, güneş spektrumu ile daha iyi örtüşen bant aralıklı p-n eklemelerini ardışık bir yığın olarak kullanmaktır. Bu yolla yüksek enerjili fotonlar yüksek E_g 'li yarıiletken, düşük enerjili fotonlar düşük E_g 'li yarıiletken tarafından soğurulacaktır. Böylece fonon emisyonu ile taşıyıcıların gevşemesi sonucu oluşan ısı kaybı azaltılmış olacaktır. Geliştirilen üç eklemli hücre yapı tasarımında bu özellikler dikkate alınmıştır.

Geleneksel p-n eklem güneş hücrelerinde GaAs tek güneş ışması altında %25 civarında verim sağlayan optimal bir bant aralığına (1,4 eV) sahiptir. Günümüzde üretilen iki eklemli ve üç eklemli yapılarda; GaInP (1,9 eV), GaAs (1,4 eV) ve Ge (0,7 eV) kullanılmaktadır. Ayrıca AlGaInP (2,2 eV), AlGaAs (1,6 eV), GaInP (1,7 eV), GaInAs (1,2 eV), GaInNAs (1,0-1,1 eV) yapıları da çalışılmaktadır. Bazı yarıiletkenlerin bant aralığı değeri ve elektromanyetik spektrumu Şekil 2.23'de verildi.



Şekil 2.23. Bazı yarıiletkenlerin bant aralığı değeri ile elektromanyetik spektrumu [83].

ii) *Örgü sabiti*: Tek alttaş üzerinde farklı yarıiletken katmanların direkt olarak büyütüldüğü çok eklemlili güneş hücrelerinde optik geçirgenliğin ve maksimum akım iletkenliğinin sağlanması için bütün katmanların kristal yapılarının uyumlu (örgü uyumu) olması gerekmektedir. Katmanlar arasındaki örgü uyumsuzluğu, katmanların kristal yapılarında bozulmalara ve güneş hücresinin veriminde önemli oranda bir azalmaya sebep olmaktadır [83]. Örgü sabitleri birbirine yakın malzemelerin türevleri kullanılarak yüksek verimli çok eklemlili güneş hücreleri üretilebilmektedir [84]. Bazı III-V yarıiletken bileşimlerinin örgü uyumlarını sağlamak için, yapı içerisine çok düşük oranlarda grup-III atomu katkılanarak uyumlu hale getirilebilir [80].



Şekil 2.24. Örgü sabiti-yasak enerji bant diyagramı

iii) *Akım uyumu:* Çok eklemli güneş hücreleri seri bağlı katmanlardan oluştuğundan güneş hücresinde akım uyumunu kaçınılmaz kılmaktadır [85]. Çok eklemli güneş hücresinin çıkış akımı, eklemlerin ayrı ayrı ürettiği akımların küçüğü ile sınırlıdır. Bu nedenle akım üreten seri sistemlerde her bir eklemden oluşan akım aynı değerde olmalıdır. Her bir tabaka kalınlığının belirlenmesinde iki önemli etken vardır: [86]

- Katmanı oluşturan malzemenin soğurma katsayısı,
- Katmanın soğurabildiği spektrumdaki fotonların sayısı: Işık malzeme içerisine girdiğinde şiddeti üstel olarak azalır. Üstel ifadedeki sabit, malzemenin soğurma katsayısıdır.

Bir katmanda, bant aralığını aşan foton sayısı fazla ise o katman daha ince yapılmalıdır. Malzemenin soğurma katsayısı düşük ise daha fazla foton soğurmak için bu katman daha kalın olmalıdır. İstenilen bant aralığına ve örgü sabitine sahip malzemeler seçildikten sonra, soğurma katsayılarına ve gelen foton sayısına göre her katmanın kalınlıkları aynı akımı üretecek şekilde belirlenir. Örneğin, GaInP/GaAs/Ge tasarımında, Ge'nin soğurma katsayısı küçük olduğundan bu katman diğerlerine göre oldukça kalındır; diğer katmanların kalınlıkları ise uzay ya da yeryüzü uygulaması (bu iki ortam için UV ve IR foton sayılarına göre) olmasına göre değişir [83].

iv) *Çok eklemli yapının oluşturulması:* Çok eklemli güneş hücreleri, ayrı alttaşlar üzerinde ya da tek alttaş üzerinde (monolitik) üretilebilirler. Ayrı alttaş kullanımı maliyeti artırdığı için tek alttaş tercih edilir. Üretimde MOCVD ya da MBE teknikleri kullanılır [51,87]. Çok eklemli yapıda elektronların iki p-n eklemi arasındaki iletimi bir tünel diyot (TD) vasıtasıyla sağlanır. Çok eklemli güneş hücrelerinde TD kullanılmasının temel amacı, iki p-n eklem hücre arasında küçük dirençli ve optik kayıpları en aza indiren bir bağlantı sağlanmasıdır. Tünel diyot bulunmazsa, örneğin, üstteki hücrenin p- tipi katkılı yanı, alttaki hücrenin n-tipi katkılı yanına direkt olarak bağlanacaktır. Böylece, üst ve alt hücrelerin yönlerine zıt bir p-n eklemi oluşacaktır ve fotovoltaj düşecektir.

Malzemelerin aşırı katkılı olması sebebi ile artırılmış bölge çok ince olur ve elektronlar rahatlıkla tünelleme yoluyla bu bölgeyi aşabilirler. Bu diyot tünelleme bölgesinde kullanıldığında hem çok küçük direnç gösterir hem de üzerinde çok küçük bir gerilim tutar [88]. Çok eklemli güneş hücrelerinin performansının düşmemesi için tünel diyotlar, alttaki

hücrenin soğurması gereken dalga boyları için optik olarak geçirgen olmalıdır: $E_g (TD) > E_g (alt\ hücre)$. TD büyütülmesi, çok eklemli güneş hücresi verimini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. TD büyütülmesindeki zorluk yüzey morfolojisini bozmadan düzenli, yüksek katkılı ve geçirgen bir yapı talep edilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu yapıda n-tipi katkılama için S, Te, Sn, Si, C, Ge ve p-tipi katkılama için Zn, Be, Mg, Cd, Si, C atomları kullanılır [84].

v) *Yansımaya önleyici katman oluşturulması:* Güneş ışınlarının yüzeyden yansımalarını önlemek ve böylece hücrenin daha fazla foton soğurmasını temin etmek amacıyla hücre yüzeyleri SiN, TiO₂ gibi tekli ve TiO₂/Al₂O₃ gibi iki katlı bir dielektrik tabaka ile kaplanır. Bu yansımaya önleyici yapı, yüksek yansıtıcılığı olan (%30 civarı) malzemelerin yansıtıcılığını azaltmak (<%1) üzere tasarlanmaktadır.

2.5. Güneş Hücresinin Çalışmasını Etkileyen Dış Faktörler

2.5.1. Sıcaklığın etkisi

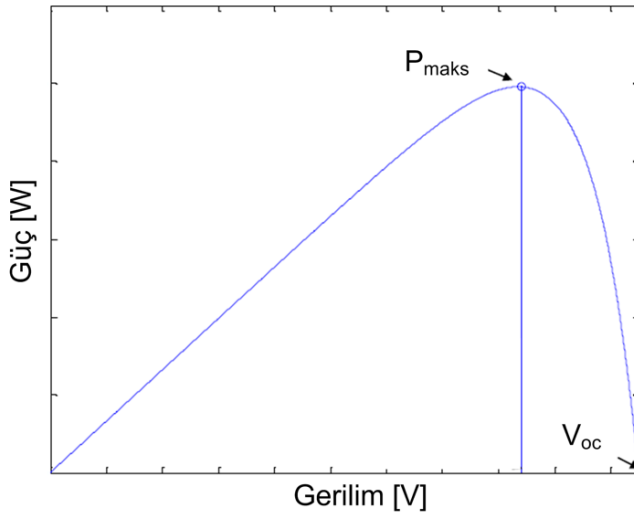
Güneş hücrelerinin çalışmasını etkileyen önemli etkenlerden birisi sıcaklıktır. Sıcaklığın artmasıyla güneş hücrelerinin kısa devre akımı artmaktadır. Yarıiletken enerji bant aralıkları sıcaklıkla azaldığından dolayı dolun faktörü ve açık devre voltajı azalmaktadır. Oda sıcaklığında lineer olarak değişme gösteren enerji bant aralığı, düşük sıcaklıklarda doğrusal olmayan bir değişme gösterir. Bazı yarıiletkenlerin enerji bant aralığının sıcaklıkla değişimi Çizelge 2.2’de verildi.

Çizelge 2.2. Bazı yarıiletkenlerin enerji bant aralığının sıcaklık ile değişimi [89]

Materyal	Enerji band gap (eV)	
	T=0 K	T=300 K
Si	1,17	1,11
Ge	0,74	0,66
GaAs	1,52	1,43
GaP	2,32	2,25
InP	1,42	1,27
InAs	0,43	0,36
InSb	0,23	0,17
GaSb	0,81	0,68
CdSe	1,84	1,74
CdTe	1,61	1,44
ZnO	3,44	3,20
ZnS	3,91	3,60

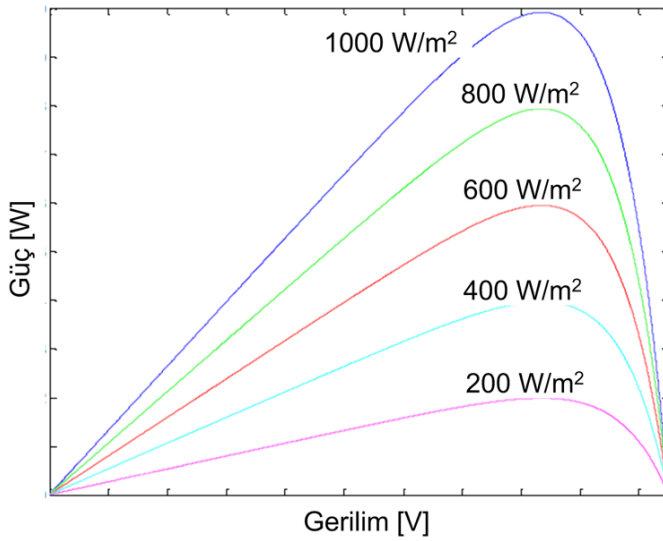
2.5.2. Işınım etkisi

Bir PV hücresinden elde edilecek güç, üzerine düşen ışık enerjisi (güneş radyasyonu) ile doğru orantılıdır. Yani ışık şiddetinin artmasına bağlı olarak güç de artmaktadır [90,91]. Bir hücrenin üretebileceği maksimum güce “tepe gücü” denilir. PV hücrelerin lineer olmayan I-V karakteristiğinden ötürü bir PV hücrenin her bir ışınım değerinde maksimum güç çıkışına sahip olduğu tek bir nokta vardır. Bu durum PV hücrenin güç-gerilim eğrisinin Şekil 2.25’ de gösterildiği gibidir. Maksimum güç noktası tek bir gerilim değerine tekabül etmektedir.



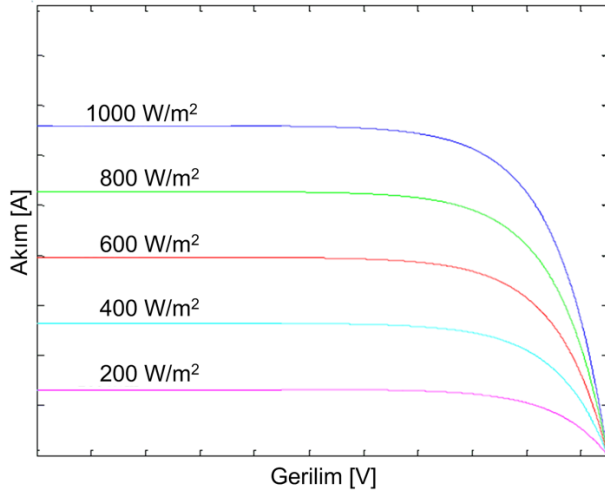
Şekil 2.25. PV hücrenin güç-gerilim eğrisi [91].

PV hücrelerin çıkış gücü güneş ışınımına göre büyük bir oranda değişmektedir.



Şekil 2.26. PV hücrenin güneş ışınımına bağlı güç-gerilim eğrisi [91].

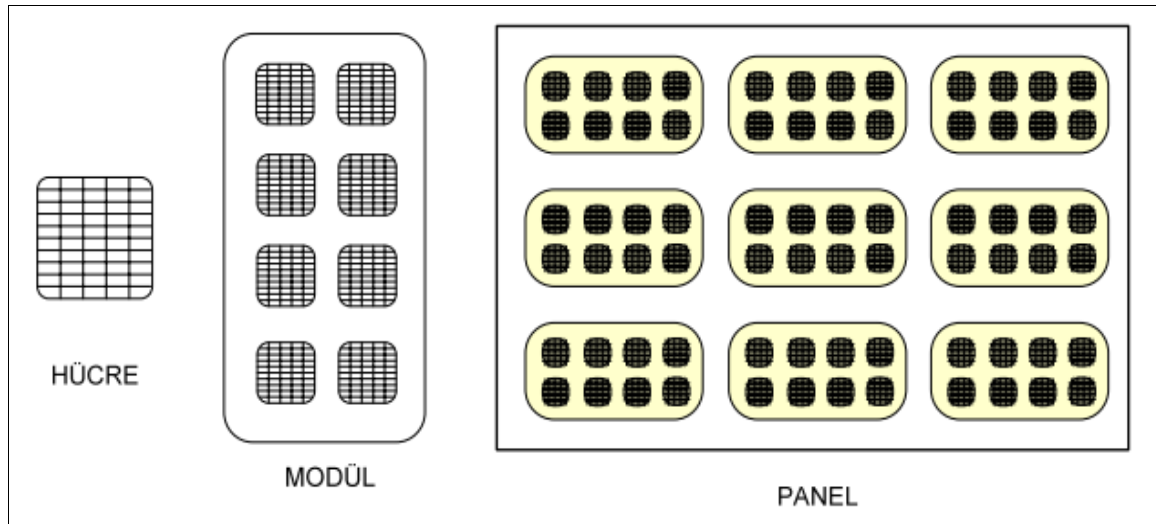
Aşağıdaki şekilde ise referans ortam sıcaklığı olarak kabul edilen 25 °C’de bir PV hücrenin I-V eğrisinin ışınımına bağlı olarak değişimini göstermektedir. Işınımdaki değişimlerin PV hücrenin akımını önemli oranda etkilediği, ancak gerilim üzerinde aynı oranda büyük bir etkisi olmadığı kolayca görülebilmektedir:



Şekil 2.27. PV hücrenin ışınımına bağlı I-V eğrisi [91].

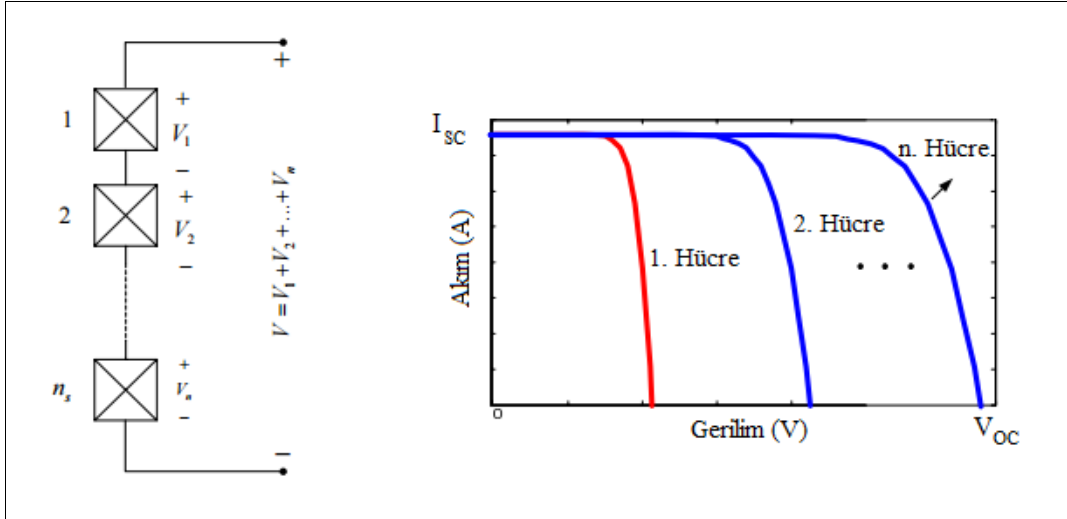
2.6. Güneş Hücre Sistemleri

Çıkış gücünü artırmak amacıyla çok sayıda güneş hücresi birbirine seri ya da paralel bağlanır. Bu yapıya güneş hücre modülü ya da PV modülü adı verilir. Modüllerin birbirine bağlanması sonucu paneller ve panellerin birleşmesiyle de panel dizisi (solar dizi) oluşur.



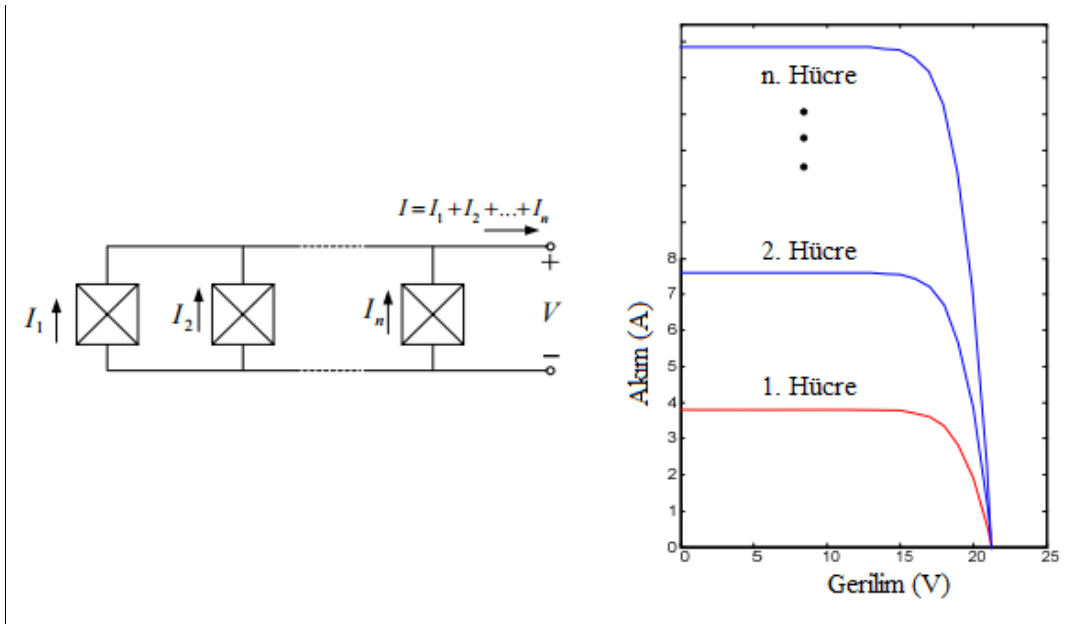
Şekil 2.28. Güneş hücresi, modül ve panel [41].

Uygulamanın farklılığına göre değişik kombinasyonda PV hücre, birbirlerine seri ya da paralel olarak gruplandırılabilir. Seri bağlı PV hücrelerde toplam gerilim, hücrelerin tek tek gerilimleri toplamına eşit olacaktır. Hücrelerin seri bağlanmasıyla modül gerilimi artar, istenilen gerilim seviyesi elde edilir [92].



Şekil 2.29. Seri bağlı PV hücrelerin I- V eğrisi [92].

Hücrelerin paralel bağlanmasıyla modülün sağlayacağı akımın miktarı ayarlanır. Şekil 2.31’de ise hücrelerin paralel bağlanması durumunda modülün akım değerinin tüm hücrelerin akımları toplamına eşit olacağı görülmektedir [93].



Şekil 2.30. Paralel bağlı PV hücrelerin I- V eğrisi [92].

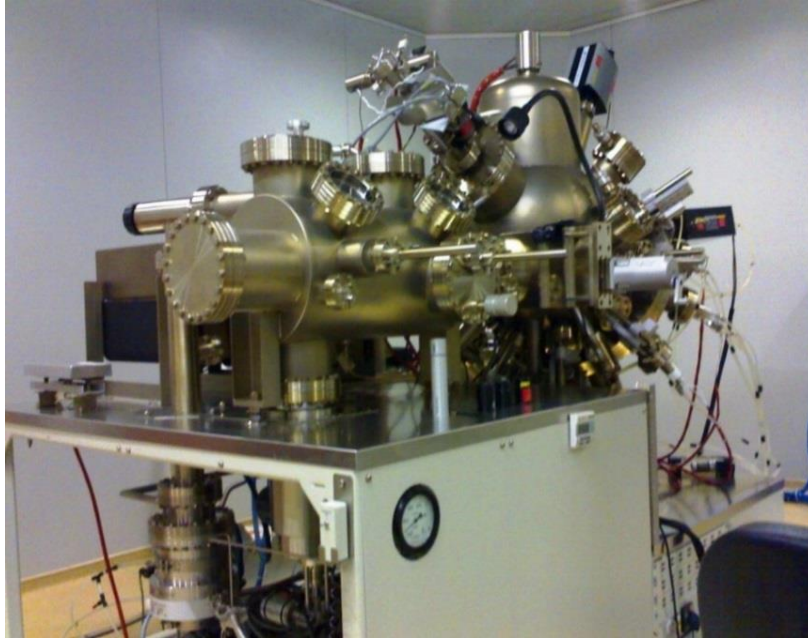
3. GÜNEŞ HÜCRE ÜRETİMİ VE FABRİKASYONU

3.1. Güneş Hücre Üretimi

III-V grubu yarıiletken bileşimler epitaksiyel olarak yüksek kalitede MOCVD ve MBE teknikleriyle büyütülebilmektedir.

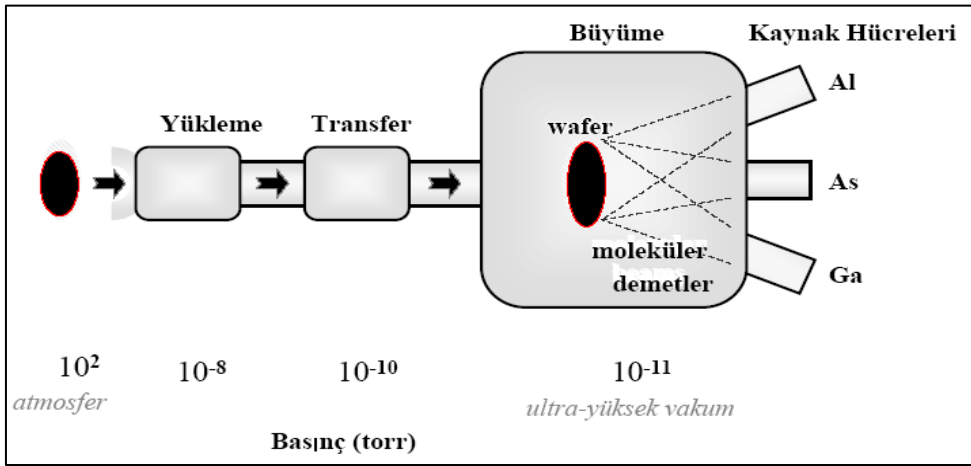
3.1.1. MBE sistemi

Tez kapsamında geliştirilen PV hücre yapıları, kristal büyütmede üstün kalitede yapıların ardışık tabakalar halinde büyütülmesine imkan veren MBE sistemi (Resim 3.1) ile büyütüldü. Bu teknik literatürde benzer yapıların büyütülmesinde kullanılmasına rağmen, her büyütme şartları ve ilgili deneyim farklı üstün özellikli örneklerin büyütülmesini sağlamaktadır. Gazi Fotonik'te ince film büyütme için kullandığımız MBE sistemi VG Semicon firması tarafından üretilen V80H-10 markalı cihazdır. V80H-10 MBE sistemi, bileşik yarıiletken malzemeleri geliştirmek ve küçük boyutlarda üretmek için tasarlanan bir sistemdir. Kompozisyon, katkı konsantrasyon profilleri ve mono tabaka hassaslığında tabaka kalınlığı kontrolüyle, yarıiletken malzemelerin büyütülmesine imkan veren bir epitaksi tekniğidir.



Resim 3.1. V80H model MBE sistemi (Gazi Fotonik).

MBE sistemi ultra yüksek vakum şartlarında elementlerin atomik ya da moleküler demetlerinin uygun yönelimde bir alttaş üzerine birikimi şeklinde kristal büyütme sürecidir. Moleküler demetler bir kaynaktan ısı etki ile üretilerek kazandıkları kinetik enerjileriyle alttaşa yönlendirilirler. Kusursuz kristal büyümesi için alttaş sıcaklığının ayarlanması önemlidir. MBE’de vakum vanaları ile birbirinden ayrılan üç ana oda vardır (Şekil 3.1). Bu üç oda pompalarla emilerek şekilde gösterilen basınç değerlerinde vakum altına alınır.



Şekil 3.1. MBE sisteminin şematik gösterimi

MBE'nin temel karakteristiği kütle transferidir. Ultra-yüksek vakum (UHV) ortamında kütle transferi için iki önemli parametre vardır:

1. Vakum ortamına giren gaz moleküllerinin ortalama serbest yolu,
2. Gaz moleküllerinin konsantrasyonu (birim hacimdeki molekül sayısı= n)

Ortalama serbest yol, moleküller arası ardışık çarpışmalar için ortalama mesafedir. L ile gösterilir. Gazların kinetik teorisi ile yukarıda bahsedilen iki parametre belirlenir. Gazların kinetik teorisinin kabul ettiği dört tane şart vardır:

1. Gaz molekülleri özdeş nokta yüklerden oluşur.
2. Moleküller arasında bir etkileşme kuvveti mevcut değildir.
3. Moleküllerin hız dağılımı Maxwell dağılımına uyar.
4. Gaz izotropiktir (hareket yönü belli bir doğrultuya yönlendirilmiştir).

MBE’de güçlü yönler;

- Mükemmel yüzey morfolojisi ve kalınlık kontrolü,
- Alaşım oranının hassas belirlenmesi,
- Çoklu tabaka büyütülebilmesi,
- III ve V grubu elementlerin (InGaNAs gibi seyreltik nitritler dahil) alaşımlarının kolay büyütülmesi,
- Zehirli gaz ortamının oluşmaması.

MBE’de zayıf yönler;

- Tabaka kalınlığı ve kompozisyon oranının tekrarlanabilirliği için sıklıkla kalibrasyon gerekliliği,
- Düşük büyütme oranı,
- Kaynak malzemelerinin yüklenebilmesi için sistemin vakuma açılması ve tekrar büyütme için geçen sürenin uzun oluşudur.

3.1.2. Kalibrasyon numunelerinin büyütülmesi ve optimizasyonu

Üç-eklemlili GaInP/GaAs/Ge güneş hücre yapılarının büyütülmesinden önce tabakaların katkı konsantrasyonları, kalınlıkları ve alaşım oranları hassas olarak belirlendi. Büyütme çalışmaları için Ge ve GaAs alttaşlar kullanıldı. Öncelikle üç eklemlili hücrenin birinci eklemeni oluşturan p–n eklem Ge hücresinin kalibrasyon çalışmaları yapıldı. Daha sonra p–n eklem Ge hücresi üzerine p–n eklem GaAs tabakaları büyütüldü. Üç eklemlili hücrenin en üst tabasını oluşturacak olan $Ga_x In_{1-x} P$ üçlü alaşımı GaAs alttaşlar üzerine büyütüldü ve kalibrasyon çalışmaları yapıldı.

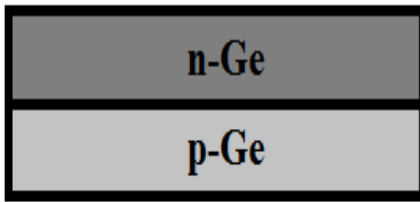
p-n eklem Ge güneş hücresinin oluşturulması

Germanyum (Ge) 1886 yılında Alman kimyacı C. Winkler tarafından keşfedilmiş ve Si gibi yaygın olarak kullanılan doğal yarıiletkenlerdendir. Ge, periyodik tablonun IV. sütununda bulunan dikkat çekici derecede elektriksel özelliklere sahip gümüş grisi renğinde metalik görünümlü bir elementtir. Ge elmas yapıdadır. Elmas kristal yapısında olan Ge’un oda sıcaklığındaki (300 K) bazı özellikleri Çizelge 3.1’de verildi.

Çizelge 3.1. Oda sıcaklığında Ge'a ait bazı fiziksel parametreler [94]

Özellik	Parametre
Kristal yapısı	Elmas
Simetri grubu	O_h^2 -Fd3m
cm ³ 'deki atom sayısı	$4,4 \cdot 10^{22}$
Yoğunluk (g/cm ⁻³)	5,3234
Dielektrik sabiti	16,2
Elektron ilgisi (eV)	4,0
Yasak enerji aralığı (eV)	0,661
Örgü sabiti (Å)	5,658

Ge p-n eklem yapısı literatürde çeşitli metotlarla yapılmaktadır. Epitaksiyel büyütme hazır (100) yönelimli ve düşük dirençli (<5 ohm-cm) p-tip Ge kristali MBE sistemi ile kristal büyütme hazır durumda manipulatör üzerine yerleştirildikten sonra ~600 °C'ye küçük artışlarla ısıtılır. Üzerine As₂ molekülleri kırma hücresi vasıtasıyla yönlendirilerek As zengin bir yüzey oluşturulur. As₂ buharı altında altta sıcaklığı 700-900 °C civarına çıkarılarak, As'ın Ge içerisine difüzyonu sağlanır. Difüzyon derinliği ve katkılanan As konsantrasyonu sıcaklık ve tavlama süresine bağlı olarak belirlenir. Böylece p-Ge üzerinde optimize edilmiş kalınlıkta n-tipi Ge tabakası oluşturularak Şekil 3.2'de verilen p-n eklem Ge hücresi büyütülmüş olur.



Şekil 3.2. Ge p-n eklemi

GaAs/Ge güneş hücresinin oluşturulması

Galyum Arsenik (GaAs), periyodik tablonun III. sütununda bulunan Ga ve V. sütununda bulunan As elementlerinin bileşiminden oluşan III-V grubu yarıiletken bileşiktir. GaAs

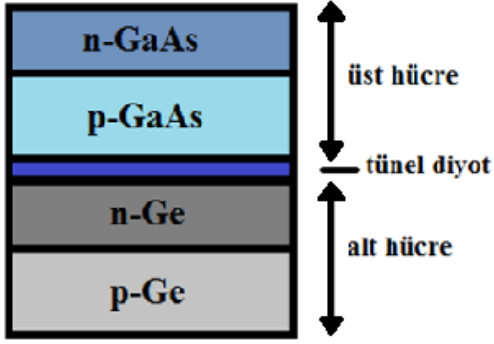
kristali çinko sülfür (zinc blende) yapıdadır. GaAs'ın oda sıcaklığındaki (300 K) bazı özellikleri Çizelge 3.2'de verildi.

Çizelge 3.2. Oda sıcaklığında GaAs'a ait bazı fiziksel parametreler [94]

Özellik	Parametre
Kristal yapısı	Çinko Sülfür
Simetri grubu	T_d^2-F43m
cm^3 'deki atom sayısı	$4,42 \cdot 10^{22}$
Yoğunluk (gcm^{-3})	5,32
Dielektrik sabiti (statik)	12,9
Elektron ilgisi (eV)	4,07
Yasak enerji aralığı(eV)	1,424
Örgü sabiti (Å)	5,651

As difüzyonu ile oluşturulmuş Ge güneş hücresi üzerine Ga elementer kaynağından elde edilecek Ga atomik demeti ile kırma hücreli As kaynağından elde edilecek As_2 moleküler demetlerinin uygun akıda yönlendirilmesiyle p ve n tipi GaAs katmanları Be ve Si katkı kaynakları kullanılarak büyütüldü. Büyütme sıcaklığı 530 °C de gerçekleştirildi.

Farklı atomların bileşiminden oluşan hetero-epitaksidede alttaş malzemesinin örgü sabiti ve kristal yapısı son derece önemlidir. GaAs'ın Ge üzerine büyümesi örgü sabitleri ve yapı uyumluluğuna bağlıdır. Kristal yapılarının benzerliği yukarıda ifade edilen bu iki malzemenin örgü sabitleri: polar olmayan Ge'un örgü sabiti 5,6578 Å, GaAs'ın ise 5,6507 Å dur ve aradaki fark 0,07 Å dur. Ge ve GaAs arasındaki örgü uyumsuzluğu çok küçüktür. Ge ve GaAs arasındaki örgü uyumsuzluğunun az olması, Ge üzerine düzgün olarak GaAs büyütülebildiğinin bir göstergesidir.



Şekil 3.3. GaAs/Ge iki eklemli güneş hücre yapısının şematik gösterimi

GaInP/GaAs güneş hücresinin oluşturulması

III–V grubu yarıiletken üçlü alaşım GaInP, periyodik tablonun III. sütununda bulunan Galyum (Ga), İndiyum (In) ve V. sütununda bulunan Fosfat (P) elementlerinin bileşiminden oluşur. Kristal yapısı GaAs’de olduğu gibi çinko sülfür yapıdadır.

GaInP üçlü alaşımı geniş bant aralığı sayesinde güneş spektrumunun görünür bölgesinin büyük bir kısmını soğurduğundan dolayı, yüksek verim güneş hücreleri için gerekli bir malzemedir. Buna ek olarak, GaAs (bant aralığı: 1,42 eV) ikili bileşik yapısı, güneş spektrumunun yakın kızılötesi kısmını soğurur. GaInP/GaAs yapısının Ga kompozisyon oranı yaklaşık %51 olduğunda, GaInP alaşımı örgü uyumlu olarak GaAs alttaş üzerinde büyür ve bu yapının bir çok teknolojik uygulama alanı vardır [95]. Böylece iki eklemli GaInP/GaAs SC yapısı, güneş spektrumunun büyük bir kısmını soğurur. $Ga_x In_{1-x} P$ ve $Ga_{0,51} In_{0,49} P$ 'ın oda sıcaklığındaki (300 K) bazı fiziksel parametreleri Çizelge 3.3’de verildi.

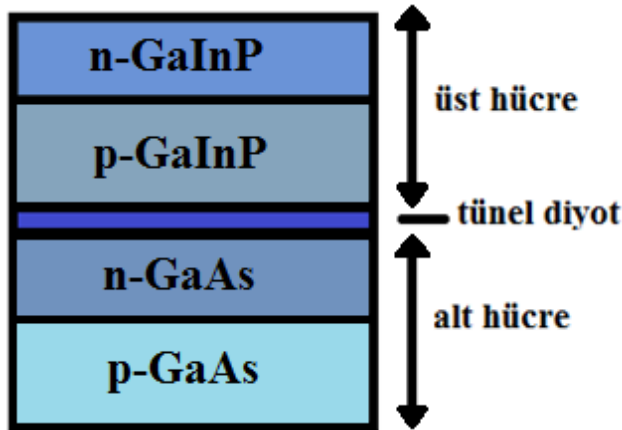
Tünel diyotlar çok eklemli güneş hücrelerinde, ardışık hücreleri birbirine bağlama rolüne sahip yüksek katkılı ve metalik özellik gösteren pn-eklem diyot yapılarıdır. Hücreler arasında akım iletimini sağlayan tünel diyotlar bir kaç nm kalınlıkları ile optik olarak şeffaf ve düşük direnç özelliklerinde olması gerekir. Bu yapılarda diyot engeli yeterince dar olacağından taşıyıcılar tünelleme yolu ile diğer hücreye akabilir; tünel etkisinde, elektron değerlik bandının üstüne ve iletim bandının altına geçişte ekstra enerjiye ihtiyaç duymaz. III-V grubu güneş hücrelerinde yoğun katkılı AlGaAs, GaInP, GaAs gibi tünel diyotlar kullanılmaktadır. Optik geçirgenliğin sağlanabilmesi için tünel diyonu oluşturan

malzemenin enerji bant aralığının, altındaki hücre malzemesininkinden büyük olması sağlanmalıdır.

Çizelge 3.3. Oda sıcaklığında $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ ve $\text{Ga}_{0,51}\text{In}_{0,49}\text{P}$ 'a ait bazı fiziksel parametreler [96]

Özellik	Parametre	
	$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$	$\text{Ga}_{0,51}\text{In}_{0,49}\text{P}$
Kristal yapısı	Çinko Sülfür	Çinko Sülfür
Simetri grubu	T_d^2-F43m	T_d^2-F43m
cm^3 'deki atom sayısı	$(3,96+0,98x) \cdot 10^{22}$	$4,46 \cdot 10^{22}$
Yoğunluk (g.cm^{-3})	4,81-0,67	4,47
Dielektrik sabiti (statik)	12,5-1,4	11,8
Dielektrik sabiti (yüksek frekans)	9,61-05	9,35
Elektron ilgisi (eV)	4,38-0,58	4,1
Örgü sabiti (Å)	$5,8687 \pm 0,0418$	5,653

$\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}/\text{GaAs}$ yapılarının MBE ile büyütülmesi sürecinde farklı Ga kompozisyon oranı elde edebilmek için toplam demete özgü basınç sabit tutulurken Ga/In oranı değiştirildi. Si ve Be sırasıyla n ve p tipi katkılama için kullanıldı. Yapının şematik diyagramı Şekil 3.4'de verildi.



Şekil 3.4. GaInP/GaAs iki eklemlili güneş hücre yapısının şematik gösterimi

Üç eklemli güneş hücrelerinin oluşturulması

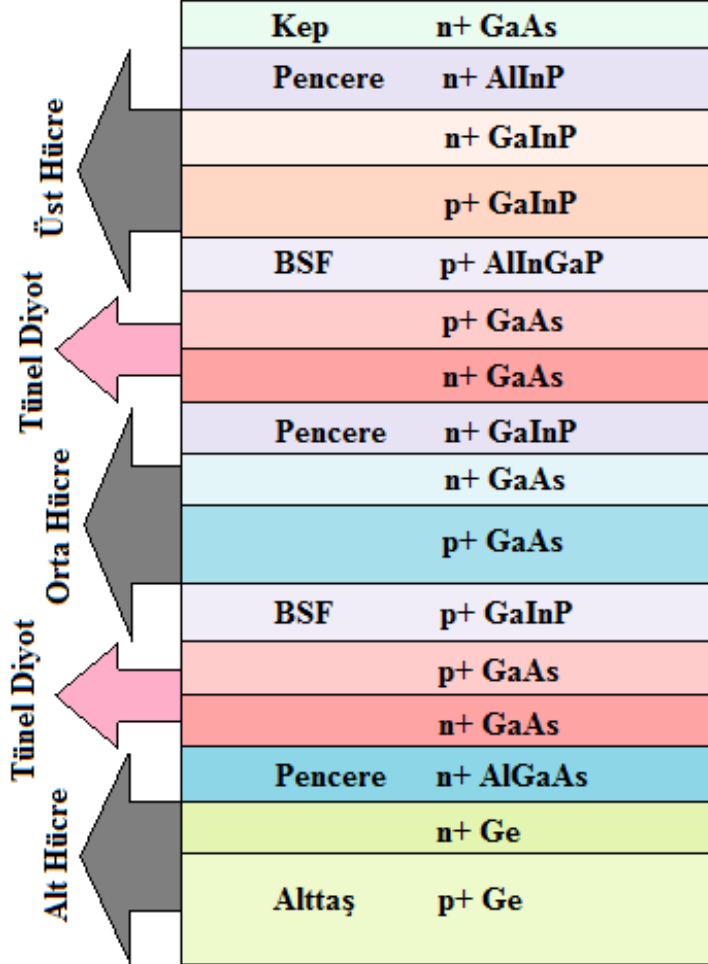
GaInP/GaAs/Ge üç eklemli yapıların tasarımı yapılarak akım uyumlu hücre yapısının aşağıdaki şekilde olacağı belirlendi. Yapılan tasarım parametrelerini kalibre etmek amacıyla MBE sistemi ile kalibrasyon numuneleri büyütülmüş ve karakterizasyonları yapılmıştır. Çizelge 3.4’de üç eklemli güneş hücre yapısının katman kalınlıkları ve taşıyıcı yoğunlukları verildi. Yapının en üst katmanı (n^{++} GaAs), AlGaAs (veya AlInP) pencere katman üzerine, hücre fabrikasyonunda iyi omiklik sağlamak amacı ile büyütüldü.

Çizelge 3.4. Üç eklemli güneş hücre yapısının katman kalınlıkları ve taşıyıcı yoğunlukları

	Katman	Kalınlık (nm)	Taşıyıcı yoğunluğu (cm^{-3})
Kep Tabaka	n^+ GaAs	460	5.10^{18}
Pencere Tabaka	n +AlInP	20	1.10^{19}
Üst Hücre	n - $\text{Ga}_{0,51}\text{In}_{0,49}\text{P}$	170	$1,8.10^{18}$
	p - $\text{Ga}_{0,51}\text{In}_{0,49}\text{P}$	800	1.10^{18}
BSF	p +AlInGaP	20	1.10^{19}
Tünel Diyot	p^{++} GaAs	15	3.10^{19}
	n^{++} GaAs	15	5.10^{19}
Pencere Tabaka	n +GaInP	20	1.10^{19}
Orta Hücre	n -GaAs	150	2.10^{18}
	p -GaAs	300	2.10^{16}
BSF	p + GaInP	20	1.10^{19}
Tünel Diyot	p^{++} GaAs	15	3.10^{19}
	n^{++} GaAs	15	5.10^{19}
Pencere Tabaka	n +AlGaAs	20	1.10^{19}
Alt Hücre	n -Ge	180	2.10^{17}
	p -Ge	alttaş	2.10^{17}

Hedef üç eklemli GaInP/GaAs/Ge hücre yapısının büyütülmesinde yapıdaki P alaşım oranının belirlenmesi dikkat edilmesi gereken en önemli durumdur. GaAs ile GaP arasındaki örgü uyumsuzluğu nedeniyle gerilmeli yapılar elde edilmektedir. Bu durum kademeli (graded) yapı büyütülmesi ile minimuma indirilebilmektedir. Büyütülen GaInP p-n eklem yapısında bant aralığı 1,7 eV veya 1,8 eV olacak şekilde P oranı ayarlandı. GaAs

ve GaInP p-n eklemlerinin (güneş hücrelerinin) MBE sisteminde büyüme oranları $1 \mu\text{m/sa}$ olarak yapıldı. Tez kapsamında geliştirilen üç-eklemli güneş hücre yapısının şematik çizimi Şekil 3.5’de verildi.



Şekil 3.5. GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücre yapısının şematik gösterimi

Farklı materyallerden oluşan tabakalar üst üste büyütüldüğünde birleşme merkezleri oluşur. Bunlar yüzey birleşmeleri olarak adlandırılır. Yüzey birleşmesi (rekombinasyon), yarıiletkenin yüzeyindeki boş bağlardan kaynaklanır. Örgünün bu istenmeyen süresizliği yüzey durumları olarak adlandırılan çok sayıda enerji durumları oluşturur. Bu boş bağlı atomlar aynı zamanda bir birleşme mekanizması gibi davranarak taşıyıcıları tuzaklar ve taşıyıcı ömrünü azaltır. Bu nedenle örgü-uyumlu tabakaların üst üste büyütülmesi gerekir.

Ge gibi tek atomlu ve InP gibi ikili yarıiletkenler, değiştirilemeyen örgü sabitine sahip olduklarından, doğrudan örgü uyumu sağlayamazlar. Öte yandan GaInP gibi üçlü ve AlGaInP gibi dördü alaşımlar, alaşım oranları değiştirilerek örgü uyumlu yapılabilir. Örgü

uyumsuz tabakaların üst üste büyütülmelerinin gerektiği durumlarda “pencereleme” metodu kullanılır. Bu metoda göre, istenmeyen yüzey birleşmelerini önlemek için bu tabakalar arasına çok ince bir alaşım tabaka büyütülür. Pencere tabaka, örgü farkını azaltan bir eğilim oluşturur. Pencere tabaka, altındaki hücreden daha büyük bant aralıklı bir alaşım olmalıdır. Ayrıca, kalınlığı fotonları yok etmemesi için çok ince olmalıdır.

Foto-uyarma meydana geldiğinde, azınlık taşıyıcıları hücre eklemine doğru hareket ederler. Bununla birlikte, bunların bazıları ters yönde (hücrenin arkasına doğru) hareket ederler. Bu ise taşıyıcı kaybı oluşturur. Bunu önlemek için, yüksek katkılı bir tabaka hücrenin altına büyütülür. Bu tabaka, oluşturduğu elektrostatik alanla, azınlık taşıyıcılarını hücre eklemine doğru iter. Genellikle alttaşın üzerinde oluşan bu alana arka yüzey alanı (BSF) denir. Hücre yapısının en üstüne yüksek katkılı GaAs kep tabaka büyütülür. Bu tabaka, akım toplayıcılarının (metal ızgaralar) omikliğine artırıcı role sahiptir. Ayrıca kep tabaka, metal kontaklar tel bağlamak için ısıtıldığında, alttaki tabakaların zarar görmesini de engeller.

3.2. Güneş Hücre Fabrikasyonu

İyi nitelikli kristal büyütmenin yanında, litografi ve metalizasyon süreçlerinde yapılabilecek iyileştirmeler hücre verimini önemli ölçüde etkilemektedir. Metalizasyon, hücre seri direnci üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

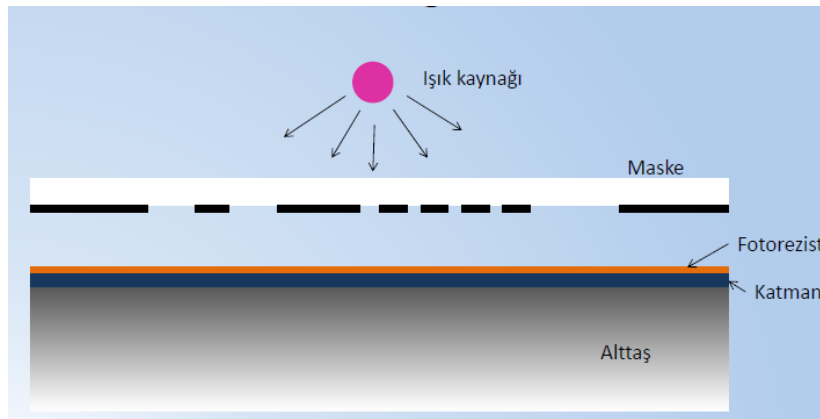
3.2.1. Fotolitografi

Yunanca bir kelime olan litografi ismi, “*Lithos* (Taş)” ve “*Grapho* (yazmak)” kelimelerinin birleşiminden oluşmaktadır. Litografi işlemi; tamamıyla pürüzsüz bir yüzeye bir taş ya da plaka yardımıyla desenin basılmasıdır. Litografi işleminde desenin yüzeye aktarılması işlemine “*pozlama*” denir. Pozlama işlemi için bir radyasyon kaynağı kullanılmaktadır [97]. Pozlanan bölgelerin aşındırılması ile fotolitografi sonucu elde edilen desenlerin kristal dilimine işlenmesi amaçlanmaktadır. Bu işleme sonucunda, maskede yer alan 2 boyutlu desenler 3 boyutlu hale dönüştürülür. Litografi çeşitleri pozlama sisteminde maske hizalama (mask aligner) kullanılan radyasyon kaynağına göre değişmektedir. Çizelge 3.5’de litografi çeşitleri ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.5. Litografi çeşitleri

Pozlama Metodu	Radyasyon kaynağı	Litografi Çeşiti
Işık	$\lambda=157-436$ nm	Fotolitografi
X-ışınları	$\lambda=0,4-5$ nm	X-ışını Litografi
Elektronlar	$E=10-100$ keV	Elektron demet litografi
İyonlar	$E=50-200$ keV	İyon demet litografi

Fotolitografi bir maske üzerindeki desenlerin, fotodirenç (PR) adı verilen özel dalga boylarındaki ışığa (enerji) duyarlı, polimer madde aracılığıyla, kristal dilimi üzerine basılması işlemidir. Burada foto-maskedeki (maske) geometrik desenin, alttaş yüzeyindeki ışığa duyarlı polimerik tabaka PR üzerine aktarılması için morötesi (UV) ışık kullanılmaktadır [97]. Şekil 3.6’da fotolitografi işlemi verilmiştir.



Şekil 3.6. Fotolitografi işlemi [97].

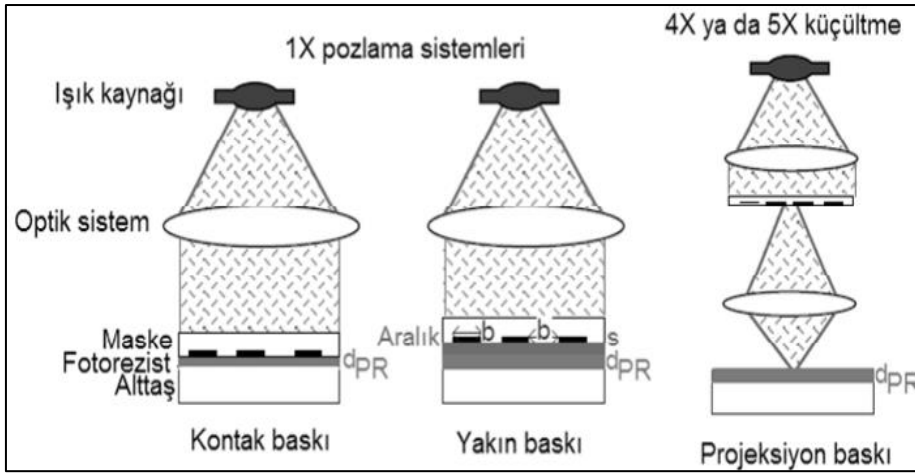
Fotolitografi işlemlerinde kullanılan pozlama sistemleri maske-alttaş mesafesine göre üç grupta incelenebilir;

- **Kontak baskı:** Maske alttaşa direk temas ediyorsa yani maske ile attaş arasında herhangi bir açıklık (s) yoksa bu tipteki pozlama sistemleri “kontak baskı” olarak adlandırılır.
- **Yakın baskı:** Maske ile alttaş arasında belirli bir açıklık ($3 \mu\text{m} < s < 50 \mu\text{m}$) varsa, bu tipteki pozlama sistemleri maskedeki desenin birebir (x1) basılmasıyla oluşur ve bu tipteki pozlama sistemleri “yakın baskı” olarak adlandırılır.
- **Projeksiyon baskı:** Maskedeki desenin belirli oranda küçültülerek (x4 ya da x5) alttaş yüzeyine aktarılmasına ise “projeksiyon baskı” olarak adlandırılır [97].

Şekil 3.7’de pozlama sistemleri verilmiştir. Kontak ve yakın baskı sistemleri kullanılarak elde edilen desen için çözünürlük (minimum desen boyutu) Eş. 3.1’den elde edilir.

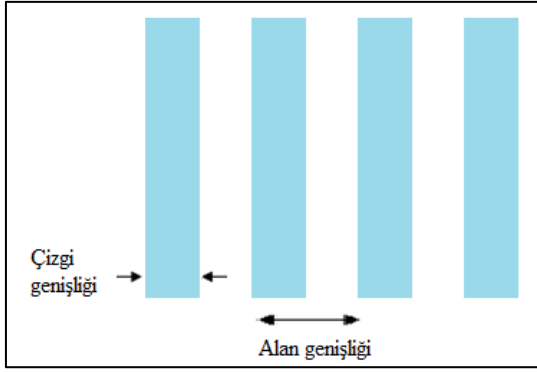
$$b_{min} = \frac{3}{2} \sqrt{\lambda \left(s + \frac{d_{PR}}{2} \right)} \quad (3.1)$$

Burada b_{min} minimum desen boyutu, λ pozlama sisteminin dalgaboyu, s maske-alttaş mesafesi ve d_{PR} PR tabakasının kalınlığıdır.



Şekil 3.7. Pozlama sistemleri

Kontak baskı sistemlerinin ve litografi metotlarının seçiminde en önemli etken istenilen desenin küçüklüğü ya da çözünürlüğüdür. Bu tür pozlama işlemlerinde iki tip çözünürlükten bahsedilebilir. Birinci tip çözünürlük desenin çizgi genişliğidir. Üretilecek aygıtın boyutlarını ve çalışma hızını etkileyen parametredir. İkinci tip çözünürlük ise çizgi genişliği ile iki çizgi arasındaki uzaklığın toplamı olan alan genişliğidir. Üretilen cihazların hangi sıklıkta paketlenileceğini gösterir. Şekil 3.8’de çizgi ve alan genişliği gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Çizgi ve alan genişliği

Çözünürlük (minimum çizgi genişliği) ve odak derinliği kavramlarını açıklamak için Eş.3.2 kullanılır:

$$\text{Çözünürlük} \approx \frac{k_1 \lambda}{NA} \quad (3.2)$$

$$\text{Odak derinliği} \approx \frac{k_2 \lambda}{NA^2} \quad (3.3)$$

Burada λ pozlama sisteminin dalga boyunu karşılık gelmektedir. k_1 ve k_2 prosese ve cihazlara bağlı optik sabitlerdir. k_1 ve k_2 değeri 0,4-1,0 aralığında değişmektedir. Pozlama sisteminde yer alan optik lensin diyafram açıklığı (lens açısı) NA ile gösterilir. Değeri 0,35-1,3 aralığında değişmektedir. NA arttıkça odak derinliği düşmektedir. Odak derinliği düştükçe odakta olabilecek mesafe azalır. Bu mesafe PR kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü ile yakın boyutlara ulaşıncaya kadar başarısız olur. Ayrıca, Eş. 3.2'den rahatlıkla görüldüğü gibi minimum aygıt boyutuna ulaşılabilmesi için pozlama sisteminde kullanılan ışık kaynağının dalga boyunun küçültülmesi gerekmektedir.

3.2.2. Temel fotolitografi işlemleri

Alttaşın fabrikasyona hazırlanma işleminden fabrikasyon işlemlerinin bitmesine kadar olan fabrikasyon adımlarını kapsamaktadır. Bu işlemler;

- Numune temizliği,
- Alttaş yüzeyine PR kaplanması,

- Foto maskedeki desenin pozlama sistemi yardımıyla PR yüzeyine (alttaş yüzeyine) transfer edilmesi,
- Desenin geliştirilmesi,
- Desenin aşındırma sistemi yardımıyla ortaya çıkartılması,
- Omik kontakların yapılması olarak sıralanabilir.

Numune temizliği

Temizleme işlemi; metal kontakların kalitesi, yarıiletken yüzeyine doğru olarak kaplanması, sonradan ortaya çıkabilecek safsızlıkların engellenmesi açısından önemlidir. Ayrıca, yüzeydeki yağların ve organiklerin temizlenmesi amaçlanmaktadır. Temiz olan yüzeylere PR daha iyi yapışmakta ve yüksek kalitede litografi gerçekleşmektedir. Bu nedenle numune yüzeyi oksit ve yüzey kirliliklerinden temizlenmesi için;

- Asidik solüsyonla (DI-H₂O + HF) aşındırma,
- Ultrasonik banyo içerisinde sırasıyla aseton ve metanol kullanılarak yıkama,
- Deiyonize su (DI-H₂O) yardımıyla durulama,
- Kuru azot ile kurulama

işlemleri uygulanır.

PR'ın yüzeye kaplanması

PR ışığa duyarlı olan polimerik bir malzemedir. Süreç esnasında koruyucu maske olarak kullanılırlar. Kolayca kaldırılabilirler ve yapısı üç grupta incelenebilir [97-99]:

- Polimer (pozlama işlemi ile yapısını değiştirir),
- Fotoaktif bileşen (kimyasal reaksiyonu kontrol eder),
- Uçucu çözücü (viskoziteyi kontrol eder).

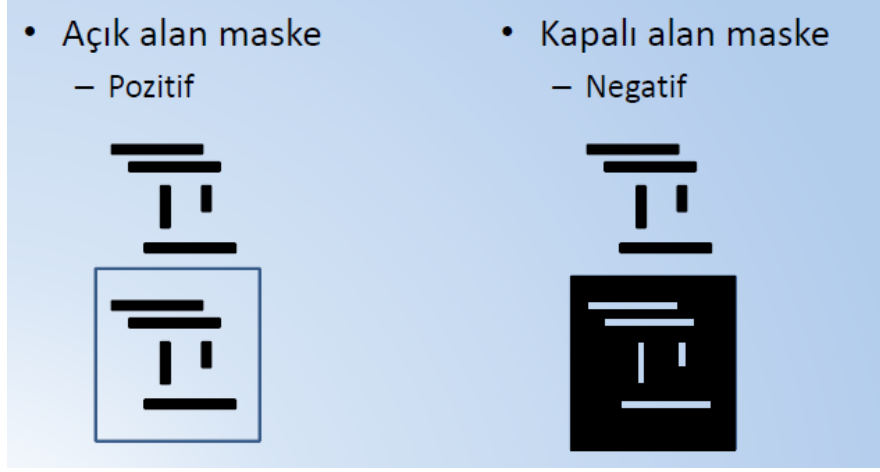
PR'nin özellikleri;

- İyon ekimi

- Yüksek enerjili B, P, As, Sb iyonlarını durdurabilmek,
 - İyon demetinin akımı PR'ı ısıtır. Çok ısınma durumunda akım limitleme ya da soğutma,
 - PR çok ağır ekim dozajı kullanıldığında kömürleşebilir bu durumda kaldırılması çok zordur.
- Islak aşındırma (kimyasal aşındırma)
 - Yüzeyden kalkmasını önlemek için iyi yapışması gerek,
 - Kimyasallara karşı dirençli olmalı.
 - Plazma ile aşındırma
 - Fiziksel ve ısı (termal) yönden dayanıklı olmalı. Plazmada oluşan iyon bombardımanı yüzünden PR fiziksel olarak aşınır. Ayrıca PR aşırı ısınabilir,
 - İyon bombardımanı yüzünden PR sertleşebilir ve kaldırması zorlaşabilir.
 - Elektroliz
 - Kimyasal dayanıklılık,
 - İyi yapışkanlık,
 - Pürüzsüz duvar yüzeyi,
 - Pozitif duvar profili.
 - Mekanik (fiziksel) sağlamlık
 - Isıl (termal) dayanıklılık
 - Kimyasal dayanıklılık
 - İyi yapışkanlık
 - Pürüzsüz duvarlar
 - İyi çözünürlük

PR'lar pozitif ve negatif iki çeşit tipi vardır. Elde edilen çözünürlüğün negatif PR kullanımında, pozitif PR kullanımına göre daha kötü olması ve içerdiği çözücünün organik bazlı (zehirli) olması gibi dezavantajları nedeniyle, sıklıkla pozitif PR kullanılır. PR'lar arasındaki uygulama farkı ise şu şekilde açıklanabilir: pozitif PR'larda UV ışık gören kısımlar kimyasal yapısını değiştirir. Kimyasal yapısı değişen PR, PR'lar için üretilmiş geliştirici solüsyon içerisinde çözünür. Bu sayede ışık gören kısımlar alttaş yüzeyinden kaldırılmış olur ve geriye sadece ışık görmeyen kısımlar kalır. Yani pozitifte oluşan motif,

maskenin aynısıdır. Negatif PR'larda ise durum tam tersidir [98]. Her iki tipteki PR için desenin geliştirilmesini açıklayan şematik diyagram Şekil 3.9'da verildi.

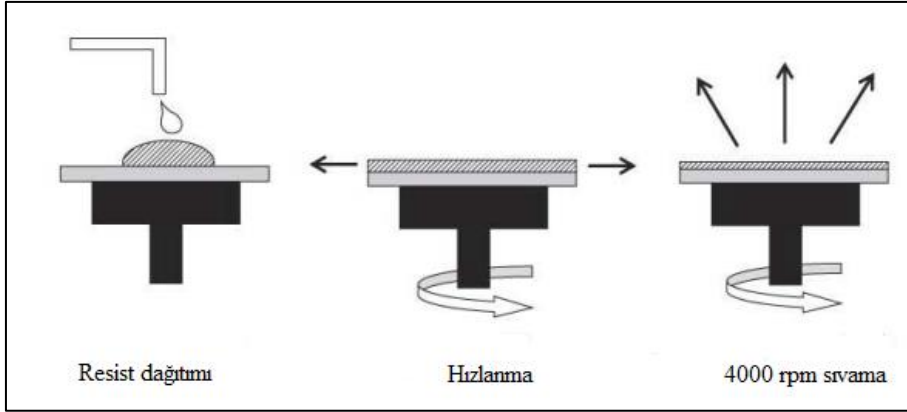


Şekil 3.9. Pozitif ve negatif PR için desenin geliştirilmesi

Pozitif ve negatif PR'ların seçiminde PR'ların farklı viskoziteye ve soğurma dalga boyuna sahip olmasından dolayı fabrikasyonu yapılacak olan aygıt tipi ve kullanılacak olan pozlama sistemi büyük önem taşımaktadır. Fabrikasyon işlemlerinde aşındırılması istenmeyen kısımların korunması için maske görevi de gören PR'ların aşındırma işleminden etkilenerek yüzeyden tamamen aşındırılmaması için uygun kalınlığa sahip olan PR'lar kullanılmalıdır. Bu yüzden PR seçiminde, tabaka kalınlığıyla doğrudan ilişkili olan viskozite parametresi göz önünde bulundurulmalıdır.

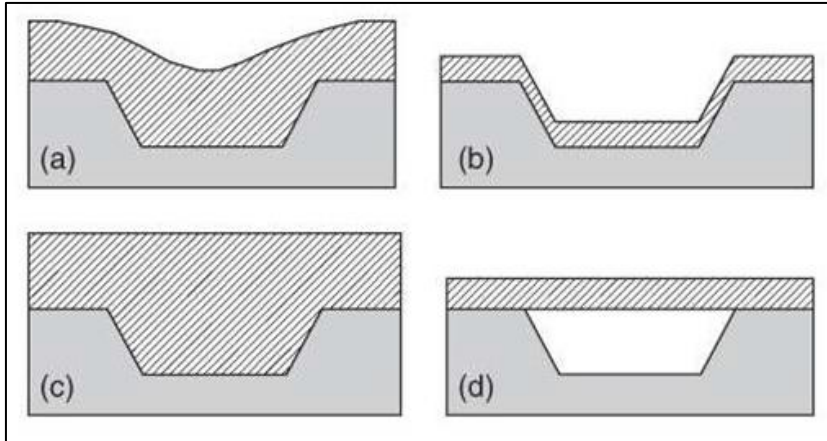
PR'ın yüzeye kaplanması için çeşitli yöntemler vardır. Bunlar;

- Döndürerek kaplama
- Akışkanlık ve döndürme hızı kalınlığı belirler,
- Düzgün dairesel yüzeyler için daha uygundur,
- Yüzey geriliminden dolayı oluşan kenarlıklar kaldırılır.



Şekil 3.10. Döner kaplama süreci

- Püskürterek (sprey) kaplama
 - Pürüzlü olan yüzeyler için uygundur.
- Elektroliz ile kaplama
 - Pürüzlü olan için daha uygundur,
 - İletken bir alt katmana ihtiyaç duyar.
- Rulo üzerinden sererek kaplama

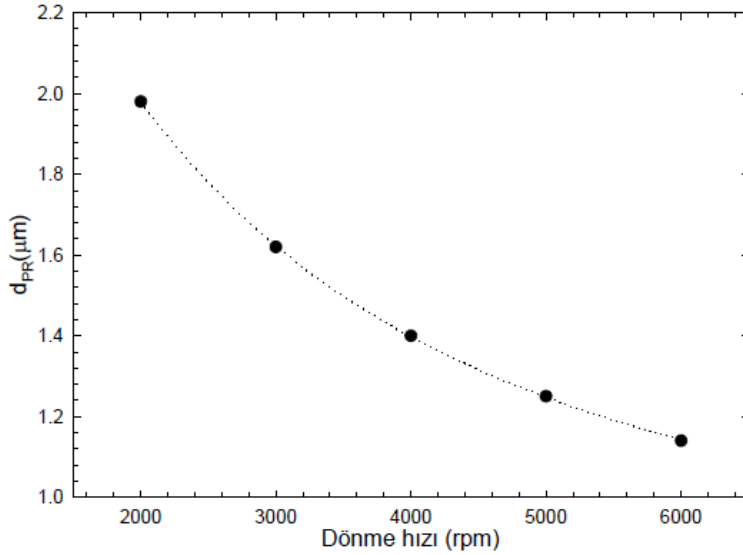


Şekil 3.11. Alttaş üzerine PR'nin; (a) döner kaplama, (b) püskürterek kaplama, (c) döküm ve (d) rulo üzerinden sererek kaplanması

PR'nin yüzeye kaplanması için döner kaplama sistemi kullanılmaktadır. Döner kaplama sisteminin dönme hızına bağlı olarak PR tabakasının kalınlığı Eş. 3.4'den elde edilir [100].

$$d_{PR} = \frac{\text{sabit}}{\sqrt{\text{dönme hızı}}} \quad (3.4)$$

Şekil 3.12’de örnek olarak Clairant AZ5214E nolu PR için dönme hızına bağlı olarak, kaplanan PR tabakasının kalınlığı verilmektedir [101]. Şekilden de rahatlıkla görüldüğü gibi, dönme hızı arttıkça PR tabaka kalınlığı üstel olarak azalmaktadır. Kontak pozlama sistemlerinde, sistemler değiştikçe kullanılan dalga boyları da değişmektedir. Örneğin, üniversitelerde araştırma amaçlı kullanımlarda sıklıkla tercih edilen Karl Suss firmasına ait kontak pozlama sistemlerinde MJB3 modelinde 363 nm dalga boylu UV kaynak yer alırken, MJB4 modelinde 405 nm dalga boylu kaynak yer almaktadır. Pozlama sistemlerinde yer alan kaynak dalga boyları farkından dolayı, kullanılacak PR’lar da sisteme uygun olarak seçilmelidir. Örneğin sıklıkla kullanılan Clairant AZ5214E nolu PR için soğurma aralığı 310-420 nm’dir.



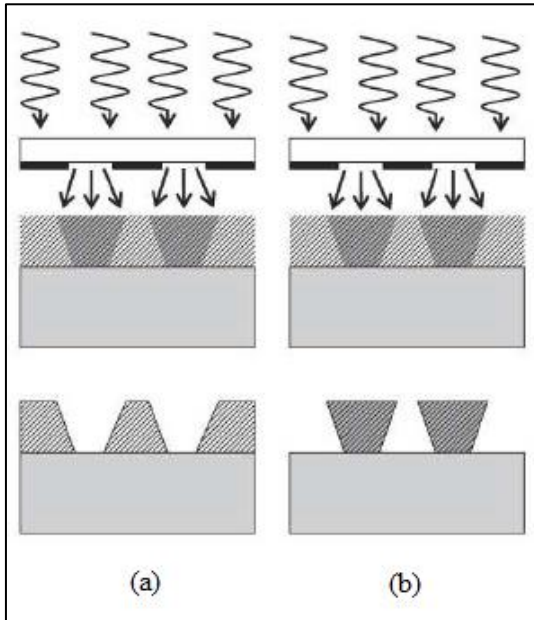
Şekil 3.12. PR tabaka kalınlığının dönme hızına bağlı değişimi [101].

Yumuşak ısıtma

Yumuşak ısıtma işlemi PR’ın yüzeye kaplanma işleminden sonra gerçekleştirilir. Bu işlemden sonra pozlama işlemi yapılacağı için “ön ısıtma” olarak da adlandırılır. Bu işlemin amacı PR içerisinde yer alan çözücü kısmın buharlaştırılmasıdır. Bilindiği üzere çözücü kısım, PR’ın çözücü solüsyon içindeki çözünme hızını etkilemektedir [97]. PR kaplı numunenin ısıtılması için fırın ya da ısıtma tablası kullanılır. Fakat ısıtma tablasındaki işlemde buharlaşma alt yüzeyden üst yüzeye doğru olduğu için daha çok tercih edilir. Fırın kullanımında sıcaklık genellikle 110 °C ve süre ise 30 dk’dır. Isıtma tablasında ise aynı sıcaklıkta 1-2 dk’lık bir ısıtma yeterli olmaktadır [100].

Pozlama

Alttaş üzerine PR'ın (pozitif veya negatif) kaplanması ve yumuşak ısıtma işlemlerinin tamamlanmasından sonra pozlama işlemine geçilir. Bu işlemde foto-maske üzerindeki desen, maske hizalama sistemi (pozlama sistemi) kullanılarak PR üzerine transfer edilir. Desen transfer işleminin şematik diyagramı Şekil 3.6'da verilmiştir. Pozlama işleminde en önemli parametreler pozlama sisteminin kaynak enerjisi ve pozlama süresidir. Pozlama zamanı ayarlanarak optimum enerji seviyesi elde edilir. Aşırı pozlama motiflerin genişlemesine ve bozulmasına sebep olur (Şekil 3.13). PR'ın pozlama sistemine göre seçilmesine karşın, pozlama süresi PR türüne göre değişiklik göstermektedir.



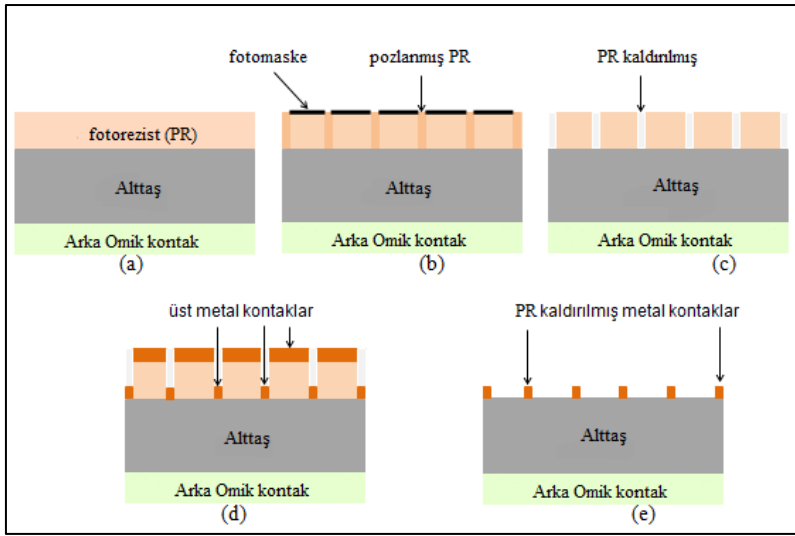
Şekil 3.13. (a) Pozitif ve (b) negatif motiflerin genişlemesi

Desenin geliştirilmesi

Pozlama işleminin tamamlanmasından sonra PR ile kaplı olan numune PR çözücü solüsyon (desen geliştirici) ile banyo edilir. Örneğin AZ5214E PR için AZ400K ile de-iyonize su 1:4 oranında karıştırılarak kullanılır. Bu işlem sonucunda PR'ın çeşidine göre UV ışık gören/görmeyen PR kısımlar numune yüzeyinden kaldırılır ve böylece maskedeki desen numune yüzeyine aktarılmış olur (Şekil 3.9).

PR'ın kaldırılması

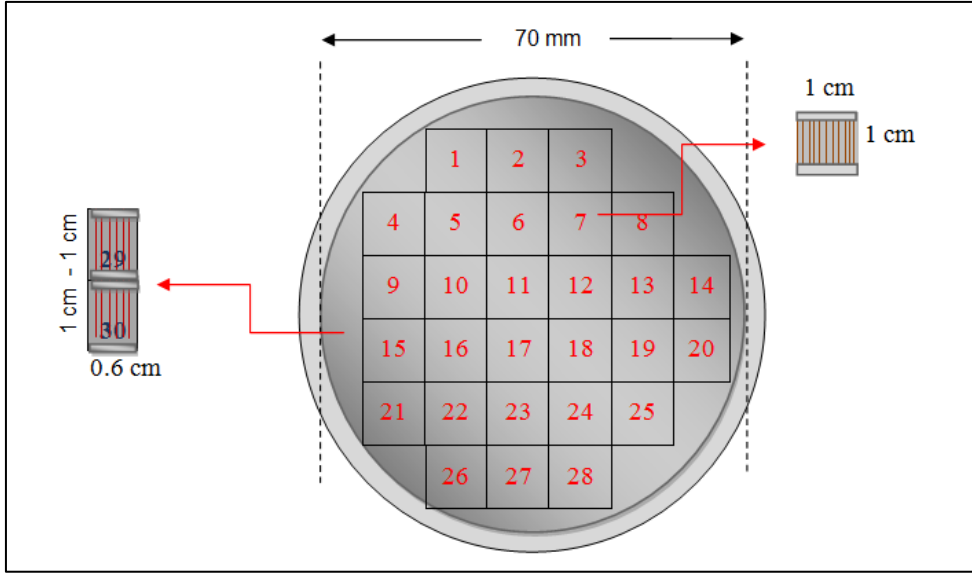
PR'ın kaldırılma işlemi genellikle istenilen metalizasyon deseninin elde edilmesi için kullanılır (Şekil 3.14). Desenin geliştirilmesinden sonra yüzey metal ile kaplanır. Metalizasyon işleminden sonra malzeme yüzeyinde yer alan PR aseton ile ya da PR kaldırma solüsyonu ile aşındırılarak istenmeyen metal kısımların kaldırılması sağlanır. Bu işlem adımları sonucunda hücre yüzeyi metalizasyon süreci tamamlanmış olur.



Şekil 3.14. Güneş hücre fabrikasyon süreci (a) PR kaplama, (b) maskeleme ve pozlandırma, (c) PR aşındırma-uzaklaştırma, (d) yüzeye metal kaplama- metalizasyon ve (e) PR uzaklaştırma

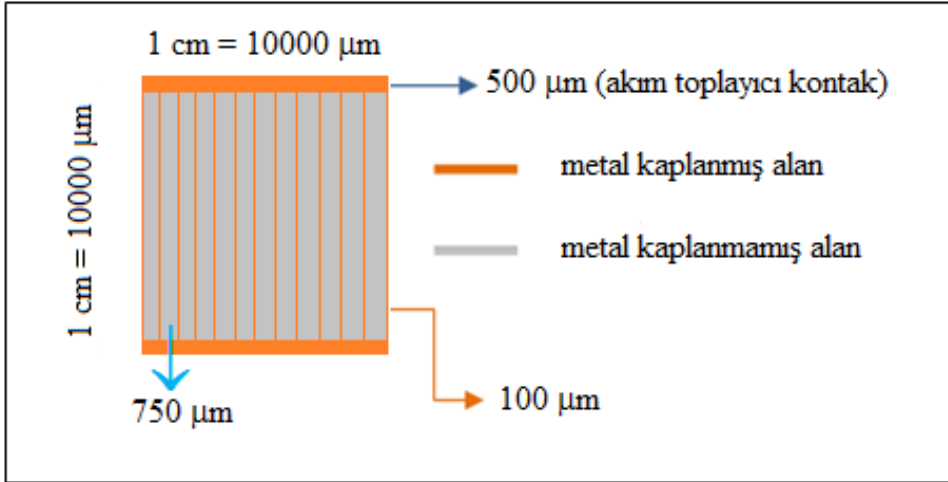
3.2.3. GaInP/GaAs/Ge üç eklemli güneş hücre fabrikasyonu

Bu bölümde MBE sistemi kullanılarak büyütülen GaInP/GaAs/Ge üç eklemli güneş hücre yapısının (Şekil 3.5) litografi ve metalizasyon işlemleri ile ilgili yapılan çalışmalar sunuldu. Fabrikasyonu tamamlanan 3'' lik bir yapıdan Şekil 3.15'de görüldüğü gibi 28 adet 1 cm² alanlı hücre ve 2 adet 0,6 cm² alanlı hücre olmak üzere toplam ~29 cm² hücre alanı elde edildi.



Şekil 3.15. Çapı 3'' (76mm) olan üç eklemlili güneş hücresi yapısından üretilecek 1cm² alanlı hücreler

Şekil 3.15'in yan tarafında grid ve kontak maske şematığı görülmektedir. Toplam hücre alanı 29 cm². Ön yüzey metalizasyonu için, Şekil 3.16'da görülen, amacı oluşacak fotoelektronları (fotoakımları) taşımak olan; 100 µm kalınlıklı ince ızgaralar ve bu ince ızgaralara paralel 500 µm kalınlıklı toplayıcı ızgaralar oluşturulmak için maske tasarlandı.

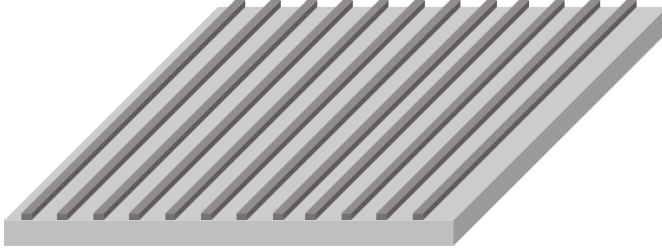


Şekil 3.16. Ön yüzey metalizasyon şematığı

Yapılan çalışmalar değerlendirildi ve iyi kalitede PV hücre fabrikasyonu oluşturabilmek için kullanılan metal maskelerin litografi aşamasında ve buna bağlı olarak metalizasyon süreçlerinde olumsuzluklar oluşturduğu anlaşıldı. Bu maskeler yerine cam üzerine krom kaplı ince filmlerin lazerle işlenmesi tekniği ile yeni maskeler oluşturuldu.

Hücre fabrikasyonu

Güneş hücre fabrikasyonları litografik teknikle maskelemek, aşındırmak ve buharlaştırma sistemi ile metalizasyon süreçleriyle gerçekleştirildi. $1 \times 1 \text{ cm}^2$ boyutlarında kesilen hücreler önce %2'lik HF çözeltisinde bir dakika bekletildi ve üzerindeki oksit tabakası kaldırıldı. Daha sonra aseton-alkol ile temizlendi ve kuru azot ile kurutuldu. Bu işlemlerden sonra, dört adımdan oluşan litografi aşamalarına geçildi. Birinci litografi basamağı, mesa litografi adımıdır. Bu adımda amaç, Şekil 3.17'de görülen mesa yapılarının numunelerin ön yüzeyinde oluşturulmasıdır.



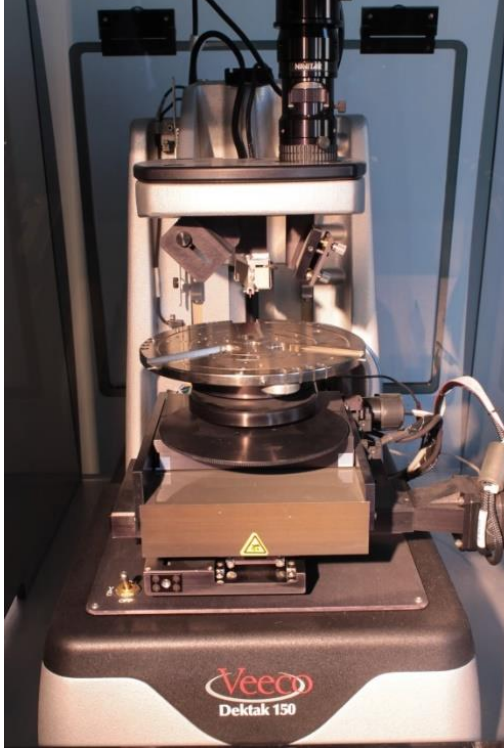
Şekil 3.17. Oluşturulan mesa yapılar

Numunelerin yüzeyine Resim 3.2'de gösterilen dönel-kaplama (Spin Coater) cihazı ile AZ5214E PR 4000 rpm'de 40 saniye döndürülerek yüzeye homojen bir şekilde kaplandı.

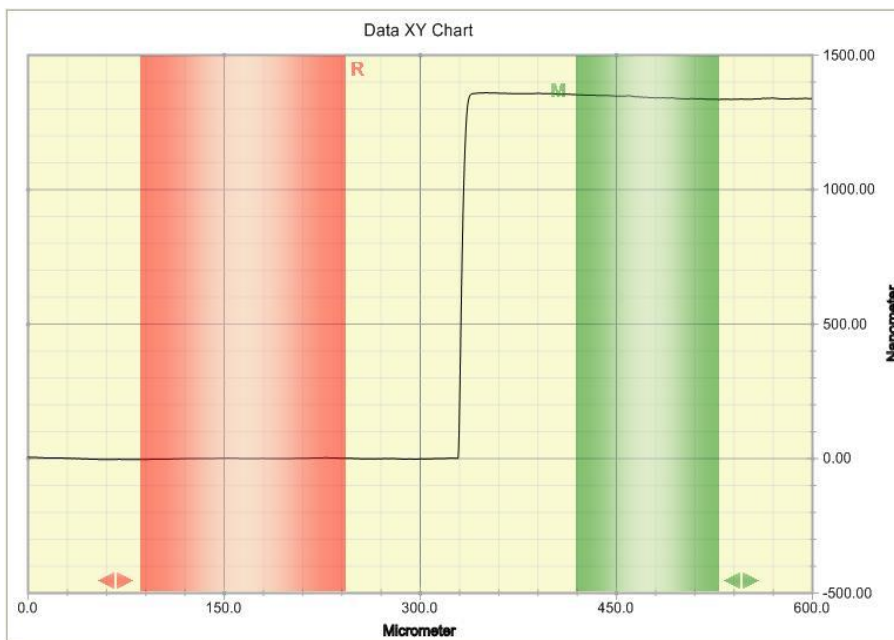


Resim 3.2. Dönel kaplama cihazı (Gazi Fotonik)

PR kaplama işlemi ardından numuneler ısıtıcı tabla (hot-plate) ile 110 °C'de 55 saniye tavlandı. Numunelerden biri PR kalınlığının belirlenmesi için Resim 3.3'de gösterilen yüzey profilometresi (Veeco Dektak 150) ile analiz edildi. PR kalınlığı yaklaşık 1340 nm olarak ölçüldü (Şekil 3.18).



Resim 3.3. Yüzey Profilometresi cihazı (Gazi Fotonik)

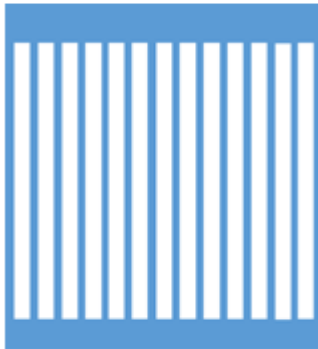


Şekil 3.18. PR kalınlık grafiği

PR kaplanmış numunelere, UV pozlama işlemi gerçekleştirildi. Pozlama, PR kaplı numuneyi belli dalga boyundaki UV ışığa maruz bırakma işlemidir. AZ-5214E PR, 360 nm dalga boyundaki ışığı soğurmaktadır. 365 nm'den yüksek enerjili Hg-Arc lambaya sahip, Resim 3.4'de ki Karl-Suss marka, Süss Microtech MJB4 model maske hizalama sistemi ile Şekil 3.19'daki fotomaske 20 saniye süreyle uygulandı.



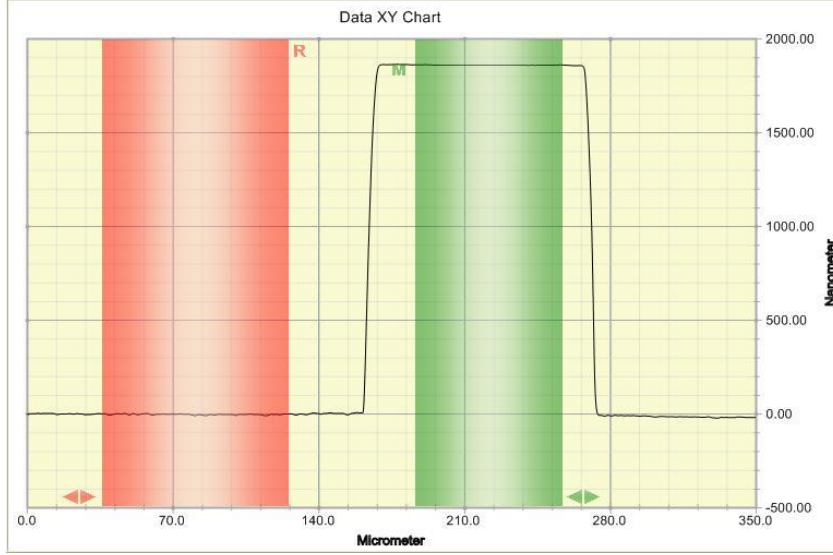
Resim 3.4. SUSS Micro Tech-MJB4 model maske hizalama sistemi (Gazi Fotonik)



Şekil 3.19. Mesa litografi adımı foto-maskesi

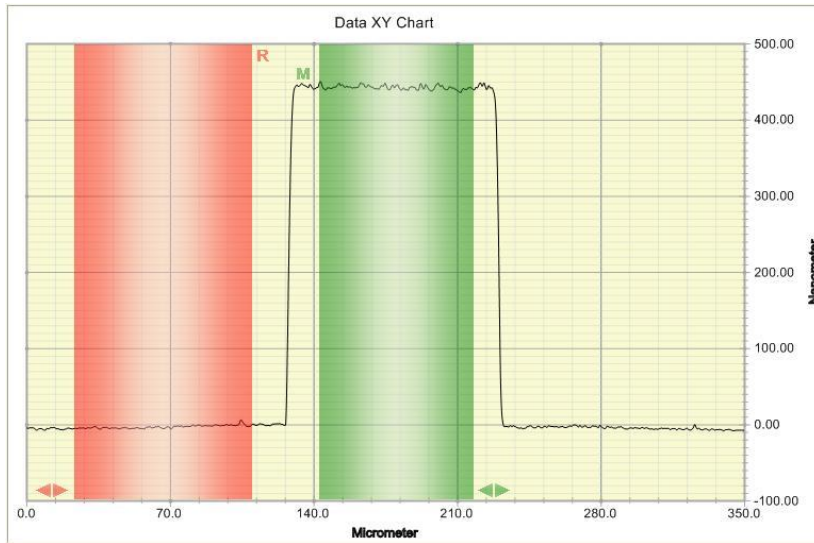
Pozlama işlemi ile UV ışığa maruz bırakılan bölgelerin kaldırılma işlemi için AZ400K çözücüsü kullanıldı. AZ400K ile de-iyonize su 1:4 oranında karıştırılarak uygun çözelti hazırlandı ve numune bu çözelti içinde 27 s beklendi. Ardından numune hemen DI-H₂O'da durulandı ve kuru azot ile kurutuldu.

Birinci litografi aşamasının ardından mesa yapılarının oluşturulması amacıyla, numunelerin yüzeyine sitrik asit çözeltisi ile ıslak aşındırma işlemi uygulandı. Oluşturulan yapının derinliği (aşındırma ve PR kaplama) yaklaşık 1800 nm olarak belirlendi ve profili Şekil 3.20’de verildi.



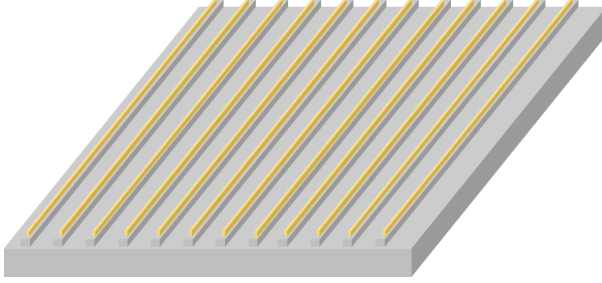
Şekil 3.20. PR kaplama ve aşındırmayı içeren toplam derinlik grafiği

Numuneler asetonda 3 saat bekletilerek yüzeylerindeki PR’ın temizlenmesi sağlandı. Numunelerin aşındırma derinliklerinin kesinleştirilmesi amacıyla tekrar profil analizi yapıldı. Şekil 3.21’de de görüldüğü üzere yaklaşık 460 nm’lik aşındırma derinliği elde edildi.



Şekil 3.21. Aşındırma derinliği grafiği

Aşındırma işleminin ardından ikinci litografi aşamasında numunelerin ön yüzeyine Şekil 3.22’de görülen ince ızgaralar oluşturuldu.



Şekil 3.22. Şematize edilmiş ince ızgara yapıları

Şekil 3.23’de görülen foto-maske kullanılarak ince ızgara metal kaplama alanları açıldı. Bu maske ile ince ızgaraların metal genişliklerinin Şekil 3.18’deki maske kullanılarak elde edilen çizgilerden daha ince olması sağlanmıştır. Bu sayede, metalizasyon süreci ile oluşturulan ince ızgara metallerinin aktif hücre yüzeyine temas etmesi engellenmiştir.



Şekil 3.23. İnce ızgara foto-maskesi

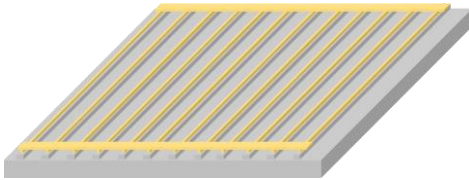
İnce ızgara maskesi kullanılarak, önceki aşamalarda yapılan işlemler gerçekleştirilerek AZ5214E PR kaplama-pozlama ve çözücü ile PR kaldırma işlemleri uygun şartlarda gerçekleştirildi. Numuneler DI-H₂O’da durulandı ve kuru azot ile kurutuldu. Numuneler termal buharlaştırma yöntemiyle (Resim 3.5) Au metali, ortam sıcaklığında ve 2000 Å kalınlığında kaplandı.

Metalizasyon işlemi sonrasında, numuneler asetonda 3 saat bekletilerek yüzeylerindeki PR’ın ve ince ızgara yapılarının dışında kalan metallerin kaldırılması sağlandı. Böylece numunelerin ince ızgara metalizasyonları tamamlanmış oldu.



Resim 3.5. Termal buharlaştırma sistemi (Gazi Fotonik)

Mesa adımı ve ince toplayıcı litografi adımları tamamlanan numunelerinin Şekil 3.24’de gösterilen akım toplayıcı ızgaralarının yapılması amacıyla üçüncü litografi basamağına geçildi.



Şekil 3.24. Toplayıcı ızgara yapıları

Numunelerin yüzeyine daha önceki aşamada tecrübe edilen şekilde, dönel-kaplama (Spin Coater) cihazı ile AZ5214E PR homojen bir şekilde kaplandı ve ısıtıcı tabla (hot-plate) ile tavlandı. PR kaplanmış numuneler, Şekil 3.25’de gösterilen toplayıcı ızgara foto-maskesi ile UV pozlama işlemi uygulandı.



Şekil 3.25. Toplayıcı ızgara foto-maskesi

Pozlama-kaldırma-temizleme işlemlerinin ardından Şekil 3.25’de beyaz olarak görülen bölgelerin metalizasyonunu sağlamak amacıyla, termal buharlaştırma yöntemiyle Au metali ortam sıcaklığında ve 2000 Å kalınlığında kaplandı. Metalizasyon işlemi sonrasında numuneler aseton da 3 saat bekletilerek yüzeylerindeki PR’ın ve toplayıcı ızgara yapısının dışında kalan metallerin temizlenmesi sağlandı. PR ve metal kaldırma işlemleri sonucunda toplayıcı ızgaraları tamamlanan hücre yapısının ön yüzeylerindeki işlemler tamamlanmış oldu.

Hücre yapılarının arka yüzeylerine Şekil 3.26’da gösterilen arka kontaklarının yapılması amacıyla dördüncü litografi basamağına geçildi.



Şekil 3.26. Arka kontak yapıları

Şekil 3.27’de verilen maske kullanılarak numunelerin arka yüzeyine ön yüzeyde yapılanlara benzer şekilde PR kaplama-tavlama-pozlama ve PR kaldırma işlemleri uygulandı.



Şekil 3.27. Arka kontak foto-maskesi

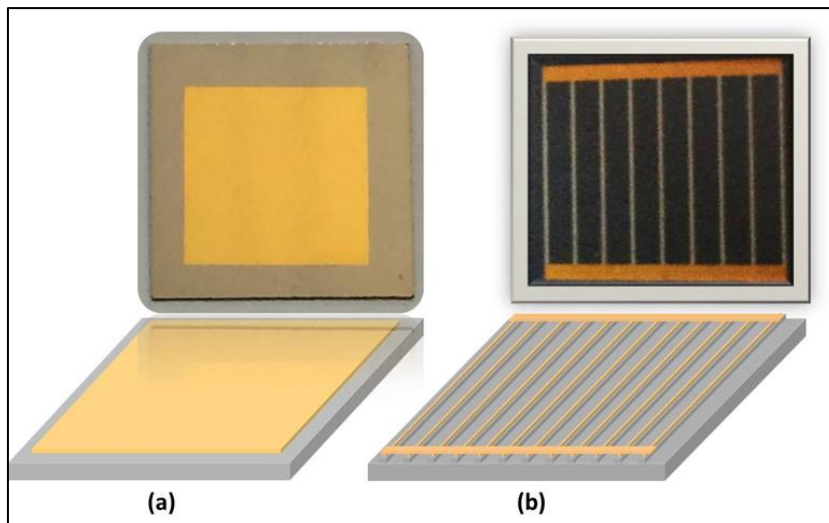
PR kaldırma işlemi ile oluşturulan alanlara termal buharlaştırma yöntemiyle AuZn metali ortam sıcaklığında ve 2500 Å kalınlığında kaplandı. Metalizasyon işlemi sonrasında numuneler aseton da 3 saat bekletilerek yüzeylerindeki PR’ın ve arka kontak yapılarının

dışında kalan metallerin temizlenmesi sağlandı. PR kaldırma adımının da bitmesiyle birlikte numunelerin arka kontak metalizasyonları tamamlandı. Ön ve arka metalizasyonları tamamlanan numunelerdeki kaplanan metallerin omik özellik göstermesi önemlidir. Oluşturulan metalizasyonun omik hale gelmesi için hücreler Resim 3.6'da gösterilen hızlı tavlama sisteminde (RTA) azot ortamında ve 380 °C'de 50 saniye süreyle tavlansak hücre fabrikasyonu tamamlandı.



Resim 3.6. Hızlı tavlama sistemi (RTA) (Gazi Fotonik)

Şekil 3.28'de GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücre yapılarının alt ve üst yüzeylerinin hem yapısal hem de şematik gösterimi birlikte verildi.

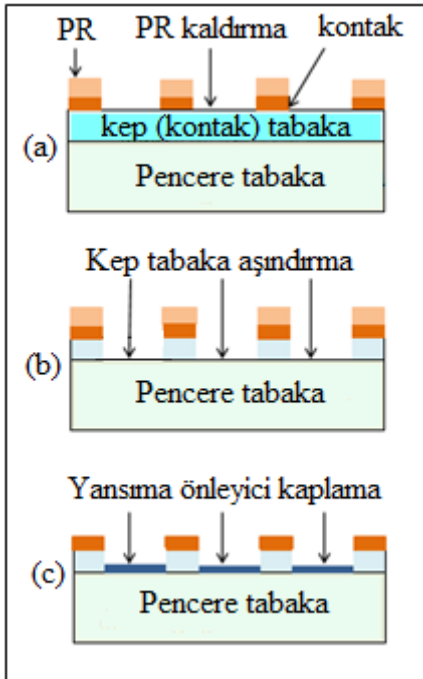


Şekil 3.28. GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücre yapılarının alt ve üst yüzeylerinin hem yapısal hem de şematik gösterimi

Üst katmanı GaAs kep tabakadan oluşan hücreler üzerlerine düşen ışığı iyi bir şekilde absorblayabilmektedir. Bununla birlikte güneş hücrelerinin yüzeyleri yansımaya önleyici (antireflection-AR) malzeme ile kaplanması verimlerini artırmaktadır. En üst tabaka üzerine yansımaya önleyici katman TiO_2 biriktirilmesi sağlanarak üç eklemlili güneş hücre üretimi aşaması tamamlandı.

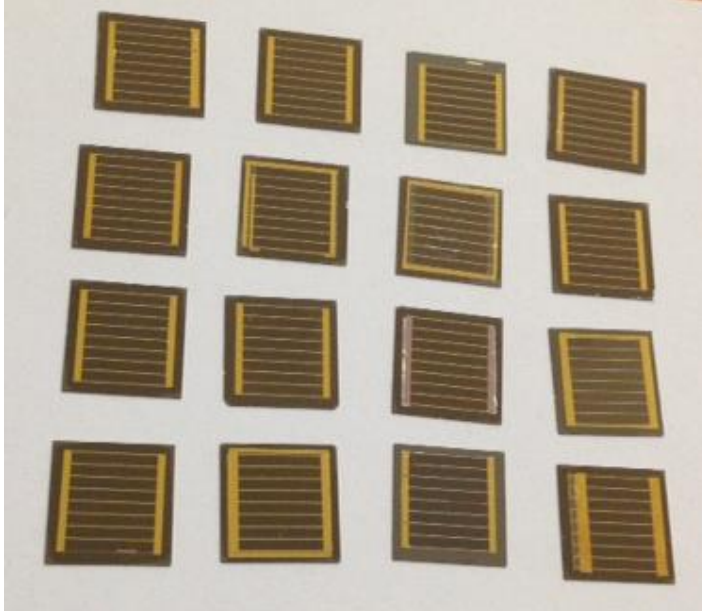
Geliştirdiğimiz hücrelerde PR malzemesi kep tabaka altındaki pencere tabaka üzerine kaplandı (Şekil 3.29). Bunun için izlenen süreç;

1. Metalizasyonu tamamlanmış hücre yüzeyine PR kaplama,
2. Metal kısımlar dışındaki yerlerin fotolitografi ile pozlanacak şekilde maske seçimi ve pozlama,
3. Pozlanan kısımların develop edilerek PR'ın uzaklaştırılması,
4. Strik asit ve hidrojenperoksit (H_2O_2) ile GaAs kep tabakanın ıslak aşındırılarak uzaklaştırılması,
5. Aşındırılan kısma TiO_2 AR malzeme ile kaplanması,
6. PR kısmın kaldırılması.



Şekil 3.29. Yansımaya önleyici tabaka kaplama süreci: (a) metalizasyonu tamamlanmış hücre üzerine PR kaplama ve aşındırılacak bölgeden PR kaldırma, (b) kep tabakanın aşındırılması, (c) yansımaya önleyici tabakanın kaplanması ve PR'ın yüzeyden kaldırılması

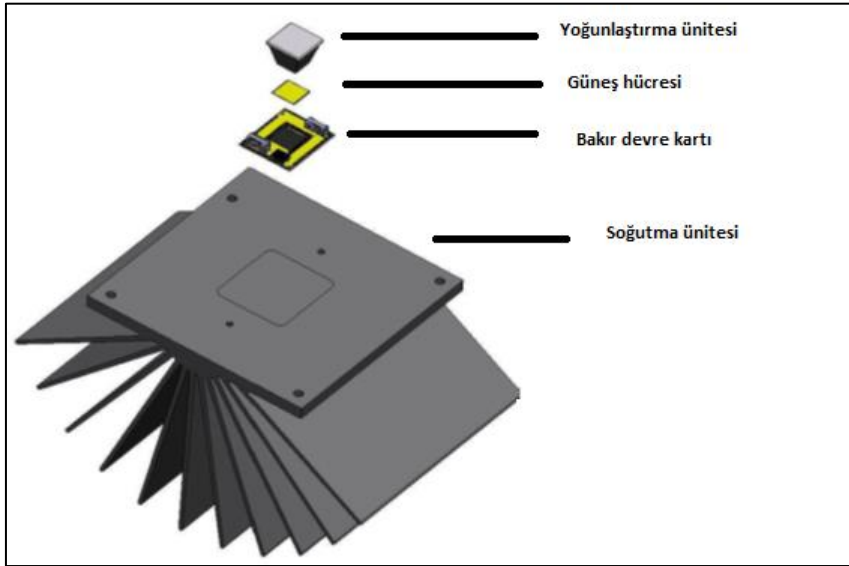
Hücre fabrikasyonunda; litografik teknikle mesa yapıların oluşturulması, metalizasyon niteliklerinin belirlenmesi ve hücre yüzeyine yansıma önleyici katman oluşturulması çalışmaları yapıldı. Yapılan çalışmalar sonucunda fabrikasyonu tamamlanan 16 adet üç eklemlü güneş hücreleri alıcı sistemine monte edilebilir hale geldi (Resim 3.7)



Resim 3.7. Fabrikasyonu tamamlanan $1 \times 1 \text{ cm}^2$ boyutlu 16 adet GaInP/GaAs/Ge güneş hücreleri

4. CPV ALICI SİSTEMİ

Hücre alıcısı, her bir hücrenin modülde yerleştirilebileceği ve diğer hücrelerle seri/paralel bağlanmasını sağlayan bir elemandır. Alıcı genel olarak iletken iki plakanın ısı iletkenliği yüksek elektriksel yalıtkan bir malzeme ile birbirlerine bağlanmış iki iletken levhadan oluşur. Sistemin en önemli parçası hücrenin bulunduğu yani elektrik enerjisinin üretildiği yerdir. Alıcı sistem 5. bölümde anlatılacak olan yoğunlaştırıcı sistemin odak noktasına yerleştirilir. Alıcı çok eklemli hücre boyutuna göre şekillendirilmektedir. Uygulamada 1x1 cm² boyutlu hücrelerin ısı defi için genellikle her bir hücre için bir alıcı tasarlanmıştır. Bu sistemde güneş hücresi, yoğunlaştırılan güneş ışınlarından kaynaklanan ısıyı engellemek için bir soğutucu sistem üzerine monte edilir.



Şekil 4.1. Alıcı sistemi

Ek modül kayıpları; hücreler arasındaki bazı kaçınılmaz boşluklardan, aktif bölgede hücreyi gölgeleyen ön bağlantılardan ve seri bağlantılı hücrelerin faaliyet farklılıkları nedeniyle oluşan akım uygunsuzluğundan kaynaklanır. Bu ek kayıplar hücrelerin ideal farklılığının %10'u olduğu varsayılır. Hücre verimliliği ayrıca gelen ışığa ve hücre sıcaklığına bağlı olarak çeşitlenebilir. 1 kW/m² (bir güneş) gelen ışık altında modül verimi (n_{PV}), hücre sıcaklığıyla (T_s) hücre etkinliğinin farklılığı Eş. 4.1'den elde edilir.

$$n_{PV} = 0,9 \cdot (0,32 - 0,00062 \cdot (T_s - 25 \text{ } ^\circ\text{C})) \quad (4.1)$$

Yoğunlaştırma da sıcaklık katsayısının bağımlılığı hücrenin üreticisi tarafından verilmez. Işık akışı artarken hücre verimliliğinin sıcaklığa olan hassaslığının daha düşük olduğu bilinir. Bir güneş sıcaklık katsayısı (-0,00062) olarak kullanır [102].

Elektriğe dönüştürülmeksizin hücre modülünde soğurulan enerjinin bir kısmı modülün ısınmasına sebep olur. Bu termal enerjinin çoğu soğutucu tarafından ortadan kaldırılır. Metal soğutma tablasındaki sıcaklık onun yüksek termal iletkenliği ile düzenlenir. Termal güç (φ_T) ve alıcı verimliliği (n_A) aşağıdaki eşitliklerden elde edilir [102,103];

$$\varphi_T = n_{Opt} \cdot (1 - n_{PV}) \cdot \varphi_{In} = \varphi_{Coo} + \varphi_F + \varphi_B \quad (4.2)$$

$$n_A = \varphi_{Coo} / \varphi_T \quad (4.3)$$

Burada, φ_{In} : Modüldeki iş gücü, φ_S : Soğutucu gücü, φ_F : Ön yüzey gücü, φ_B : Arka yüzey gücü, n_{Opt} : Optik verim, n_{PV} : PV modül verimidir. φ_F ve $\varphi_S + \varphi_B$ Eş. 4.4 ve 4.5 elde edilir.

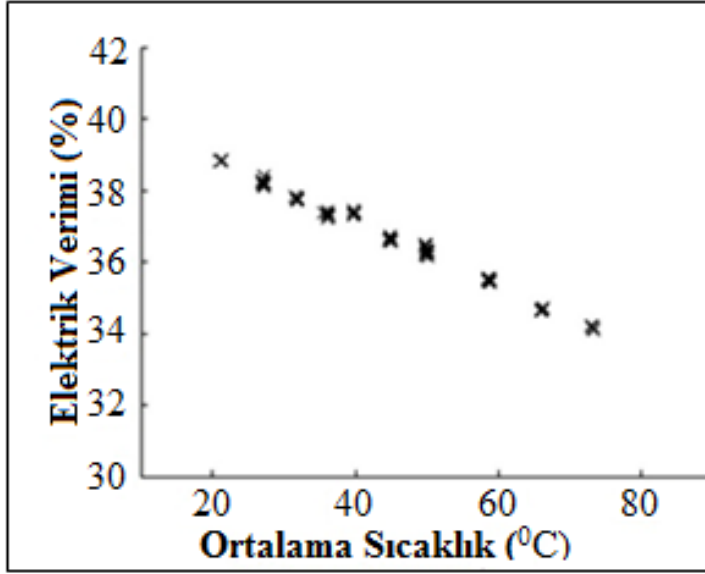
$$\varphi_F = h_F A_F (T_c - T_\infty) + \varepsilon_F A_F \sigma (T_s^4 - 0,5 T_\infty^4) \quad (4.4)$$

$$\varphi_S + \varphi_B = k_{Alt} A_{Alt} (T_s - T_\infty) / l_{Alt} \quad (4.5)$$

Burada, h_F : Ön yüzey taşınım katsayısı, A_F : Ön yüzey hücre alanı, T_s : Hücre sıcaklığı, T_∞ : Ortam sıcaklığı, ε_F : Ön yüzey emisyonu, σ : Stefan-Bolzmann sabiti, l_{Alt} : Alttaş kalınlığı, k : Termal iletimdir.

4.1. Soğutma Sistemi

Yüksek yoğunlaştırma kullanımı çaresiz olarak sonlu dönüşüm etkinliği nedeniyle işlem boyunca hücre sıcaklığının artmasına sebep olur. Üretilen ısı hücre performansının düşmesine sebep olabilir. Bu yüzden, bu sistem işlem boyunca soğutulmaya ihtiyaç duyar [104].



Şekil 4.2. Sıcaklığa bağlı enerji verimliliği [105].

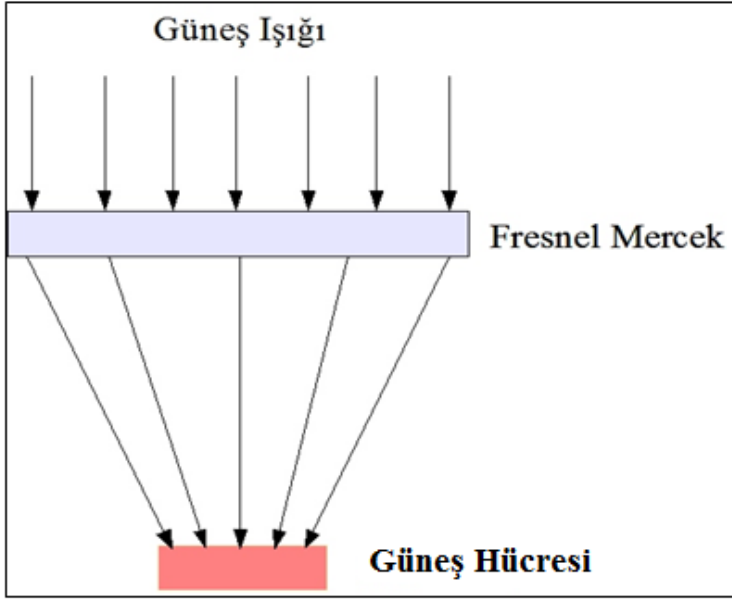
Şekil 4.2’de sıcaklığın artmasına bağlı olarak verimin azalması görülmektedir. Düşük sıcaklıklarda verim yüksek iken, işlem sıcaklığının artmasıyla birlikte enerji veriminin azaldığı görülmektedir [105]. Yüzey alanı daha genişledikçe kayıplar daha çok artar [102,103].

PV güneş hücreleri için dönüşüm etkinliği sıcaklık arttıkça azalır. Sıcaklığın 300’den 500 K’e arttığında verimliliğin %18.4’den %4.4’e azaldığı kaydedilmiştir [106]. Çoğu modeller sıcaklıkla verimlilik arasında doğrusal bir azalışın olduğunu düşünür [107]. Sıcaklık ile verimlilik arasındaki doğrusal azalışın

$$n = a (1 - b T) \quad (4.8)$$

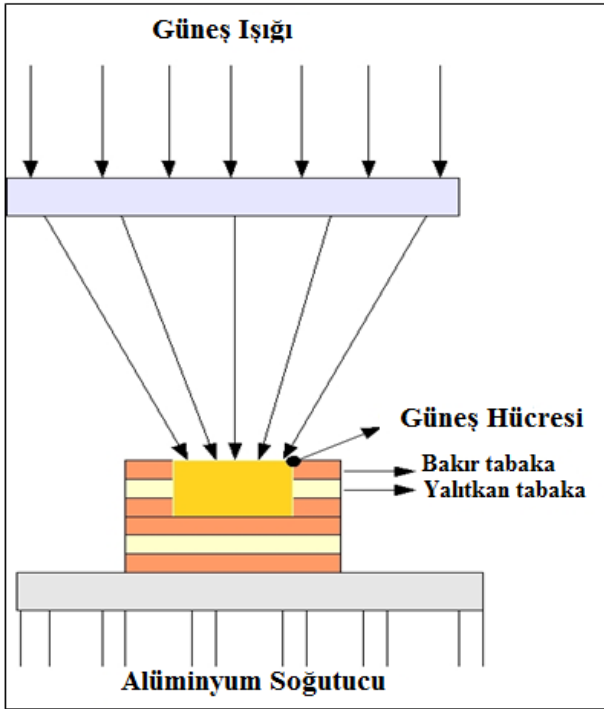
Eş. 4.8 ile verildiği tahmin edilir. Burada; a ve b doğrusal parametrelerdir (a = 0,425 ve b = 0,00176).

Yoğunlaştırıcı sistem için soğutma yardımı olmadığında (Şekil 4.3’de gösterildiği gibi) ısı hücre yüzeyinden sadece ışıınım ve ısı yayılımı boyunca harcanır.



Şekil 4.3. Yoğunlaştırma altında soğutma sistemli güneş hücresi

Şekil 4.4’de gösterildiği gibi metal bir tabaka CPV den ısıyı yaymak ve soğutmak için kullanıldı. Hücre ve soğutucu arasında ince termal bir iletken yapıştırıcı ile bağlantı kuruldu. Hücrenin sıcaklığı yaklaşık olarak ısı yayıcının ortalama sıcaklığına eşittir. Ayrıca ısı, ısı yayıcının yüzeyinden ışınimsal ya da ısısız olarak yayılır.

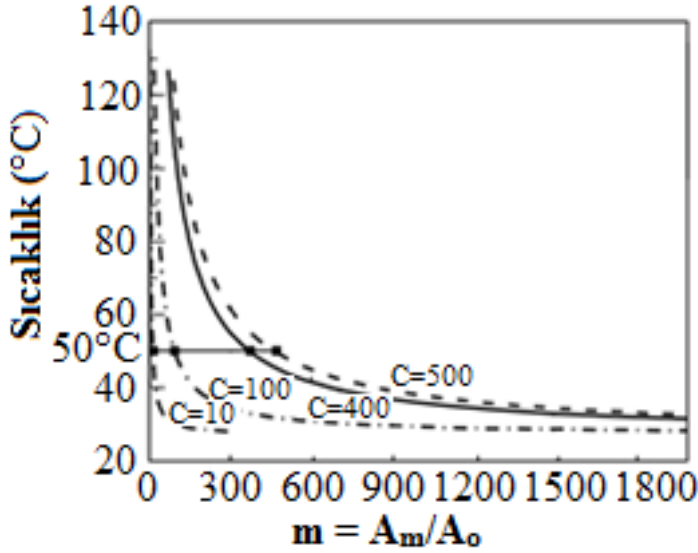


Şekil 4.4. Yoğunlaştırma altındaki bir soğutucu sistemli güneş hücresinin şematik diyagramı

Burada soğutucu yüzey bölgesinin, hücre yüzey bölgesine oranı olan m ifadesinin tanımlanması gerekir (Eş. 4.9).

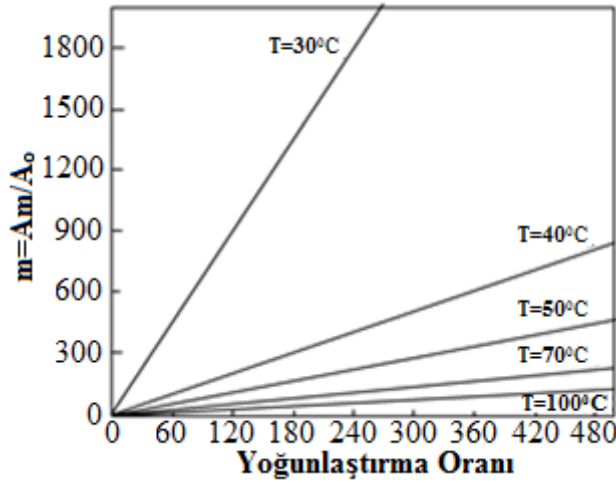
$$m = A_m/A_o \quad (4.9)$$

Şekil 4.5 farklı yoğunlaştırma oranları için hücre sıcaklığının m 'ye bağımlılığını gösterir. Şekil 4.5'de gösterildiği gibi ısı yayılım bölgesinin artmasıyla hücre sıcaklığı başlangıçta azalır ve daha sonra yavaş yavaş değişir. Hücre sıcaklığını 50°C 'de tutma ve yoğunlaştırma oranını 10'dan 500'e değiştirme durumu m 'nin 14'den 479'a artmasına neden olur.



Şekil 4.5. Hücre yüzey alanında, ısı yayılım yüzey alan oranının hücre sıcaklığına bağımlılığı [104].

Yoğunlaştırma oranı ve m arasındaki ilişki sabit hücre sıcaklığı durumu için Şekil 4.6'da gösterildi. Bu modele göre, soğutma bölgesi hücre sıcaklığını belli bir değerde tutmak için yoğunlaştırma oranı ile doğrusal bir şekilde artar. Ayrıca daha düşük sıcaklıklarda doğruların eğiminin daha dik olduğu görülebilir. Konsantrasyon oranı artırılması ile güneş hücrelerinin daha yüksek dönüştürücü verimliliğini sağlaması ve sıcaklığı düşük seviyede tutması için daha geniş bir bölgeye sahip soğutucuya ihtiyaç duyulur.



Şekil 4.6. Yoğunlaştırma oranı için ısı yayılım alanının ilişkisi [104].

Güneş hücrelerinin maksimum tolerans sıcaklığı $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin altındadır. Hücre ve ortam sıcaklığı arasındaki sıcaklık $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'yi geçmemesi gerekir [108]. PV hücrelerin soğutulması için önemli tasarım konuları aşağıda listelenmiştir:

Hücre Sıcaklığı: PV hücre verimliliği artan sıcaklık ile azalır [109]. Aynı zamanda sıcaklık belirli bir sınırı aşarsa hücrelerin bozulmasına neden olur [110]. Hücre üreticileri genellikle belirli bir ısı bozulması katsayısı ve hücre için maksimum çalışma sıcaklığı belirlemesi gerekmektedir.

Sıcaklığın Sabitliği: Hücre etkinliği nedeniyle hücrenin her yerinde eşit olmayan sıcaklıklar olduğu bilinmektedir [111]. Hücre seri bağlı olduğu için bütün eklemlerin arasında sıcaklık farkı olmaması gerekir.

Dayanıklılık ve basitlik: Sistem maliyetini azaltmak için basit ve kolay bakım yapılabilen malzemeler kullanılır. Soğutma sisteminin bir hatası PV hücrelerinin yıkımına yol açması nedeniyle, güvenilirlik açısından önemlidir. Modüller içinde soğutma sistemi elektrik kesintileri, izleme ve elektrik arızaları gibi "en kötü durum senaryoları" ile başa çıkmak için tasarlanmış olmalıdır [112].

Termal enerjinin kullanılabilirliği: Soğutma ile ekstra termal enerjinin kullanılması alıcının toplam dönüşümü veriminde önemli bir artışa yol açabilir [113]. Mümkün olduğunca yüksek bir sıcaklıkta su sağlayan bir soğutma sistemi arzu edilmektedir. Bundan

başka, ikinci bir ısı değiştirici aracılığıyla ısı kaybını önlemek için, açık-devre soğutma devresi bir avantajdır.

Yüksek yoğunlaştırma PV hücreleri soğutmak için kullanılan metotlardan birisi aktif diğeri pasif soğutmadır. Kullanılacak yoğunlaştırma oranına ve teknolojiye bağlı olarak sistemde kullanılacak soğutma sistemi Çizelge 4.1'deki gibi belirlenir.

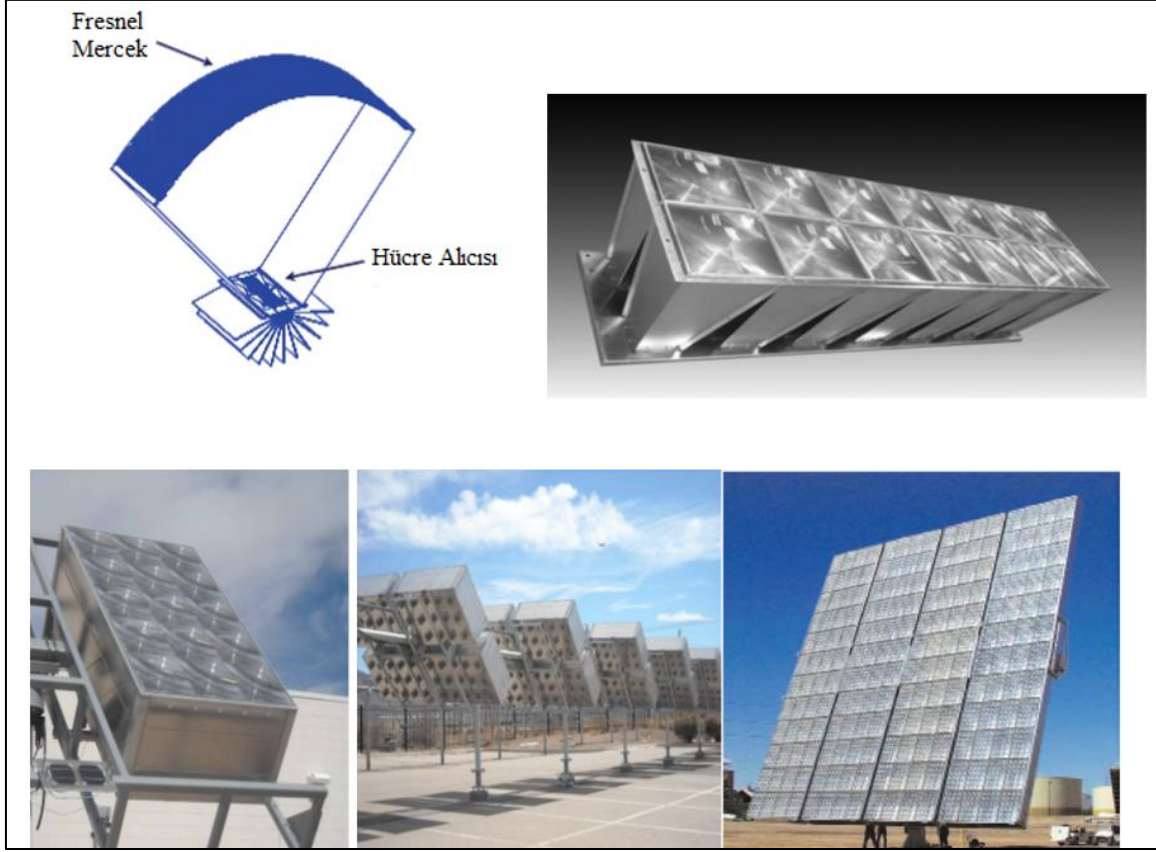
Çizelge 4.1. Yoğunlaştırma oranına bağlı kullanılan soğutucu sistemler

	Yoğunlaştırma oranı	Teknoloji	Soğutucu
Düşük CPV	1-10	Lineer odaklama sistemleri	Pasif
Orta CPV	10-100	Lineer odak sistemleri (parabolik, lineer Fresnel mercekler)	Pasif yada aktif
Yüksek CPV	100-1000	Nokta odaklar (Fresnel mercekler, aynalar, parabolik çanak)	Aktif

4.2. Pasif Soğutma

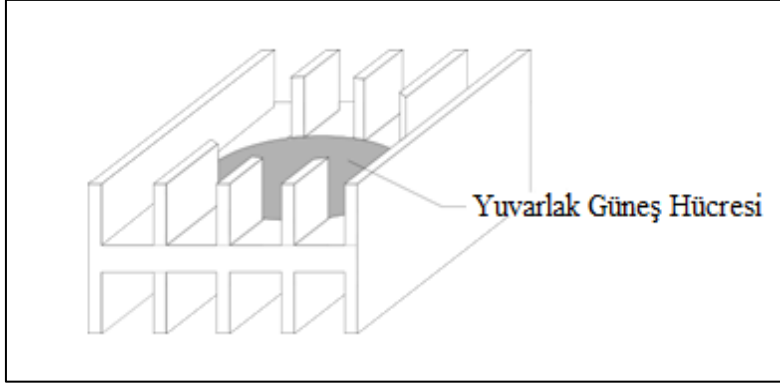
Pasif soğutma sisteme ek bir enerji kaybına neden olmaz. Sadece kurulum aşamasında maliyet gerektirir. Güneş hücreleri genellikle Al ya da Cu disklere Ag epoksilerle bağlanır. Böylece ısı değişim alanının artırılmasıyla güneş hücre sıcaklığının azaltılması amaçlanır.

Isı düşürücü mini çanağın arkasına gömülü ve ortam hava akımına maruz kalır. Böylece her diskin kenarından ısı kaybı gerçekteşir [108]. Şekil 4.7'de pasif soğutuculu sistemlere örnekler verildi.



Şekil 4.7. Pasif soğutuculu fresnel mercek odaklı güneş hücre modülleri

Edenburn Şekil 4.8’de ki gibi bir pasif soğutma sistemi geliştirdi. Soğutma sistemi ısı yayıcı yüzeylere sahip düz yüzgeçlerden oluşur [114]. Bu model aşırı termal koşullar (çok düşük rüzgar hızı, yüksek güneşlenme ve yüksek ortam sıcaklıkları) altında odak ayarsızlığı durumunda kullanılması için geliştirilen bir pasif soğutma cihazıdır. Hücre boyalı Al kutu içinde yuvalandıran hücre düzeneğine yerleştirilmektedir ve kanallar vasıtasıyla soğutma gerçekleşmektedir. Kanat sayısı ne kadar az olursa sıcaklık düşüşü de o kadar az olur. Kanatların şekildeki gibi kutu tasarımı ile hücreler yaklaşık 90 güneş yoğunlaştırma seviyesinde bile 150 °C'nin altında tutulabilir. Bu sıcaklık yine de PV hücreler için çok yüksek bir sıcaklıktır.

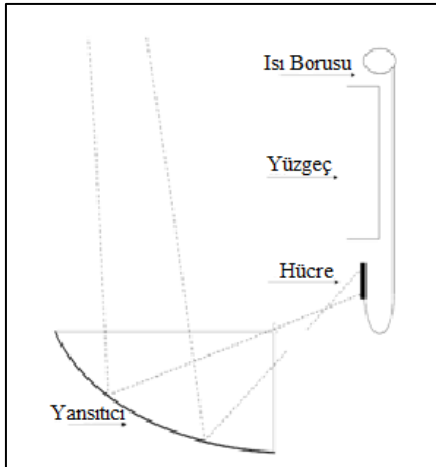


Şekil 4.8. Edenburn önerdiği gibi tek bir hücre için pasif soğutucu [114].

Edenburn yüksek yoğunlaştırılmalı hücre sistemlerinde daha büyük soğutucular kullanılması gerektiğini bildirmiştir. Ayrıca lens ile hücre aralığının fazla olması halinde hücre ile soğutucu arasında dikkate değer sıcaklık farkı oluşabileceğini vurgulamıştır.

Minano, yüksek yoğunlaştırmada tek bir hücrenin pasif soğutma için bir ısıl model oluşturduğunu savunmuştur. Minano pasif soğutmada hücre boyutlarının küçültülmesi ile 1000 güneş yoğunlaştırması altında çalışılabileceğini vurgulamıştır [115].

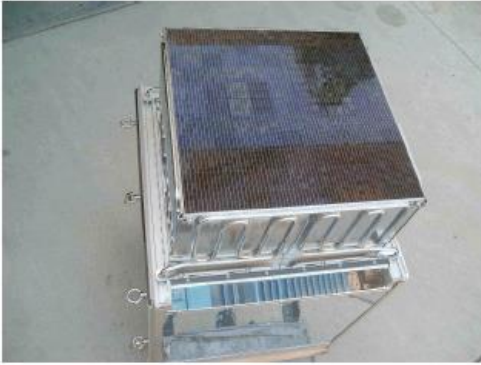
Akbarzadeh ve Wadowski Şekil 4.9’da ki soğutma için doğrusal oluk benzeri ısı boruları kullanan bir sistem üzerinde çalıştı [116]. Bu sistemde her bir hücre düzleştirilmiş bir Cu borudan yapılmış bir termosifonun ucuna dikey olarak monte edilir. 46 °C sıcaklığa sahip güneşli bir günde 20 güneş yoğunlaştırma altında soğutma sisteminde sıvı olmadan hücre sıcaklığı 84 °C olarak elde edildi.



Şekil 4.9. Isı borusu bazlı soğutma sisteminin şematik gösterimi [116].

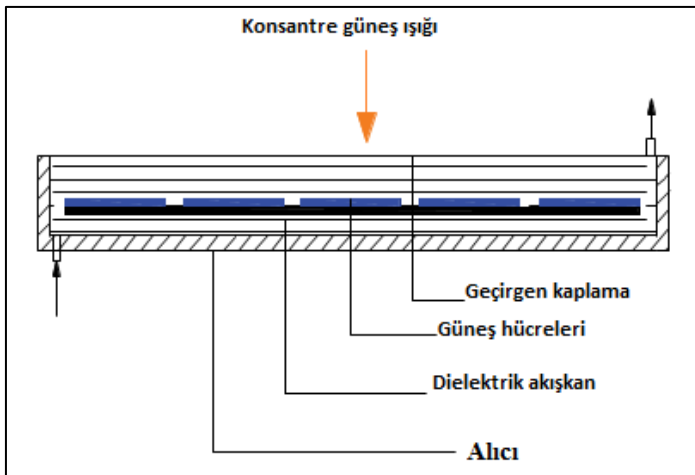
4.3. Aktif Soğutma

Aktif soğutma hücre sıcaklığını hareketli bir soğutucu vasıtasıyla sabit bir sıcaklık değerinde tutmaya yarayan sistemdir. Kararlı hal durumu olarak nitelendirilen bu durum sayesinde hücrenin her noktasında sıcaklık aynı değerdedir ve hücre verimi pasif soğutucuya göre daha yüksektir. Şekil 4.10’da aktif soğutucu verildi. Aktif soğutma ünitesi sıvı akışının pompalanması ve sıvı akış kanalı gibi parametreler sebebiyle sisteme ekstra bir enerji kaybına neden olmaktadır.



Şekil 4.10. Aktif soğutucu [117].

Sıvı giriş sıcaklığı, kütle akış hızı ve sıvı akış kanallarının kalınlığı hücre sıcaklığını doğrudan etkiler. Akış hızı ayarlanarak bu sorun çözülebilir. Ancak, artan akış hızı yüksek pompa hareketi gerektireceğinden sistemin maliyetini artırır. Bu tür sistemlerde amaç yüksek verimlilik ve düşük maliyettir. Aktif soğutuculu alıcı sistem Şekil 4.11’de verildi.



Şekil 4.11. Aktif soğutuculu alıcı sistem

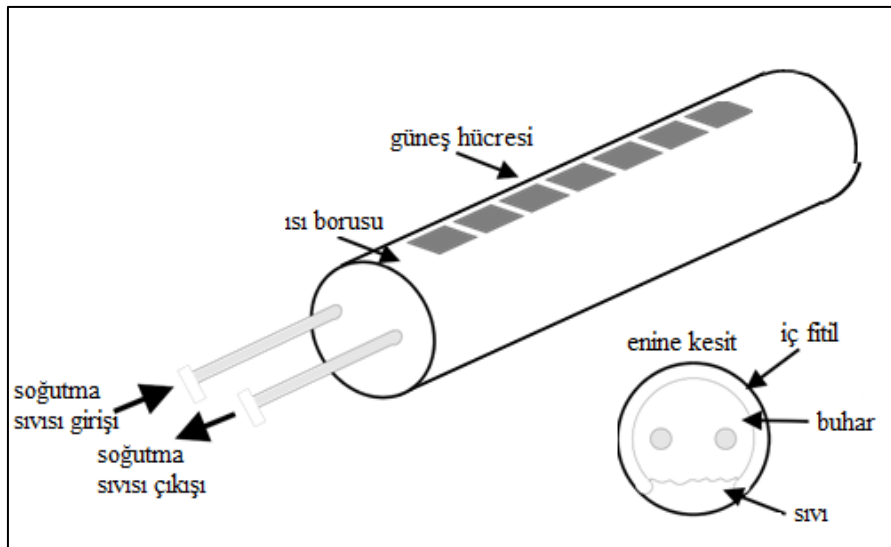
Aktif soğutucuda kullanılacak akışkan;

- Dielektrik,
- İyi termal iletim ve düşük akışkanlık,
- Uzun süreli kimyasal ve fiziksel stabilite,
- Düşük optik absorplaması, iyi optik stabilitesi,
- Zehirsiz ve ucuz olmalıdır.

Soğutucu üniteler hücrelerden kaynaklanan ısıyı akışkan vasıtasıyla taşırlar. Bu sayede ısınan akışkan ek bir enerji olarak kullanılabilir. Bu enerji genel olarak evsel ya da endüstriyel uygulamalar için sıcak su ve yerel ısıtma sistemlerinde kullanılır.

Alıcı soğutma işleminde anti-dondurucu ve aşınma önleyici madde katkılı su; toplam termal enerji ve hücreleri soğutmak için kalıplanmış alıcı içine pompalanır [105].

Şekil 4.12’de gösterildiği gibi Russell bir ısı borulu soğutma sistemi tasarladı [118]. Bu tasarımda hücreler bir ısı borusunun üzerine monte edilmiştir ve hücrelerin üzerine ışık doğrusal Fresnel merceklerle odaklanmıştır. Borular bir panel oluşturmak için birbirine monte edilmiştir. Soğutucu akışkan sistemin bir ucundan girer ve sistemin tamamını dolaşarak sistemin homojen bir şekilde soğumasını sağlamıştır.



Şekil 4.12. Russell tarafından önerilen ısı borulu soğutma sistemi [118].

4.4. Alıcı Sisteminin Önemi

Alıcı sistemi ve onun performansı modül verimini direk etkiler. Alıcı verimi yapının ömrünü artırır, maliyetin düşmesine sebep olur. Alıcı tasarımı için gerekli hususlar;

- Hücrelerin gölgelenmesinden sakınılması,
- İyi ısı transferi ve düşük parazitik güç kayıpları,
- Hücre ve devreleri yüksek voltajdan uzak tutmak,
- Uyarlanabilir çalışma parametreleri,
- İmalat ve bakım kolaylığıdır.

Kullanılacak toplayıcıya bağlı olarak alıcı boyut yapısı oluşturulmalıdır. Ayrıca kullanılan hücre ömrüne bağlı olarak yapı tasarımları ve ömürleri ona göre belirlenmelidir.

Panelin sayısına bağlı olarak alıcıların boyutlarını (genişliği ve yüksekliği) önceden belirlemek alıcı verimi için önemlidir. Alıcı jeneratöre ne kadar yakın olursa kayıplar o kadar azalır. Alıcı güneş hücrelerinde kullanıldığı gibi termal güneş güç üretiminde de kullanılabilir. Alıcı güneş hücrelerinde soğutucu görevi yaparken termal güç sistemlerinde ısı kaybını önlemek için görev yapmaktadır.

Alıcı ortam koşullarına dayanıklı olması gerekmektedir. Bu yüzden alıcı sistemini oluşturan malzemelerin ona göre seçilmesi gerekir. Yüzeyi paslanmamalı, oksitlenmemeli ve sıcaklıkla genişleme katsayısı düşük olmalıdır. Bunun için:

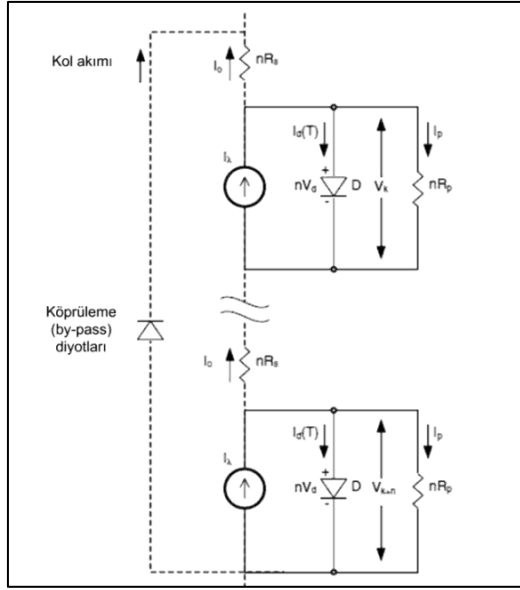
- Kullanılan malzemelerin arasında termal genişleme katsayılarının yakın olması gerekir.
- Birbirine eklenecek malzemeler iyi seçilmelidir ve birbirine bağlantıları ideal olmalıdır.
- Ani soğutmada oksit tabakası içinde gerilme stresleri nedeniyle bağlantı kayıplarının olmamasına dikkat edilmelidir.
- Yüksek sıcaklıklara çıkılması durumunda alıcı üzerinde bulunan parçaların birbirine tamamen kaynak olmamasına veya birbirine yapışan malzemelerin ayrılmamasına dikkat edilmelidir.

Alıcı temizliği, testi, tamiri hücre teknolojisinin gelişmesi ve maliyeti açısından önemlidir. Yoğunlaştırıcının boyutunun artmasıyla alıcının sıcaklığı artacağı için hücrenin verimi düşer. Alıcı ile odaklayıcı sabitlemesi düzgün bir şekilde yapılmadığında odak noktasında sapmalar meydana gelir. Bu sapmalar verimi doğrudan etkiler ve yapıya zarar verebilir.

PV sistemlerin elektriksel karakteristiklerinin incelenmesinde göz önüne alınması gereken bir başka husus da PV sistemlerdeki gölgeleme etkisidir. PV yüzeyinde beklenmedik bir gölge durumunun oluşması PV sistemlerini oluşturan hücrelerde gerilim dengesizliğine neden olan bir durumdur. Buna sebep olabilecek nedenler: yoğunlaştırıcı ile alıcıyı sabitleyen destek malzemelerinin gölgelemesi, başka bir PV sisteminin gölgelemesi ve çevresel etkenlerden oluşabilecek gölgelemelerdir.

Işığın hücreye ulaşmadığı gölgeleme durumunda fotoakım sıfırdır ($I_{\lambda} \rightarrow 0$). Sadece iç diyot, R_s ve R_p dirençleri diğer aktif hücrelerden gelen akımlar için bir yol oluşturur. Sağlıklı hücrelerin gerilimi koldaki gölgeli hücrelere akım sağlar ve bu nedenle faydalı enerji dirençler üzerinde boşa harcanır. Eğer daha fazla hücre gölge altında kalırsa bu iç dirençler ısı kaynağı gibi davranır ve PV sistemin verimini düşürürler. Bu durum ayrıca PV sisteme zarar verebilir. Bunu engellemek için köprüleme (by-pass) diyotları kullanılır [119]. Gölgeleme durumunda bu diyotlar akım için bir yol oluşturur ve enerjinin dirençlerde harcanması engellenmiş olur.

Schottky by-pass diyotlar alıcının üst kısmının gölgelemesinden kaynaklı, hücrelere ters yönlü akı geçmesini önlemek için ve sistemi korumak amacıyla yapılır. By-pass diyot bağlantılı güneş hücre şematiği Şekil 4.13'de verildi.



Şekil 4.13. By-pass diyot bağlantılı güneş hücre şematığı

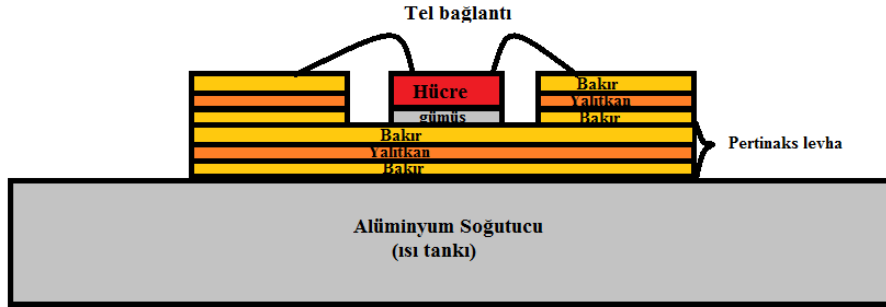
4.5. Kullanılan Alıcı Sistemi

Yüksek yoğunlaştırma altında çok yüksek sıcaklıklara maruz kalan hücreleri soğutmak için biz sistemimizde pasif soğutucu olarak Al kullandık. Alıcı aygıt iki tarafı Cu ve ortası yalıtkan olan Pertinaks malzemesi ile Al soğutucu tablanın birbirine yüksek termal iletim ve düşük direnç özelliği gösteren yapıştırıcıyla birbirine bağlanması ile oluşur. Hücrenin alt ve üst tarafından bağlantı kontakları alınarak iki adet pertinaks levhası hücre ve by-pass diyotun yerleştirileceği şekilde Al soğutucuya monte edildi. Buradaki Cu levha devre kartı görevi yapmaktadır. Yapıştırıcı olarak Elecolit 325 markalı yapıştırıcı kullanıldı. Çizelge 4.2’de kullanılan yapıştırıcının özellikleri verildi.

Çizelge 4.2. Kullanılan yapıştırıcı özellikleri

Baz	Akışkanlık (CPS)	Çalışma Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Öz Direnç	Kürlenme Süreleri ($^{\circ}\text{C}$)						Kullanım Yerleri
				25	50	100	125	150	180	
Epoksi /Ag	Pasta	-40,+150	0,0005	16s	2s	30dk	18dk	5dk	-	Çift bileşenli elektriksel bileşen yapıştırıcı.

Alıcı katmanlarının özellikleri ve bir hücrenin alıcıya bağlantısı şematik olarak Şekil 4.14’de verildi. Alıcı sistemde bulunan parçaların termal iletkenlik uyumu olması gerekir. Bu yüzden kullanılan her bir parçanın termal iletkenliği bilinmelidir. Çizelge 4.3’de kullanılan malzemelerin termal iletkenlik değerleri verildi. Çizelge 4.3’den de görüldüğü gibi malzemelerin termal iletkenliği uyum içerisindedir.



Şekil 4.14. Alıcı tasarımı

Çizelge 4.3. Kullanılan malzemelerin termal iletkenlik değerleri [120]

Yapı	Malzeme	Termal İletkenlik ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Güneş Hücresi	GaInP	5
	GaAs	55
	Ge	58
Yapıştırıcı	Ag	430
Pertinaks levha	Cu	401
Soğutucu	Al	237

Alıcı yapısı Şekil 4.14’de gösterilen sistemi oluşturmak için aşağıdaki adımlar izlenecektir;

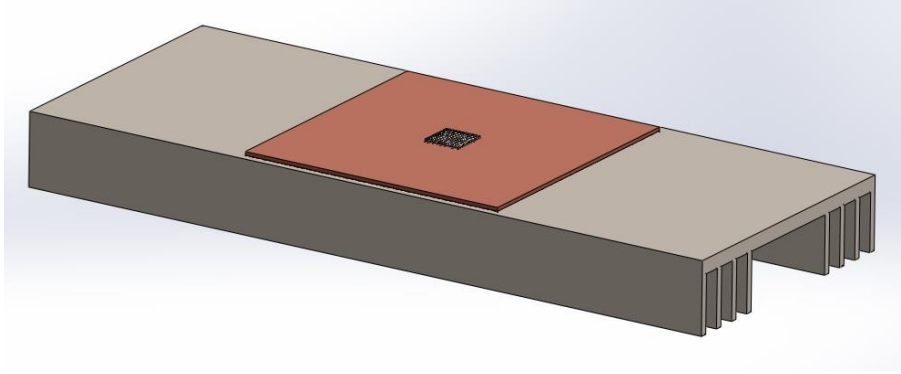
- Güneş hücrelerinin 1 güneş altında I-V ölçümleri yapılarak yaklaşık olarak aynı verimliliğe sahip hücreler seçilir.
- Güneş hücreleri, Al soğutucu üzerindeki yerlerine alt pertinaksın üst Cu levha yüzeyine yerleştirilerek yapıştırılır.
- Bir by-pass diyot gölgeleme, yanma halinde aşırı akıma karşı diğer güneş hücrelerini korumak için hücrelere paralel bağlanır. Güneş hücreleri ve by-pass diyotların ön

yüzeyi dört adet 0,05 mikron tel ile üst pertinaks malzemesinin üst Cu yüzeyine yapıştırıcı ile tutturulur.

- Güneş hücrelerinden ısı nispeten Cu plaka tarafından uzaklaştırılır alıcı ve CPV modülün alt Al levhası arasındaki termal iletken yapıştırıcı vasıtasıyla dışa aktarılır.

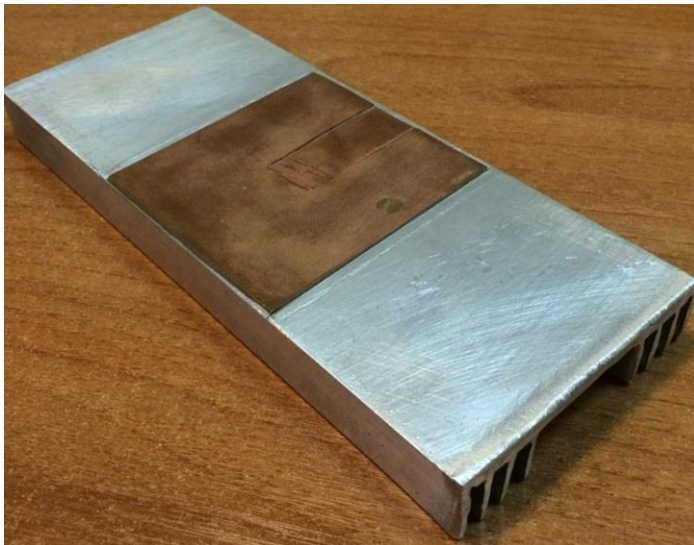
4.5.1. Alıcı tasarımı

Sistemimizde pasif soğutucu olarak Al soğutucular kullanıldı. Birçok Al soğutucu çeşidi bulunmaktadır. Bunlar içerisinde öncelikli olarak düz ızgaralı Al soğutucu kullanılması düşünüldü. Şekil 4.15’de düz ızgaralı Al soğutucunun şematik gösterimi verildi.



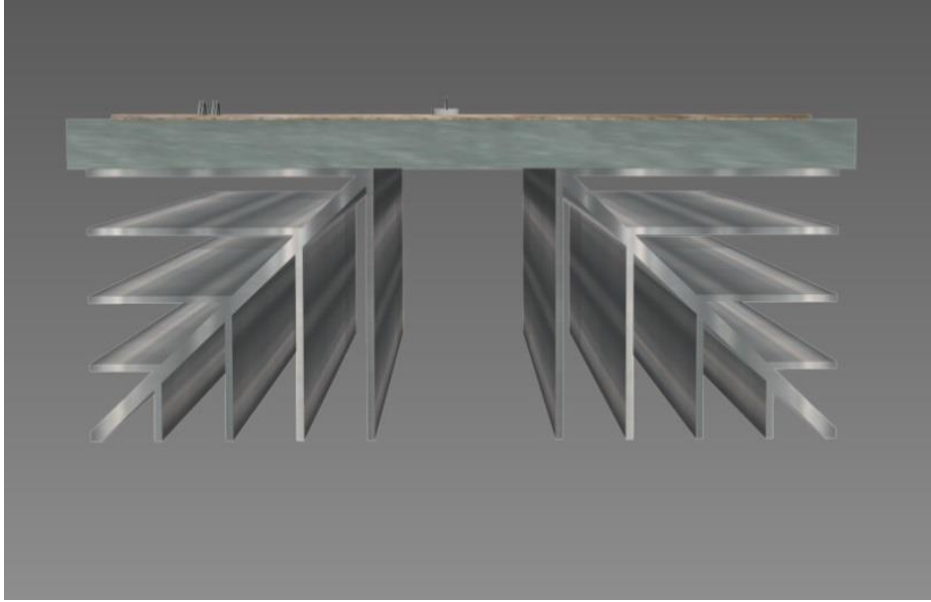
Şekil 4.15. Düz ızgaralı Al soğutucu şematiği

Şekil 4.15’deki düz ızgaralı Al soğutucu şematiğine uygun olarak üzerine hücre ve by-pass diyot yerleştirmek için hazırlanmış pertinaks levhalı Al soğutucu Resim 4.1’de verildi.



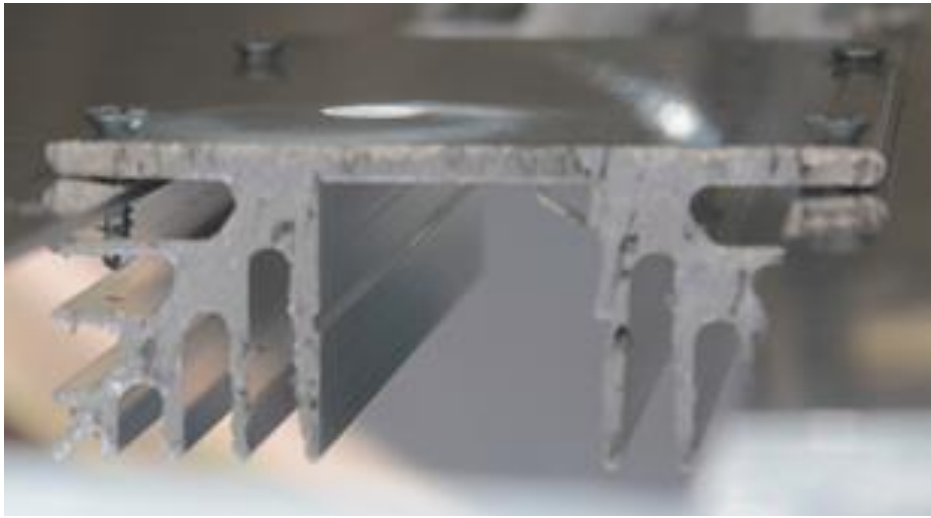
Resim 4.1. Düz ızgaralı Al soğutucu

Yapılan bu soğutucu yerine yüksek yoğunlaştırma altında yani daha yüksek sıcaklıklarda düz ızgara soğutucuya göre daha iyi performansa sahip oluklu Al soğutucular kullanıldı. Bu oluklar sayesinde daha fazla hava akışı geçerek daha iyi soğutma gerçekleştiriyor. Şekil 4.16'da oluklu Al soğutucunun şematik çizimi gösterilmiştir.



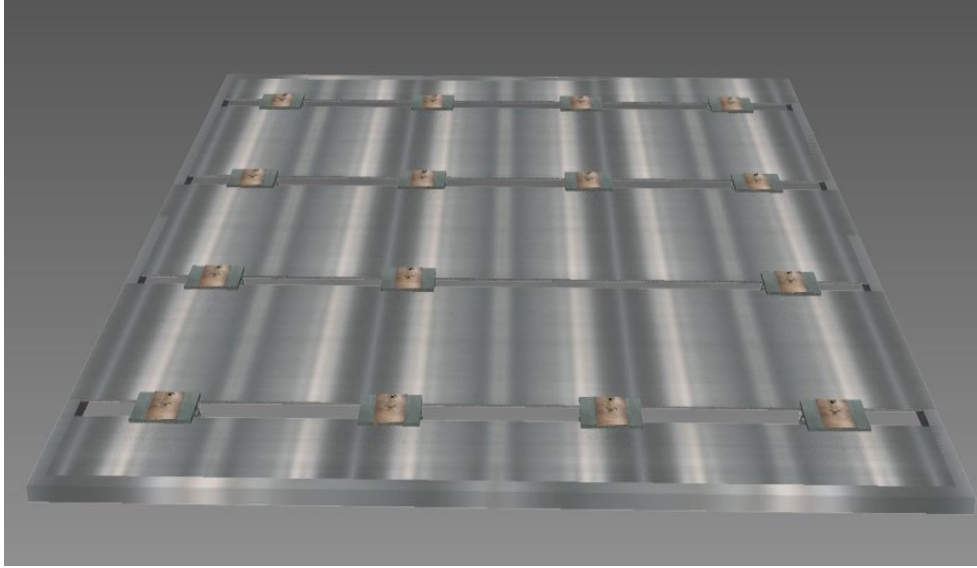
Şekil 4.16. Oluklu Al soğutucu şematik çizimi

Şekil 4.16'da verilen bu Al soğutucular hazır olarak alındı. Resim 4.2'de alınan oluklu Al soğutucunun kesiti gösterildi.

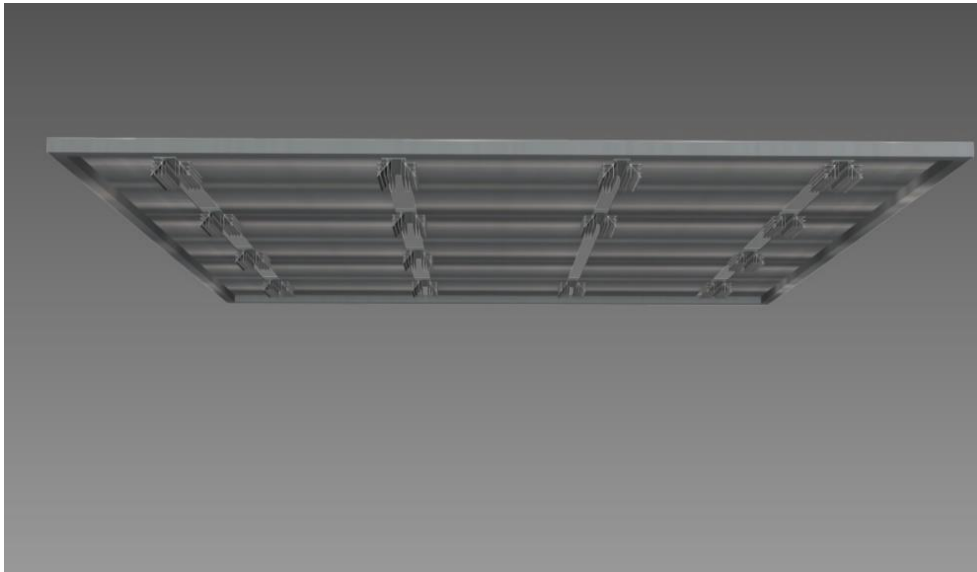


Resim 4.2. Oluklu Al soğutucu

CPV prototip sistemi için 16 adet alıcıdan oluşan sistemin şematik çizimi Şekil 4.17 ve 4.18’de verildi. Çizimlerden de görüleceği gibi 16 adet alıcı bir Al levhaya monte edildi.

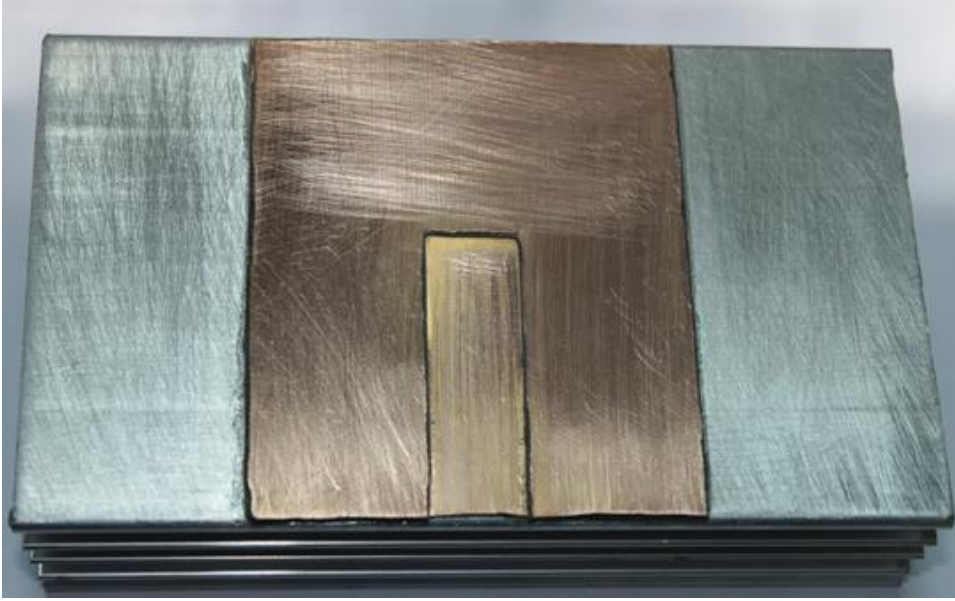


Şekil 4.17. 16 adet alıcıdan oluşan sistemin ön yüzey çizimi



Şekil 4.18. 16 adet alıcıdan oluşan sistemin arka yüzey çizimi

Çizimi oluşturulan alıcı sistemin gerçekleşmesi için her bir alıcı özel olarak hazırlandı. Her alıcıya eşit boyutlarda 2 adet pertinaks malzemesi kesildi. Kesilen pertinaksın biri Al soğutucu üzerine yapıştırıldı. İkinci pertinaks ise ortasına $1 \times 1 \text{ cm}^2$ hücre ve by-pass diyot yerleştirilebilecek şekilde kesildi. Kesilen ikinci pertinaks da birinci pertinaksın üzerine düzgün bir şekilde yapıştırıldı. Pertinaksları yapıştırılmış Al soğutucu Resim 4.3’de verildi.



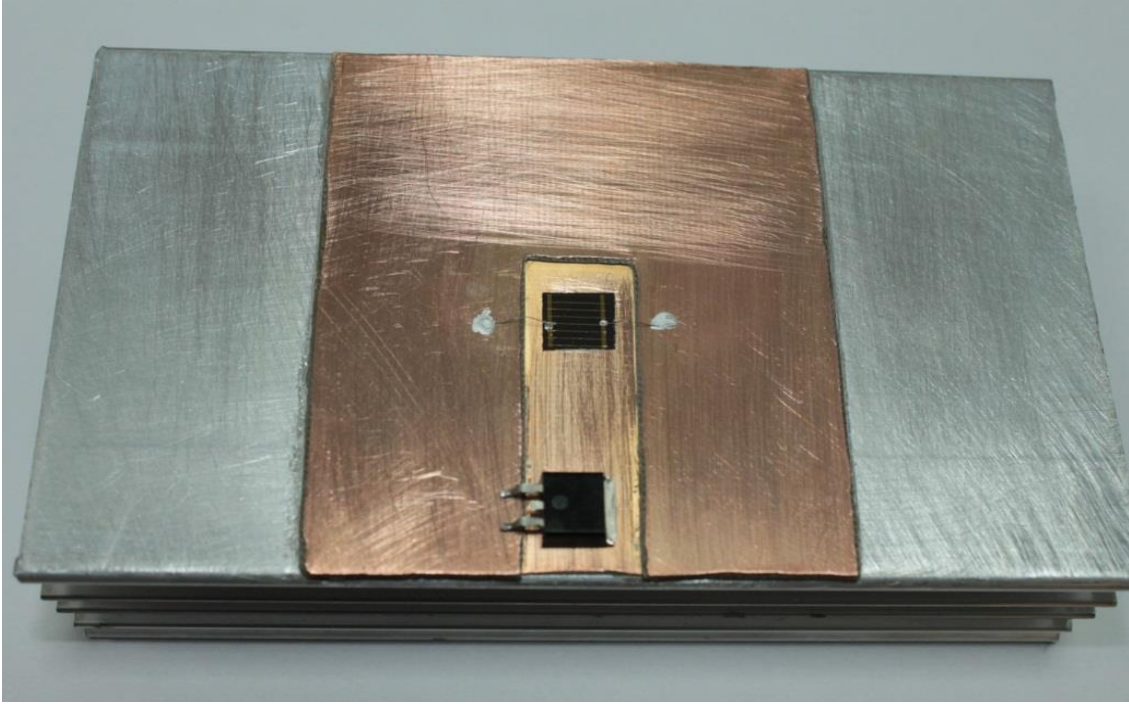
Resim 4.3. Pertinakları yapıştırılmış Al soğutucu

Şekil 4.19'da Al soğutucu üzerine monte edilecek olan güneş hücresinin ve by-pass diyotun şematik çizimi verildi.



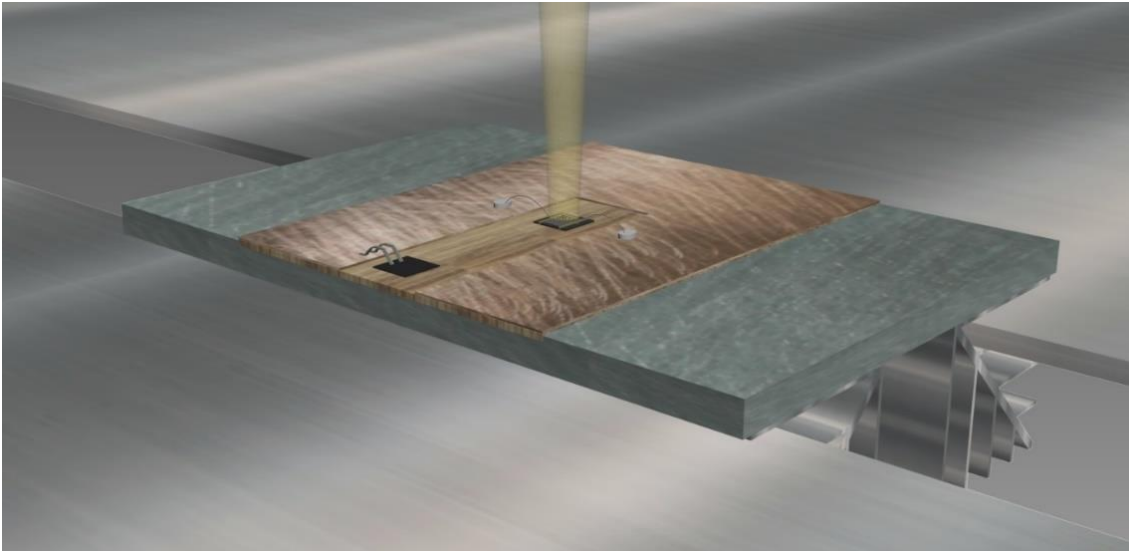
Şekil 4.19. Güneş hücresi ve by-pass diyot yerleştirilen Al soğutucunun şematik çizimi

Şekil 4.19'da çizime göre güneş hücresi yüksek sıcaklığa dayanıklı yüksek iletkenliğe sahip yapıştırıcı ile alt pertinaksa yapıştırıldı. Hücre üzerinden bakır levhalara kontaklar alındı. Sistemi korumak amacıyla by-pass diyot yerleştirildi. Bu şekilde tamamlanan alıcı sistemi Resim 4.4'de gösterildi.



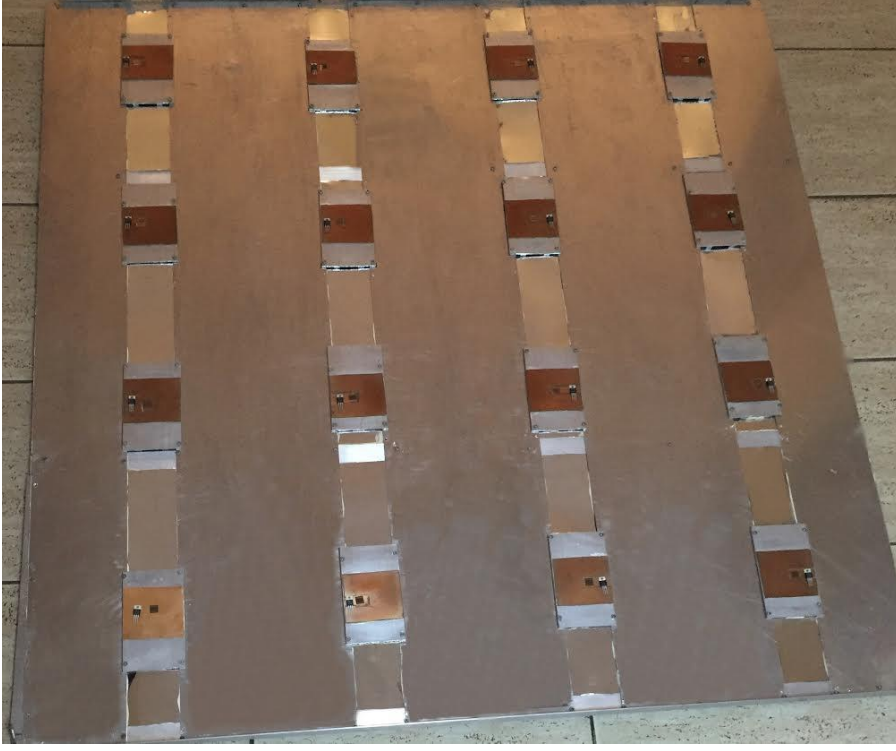
Resim 4.4. Güneş hücresi ve by-pass diyot monte edilmiş Al soğutucu

Oluşturulan alıcı sistemler, Şekil 4.20’de gösterildiği gibi yoğunlaştırıcı ışığın tam hücre üzerine düşecek şekilde ayarlanarak Al levhaya Resim 4.5’deki gibi yerleştirildi.



Şekil 4.20. Hücre üzerine düşen ışığın şematik çizimi

16 adet alıcı sistem elde edildi ve bu alıcılar 135 cm x 135 cm x 0,3 cm boyutunda Al plakaya yerleştirildi (Resim 4.5). Bu şekilde alıcı sistem tamamlanmış oldu.



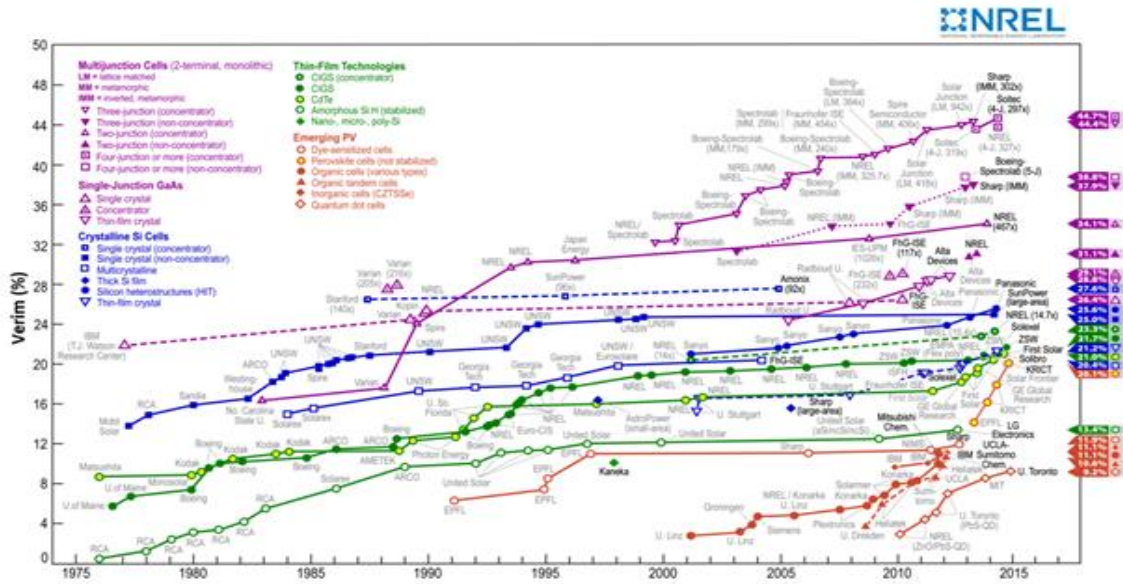
Resim 4.5. Al levhaya monte edilen 16 adet alıcı

5. YOĞUNLAŞTIRICI SİSTEMLER

5.1. Yoğunlaştırma Neden Yapılır?

Güneş enerjisi doğrudan ışın ve yoğunlaştırılmış ışın olarak iki şekilde elde edilir. Yoğunlaştırıcı sistem ışığı yoğunlaştırabilen optik bileşenler içeren modüllerden oluşan bir PV sistemdir. Bir yoğunlaştırıcı sistemin amacı hücre üzerine düşen güneş ışığı yoğunluğunu artırarak PV modülün performansını artırmayı sağlamaktır. Ancak yoğunlaştırmayı kullanmanın temel nedeni Wp maliyetini azaltmaktır. Bu ise PV sistemin en pahalı unsuru olan güneş hücrelerinin alanını azaltarak yüksek verim elde etmekle sağlanabilmektedir.

CPV modüller dünyada son yıllarda hem üretim hem de arge düzeyinde geliştirilmektedir [121]. Şekil 5.1'de farklı teknolojiler için zamanın bir fonksiyonu olarak güneş hücrelerinin verim değerleri verildi. Üç eklemlili hücrelerden elde edilen verimlilik değerleri oldukça ilgi çekicidir.

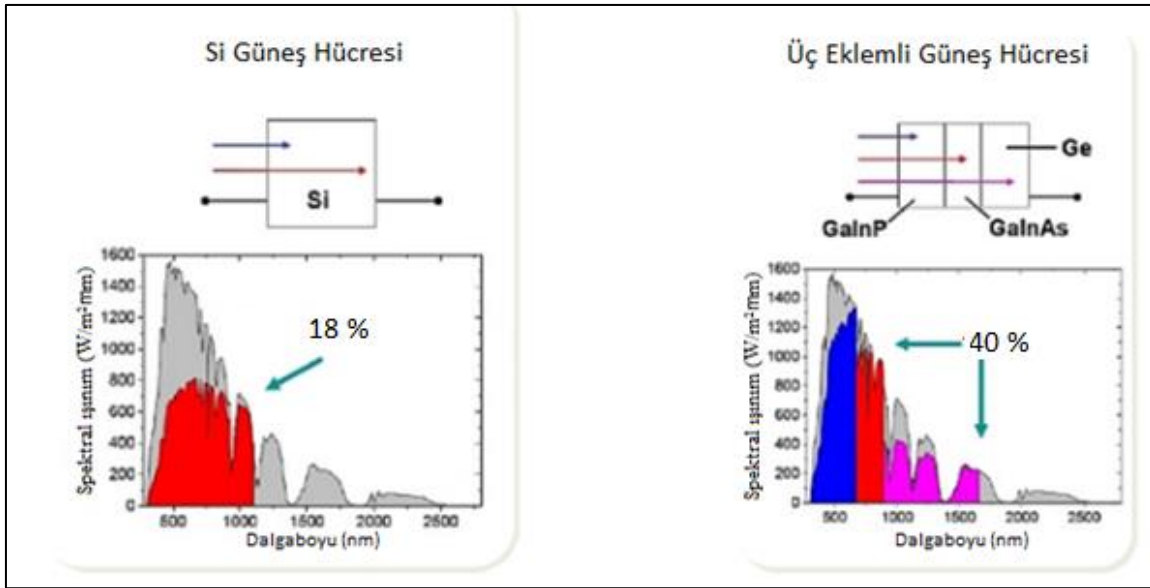


Şekil 5.1. ABD Ulusal yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) [122].

Çok eklemlili güneş hücreleri diğer güneş hücrelerine göre üretim maliyeti yüksektir. Ancak oluşturulan yüksek yoğunlaştırma ile yüksek verim değerlerine ulaşan bu hücreler pazarda rekabetçi hale gelmektedir.

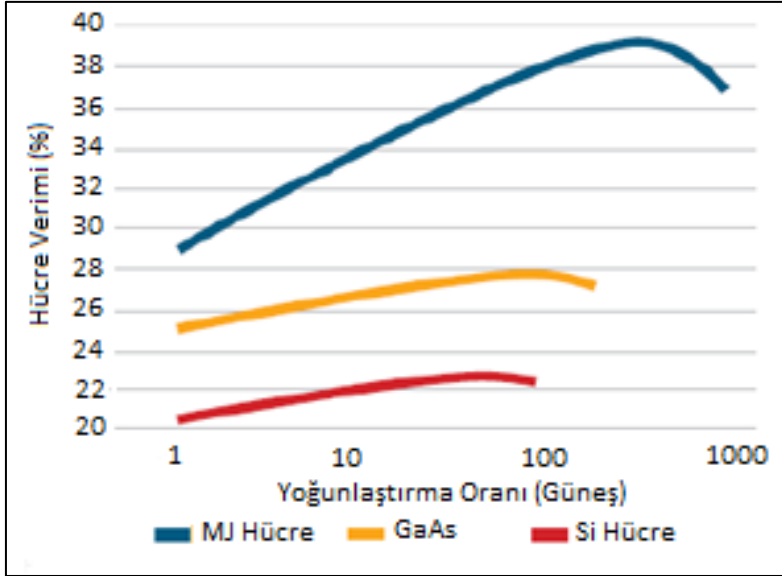
Piyasada bilinen güneş panellerine göre eşdeğer güç çok daha küçük alanlara sahip modüllerle elde edilebilecektir. Bir 1m² büyüklüğündeki (bir çanak anten büyüklüğünde) sistemle bir konutun enerji ihtiyacını karşılayabilecek güce ulaşılabilecektir. Ayrıca birkaç MW mertebesinde kurulacak güç santralleri için dekarlık arazilerin kullanılmasına gerek kalmayacak daha küçük alanlarda eşdeğer güç elde edilebilecektir. Böylece hem modül maliyeti azaltılabilecek hem de arazi tasarrufu sağlanabilecektir.

Özellikle yüksek ışınlanma için üretilen bu yüksek performanslı CPV hücreler ışığı en verimli şekilde elektrik enerjisine dönüştürürler. Bu durum materyal kullanımında sağlanan azalma ile konvansiyonel tek kristal Si hücrelerine göre önemli oranda maliyet tasarrufu sağlar. Bu hücreler özel seri III/V yarıiletken malzemeler ile kullanıldığında önemli oranda güneş ışınımını elektrik enerjisine çevirmektedir. Si alaşımli geleneksel güneş hücreleri güneş ışınımının tüm spektrumunu enerjiye çevirme yeteneğine sahip değildir.



Şekil 5.2. Si ve üç eklemlı güneş hücrelerinin spektral ışınımı [123].

Uzay uygulamalarında tek aday olan GaAs teknolojisine dayalı bu hücreler diğer PV türlerinden daha fazla enerji üretmekte ve ekonomik kazancı artmaktadır. Şekil 5.3'de çok eklemlı (MJ), GaAs ve Si güneş hücre yapılarının güneş ışığı ile yoğunlaştırma oranlarına bağlı hücre verimleri verilmektedir.



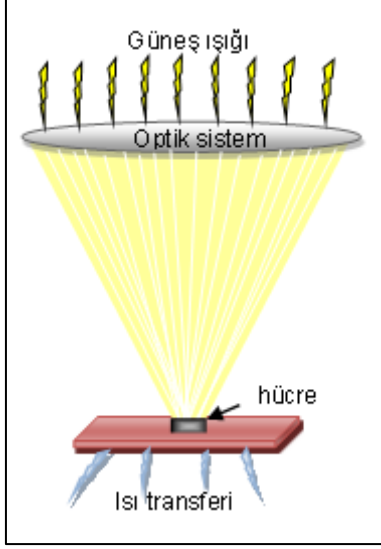
Şekil 5.3. Yoğunlaştırma oranlarına göre güneş hücre verimleri [123].

Üç-eklemlı GaInP/GaAs/Ge CPV'lerde 175 güneş yoğunlaştırma altında %37 verime ulaşılmıştır [123]. Günümüzde 500 güneş altında %40'lı verimlere ulaşan üç eklemlı CPV modüllerin geliştirildiği bilinmektedir. NREL, 234 güneş yoğunlaştırması altında dört eklemlı güneş hücresinde %45,7 dönüşüm verimliliği göstermiştir [122]. Bu başarı güneş hücrelerinin her türlü genelinde elde edilen en yüksek fotovoltaik hücre verimliliğini temsil eder. PV uygulamalarda yoğunlaştırılmış güneş ışığının iki önemli avantajı vardır.

- Büyütülen güneş hücreleri Fresnel mercekler ya da diğer optik aygıtlar vasıtasıyla güneş spektrumunun yoğunlaştırılması sonucunda yüksek verimliliklere ulaşabilmektedirler. Burada pahalı olan yarıiletken malzemenin boyutlarını küçültmek, maliyeti düşürmek amaçlanmaktadır.
- Daha yüksek dönüşüm verimi mümkündür. Logaritmik ışık yoğunlaştırmasından dolayı PV hücresinin voltajı artar (iç direnç kayıpları ve yüksek hücre sıcaklıkları verimi düşürür).

Optik yoğunlaştırıcılar gelen ışığı kullanılan sisteme göre 2-1000 kat oranında yoğunlaştıran mercekler veya yansıtıcılardan oluşmaktadır. Güneş ışığını yoğunlaştırmak için plastik lensler ve cam aynalar gibi ucuz materyaller kullanılır. Bu materyallerin PV hücre ile geometrik ve optik tasarımlarla bütünleştirilmesi sonucunda prototip CPV paneller üretilir. Şekil 5.4'de yoğunlaşmış güneş ışığı altında çalışan güneş hücresi ve

yoğunlaştırıcı optik sistem verildi. Çizelge 5.1’de ise farklı güneş dönüştürücü sistemler için kullanılan güneş hücrelerine bağlı olarak yoğunlaştırma değerleri verildi.



Şekil 5.4. Yoğunlaşmış güneş ışığı altında çalışan güneş hücresi ve yoğunlaştırıcı optik sistem

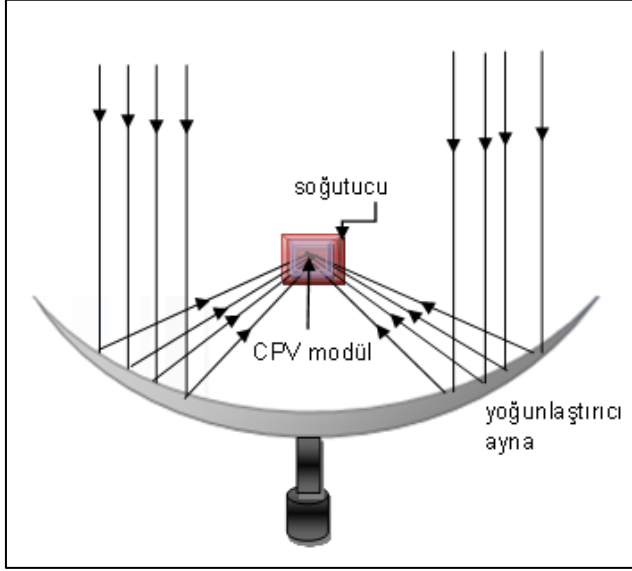
Çizelge 5.1. Farklı güneş dönüştürücü sistemler için kullanılan güneş hücrelerine bağlı olarak yoğunlaştırma değerleri [124]

	CPV Sınıfı	Yoğunlaşma Oranı	Dönüştürücü Tipi
I	Yüksek Yoğunlaştırma	>400X	Çok eklemli (MJ) güneş hücreleri
II	Orta Yoğunlaştırma	3X-100X	Si yada diğer güneş hücreleri
III	Düşük Yoğunlaştırma	<3X	Si modüller

Yoğunlaştırma sistem tercihi genellikle enerji tüketimine, enerjiyi nasıl kullanılacağına ve nerede kullanılacağına göre değişir. Yoğunlaştırıcı sistem geliştirmede tabiat şartlarından en az etkilenen ucuz malzeme seçimi belirli bir alan için homojen ışınım dağılımı sağlayabilme gibi faktörlerin yanında sistem ağırlığını minimal düzeyde tutabilecek özellikleri de dikkate almak gerekmektedir. Örneğin, Fresnel mercekler hafif ve düşük maliyetlidir.

Yoğunlaştırıcı sistem bileşenlerini (Şekil 5.5) ayrı ayrı irdeleyip sistemi bir bütün olarak ele almak gerekir. Kullanılan yoğunlaştırıcı optik elemanın optik verimliliği, hücre üzerindeki ışık dağılımı ve homojenliği, gölge faktörü ve açılal dağılımı

değerlendirilmelidir. Optik verimlilik kullanılan ayna ya da merceğin ışığı absorpsiyonu ve geometrik optik verimliliğini içerir. Işık dağılımı optik sistemin ışığı odaklama özellikleri ile ilgilidir.



Şekil 5.5. Bir CPV aygıt şeması

Optik verimlilik Eş. 5.1'den elde edilir:

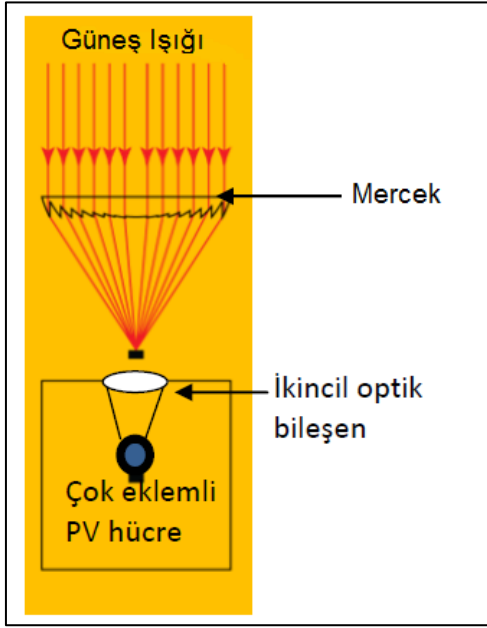
$$\eta_{opt} = \left(\frac{H_p}{K_p} \right) \left(\frac{A_H}{A_K} \right) \quad (5.1)$$

Burada H_p : hücre üzerindeki aydınlama, K_p : Toplayıcı yüzeyindeki aydınlama, A_K : Toplayıcı yüzeyi, A_H : Hücre yüzeyidir.

Yoğunlaştırma sistemindeki kusurlu yansımaya gelen güneş ışığının genellikle %6-12'lik kaybına sebep olur. Bu durum kullanılan aynanın veya merceğin çeşidine ve temizliğine bağlıdır. Ag ile kaplı düşük Fe oranlı camdan yapılmış temiz bir ayna %90-94'lük yansıtma sağlamaktadır. Toplam akım analizlerinde kullanılan optik etkinlik bütün kayıpları içerir ve $n_{opt}=0,85$ temsili değeri olarak tahmin edilir. Yoğunlaşma faktörü optik sistem alanı ile hücre alanının oranıdır ve Eş. 5.2'den elde edilir.

$$\text{Yoğunlaşma oranı} = \frac{\text{Optik sistem alanı}}{\text{Hücre Alanı}} \quad (5.2)$$

Yoğunlaştırıcı sistemin bir diğer bileşeni de ikincil optik olarak adlandırılan tabanı hücre boyutunda olan ve mercekten gelen ışınının tam olarak hücre üzerine düşmesini ve hücre dışı malzemenin (hücresinin yerleştirildiği platformun-alıcı) ışıınımdan korunmasını sağlayan optik bileşendir (Şekil 5.6). Bu bileşen, tarafımızdan kullanılacak hücre geometrisine göre, iç kısmı yüksek yansıtma katsayılı (>%96) malzeme kaplı konik formda ucuz maliyetli olacak şekilde tasarlandı.

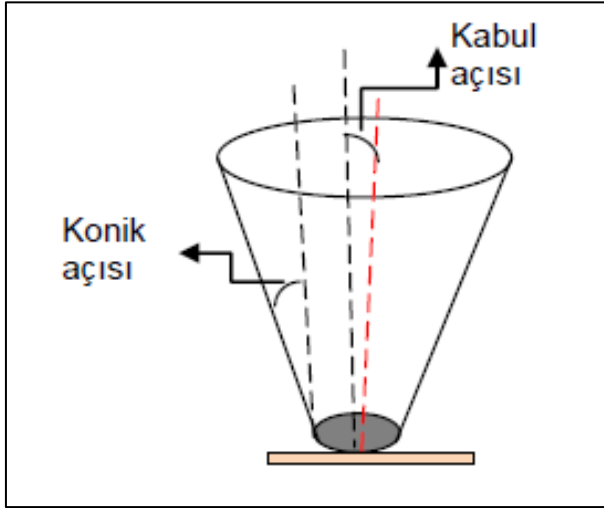


Şekil 5.6. Yoğunlaştırıcı sistemde kullanılan ikincil optik sistem şematiği

CPV teknolojisinde sistem maliyetini azaltmak için PV hücre boyutunu düşürmek gereklidir. Renk sapmaları ve geniş kabul açıları sonucu güneş ışığına oluşan tepki nedeniyle mercek odak noktasında oluşan bulanıklık (lekemsi alan) güneş hücresi boyutunun küçültülmesi ve dolayısıyla hücre üzerine düşen ortalama güneş ışığı yoğunluğunu engellemektedir. Bu sorunun çözümü hücre yüzeyi üzerine ikincil optik bileşen (Şekil 5.7) yerleştirmektir. Geometrik şekli ve toplayıcı özellikleriyle farklı tiplerde ikinci optik bileşen geliştirmek mümkündür. Bu eleman sayesinde;

- Hücre üzerinde önceden hedeflenen ışımaya profiline sağlanması ve aydınlanma homojenliğinin elde edilmesi,
- Birincil mercekten odaklanmada oluşan bulanıklık nedeniyle ortaya çıkan ısıl dağılım dengesizliğinin giderilmesi,

- Farklı türdeki güneş hücrelerindeki dönüşümde maksimum verime ulaşmak amacıyla yoğun radyasyon akısının spektral bölünmesine katkı sağlaması,
- Odak mesafesi üzerindeki saçılımı ve mercek paneline yerleştirilmesinde birincil merceklerin optik eksenlerinin tam paralel olmaması problemlerinin ve ayrıca ısı yayılım düzlemi (bir ölçüde alıcı) üzerindeki hücrelerin pozisyonlarındaki belirsizliklerden kaynaklanan olumsuzlukların giderilmesi,
- İyi kabul açısı (gelen ışınım ile alıcı düzlemi arasındaki açı) sağlaması ile ışığın yoğunlaşmasının maksimum olmasının sağlanması (yoğunlaştırma = (kırılma indisi)²/Sin (kabul açısı)).



Şekil 5.7. İkincil optik eleman

İkincil optik eleman prototip üretiminde, malzeme, konik yüksekliği, kabul açısı ve konik açısı (veya konik çapı) maksimum yansıma sağlayacak şekilde tasarlanmalıdır.

5.2. CPV Modül Tasarımı Ve Prototip Üretimi

Güneş ışığını yoğunlaştırmak amacıyla, optik bilim ışığında;

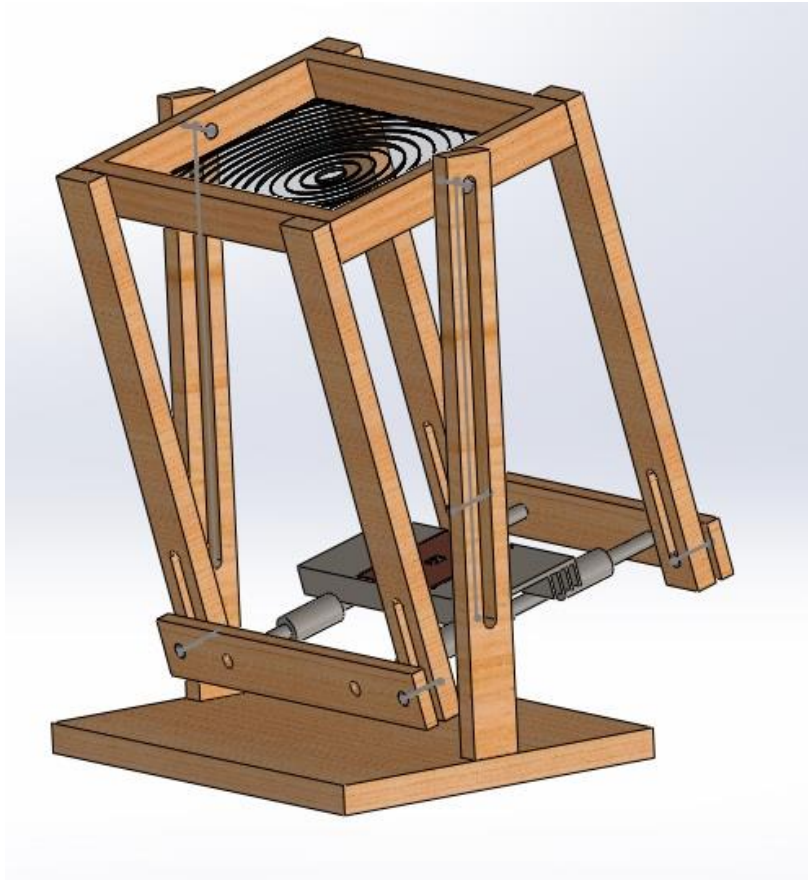
- Fresnel Mercek,
- Parabolik çanak ayna sistemi,
- 16'lı parabolik yoğunlaştırıcı modül

olmak üzere üç adet güneş ışığını yoğunlaştırıcı sistem tasarımı yapılmıştır.

İlk olarak geliştirdiğimiz alıcının Al ısı tankı kullanılarak pasif soğutma ile sağladığı soğutmanın tam olarak ölçülebilmesi amacıyla Fresnel mercekli düzenek hazırlandı. Ayrıca tek bir parabolik ayna kullanılarak dört hücreli alıcıdan oluşan bir model CPV modül oluşturuldu. Bu sistem iki eksende güneşi takip edebilen küçük bir güneş takip sistemine monte edilerek yoğunlaştırma ölçümleri gerçekleştirildi. Bu çalışmalar ışığında amaçlanan 16'lı parabolik sistemi oluşturuldu.

5.2.1. Fresnel mercek sistemi

Fresnel mercek birçok yönde gelen ışığın bir noktada toplanmasını sağlayan mercek sistemidir. Tez çalışması kapsamında kullanılan Fresnel mercek, $14 \times 28 \text{ cm}^2$ alana ve 30 cm odak uzaklığına sahiptir. Şekil 5.8'de Fresnel mercek sisteminin tasarımı gerçekleştirildi ve buna uygun olarak Resim 5.1'deki Fresnel mercek prototipi elde edildi. Burada dış aksam malzemesi olarak tahta kullanıldı ve tüm üretim laboratuvarımızca gerçekleştirildi.



Şekil 5.8. Fresnel mercek sistem tasarımı



Resim 5.1. Fresnel mercek prototipi

Hava sıcaklığının $35,2^{\circ}\text{C}$ olduğu bir Eylül ayında Fresnel merceğin $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 'lik odak noktasında 925°C sıcaklık ölçüldü (Resim 5.2).



Resim 5.2. Fresnel merceğin odak noktasında oluşan sıcaklık değeri

Bu sıcaklıklar güneş hücreleri için tehlikelidir ve bu yüzden sisteme bir soğutma ünitesi eklenmesi gerekir. Sistemin odak noktasında ışık yoğunluğu $1 \times 1 \text{ cm}^2$ alan oluşacak şekilde hücre alıcısı sisteme yerleştirildi. Burada alıcı $8 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ boyutunda Al soğutucu kullanıldı. Al soğutucu üzerine $8 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ boyutunda 2 adet pertinaks malzemedan oluşan tabakalar yerleştirildi. Güneş hücresi $1 \times 1 \text{ cm}^2$ ışık yoğunluğu üzerine gelecek şekilde alıcı üzerine yerleştirildi. Böylece bir Fresnel mercek prototipi gerçekleştirildi.

Oluşturulan Fresnel mercek prototipi ile geliştirdiğimiz alıcının Al ısı tankı kullanılarak pasif soğutma ile sağladığı soğutmanın tam olarak ölçülebilmesi amacıyla bir günlük sıcaklık değerleri ölçüldü. Çizelge 5.2’de bu sistem için yaptığımız bir günlük ölçüm sonuçları verilmektedir.

Çizelge 5.2’de görüldüğü gibi saat 12:00, hava sıcaklığı $35,2 \text{ }^\circ\text{C}$ ’de iken hücre üzerinde oluşan maksimum sıcaklık $925 \text{ }^\circ\text{C}$ ve soğutucu metal plakanın sıcaklığı $36,4 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak ölçüldü. Bu da metal soğutucunun $925 \text{ }^\circ\text{C}$ gibi yüksek bir sıcaklıkta işe yaradığını ve sistemi düşük sıcaklıkta tuttuğunu gösterir.

Çizelge 5.2. Fresnel mercek ile elde edilen bir günlük sıcaklık değerleri

Zaman (saat)	Hücre üzerindeki sıcaklık ($^\circ\text{C}$)	Metal plakanın sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)	Hava sıcaklığı ($^\circ\text{C}$)
08:00	840	34,6	29,3
09:00	860	35,0	30,2
10:00	885	35,1	31,6
11:00	895	35,5	33,5
12:00	925	36,4	35,2
13:00	910	37,3	34,7
14:00	880	38,4	34,2
15:00	879	39,0	33,1
16:00	880	38,8	32,2
17:00	878	38,7	30,8
18:00	875	38,8	30,2

5.2.2. Parabolik çanak ayna sistemi

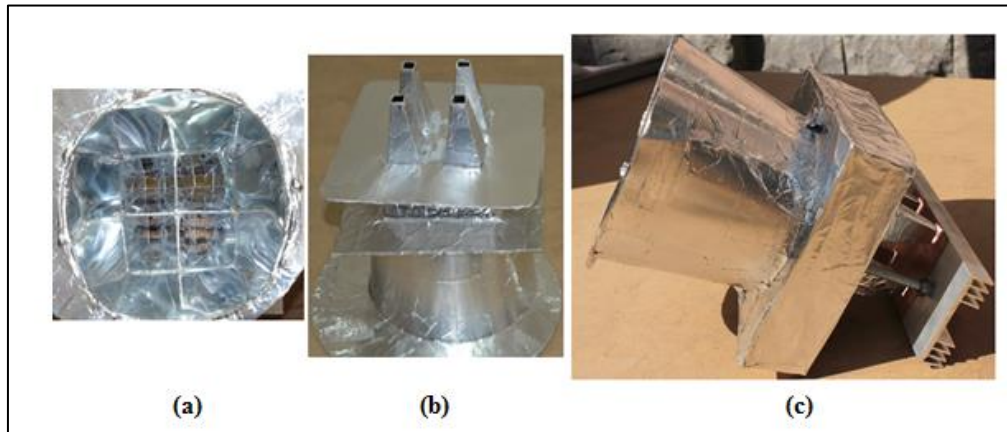
Güneş hücre yüzeyinde oluşan yoğunlaşma miktarlarını deneysel olarak değerlendirmek amacı ile parabolik çanak ayna sistemi tasarlandı ve 70 cm çapına sahip bir çukur ayna kullanıldı. Ayna yüzeyinde ışınım kaybı (yansıtıcı yüzey tarafından ışınımın soğurulması

nedeniyle) %5 olarak alındı. Ayna optik verimi %95 olarak hesaplandı. Çukur ayna bir çanak içerisine monta edildi. İki yönlü güneş takip sistemi kullanılarak sistemin güneş ışığından daha fazla faydalanılması amaçlandı (Resim 5.3).



Resim 5.3. Parabolik çanak ayna sistemi

Bu sistemde yaklaşık 1800 °C gibi yüksek sıcaklığa çikıldı. Fakat bu sıcaklıkta numune zarar görebileceği için sisteme ikincil bir optik toplayıcı sistem geliştirildi. Bu sistem aynanın odak noktasına yerine 10 cm uzağına konularak burada oluşan yüksek sıcaklıktan numunenin zarar görmesi engellendi. İkincil optik elemanlar %10 civarında optik kayba neden olmaktadır. Böylece sistemin toplam optik verimi %85 civarındadır. İkinci optik sistemin kabul açısı, konik açısı ve yüksekliğı optimize edilerek 4 ayrı 1x1 cm² alanlı güneş hücresi üzerinde maksimum yoğunlaşma ve homojenlik sağlandı.



Resim 5.4. İkincil optik sistemin; (a) iç gösterimi, (b) dış gösterimi, (c) alıcı eklenmiş gösterimi

Resim 5.4'de gösterilen ikincil optik sistem ile güneş ışığını homojen hale getirip hücre üzerine düşmesi sağlandı. Burada alıcı 4 güneş hücresi yerleştirilecek şekilde tasarlandı. Her bir güneş hücresi üzerine düşen güneş ışığı miktarı ~500 güneş olarak ayarlandı. Yoğunlaşma sıcaklığı ~500 güneşte 1200 °C civarında oldu. Bu yüksek sıcaklıklarda normalde aktif soğutma kullanılması gerekirken bizim sistemimizde küçük alana sahip güneş hücresi ve büyük alana sahip soğutucu kullanılarak yüksek ısı defi gerçekleştirildi. Böylece sistem maliyet açısından da avantajlı oldu. Soğutucu sistem olarak Al pasif soğutucu kullanıldı. 38 °C hava sıcaklığında yapılan ölçümlerde güneş hücresi üzerinde oluşan sıcaklık 42 °C olarak ölçüldü. Bu sıcaklık güneş hücresinin çalışabileceği bir sıcaklık değeridir.

Yoğunlaştırıcı sistem parabolik çanak ayna ve ikincil (homojenleştirici) optik sistemin uygun geometride yerleştirilmesi ile gerçekleştirildi. Tek bir parabolik ayna kullanılarak dört hücreli alıcıya geliştirilen hücreler yerleştirilerek bir model CPV modül oluşturuldu (Resim 5.5). Böylece 4 ayrı güneş hücresinden enerji elde edildi ve elde edilen verime göre maliyeti azaldı.



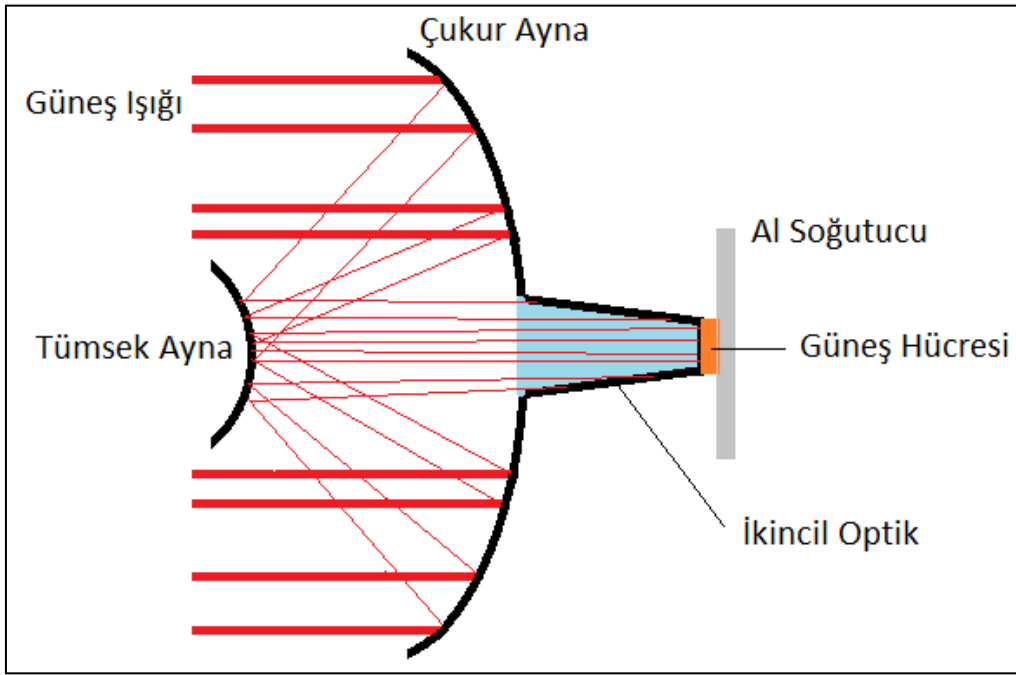
Resim 5.5. Parabolik çanak ayna CPV modülü

5.2.3. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcı modül sistemi

Fresnel mercek ile alıcı sistemin güneş hücresini düşük sıcaklıkta tuttuğu belirlendi ve parabolik ayna sistemi ile de 1x1cm²'lik güneş hücresi üzerine 500 güneş yoğunlaştırması

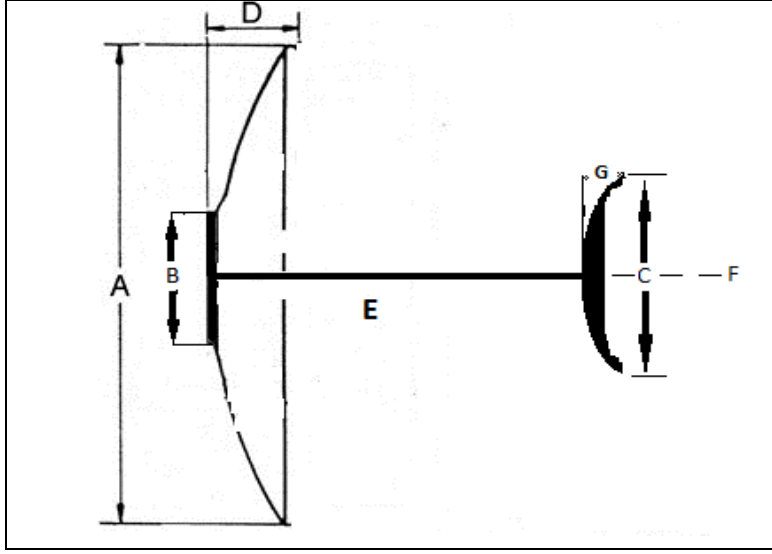
gerçekleştirildi. Böylece yapılan çalışmalar sonucunda ve elde edilen deneyimler sayesinde 16'lı yoğunlaştırıcı parabolik modül oluşturuldu.

Bu sistemde bir güneş hücresi üzerine 500 güneş ışığını yoğunlaştırmak amacıyla asal eksene paralel gelen ışınları odak noktasından geçecek şekilde toplayan bir çukur ayna ve odak noktasına gelen ışınları paralel olarak yansıtan bir tümsek ayna sistemi ile ikincil optikten oluşan bir modül üretildi (Şekil 5.9).



Şekil 5.9. Birincil ve ikincil sistemden oluşan yoğunlaştırıcı modül tasarımı

Sistem Şekil 5.10'daki gibi dizayn edildi. Burada 30 cm çap (A), 2 cm yükseklik (D), 28 cm odak uzaklıklı çukur ayna ve 5 cm çap (C), 0,3 cm yükseklik (G), 4,7 cm odak uzaklıklı tümsek ayna olacak şekilde tasarlandı. Ayrıca çukur aynanın odak noktası ile tümsek aynanın odak noktası çakıştırıldı ve bu iki ayna arasındaki mesafe 23,3 cm (E) olarak ayarlandı. Çukur aynanın asal ekseninde ikincil optik yerleştirmek amacıyla 5 cm çapa (B) sahip bir daire kesildi. Böylece 5 cm çaplı dairesel alana güneş ışınları dik olarak gelmesi sağlandı. İkincil optik çukur aynanın arka kısmında gelecek şekilde yerleştirildi. İkincil optiğe giren güneş ışınları homojenleştirilerek $1 \times 1 \text{ cm}^2$ alanlı hücre üzerine düşmesi tasarlandı.



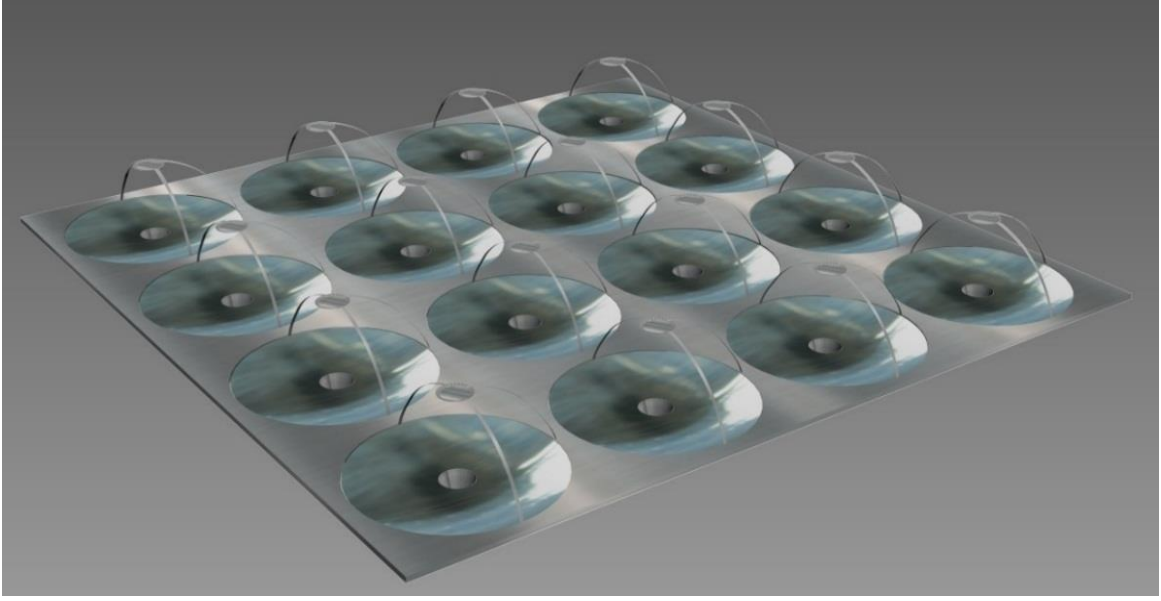
Şekil 5.10. Çukur ve tümsek ayna sistem şematığı

Sistemde kullanılan ayna yapısı olarak Al malzeme kullanıldı. Ayna kısımları polisaj tekniği kullanılarak parlatıldı. Parabolik aynalar ve ikincil optik sistemden kaynaklı oluşan ışınım kaybı yaklaşık olarak %85 civarındadır. Tüm kayıplar dikkate alındığında 1 cm^2 alana düşen ışınımın ~500 güneş olduğu belirlendi. Her bir hücre için modül bağımsız olarak tasarlandı ve Resim 5.6'daki gibi yapıldı.

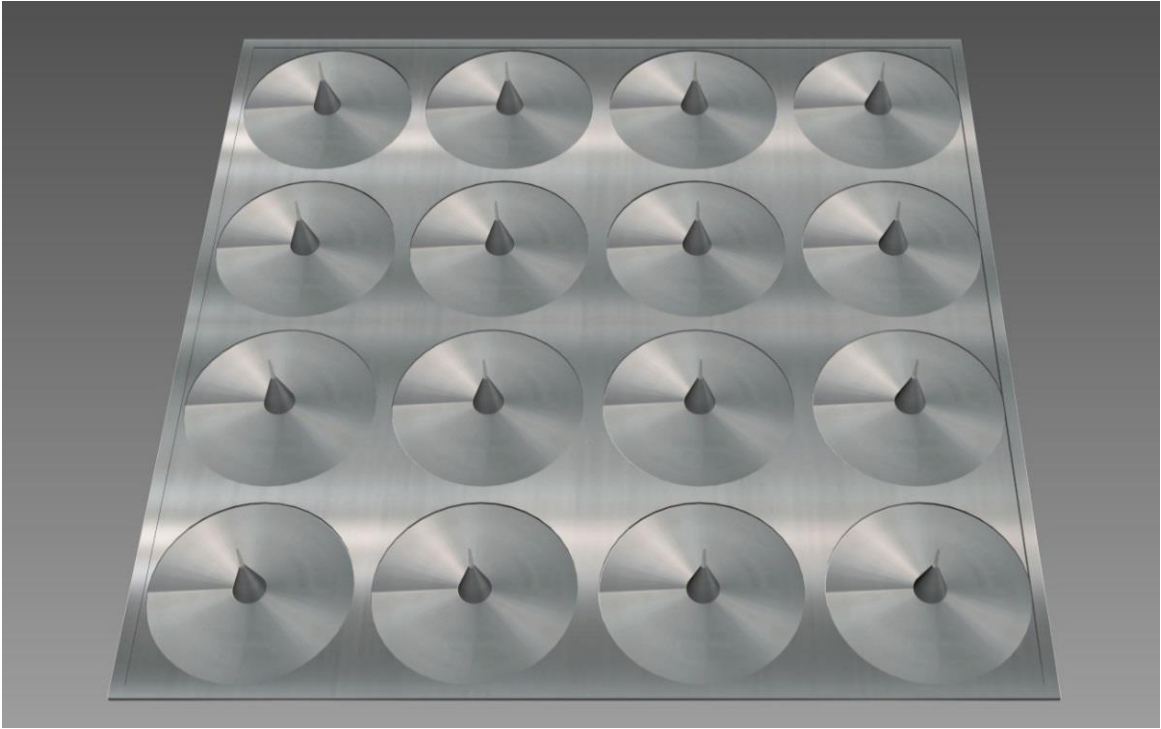


Resim 5.6. Bir güneş hücresi için oluşturulan modül

Bu tekli optik sistem, kullanılacak hücre kadar artırılmak suretiyle istenilen büyüklükte/güçte CPV yoğunlaştırıcı gerçekleştirilebilir. Tez kapsamında 16 adet hücre kullanılarak, 16 adet tekli optik sistem bütünleştirilmiştir. Kenar uzunlukları $135 \times 135 \text{ cm}^2$ olan 16'lı parabolik yoğunlaştırıcılı optik modül prototipi geliştirilmiş ve üretilmiştir. Tasarlanan sistemin şematik çizimleri Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'de verildi.



Şekil 5.11. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcı optik modülün ön yüzey tasarımı



Şekil 5.12. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcı optik modülün arka yüzey tasarımı

Şematik çizimleri verilen 16'lı parabolik yoğunlaştırıcı optik sistem Resim 5.7 ve Resim 5.8'de görüldüğü gibi gerçekleştirildi.

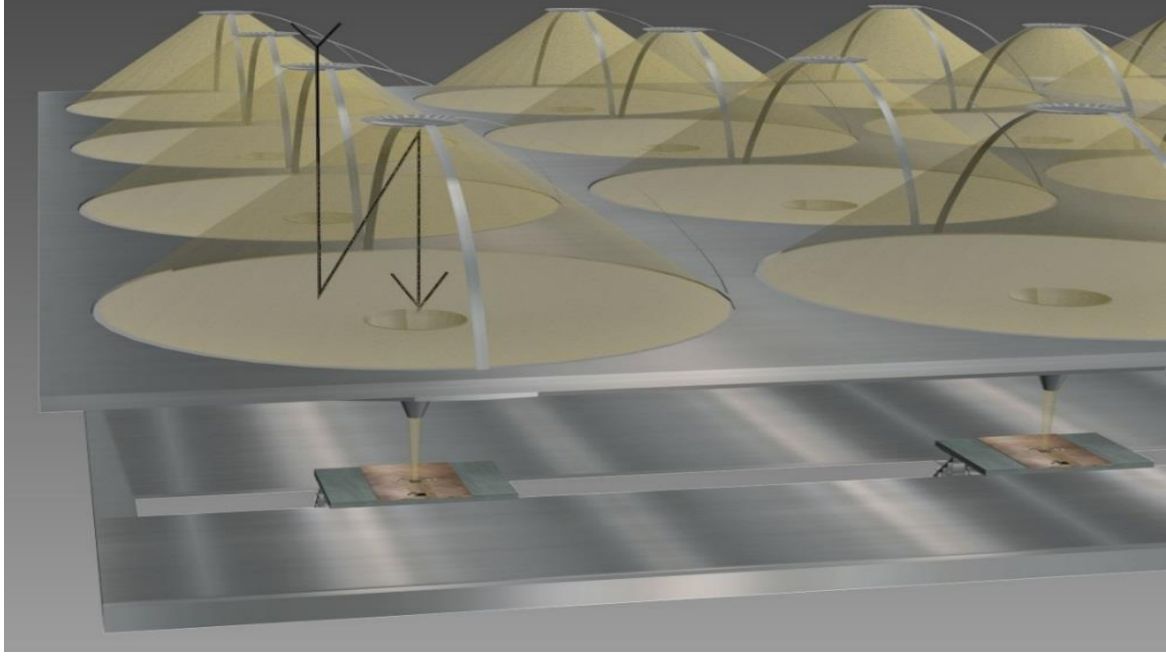


Resim 5.7. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcı optik modülün ön yüzeyi

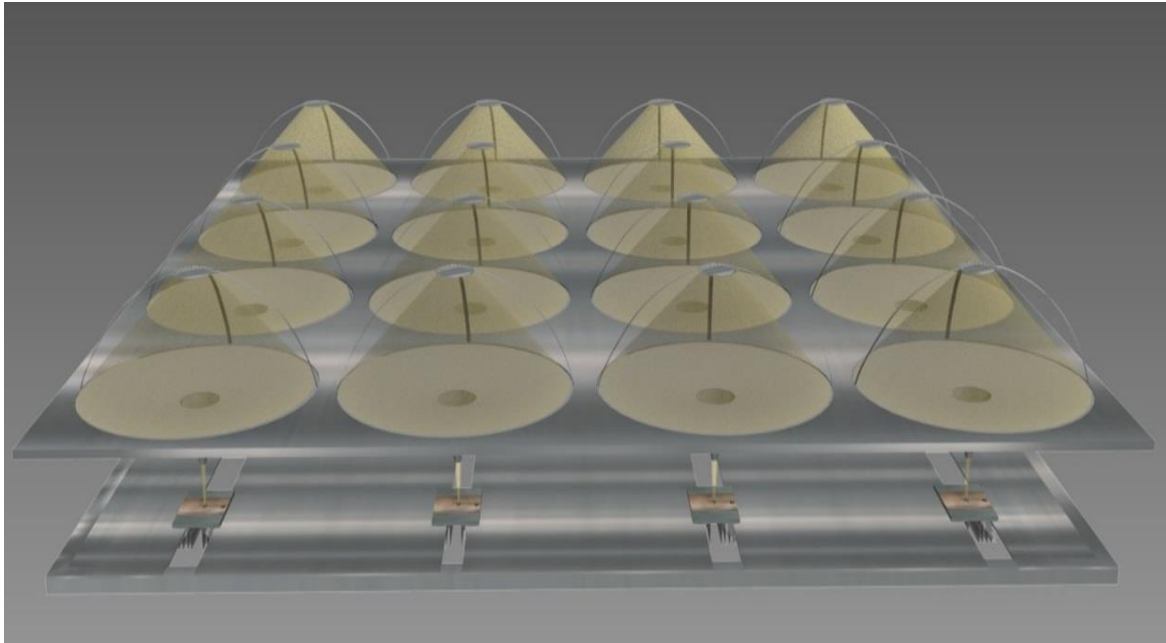


Resim 5.8. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcı optik modülün arka yüzeyi

16'lı parabolik yoğunlaştırıcılı optik modülün güneş ışığı altında alıcı sistem üzerinde oluşturduğu ışık yolu (Şekil 5.13) ve ışığı yoğunlaştırması (Şekil 5.14) tasarımları yapıldı.

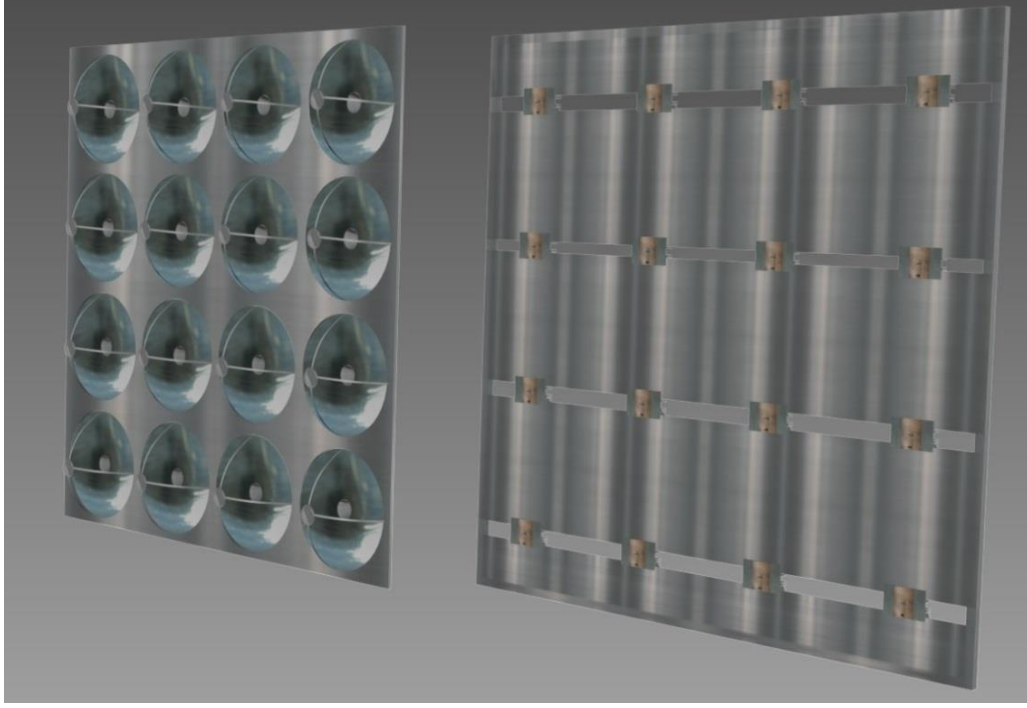


Şekil 5.13. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcılı optik modülün ışık yolu tasarımı



Şekil 5.14. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcılı optik modülün ışığı yoğunlaştırması tasarımı

Yoğunlaştırıcı optik sistem, ısı tankı ve hücre platformunun uygun geometrik yerleşimleri ile 16'lı parabolik yoğunlaştırıcılı prototip gerçekleştirilir. Bu prototipin hazırlanması için Şekil 5.15'deki gibi tasarımı yapıldı.



Şekil 5.15. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcılı prototip tasarımı

Tasarımı yapılan 16'lı parabolik yoğunlaştırıcılı prototip Resim 5.9 (ön görünüş) ve Resim 5.10'daki (arka görünüş) gibi gerçekleştirildi.



Resim 5.9. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcı prototip sistemin ön yüzey görünüşü



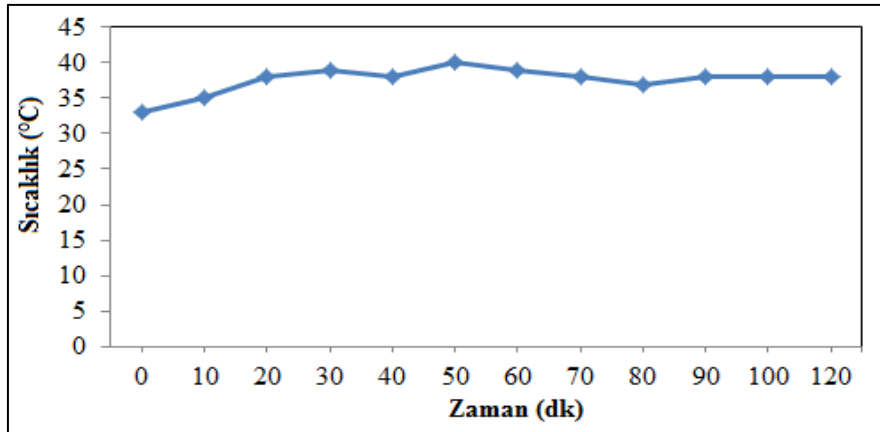
Resim 5.10. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcı prototip sistemin arka yüzey görünüşü

Sistem dış etkenlerden korunması amacıyla Resim 5.11'deki gibi kutulama sistemi yapıldı. Kutulama da Al malzemenen gerçekleştirildi. Böylece sistemin bütün malzemesi Al malzemenen yapıldı. Bu hem termal genişleme katsayısı açısından hem de maliyet açısından önemlidir.



Resim 5.11. 16'lı parabolik yoğunlaştırıcı prototip sistemin kutulanmış görünüşü

Kutulama sistemi ile birlikte prototip tamamlandı. Tamamlanan prototip sistemin optiksel ve sıcaklığa bağlı değerleri incelendi. 33 °C sıcaklığa sahip bir havada yaklaşık 500 güneş yoğunluk altındaki hücrenin sıcaklığı yaklaşık 38 °C ölçüldü. Şekil 5.16'da prototipe yerleştirilen bir güneş hücresinin sıcaklığını zamanın bir fonksiyonu olarak grafiği gösterilmiştir.



Şekil 5.16. 500 güneş yoğunluğu altında bir güneş hücresinin zamanla sıcaklık değişimi

Tez çalışmasının bu bölümünde CPV prototip modülün paketlenme çalışmaları tamamlandı. Hücrelerin yerleştirildiği platformun geometrik optimizasyonu gerçekleştirildi. Hücre platformlarının modül tabanı üzerine yerleştirilmesi tamamlandı. Sistem elektriksel ölçümleri için hazır hale geldi.

6. ARAŞTIRMA VE BULGULAR

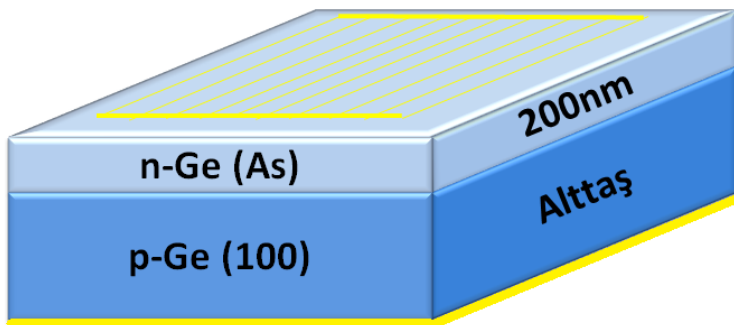
Bu tez çalışması kapsamında fabrikasyonu tamamlanan tek, iki ve üç eklemlı güneş hücrelerinin karanlık ve aydınlık akım-voltaj ölçümleri için Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Keithley 4200 I-V ölçüm sistemine entegre edilmiş 10 A'e kadar ölçüm alabilen Keithley 2602B güç ölçüm ünitesi ve AM1,5 standardında ölçüm alan Newport Oriel Sol1A güneş simülatörü kullanıldı (Resim 6.1). Güneş simülatörü 1 güneş için 0,1 W/cm²'ye kalibre edildi.



Resim 6.1. I-V ölçüm düzeneği (Gazi Fotonik)

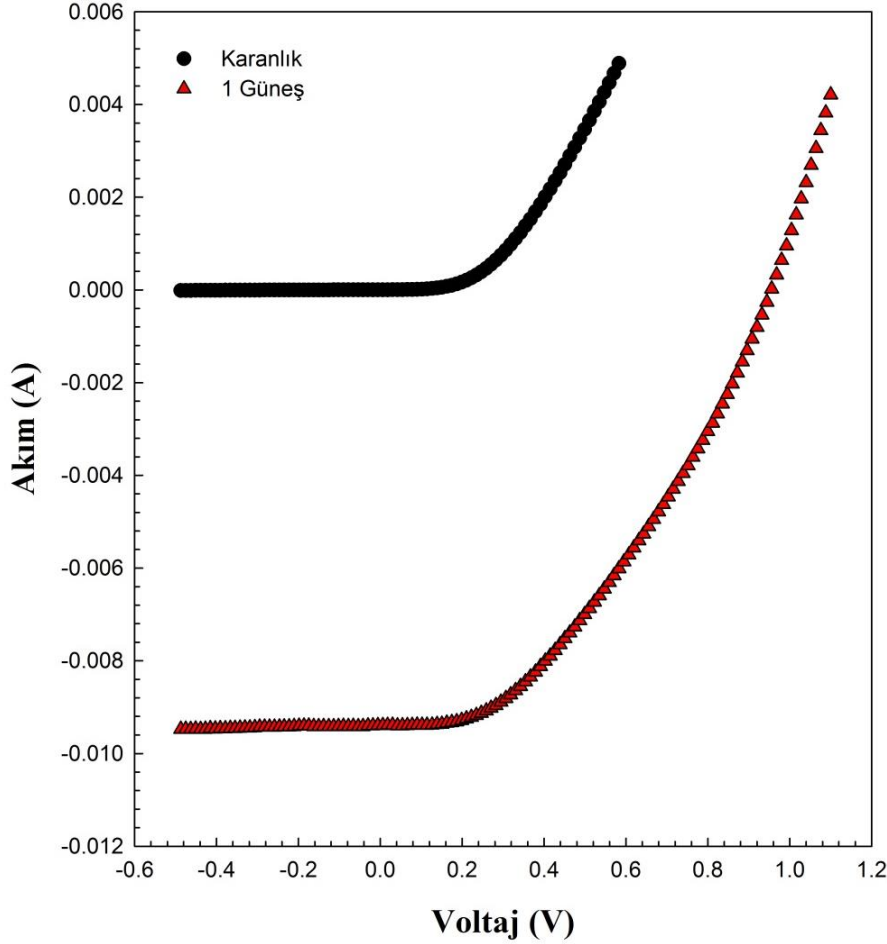
6.1. Tek Eklemlı Ge Güneş Hücre Yapısının Analizi

Alt ve üst kontaktarı oluşturularak fabrikasyonu tamamlanan p-n eklem Ge güneş hücre yapısının şematik gösterimi Şekil 6.1'de verildi.



Şekil 6.1. Ge güneş hücresinin şeması

Güneş hücresinin temel parametreleri olan I_{sc} , V_{oc} , FF ve η değerleri Şekil 6.2’de gösterilen karanlık ve bir güneş altında I-V ölçümlerinden elde edildi ve Çizelge 6.1’de verildi.



Şekil 6.2. Ge güneş hücre yapısının karanlık ve 1 güneş altındaki I-V grafiği

Çizelge 6.1. Ge güneş hücresinin temel parametreleri

I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
9,40	0,96	0,39	4,14

Çizelge 6.1’de görüldüğü gibi tek eklemli Ge güneş hücresi için verimlilik değeri %4,14 olarak elde edildi. Bu değer tez kapsamında kullanılacak olan üç eklemli GaInP/GaAs/Ge güneş hücresi için bir temel oluşturmaktadır. Tabaka sayısının artması ve fabrikasyon aşamalarının geliştirilmesi ile iki ve üç eklemli hücrelerde daha yüksek verim elde edildi.

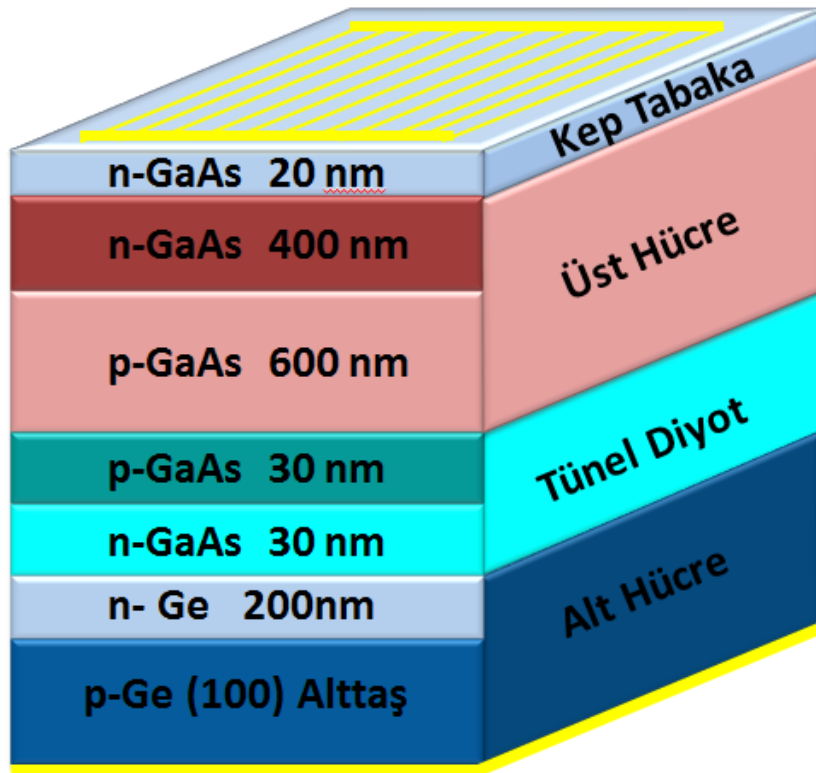
Sonuç olarak bu kısımda litografi ve metalizasyon süreçlerinin geliştirilmesinde önemli teknolojik bilgi ve becerilere ulaşıldı.

6.2. İki Eklemlı Güneş Hücre Yapılarının Analizi

Tezin bu bölümünde üç eklemlı GaInP/GaAs/Ge güneş hücresinin tabakalarını oluşturan ve fabrikasyonları tamamlanan GaAs/Ge ve GaInP/GaAs iki eklemlı hücrelerin analizleri gerçekleştirildi.

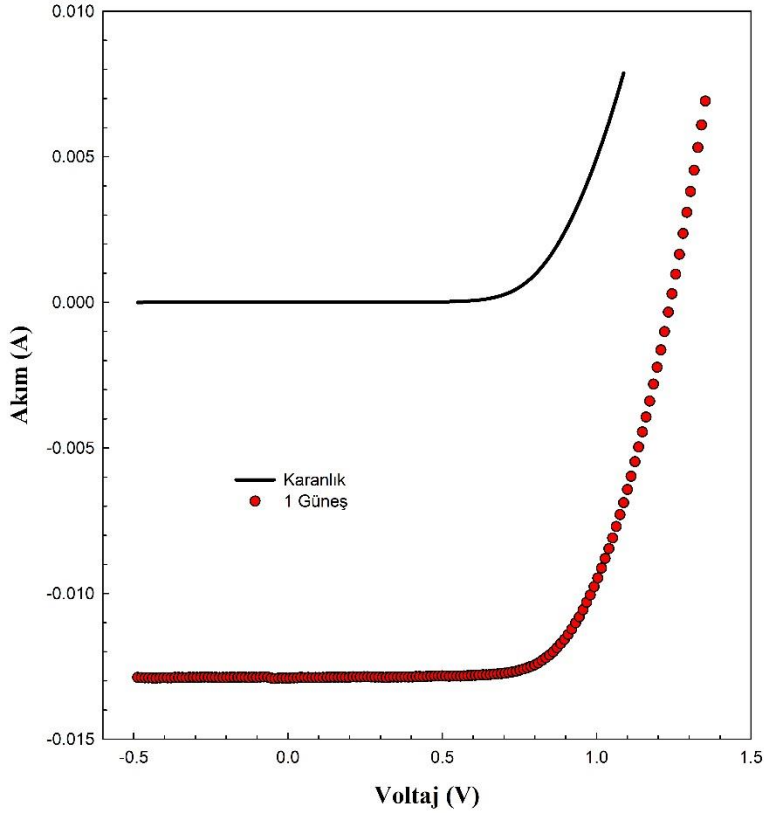
6.2.1. GaAs/Ge iki eklemlı güneş hücre yapısının analizi

MBE sisteminde büyütülen litografi ve metalizasyon işlemleri yapılarak fabrikasyonu tamamlanan GaAs/Ge güneş hücre yapısının şematik gösterimi Şekil 6.3'de ki gibidir.



Şekil 6.3. GaAs/Ge güneş hücresinin şematik gösterimi

GaAs/Ge güneş hücresinin I_{sc} , V_{oc} , FF ve η değerleri Şekil 6.4'de gösterilen karanlık ve bir güneş altında I-V ölçümlerinden elde edildi ve Çizelge 6.2'de verildi.



Şekil 6.4. GaAs/Ge güneş hücre yapısının karanlık ve 1 güneş altındaki I-V grafiği

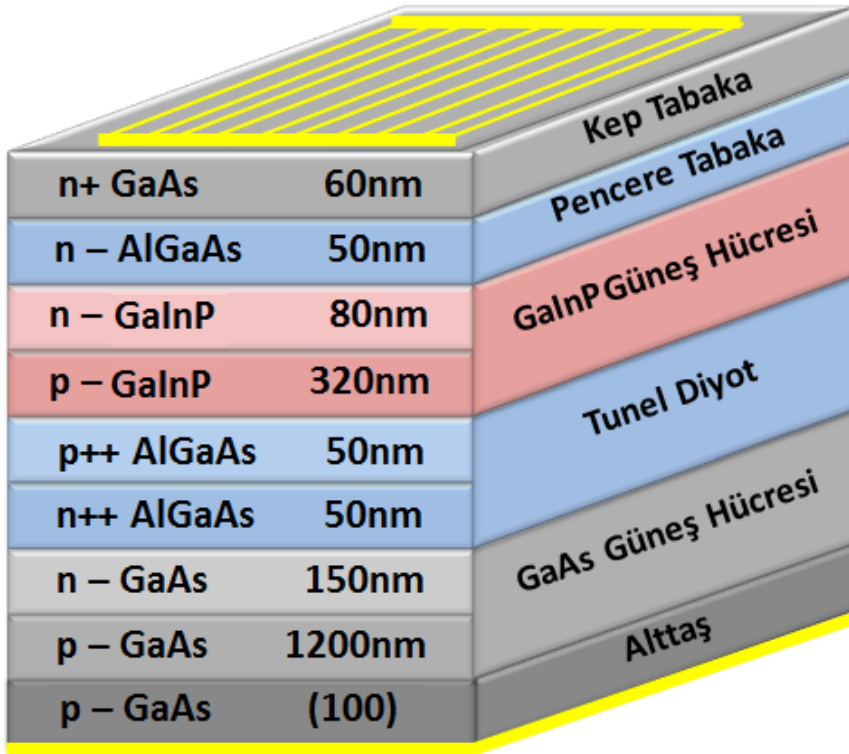
Çizelge 6.2. GaAs/Ge güneş hücresinin temel parametreleri

I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
12,36	1,21	0,60	10,56

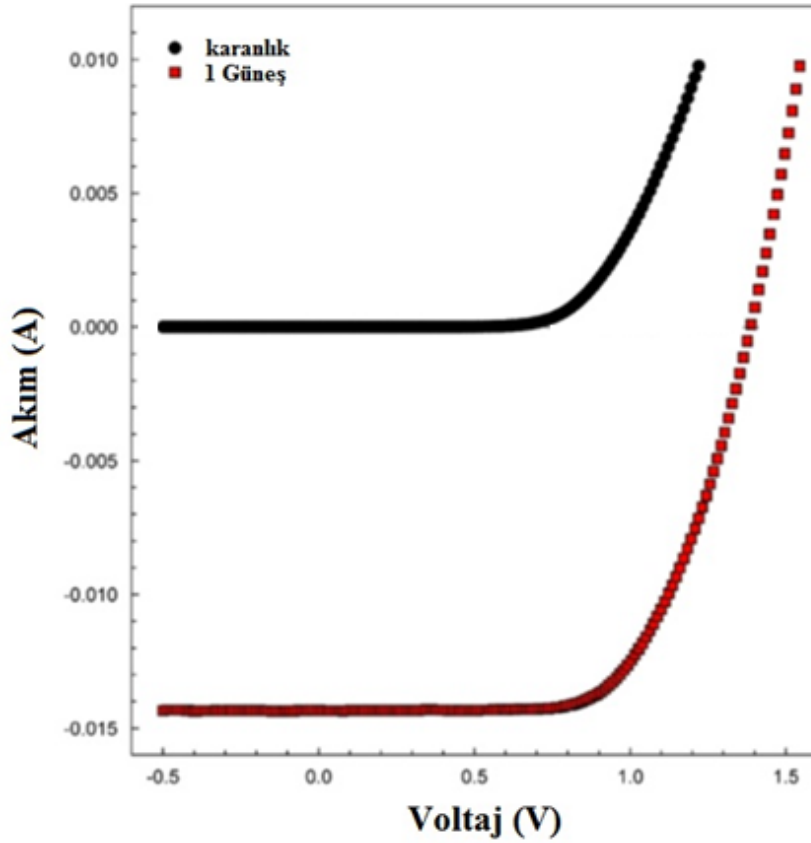
Çizelge 6.2’de görüldüğü gibi GaAs/Ge iki eklemli güneş hücresinin verim değeri %10,56 olarak elde edildi.

6.2.2. GaInP/GaAs iki eklemli güneş hücre yapısının analizi

Hücre fabrikasyonu tamamlanan GaInP/GaAs iki eklemli güneş hücresinin şematik gösterimi Şekil 6.5’de gösterildi. I_{sc} , V_{oc} , FF ve η değerleri Şekil 6.6’da gösterilen karanlık ve bir güneş altında I-V ölçümlerinden elde edildi ve Çizelge 6.3’de verildi.



Şekil 6.5. GaInP/GaAs güneş hücresinin şematik gösterimi



Şekil 6.6. GaInP/GaAs güneş hücre yapısının karanlık ve 1 güneş altındaki I-V grafiği

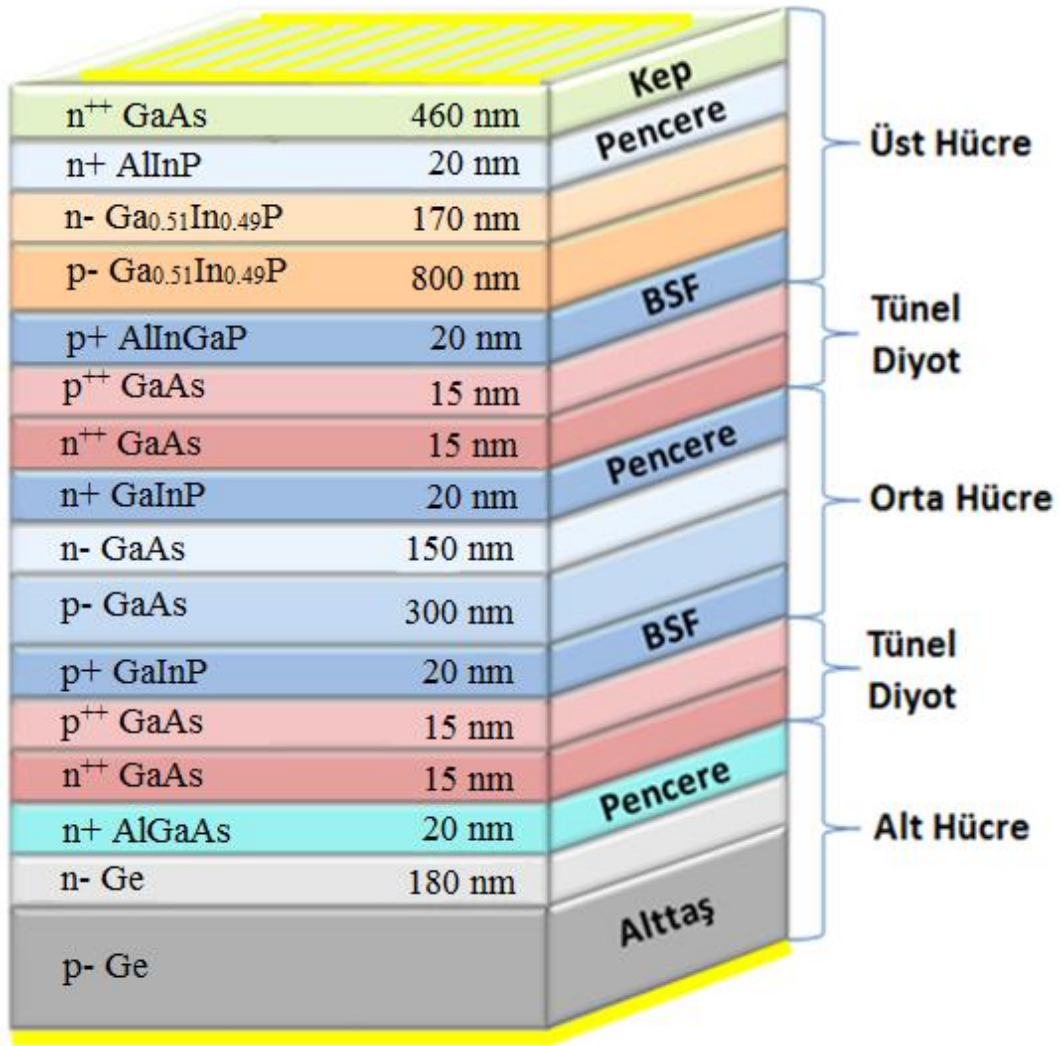
Çizelge 6.3. GaInP/GaAs güneş hücresinin temel parametreleri

I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
13,43	1,38	0,62	13,52

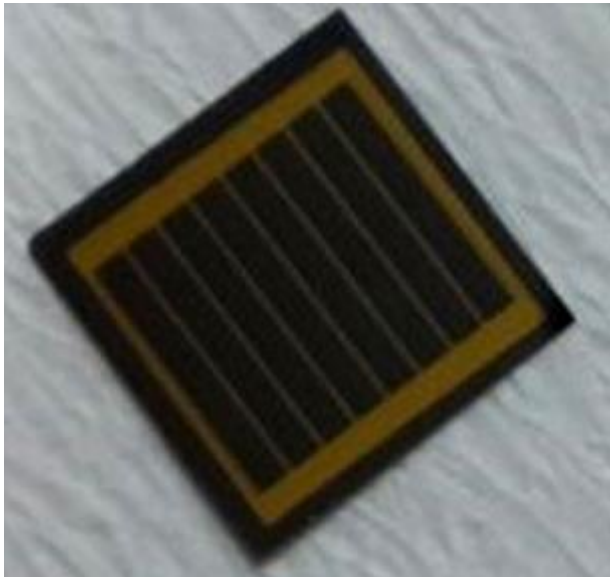
Çizelge 6.3’de görüldüğü gibi GaInP/GaAs iki eklemlı güneş hücresinin verim değeri %13,52 olarak elde edildi. GaInP/GaAs güneş hücresinde, GaAs/Ge güneş hücresine göre %28’lik verim artışı olduğu gözlemlendi. GaInP/GaAs güneş hücresi GaAs/Ge güneş hücresine göre güneş spektrumunun görünür bölgesini de soğurduğu için verimlilik değerinin yüksek çıkması beklenen bir sonuçtur [125].

6.3. GaInP/GaAs/Ge Üç Eklemlı Güneş Hücre Yapısının Analizi

Bu tez çalışmasının asıl amacı olan III/V grubu yarıiletken malzemeler kullanılarak MBE sisteminde büyütölen GaInP/GaAs/Ge üç eklemlı güneş hücresinin litografi ve metalizasyon işlemleri yapılarak fabrikasyon işlemi tamamlandı. Fabrikasyon işlemi tamamlanan GaInP/GaAs/Ge üç eklemlı güneş hücresinin şematik gösterimi Şekil 6.7’de ve resimi Resim 6.2’de verildi.

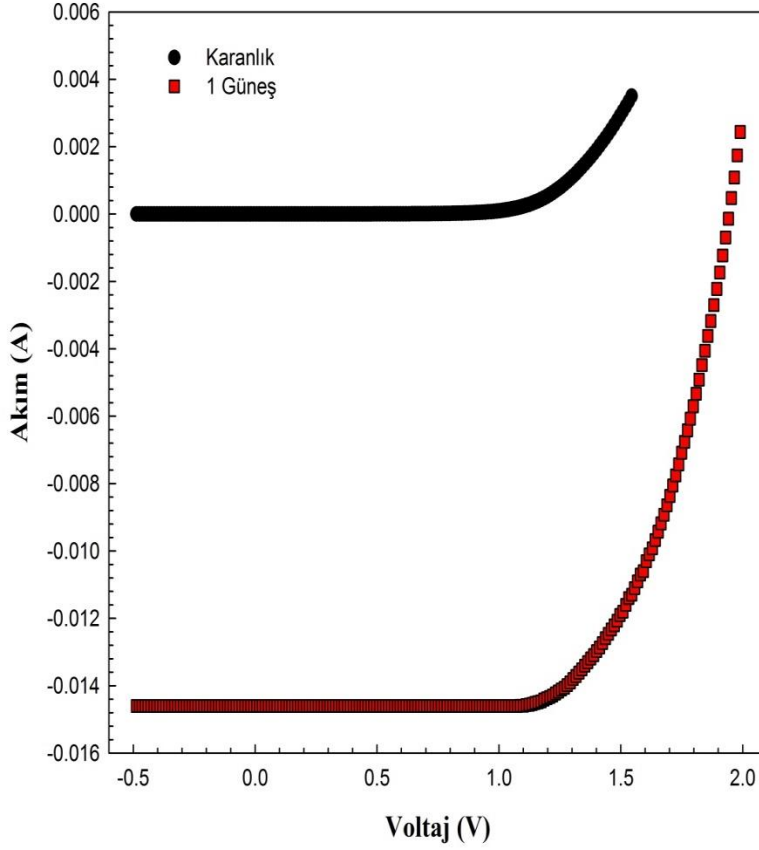


Şekil 6.7. GaInP/GaAs/Ge üç eklemlı güneş hücresinin şematık gösterimi



Resim 6.2. Fabrikasyonu tamamlanmış üç eklemlı hücre

GaInP/GaAs/Ge üç eklemlı güneş hücresinin I_{sc} , V_{oc} , FF ve η değerleri Şekil 6.8’de gösterilen karanlık ve bir güneş altında I-V ölçümlerinden elde edildi ve Çizelge 6.4’de verildi.



Şekil 6.8. GaInP/GaAs/Ge üç eklemlı güneş hücre yapısının karanlık ve 1 güneş altındaki I-V grafiği

Çizelge 6.4. GaInP/GaAs/Ge güneş hücresinin temel parametreleri

I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
14,48	1,94	0,67	22,15

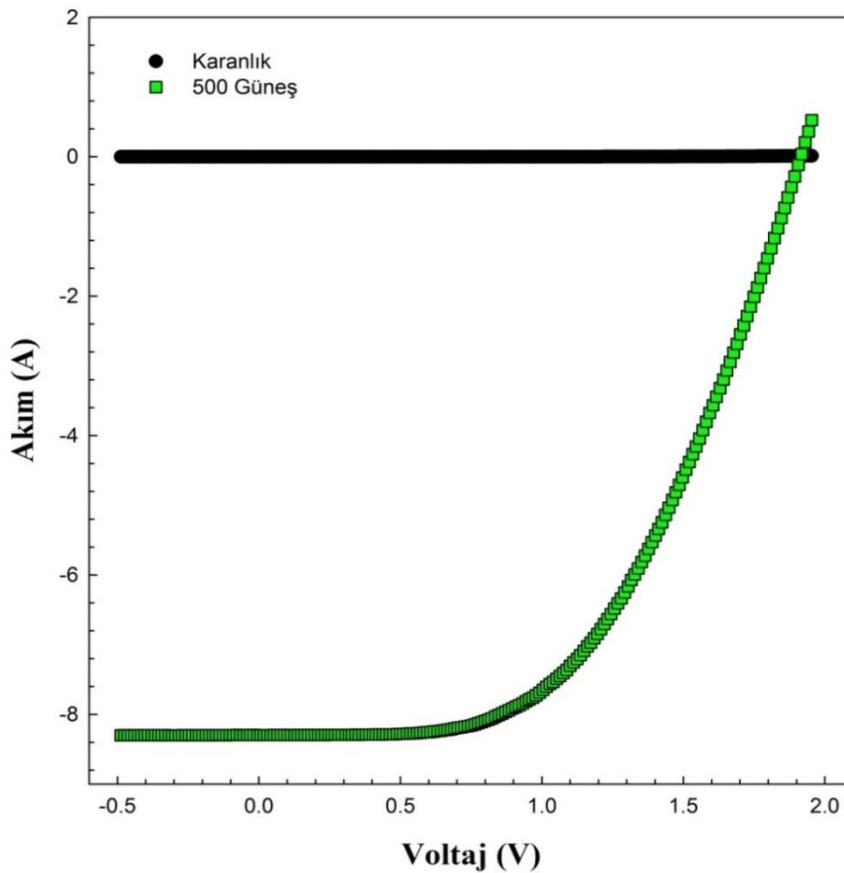
Çizelge 6.4’den de görüldüğü gibi GaInP/GaAs/Ge üç eklemlı güneş hücresinin verim değeri %22,15 olarak elde edildi. Üç eklemlı hücrenin verim değerinin iki eklemlı hücrelere göre çok daha yüksek olduğu görüldü. Bunun sebebi üç eklemlı hücrenin Şekil 2.22’de verildiği gibi güneş spektrumunun tamamını soğurmasından dolaydır. Eklem sayısının artmasına bağlı olarak hücre verimliliğinde ki artışın daha net bir şekilde

görülebilmesi için tek, iki ve üç eklemli güneş hücrelerinin verimlilikleri Çizelge 6.5’de bir arada verildi.

Çizelge 6.5. Eklem sayısına bağlı olarak hücre verimlilik değerleri

Eklem Sayısı	Hücre türü	η (%)
Tek	p-n eklem Ge	4,14
İki	GaAs/Ge	10,56
İki	GaInP/GaAs	13,52
Üç	GaInP/GaAs/Ge	22,15

GaInP/GaAs/Ge üç eklemli güneş hücresinin karanlık ve yoğunlaştırma sistemi kullanılarak elde edilen 500 güneş (50 W/cm^2) altında ki I-V grafiği Şekil 6.9’da verildi. GaInP/GaAs/Ge üç eklemli güneş hücresinin 500 güneş altındaki I_{sc} , V_{oc} , FF ve η değerleri Çizelge 6.6’da verildi.



Şekil 6.9. GaInP/GaAs/Ge üç eklemli güneş hücre yapısının karanlık ve 500 güneş altındaki I-V grafiği

Çizelge 6.6. GaInP/GaAs/Ge güneş hücresinin 500 güneş için temel parametreleri

I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	FF	η (%)
8270	1,98	0,71	27,35

Çizelge 6.5 ve 6.6'dan da görüleceği gibi I_{sc} değerinde 1 güneşe göre 500 güneşte artış olmasına rağmen, V_{oc} ve FF değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Verimlilik değerinde ise 500 güneş altında 1 güneşe göre %23,50'lik bir verim artışı olduğu görülmüştür. Bu sonuç ışığında yoğunlaştırıcı sistem sayesinde verimlilik değerinde artış meydana gelmiştir. Bu tez çalışmasının çıkış amacı olan verimlilik artışı başarılı bir şekilde sağlanmıştır.

500 güneş yoğunlaştırmalı 16 adet modülden oluşan prototipe GaInP/GaAs/Ge üç eklemli güneş hücreleri yerleştirildi. Bir modülden 13,67 W elde edildi. Modüller seri bağlanarak akım sabit tutuldu ve voltajlarının toplamı alındı. Bu 16 adet modülden oluşan prototipin çıkış gücü 218,80 W olması beklenirken %22'lik sistemsel kayıplardan dolayı 170,65 W olarak ölçüldü.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında MBE tekniği ile büyütülmüş olan tek eklemli p-n Ge, iki eklemli GaAs/Ge ve GaInP/GaAs, üç eklemli GaInP/GaAs/Ge güneş hücrelerinin fabrikasyonları yapıldı ve elektriksel ölçümleri ile temel güneş hücre parametreleri belirlendi. Fabrikasyon aşamasında Fotolitografi, Profilometre ve Termal buharlaştırma cihazları kullanıldı. Elektriksel ölçüm aşamasında I-V ve Solar Simülatör cihazları kullanıldı. Bu tezin temel hedefi, güneş hücrelerinin verimini artırmak ve yoğunlaştırıcı sistemler kullanarak çıkış gücü maliyetini azaltmaktır. Bu hedef doğrultusunda güneş spektrumunun geniş bir bölgesini foto-akıma dönüştürebilen GaInP/GaAs/Ge üç eklemli güneş hücrelerinin fabrikasyonu yapıldı ve prototip yoğunlaştırıcı hücre geliştirildi.

Tek, iki ve üç eklemli yapıların küçük alanlı (1 cm^2) güneş hücresi fabrikasyonları litografik teknikle oluşturulan desenlerin püskürtme ve vakum ısı buharlaştırma sistemleri kullanılarak gerçekleştirildi. AM1,5 ışınımı altında PV dönüşüm verimlilik değerleri belirlendi. Ayrıca güneş ışığını 500 kat yoğunlaştırabilecek parabolik ayna ve yoğunlaştırıcı sistem tasarımı yapıldı. Sistemin optik verimliliği belirlendi. Hücre üzerindeki ışık dağılımının homojenliğini sağlayan konik yapıli ikincil optik elemanlar geliştirildi. Ayrıca, tez kapsamında PV hücrelerin üzerine yerleştirilebildiği bir hücre alıcısı prototipi geliştirildi. Bu hücre platformunun Al soğutucuya monte edilmesi ile üzerine düşen yoğunlaştırılmış ışınım ile oluşan $925 \text{ }^\circ\text{C}$ 'lik ısıyı $40 \text{ }^\circ\text{C}$ civarına düşürdüğü belirlendi. Geliştirilen GaInP/GaAs/Ge üç eklemli güneş hücre yapısı-hücre platformu-soğutucu ve yoğunlaştırıcı ile model CPV panel/modül ürünü elde edildi. Oluşturulan prototip CPV panel 16 adet yoğunlaştırıcı ayna ve 16 adet üç eklemli hücre ve soğutucudan oluşturuldu.

Tek eklemli Ge güneş hücresi için verimlilik değeri %4,14 olarak elde edildi. GaAs/Ge iki eklemli güneş hücresinin verim değeri %10,56 olarak elde edildi. GaInP/GaAs iki eklemli güneş hücresinin verim değeri %13,52 olarak elde edildi. GaInP/GaAs güneş hücresinde, GaAs/Ge güneş hücresine göre %28'lik verim artışı olduğu gözlemlendi. GaInP/GaAs güneş hücresi GaAs/Ge güneş hücresine göre güneş spektrumunun görünür bölgesini de soğurduğu için verimlilik değeri daha yüksek çıktı. GaInP/GaAs/Ge üç eklemli güneş hücresinin verim değeri %22,15 olarak elde edildi. Üç eklemli hücrenin verim değerinin iki

eklemlı hücrelere göre çok daha yüksek olduğu görüldü. Bunun sebebi üç eklemlı hücrenin güneş spektrumunun tamamını soğurmasından dolaydır. Ayrıca GaInP/GaAs/Ge üç eklemlı güneş hücresinin CPV sistem ile 500 güneş altında verimlilik değeri %27,35 olarak hesaplandı. Verimlilik değeriinde ise 500 güneş altında 1 güneşe göre %23,50'lik bir verim artışı olduğu görüldü. Bu sonuç ışığında CPV sistem sayesinde verimlilik değeriinde artış meydana geldiği belirlendi. Bu tez çalışmasının çıkış amacı olan verimlilik artışı başarılı bir şekilde sağlandığı görülmüş oldu.

500 güneş yoğunlaştırma yapan bir CPV modülden 13,67 W elde edildi. 16 adet CPV modülden oluşan prototip yapıldı. Bu prototipin çıkış gücü 218,80 W olması beklenirken %22'lik sistemsel kayıplardan dolayı 170,65 W olarak ölçüldü.

Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı'nın 00587.STZ.2010-1 kodlu SANTEZ projesi tarafından desteklenen ve Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde ki cihazlar kullanılarak yapılan bu çalışma sayesinde günümüz PV teknolojisinde önemli bir yere sahip olan üç eklemlı GaInP/GaAs/Ge güneş hücre yapısının fabrikasyon ve CPV sistem prototip aşamaları tamamlanmıştır. Bu projenin çıkış amacı olan yüksek verimliliğe sahip yoğunlaştırılmış güneş hücre model/modül üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Üç eklemlı hücreden %22,15 verim elde edilirken CPV sistem ile 500 güneş oluşturularak %27,35 verimlilik elde edilmiştir. Verim değeriinde %23,50'lik bir artış gözükmemektedir ki bu sonuç projenin başarısını da tescillemektedir. 16 adet hücreden oluşan CPV panelden de elde edilen güç 170,65 W olarak ölçüldü. Bu güç değeri oldukça ilgi çekicidir. Bu çalışma sonucunda elde edilen hücrelerin yüksek verimliliğe sahip modüllerde kullanılması beklenilmektedir. İleriki çalışmalarda, daha yüksek verimliliğe sahip üç eklemlı GaInP/GaAs/Ge güneş hücre yapılarının verimlilik değeriilerini arttırmak üzerine çalışmalara devam edilecektir. 16'lı CPV sistemden elde edilecek verimlilik değeriindeki kayıpları azaltmak için de çalışmalr yapılacaktır.

KAYNAKLAR

1. Çengel, Y.A., Boles, M. (2013). Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik. (Yedinci Basım). Ankara: *Palme Yayıncılık*, 38-44.
2. İnternet: Polatkan D.S. (2010). Güneş elektriğinde Türkiye için öncelikler [ÖZET]. Solar Future 2010 Bildiriler Kitabı. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.solar-santral.com%2Fmenuis%2Fsolar-future-2010181750.pdf&date=2015-12-22>, Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.
3. Dinçer, F., (2011). Türkiye’de Güneş Enerjisinden Elektrik Üretim Potansiyeli – Ekonomik Analizi ve AB ülkeleri ile Karşılaştırmalı Değerlendirme. *KSU Mühendislik Dergisi*, 8-15.
4. IEA, (2012). Key World Energy Statistics. International Energy Agency.
5. Dilaver, Z. and Hunt, L.C. (2011). Turkish Aggregate Electricity Demand: An Outlook to 2020. *Surrey Energy Economics Centre*.
6. Ünalın, S. (2000). Alternatif enerji kaynakları. *Ders Notu*, 169, Kocaeli.
7. Acaroğlu, M. (2003). Alternatif Enerji Kaynakları. *Atlas Yayın Dağıtım*, 3-175, İstanbul.
8. international Energy Agency, (2010). World Energy Outlook 2010. IEA Pub, 731.
9. İnternet: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü EİE’nin Güneş Enerjisi Çalışmaları. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.yegm.gov.tr%2Fturkce%2FYEK%2Fgunes%2Feiegunes.html&date=2015-12-22>, Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.
10. Kılıç, A. ve Öztürk, A. (1983). Güneş Enerjisi. *Kipaş Dağıtımçılık*, Çağaloğlu, İstanbul.
11. İnternet: Gazi Üniversitesi Alternatif Enerji Kaynakları Ders Notları (2008). URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.obitet.gazi.edu.tr%2Fobitet%2Falternatif_enerji%2Falt_enerji_kay_ders_notlari.pdf&date=2015-12-22, Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.
12. İnternet: Polatkan, D.S. (2009). Fotovoltaik Güneş Elektriği Sistemler. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.emo.org.tr%2Fekler%2F2f3e889bb5275c7_ek.pdf&date=2015-12-22, Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.
13. Karaj, I. (2012). Development of Solar Energy in Iran. *Advances in Environmental Biology*, 6(7): 2195-2202.

14. Yıldız, T. (2012). Turkey Renewable Targets, Plenary Meeting Budget Discussions (Genel Kurul Bütçe Görüşmeleri). December.
15. Anonymous, (2009). World Energy Outlook 2008. *IEA*, 578, Paris.
16. İnternet: T.C. Başbakanlık Mevzuatı Geliştirme ve Yayın Genel Müdürlüğü “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun”. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.mevzuat.gov.tr%2FKanunlar.aspx&date=2015-12-22> , Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.
17. Ondraczek, J. (2014). Are we there yet Improving solar PV economics and power planning in developing countries: The case of Kenya. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 604-615.
18. EPIA, (2011). Global Market Outlook for Photovoltaics Until 2015. Brussels.
19. İnternet: Enerji Günlüğü, Dünya güneş enerjisi kurulu gücü geçen yıl 37 GW arttı. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fenerjigunlugu.net%2Fdunya-gunes-enerjisi-kurulu-gucu-gecen-yil-37-gw-_7445.html&date=2015-12-22, Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.
20. Nakir, İ. (2007). PV panellerinde GTS ve MGTS kullanarak verimliliğin artırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
21. Çelik, A.N. (2004). Present Status of Photovoltaic Energy in Turkey and Cycle Techno-Economic Analysis of a Grid-Connected Photovoltaic–House. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 1-18.
22. Andreev, V.M., Grilikhes, V.A., Romyantsev, V.D. (1997). Photovoltaic conversion of concentrated sunlight. *John Wiley & Sons Ltd*, England, 185-259.
23. Mahderekal I., Boehm R.F., (2004). Thermal Analysis of a Concentrating Photovoltaic Receiver. *International Solar Energy Conference*, 9: 247-255.
24. Shahjerdi, D. et al, (2012). High–efficiency thin–film InGaP/InGaAs/Ge tandem solar cells enabled by controlled spalling technology, *Appl. Phys. Lett.*, 100: 053901.
25. Schropp, R.E.I., Li, H., Franken, R.H.J., Rath, J.K., van der Werf, C.H.M., Schuttauf, J.A., and Stolk, R.L. (2009). Nanostructured thin films for multibandgap silicon triple junction solar cells. *Solar Energy Mat. & Solar Cells*, 93: 1129.
26. Wen, Y., Wang, Y.P., Watanabe, K., Sugiyama, M., and Nakano, Y., (2012). Enhanced Carrier Escape in MSQW Solar Cell and Its Impact on Photovoltaics Performance. *IEEE J. Photovolt*, 2: 221.

27. Fraas, L., Paratin, L., (2010). Solar Cells and Their Applications. Second Edition, *John Wiley*, 3–5.
28. McDonald, M., Horne, S. and Conley, G. (2007). Concentrator design to minimize LCOE. in Proc. SPIE 6649, High and Low Concentration for Solar Electric Applications II, San Diego.
29. Kınacı, B. (2013). III–V Grubu Güneş Hücre Yapılarının Epitaksiyel Büyütülmesi ve Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
30. Quaschnig, V. (2005). Understanding Renewable Energy Systems. Earthscan London.
31. Öztürk, H.H. (2008). Güneş Enerjisi ve Uygulamaları. Birsen Yayınevi, İstanbul, 2-237.
32. Yerebakan, M. (2010). Güneş Kolektörü Uygulamaları. İstanbul Ticaret Odası, İstanbul, 26-145.
33. Akgün, A. (2006). Mikrodenetleyici Tabanlı Güneş Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretim Sisteminin Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 14.
34. Messenger, R.A. ve Ventre, J. (2010). Photovoltaic Systems Engineering. 3rd Ed., CRC., USA.
35. Karamanav, M. (2007). Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
36. Hankins, M. (2010). Stand - Alone Solar Electric Systems: The Expert Handbook for Planning, Design and Installation. London, Earthscan.
37. Robertson, K., Athienitis, A. (2009). Solar Energy For Buildings: Introduction: Solar Design Issues. Canada Mortgage And Housing Corporation.
38. İnternet: Solar Cell Central. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fsolarcellcentral.com%2Fsolar_page.html&date=2015-12-22, Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.
39. Şen, Z. (2007). Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques: Atmosphere, Environment. Climate Change and Renewable Energy, Springer-Verlag London Limited, İstanbul, 208.
40. Iqbal, M. (1983). An introduction to Solar Radiation. Academic Press, Toronto.
41. Güçlü, S. (2009). Dumlupınar Üniversitesi Merkez Kampüs Çevre Aydınlatma Elektrik Enerjisinin; Güneş Enerjisi ile Sağlanması. Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 1-10.

42. Boztepe, M. (2005). PV Sistem Tasarımı. Yeni Enerji Kaynakları, 46-48.
43. Engin, R. (1995). Güneş Pilleri. Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Fakültesi Fizik Bölümü Yayınları 3, 151.
44. Enarun, D. (1987). Bina Tasarım Aşamasında Hacim İçindeki Doğal Işık Dağılımını Belirlemek İçin Bir Model. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
45. Jackson, F. (2008). Planning and Installing Photovoltaic Systems, A guide for installers, architects and engineers second edition. Londra, İngiltere, 21-22.
46. Batman, M.A. (2001). Elektrik üretimi için güneş pillerinin kullanımında verimi artırıcı yeni bir yöntem. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
47. Köksal, F., Altuntaş, M., Dinçer, M., Başaran, E. (2006). Katıhal Fiziği. Nobel Akademik Yayıncılık, İstanbul. 110–210.
48. Temiz Enerji Vakfı, (2001). Güneş-Elektrik Dönüşümleri, Fotovoltaik Güneş Gözeleri ve Güç Sistemleri. 9-56.
49. Dursun, B., Ulusoy, I. (2010). Fotovoltaik ve fiber optik sistemlerin aydınlatma sistemlerinde kullanılması. 251–253.
50. İnternet: Antoine-Cesar Becquerel (2010). Encyclopedia Britannica. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.britannica.com%2FEBchecked%2Ftopic%2F58017%2FAntoine-Cesar-Becquerel&date=2015-12-22>, Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.
51. Luque, A. and Hegedus, S. (2003). Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley, 12.
52. Bertness, K.A., Kurtz, S.A., Friedman, D.J., Kibbler, A.E., Kramer, C., Olson, J.M. (1994). App. Phys. Lett., 65: 989–991.
53. Friedman, D., Kurtz, S.A., Bertness, K.A., Kibbler, A.E., Kramer, C., Olson, J.M, King, D.L., Hansen, B.R. (1995). Accelerated publication %30.2 efficient GaInP/GaAs monolithic two-terminal tandem concentrator cell. Prog. Photovolt.: Res. Appl., 3:47–50.
54. Nathalie, R.I. (2006). Solid hybrid dye-sensitized solar cells: new organic materials, charge recombination and stability. Ecole Polytechnique Federale de Lausanne,
55. Masafumi, Y., Ken-Ichi N., Takuo S. (2008). Novel materials for high efficiency III–V multi-junction solar cells. Solar Energy 82:73–80.

56. Law, D.C., King, R.R., Yoon, H. (2008). Future technology pathways of terrestrial III–V multijunction solar cells for concentrator photovoltaic systems. *Solar Energy Materials & Solar Cells*.
57. İnternet: Eric Wesoff (2013). Sharp Hits Record 44.4% Efficiency for Triple-Junction Solar Cell. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.greentechmedia.com%2Farticles%2Fread%2FSharp-Hits-Record-44.4-Efficiency-For-Triple-Junction-Solar+Cell%3Futm_source%3Dfeedburner%26utm_medium%3Dfeed%26utm_campaign%3DFeed%253A%2Bgreentechmedia%252Fnews%2B%28Greentech%2BMedia%253A%2BNews%29%26utm_source%3Drss%26utm_medium%3Drss.&date=2015-12-22, Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.
58. İnternet: Serhan KÖKHAN (2013). Solar Hücre Verimliliğinde %44.7 ile Dünya Rekoru. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fteknolojikgelismeler.net%2Falternatif-enerji-2%2Fsolar-hucre-verimlilikinde-447-ile-dunya-rekoru%2F&date=2015-12-22>, Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.
59. İnternet: Güneş Enerji Sektörü 2014 Sektör Değerlendirmesi. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.elektrikport.com%2Fsektor-rehberi%2Fgunes-enerjisi-sektoru-2014-sektor+degerlendirmesi%2F14800%23ad-image-0&date=2015-12-22>, Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.
60. Erol, A., Balkan, N. (2013). *Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları*. Seçkin Yayınları, Ankara. 50-150.
61. Gordon, I., Vallon, S., Mayolet, A., Beaucarne, G., Poortmans, J. (2010). Thin–film monocrystalline–silicon solar cells made by a seed layer approach on glass–ceramic substrates. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 94: 381–385.
62. Hu, C., White, R.M. (1983). *Solar Cells from basic to Advanced Systems*. Mc Graw-Hill Book Co., University of California, Berkeley, 182-185.
63. Çolak, Ş.Ç., (2010). Fotovoltaik Paneller Yardımı ile Güneş Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretiminin Maliyet Analizi ve Gelecekteki Projeksiyonu. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 23-24, 31
64. Gordon, I., Carnel, L., Gestel, D.V., Beaucarne, G., and Poortmans, J. (2007). “8% Efficient Thin–Film Polycrystalline–Silicon Solar Cells Based on Aluminum– Induced Crystallization and Thermal CVD”, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 15: 575–586.
65. İnternet: Monokristalin Silikon. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Ftr.wikipedia.org%2Fwiki%2FMonokristalin_silikon%23Verimlilik&date=2015-12-22, Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.

66. İnternet: İnce film solar paneller. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.turksan.com%2Fince-film-solar-paneller.html&date=2015-12-22>, Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.
67. Koç, A., Karakaya, F., Altun, H. (2007). Fotovoltaik Pil Teknolojileri ve Yenilenebilir Enerji Politikaları. EMO Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi ve Fuarı, Eskişehir, 1-5.
68. NASA, Aloysius F.H. (2007). Chemical Fabrication Used to Produce Thin-Film Materials for High Power-to-Weight-Ratio Space Photovoltaic Arrays.
69. Schmidt, M., Korte, L., Laades, A., Stangl, R., Schubert, Ch., Angermann, H., Conrad, E., Maydell, K.V. (2007). Physical aspects of a-Si:H/c-Si hetero-junction solar cells. *Thin Solid Films*, 515: 7475–7480.
70. İnternet: First Solar PV Modules. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.firstsolar.com%2FImages%2Fmodule_series2_v160w.jpg&date=2015-12-22, Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.
71. EPIA (European Photovoltaic Industry Association) ve Gi (Greenpeace International) (2011). *Solar Generation 6: Solar photovoltaic electricity empowering the world*. Brussels.
72. Sites, J., Pan, J. (2007). Strategies to increase CdTe solar-cell voltage, *Thin Solid Films*, 515: 6099–6102.
73. *Accounts of Chemical Research*, (2009). 42(11), 1788-1798.
74. Repins, I., Contreras, M.A., Egaas, B., DeHart, C., Scharf, J., Perkins, C.L., To, B., and Noufi, R. (2008). 19.9%-efficient ZnO/CdS/ CuInGaSe₂ Solar Cell with 81.2% Fill Factor, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 16: 235–239.
75. Islam, M.M., Ishizuka, S., Yamada, A., Sakurai, K., Niki, S., Sakurai, T., Akimoto, K. (2009). CIGS solar cell with MBE-grown ZnS buffer Layer. *Solar Energy Mat. & Solar Cells*, 93: 970–972.
76. Kaya, E., Apaydin, D.H., Yıldız, D.E., Toppare, L., Cirpan A., (2012). Solution processable benzotriazole and fluorene containing copolymers for photovoltaic applications, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 99, 321.
77. Kroon, J.M., Veenstra, S.C., Sloof, L.H., Verhees, W.J.H., Koetse, M.M., Sweelssen, J., Schoo, H.F.M., Beek, W.J. E., Wienk, M.M., Janssen, R.A.J., Yang, X., Loos, J., Mihailetcu, V.D., Blom, P.W.M., Knol, J., Hummelen, J.C. (2007). Nanocrystalline dye-sensitized solar cells having maximum performance, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 15, 1-8.

78. Gratzel, M. (2003). Dye-sensitized solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 4 :145–153.
79. Asar, T., Sarikavak, B., Öztürk, M.K., Mammadov T., Özçelik, S. (2009). Effects of annealing on the structural properties of GaAs-based quantum well solar cells. *J.Opto. Adv. Mater.*, 11.
80. Yamaguchi, M. et al. (2005). Multi-junction III–V solar cells: current status and future potential, *Solar Energy*, 79.
81. Zweibel, K. (1984). *Basic photovoltaic principles and methods*, New York: Van Nostrand Reinhold.
82. Shockley W., Queisser, H. J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells, *Jornoul of Applied Physics*, 32, 510.
83. Burnett, B. (2002). *The basic physics and design of III-V multijunction solar cells*.
84. Roman, J.M. (2004). *State-of-the-art of III-V solar cell fabrication technologies, device designs and applications*, *Advanced Photovoltaic Cell Design*.
85. Smestad, G.P. (2002). *Optoelectronics of solar cells*. Bellingham, WA: SPIE Press.
86. Kasap, S.O. (2001). *Optoelectronics Photonics: Principles and Practices*. New York: Prentice Hall, 23–140.
87. Poortmans J., Arkhipov V. (2006). *Thin film solar cells: fabrication, characterization and applications*, Hoboken, NJ:Wiley.
88. Sharenko, A. (2009). *Optimization of tunnel diodes in multi-junction solar cells*, The 2009 NNIN REU Research Accomplishment.
89. Thornton, S.T. and Rex, A. (1993). *Modern Physics for Scientists and Engineers*, Saunders College Publishing.
90. Renaudineau, H., Houari, A.M., J.-P., Pierfederici, S., Meibody-Tabar, F., Gerardin, B., (2011). A new approach in tracking maximum power under partially shaded conditions with consideration of converter losses, *Solar Energy*, 85 (11): 2580–2588.
91. Chen, Q. and Ming, Z. (2012). *Photovoltaic Module Simulink Model for a Stand-alone PV System*, *Physics Procedia*, 24: 94 – 100.
92. Keçel, S. (2007). *Türkiye'nin Değişik Bölgelerinde Eysel Elektrik İhtiyacının Güneş Panelleri İle Karşılanmasına Yönelik Model Geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
93. Tanrıöven, M., (2011). *Rüzgar ve Güneş Enerjili Güç Sistemleri*. Ders Notları.

94. Aydoğan, Ő. (2011). Katıhal Fiziği. Nobel Yayınları, İstanbul, 221–499.
95. Denizli, T., (2006). GaInP/GaAs kuantum kuyulu yapılar da alaşım düzensizliği ve arayüzey pürüzlülüğü açılması. Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 13-15.
96. İnternet: $Ga_xIn_{1-x}P$. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.ioffe.rssi.ru%2FSVA%2FNMSM%2FSemicond%2FGaInP%2Findex.html&date=2015-12-22>, Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.
97. May, G.S, Spanos C.J. (2006). Fundamentals of Semiconductor Manufacturing and Process Control. John Wiley&Sons, NJ, 60-70.
98. Dill, F.H. (1975). Optical lithography. IEEE Trans. on Elect. Dev., 22(7): 440-444.
99. Lithography (2007). International Technology Roadmap for Semiconductors 2007 Edition, ITRS.
100. İnternet: Az Photoresists, Introduction to our Product Range Clairant. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.microchemicals.com%2Fmicro%2Fintroduction.pdf&date=2015-12-22>, Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.
101. İnternet: AZ 5214 E Image Reversal Photoresist, Product data sheet. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.microchemicals.com%2Fmicro%2Faz_5214e.pdf&date=2015-12-22, Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.
102. Kribus, A., Kaftori, D., Mittelman, G., Hirshfeld, A., Flitsanov, Y., Dayan, A. (2006). A miniature concentrating photovoltaic and thermal system. Energy Conversion and Management, 47: 3582–3590.
103. Nishioka, K., Takamoto, T., Agui, T., Kaneiwa, M., Uraoka, Y., Fuyuki, T. (2005). Annual output estimation of concentrator photovoltaic systems using high-efficiency InGaP/InGaAs/Ge triple-junction solar cells. Solar Energy Mater Solar Cells, 90: 57–67.
104. Min, C., Nuofu, C., Xiaoli, Y., Yu, W., Yiming, B., Xingwang Z. (2009). Thermal analysis and test for single concentrator solar cells. Journal of Semiconductors, 30: 1-4.
105. Coventry J.S. (2005). Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector. Solar Energy, 78: 211–222.
106. Meneses-Rodriguez D., Horley P P., Gonzalez-Hernandez J. (2005). Photovoltaic solar cells performance at elevated temperatures. Solar Energy, 78: 243.
107. Royne, A., Dey, C.J., Mills, D.R. (2005). Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination. Solar Energy Materials & Solar Cell, 86: 451.

108. Feuermann, D., Gordon, J. M. (2001). High-Concentration Photovoltaic Designs Based on Miniature Parabolic Dishes. *Solar Energy*, 70: 423–430.
109. Sala, G., Luque, A., Hilger, A. (1989). Cooling of solar cells, in *Cells and optics for photovoltaic concentration*. Bristol, 8: 239-267.
110. SunPower Application notes for HED312 Silicon Concentrator Solar Cell (2002).
111. Mathur, R.K., Mehrotra, D.R., Mittal, S., Dhariwal, S.R. (1984). Thermal nonuniformities in concentrator solar cells. *Solar Cells*, 11: 175-188.
112. Internet: Overview of concentrator photovoltaics. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.cichlid.com%2Fmailman%2Flistinfo%2Fsolar-concentrator&date=2015-12-22>, Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.
113. Faiman D. (2002). The path to ultra-high efficiency photovoltaics. Large-area concentrators, 2nd Workshop JRC Ispra.
114. Edenburn, M.W. (1980). Active and passive cooling for concentrating photovoltaic arrays. 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, 776-776.
115. Minano, J.C., González, J.C., Zanesco, I. (1994). Flat high concentration devices. 24th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Hawaii, 1123-1126.
116. Akbarzadeh, A., Wadowski, T. (1996). Heat pipe-based cooling systems for photovoltaic cells under concentrated solar radiation. *Applied Thermal Engineering*, 16: 81-87.
117. Pierre, J., Verlinden, I., Lewandowski, A., Bingham, C., Geoffrey S.K., Raed, A.S. and John B.L. (2006). Performance and Reliability of Multijunction III-V Modules For Concentrator Dish And Central Receiver Applications. 592-597.
118. Russell, R.F. (1982). Uniform temperature heat pipe and method of using the same. Patent no. US4320246.
119. Edenburn, M.W. and Burns, J.R. (1981). Shading analysis of a photovoltaic cell string illuminated by a parabolic through concentrator. 15th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Orlando, 63-68.
120. Lide, D.R. (2003). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, Florida: CRC Press.
121. Test. (2002). *Rating and Specification of PV Concentrator Components and Systems*. 1 ed., Inst. Solar Energy, Polytech. Univ. Madrid. Madrid, Spain, 1-57.
122. Internet: NREL demonstrates 45.7% efficiency for concentrator solar cell. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fphys.org%2Fnews%2F201>

4-12-nrel-efficiency-solar-cell.html%23jCp&date=2015-12-22, Son Erişim Tarihi: 22.12.2015.

123. King, R.R. et al. (2004). Metamorphic III-V Materials, Sublattice Disorder, and Multijunction Solar Cell Approaches with over 37% Efficiency. Proc. 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris.
124. Kurtz, S. (2011). Opportunities and Challenges for Development of Mature Concentrating Photovoltaic Power Industry. National Renewable Energy Laboratory, Golden.
125. Özen, Y., Akın, N., Kınacı, B., Özçelik, S. (2015). Performance evaluation of a GaInP/GaAs solar cell structure with the integration of AlGaAs tunnel Junction. Solar Energy Materials & Solar Cell, 137:1-5.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÖZEN, Yunus
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 14.07.1986, Kırıkkale
Medeni hali : Bekâr
Telefon : 0 (543) 442 31 63
e-mail : yunus.ozen@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Fizik	2010
Lisans	Erciyes Üniversitesi/ Fizik	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007-2015	Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi	Bursiyer
2014-2015	CW Enerji Tic. ve San. Ltd. Şti.	Araştırmacı

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Sinemaya gitmek, bilimsel tartışmak, müzik dinlemek

Tezle ilgili Yayınlar

Science Citation Index Tarafından Taranan Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. B. Kınacı, Y. Özen, K. Kızılkaya T. Asar, S.Ş. Çetin, E. Boyalı, M.K. Öztürk, T. Memmedli, S. Özçelik, “Effect of alloy composition on structural, optical and morphological properties and electrical characteristics of $Ga_xIn_{1-x}P/GaAs$ structure”, J Mater Sci: Mater. Electron., 24, 1375–1381 (2013).
2. B. Kınacı, Y. Özen, T. Asar, S.Ş. Çetin, T. Memmedli, M. Kasap and S. Özçelik, “Study on growth and characterizations of $Ga_xIn_{1-x}P/GaAs$ solar cell structure”, J Mater Sci: Mater. Electron., 24, 3269–3274 (2013).
3. Y. Özen, N. Akın, B. Kınacı, S. Özçelik, “Performance evaluation of a GaInP/GaAs solar cell structure with the integration of AlGaAs tunnel junction”, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 137, 1–5 (2015).

Ulusal ve Uluslar Arası Kongre Tebliğleri

1. B. Kınacı, Y. Özen, S.Ş. Çetin, T. Memmedli and S. Özçelik, “The structural and optical properties of GaInP/GaAs structure”, International Student Workshop on Condensed Matter and Materials Pyhsics, 27-31 December 2011, Antalya, Turkey.
2. S.Ş. Çetin, T. Asar, B. Kınacı, Y. Özen, T. Memmedli, S. Özçelik, “Optical and Structural Properties of $Ga_xIn_{1-x}P$ Alloys Grown on Different Substrates”, Solar Electricity Conference & Exhibition (SOLARTR-2), 7-9 November 2012, Antalya, Turkey.
3. T. Asar, B. Kınacı, Y. Özen, K. Kızılkaya, S.Ş. Çetin, T. Memmedli, S. Özçelik, “Investigation of the Photovoltaic Properties of InGaP/GaAs/Ge Solar Cells”, Solar Electricity Conference & Exhibition (SOLARTR-2), 7-9 November 2012, Antalya, Turkey.
4. B. Kınacı, N. Akın, K. Kızılkaya, Y. Özen, T. Asar, S.Ş. Çetin, T. Memmedli, M. Kasap, and S. Özçelik, “The structural and morphological characterizations of GaAs/Ge structure”, Nano-TR9, 24-28 June 2013, Ataturk University, Erzurum, Turkey.
5. Y. Özen, B. Kınacı, T. Asar, S.Ş. Çetin and S. Özçelik, “Study on the designs of concentrator for CPV systems”, Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 542, 2–5 September 2013, Istanbul, Turkey.
6. B. Kınacı, Y. Özen, K. Kızılkaya, N. Akın, T. Asar, G. Kurtuluş, S.Ş. Çetin, T. Memmedli, and S. Özçelik, “The structural, morphological and electrical characterizations of $Ga_xIn_{1-x}P/GaAs/Ge$ triple junction solar cell structure”, Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 524, 2–5 September 2013, Istanbul, Turkey.

7. S.Ş. Çetin, B. Kınacı, Y. Özen, M. Bosi, T. Asar, M. Kasap, T. Memmedli and S. Özçelik, “Structural and optical properties of double junction InGaP/GaAs solar cell”, Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 539, 2–5 September 2013, Istanbul, Turkey.

Tez Dışı Yayınlar

Science Citation Index Tarafından Taranan Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. A Bengi, U Aydemir, S Altındal, Y Özen, S. Özçelik, “A comparative study on the electrical characteristics of Au/n-Si structures with anatase and rutile phase TiO₂ interfacial insulator layer”, *Journal Of Alloys And Compounds*, 505 (2): 628-633 (2010).
2. H. Altuntaş, A. Bengi, T. Asar, U. Aydemir, B. Sarıkavak, Y. Özen, Ş. Altındal, S. Özçelik, “Interface States Density Analyzing of Au/TiO₂(Rutile)/n-Si Schottky Barrier Diode”, *Surface and Interface Analysis*, 42 (6-7): 1257-1260 (2010).
3. B. Kınacı, T. Asar, Y. Özen, S. Özçelik, “ The analysis of Au/TiO₂/n-Si Schottky barrier diode at high temperature using I-V characterisatics”, *Optoelectronics And Advanced Materials – Rapid Communications*, 5 (4): 434-437 (2011).
4. B. Kınacı, T. Asar, S.Ş. Çetin, Y. Özen, K. Kızılkaya, “Analysis of series resistance and interface states of Au/ZnO/TiO₂/n-Si and (Ni/Au)/ZnO/TiO₂/n-Si Schottky diodes using current-voltage characteristics”, *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*'de inceleniyor.
5. İ.Durukan, Y.Özen, K.Kızılkaya, M.K.Öztürk, T.Memmedli, S.Özçelik, “Effects of annealing and deposition temperature on the structural and optical properties of AZO thin films”, *Appiled Surface Science*'de inceleniyor.
6. Akın N., Özen Y., Efker H.İ., Çakmak M., Özçelik S., Surface structure and photoluminescence properties of AZO thin films on polymer substrates, *Surf. Interface Anal.* , 47, 93–98, (2015).

Ulusal ve Uluslar Arası Hakemli Dergilerde Yayınlanan Makaleler

1. B. Kınacı, T. Asar, Y. Özen, Ş. Altındal, T. Mammadov, S. Özçelik, “Temperature Dependence Electrical Characteristics of n-GaAs Structure Grown by MBE”, *Azerbaijan Journal of Physics, Fizika*, XVI(2), 335-338 (2010).

Ulusal ve Uluslar Arası Kongre Tebliğleri

1. Y. Özen, P. Durmuş, S. Ozcelik, "Püskürtme Yöntemiyle Hazırlanmış Farklı Ar/O₂ Oranlı TiO₂ İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin İncelenmesi", YMF16, Gazi Üniversitesi, 06 Kasım 2009, Ankara, Türkiye.
2. H. Altuntaş, A. Yıldız, Y. Özen, Ş. Altındal, S. Ozcelik, "Au/TiO₂/n-Si Schottky Diyotlarında Ara-yüzey Durum Analizi", YMF16, Gazi Üniversitesi, 06 Kasım 2009, Ankara, Türkiye.
3. H. Altuntaş, A. Bengi, T. Asar, U. Aydemir, B. Sarıkavak, Y. Özen, Ş. Altındal, S. Ozcelik, "Interface States Density Analyzing of Au/TiO₂(Rutile)/n-Si Schottky Barrier Diode", 322, 13th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis, October 18-23, 2009, Antalya, Turkey.
4. Yunus Özen, "The growth and structural, optical and electrical characterization of DC magnetron sputtering TiO₂ thin films", International Student Workshop on Condensed Matter and Materials Pyhsics, 27-31 December 2009, Antalya, Turkey.
5. Y. Özen, B. Kınacı, S. Ş. Çetin, P. Durmuş, S. Özçelik, "Influence of Ar/O₂ ratio on the structural and optical properties of DC magnetron sputtered TiO₂ thin films", 678, Turkish Physical Society 27th International Physics Congress, 14-17 September 2010, Istanbul, Turkey.
6. B. Kınacı, T. Asar, Y. Özen, S.Ş. Çetin, T. Mammadov, S. Özçelik, "InGaAs/GaAs multi quantum well structure: MBE growth and characterization", 658, Turkish Physical Society 27th International Physics Congress, 14-17 September 2010, Istanbul, Turkey
7. S.Ş. Çetin, S. Özçelik, T. Asar, Y. Özen, "Structural and optical properties of the TiO₂ thin film on p-Si", 614, Turkish Physical Society 27th International Physics Congress, 14-17 September 2010, Istanbul, Turkey.
8. B. Kınacı, T. Asar, Y. Özen, S. Ş. Çetin, T. Mammadov and S. Özçelik, " Current-voltage (I-V) characteristics of Au/ZnO/TiO₂/n-Si structure at room temperature", 759, Turkish Physical Society 28th International Physics Congress, 6-9 September 2011, Bodrum, Turkey.
9. S.Ş. Çetin, T. Asar, Y. Özen, G. Kurtuluş, T. Memmedli ve S. Özçelik, 18. Yoğun Madde Fiziği Kongresi 25 Kasım 2011, Ankara, Türkiye.
10. Y. Özen, B. Kınacı, T. Asar, K. Kızılkaya and S. Özçelik, "The forward bias current-voltage characteristics of (Ni/Au)/ZnO/TiO₂/n-Si Scothky diodes", International Student Workshop on Condensed Matter and Materials Pyhsics, 27-31 December 2011, Antalya, Turkey.
11. B. Kınacı, Y. Özen, S.Ş. Çetin, T. Memmedli and S. Özçelik, "The structural and optical properties of GaInP/GaAs structure", International Student Workshop on Condensed Matter and Materials Pyhsics, 27-31 December 2011, Antalya, Turkey.

12. T. Asar, K. Kızılkaya, B. Kınacı, Y. Özen and S. Özçelik, “SiN₄ AR Coating Effect to the InGaAs/GaAs QWSCs”, 496, Turkish Physical Society 29th International Physics Congress, 5–8 September 2012, Bodrum, Turkey.
13. Saime Şebnem Çetin, Tarık Asar, Baris Kınacı, Yunus Özen, Tofig Memmedli, Süleyman Özçelik, “Optical and Structural Properties of Ga_xIn_{1-x}P Alloys Grown on Different Substrates”, Solar Electricity Conference & Exhibition (SOLARTR-2), 7–9 November 2012, Antalya, Turkey.
14. Y. Özen, S. Şengüllü, K. Kızılkaya, B. Kınacı, H.İ. Efker, M.K. Öztürk, H. Çakmak, S. Özçelik and E. Özbay, “Dislocation densities’ comparison of the graded and ungraded InGaN solar cell structures”, Nano-TR9, 24–28 June 2013, Ataturk University, Erzurum, Turkey.
15. N. Akın, B. Kınacı, Y. Özen, Ü.C. Başköse, S.Ş. Çetin, T. Memmedli, M. Çakmak and S. Özçelik, “Effects of substrate temperature on the structural and optical properties of aluminum-doped zinc oxide thin films prepared by RF magnetron sputtering”, Nano-TR9, 24–28 June 2013, Ataturk University, Erzurum, Turkey.
16. Barış Kınacı, Nihan Akın, Kürşat Kızılkaya, Yunus Özen, Tarık Asar, Saime Şebnem Çetin, Tofig Memmedli, Mehmet Kasap, and Süleyman Özçelik, “The structural and morphological characterizations of GaAs/Ge structure”, Nano-TR9, 24–28 June 2013, Ataturk University, Erzurum, Turkey.
17. Y. Özen, B. Kınacı, T. Asar, S.Ş. Çetin and S. Özçelik, “Study on the designs of concentrator for CPV systems”, Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 542, 2–5 September 2013, Istanbul, Turkey.
18. B. Kınacı, Y. Özen, K. Kızılkaya, N. Akın, T. Asar, G. Kurtuluş, S.Ş. Çetin, T. Memmedli, and S. Özçelik, “The structural, morphological and electrical characterizations of Ga_xIn_{1-x}P/GaAs/Ge triple junction solar cell structure”, Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 524, 2–5 September 2013, Istanbul, Turkey.
19. H.İ. Efker, K. Kızılkaya, T. Asar, Y. Özen, B. Kınacı, S.Ö. Yıldırım and S. Özçelik, “The electrical properties of the TiO₂ Ar coated InGaAs/GaAs SLSCs”, Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 428, 2–5 September 2013, Istanbul, Turkey.
20. S.Ş. Çetin, B. Kınacı, Y. Özen, M. Bosi, T. Asar, M. Kasap, T. Memmedli and S. Özçelik, “Structural and optical properties of double junction InGaP/GaAs solar cell”, Turkish Physical Society 30th International Physics Congress, 539, 2–5 September 2013, Istanbul, Turkey.
21. S.Ş. Çetin, E. Boyalı, Y. Özen, S. Özçelik, “GaAsP/GaP Alaşımının Yapısal ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi”, 26, YMF19, Bilkent Üniversitesi, 20 Aralık 2013, Ankara, Türkiye.
22. T. Asar, Y. Özen, S. Özçelik, “InGaAs/InP Yapılarının Yapısal ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi”, 69, YMF19, Bilkent Üniversitesi, 20 Aralık 2013, Ankara, Türkiye.

23. Y. Özen, N. Akın, T. Sertel, B. Korkmaz, S.Ş. Çetin, T. Asar, B. Kınacı, S. Özçelik, “AlGaAs tünel diyot entegrasyonlu GaInP/GaAs güneş hücre yapısının performansı üzerine çalışma”, 37, YMF20, Hacettepe Üniversitesi, 26 Aralık 2014, Ankara, Türkiye.
24. T. Asar, H.İ. Efkere, G. Kurtuluş, B. Korkmaz, Y. Özen, S. Özçelik, “Investigation of Quantum Well Number Effects on The InGaAs/GaAs Quantum Well Solar Cell”, v Turkish Physical Society 31th International Physics Congress, 318, 21–24 July 2014, Bodrum, Turkey.
25. T. Asar, T. Sertel, B. Korkmaz, Y. Özen, H.İ. Efkere, V. Baran, Y. Çat, G. Kurtuluş, S. Özçelik, “Germanyum Alttaş Üretimi: İlk Çalışmalar”, 95, YMF20, Hacettepe Üniversitesi, 26 Aralık 2014, Ankara, Türkiye.
26. B. Kınacı, Y. Özen, N. Akın and G. Sürücü, “Study on efficiency of CdTe/CdS concentrated solar cell”, P34, 11th Nanoscience and Nanotechnology Conference NanoTR-11, ODTÜ, 22-25 Haziran 2015, Ankara, Türkiye.
27. N. Akın, B. Cömert, M. Dönmez, Y. Özen, E. Boyalı, B. Kınacı, M. Çakmak, S. Özçelik, “The study on characterizations of sputtered-GZO thin films with different RF power”, NanoTR-11, ODTÜ, 22-25 Haziran 2015, Ankara, Türkiye.
28. B. Cömert, M. Dönmez, N. Akın, Y. Özen, S. Sağlam, S. Özçelik, “Influence of annealing temperature on the structural and optical properties of RF co-sputtered TiO₂ thin films”, NanoTR-11, ODTÜ, 22-25 Haziran 2015, Ankara, Türkiye.
29. B. Kınacı, Y. Özen, N. Akın, G. Sürücü, U. Aydemir, S. Özçelik, “Performance evaluation of CdTe/CdS solar cell structure with concentrated photovoltaic system”, BPU-9, İstanbul Üniversitesi, 24-27 Ağustos 2015, İstanbul, Türkiye.
30. N. Akın, Y. Özen, M. Çakmak, S. Özçelik, “Characterization of sputtered-MgZnO thin films as UV sensors”, EuroNanoForum 2015, 10-12 June 2015, Riga, Letonya.
31. B. Kınacı, G. Sürücü, T. Yavuz, Y. Özen, N. Akın, U. Aydemir, S. Çörekçi ve S. Özçelik, “Konsantre Sistem İle Entegre Edilen CdTe Bazlı İnce Film Güneş Hücre Yapısının Verimlilik Analizi”, 17. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı (FOTONİK 2015), 18 Eylül 2015, Ankara, Türkiye.
32. Y. Özen, N. Akın, B. Kınacı, S. Özçelik, “Yoğunlaştırılmış Üç Eklemlili Güneş Hücre Yapısının Elektriksel Analizi”, YMF21, Gazi Üniversitesi, 25 Aralık 2015, Ankara, Türkiye.
33. N. Akın, N. Akçay, Y. Özen, B. Kınacı, G. Sürücü, S. Özçelik, “Reaktif Büyütülen Mg_{0.40}Zn_{0.60}O İnce Filmlerin Karakterizasyonları”, YMF21, Gazi Üniversitesi, 25 Aralık 2015, Ankara, Türkiye.

Görev Aldığı Projeler

1. “Üç eklemlı Güneş Pillerinin Üretim Teknolojisinin Kazanımı ve Model Modül Üretimi”, SANTEZ Projesi, Proje Kod No: 00587.STZ.2010-1.
2. “Yoğunlaştırcılı Fotovoltaik Sistem Geliştirilmesi ve Prototip Üretimi”, 1501 TÜBİTAK Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı, Proje Kod No: 3130545.



GAZİ GELECEKTİR..