



**III-V GRUBU UZAY KALİFİYE GÜNEŞ HÜCRELERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ**

Tunç SERTEL

**DOKTORA TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

KASIM 2020

Tunç SERTEL tarafından hazırlanan “III-V GRUBU UZAY KALİFİYE GÜNEŞ HÜCRELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Abdullah CEYLAN

Fizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hacettepe Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Barış KINACI

Fizik Ana Bilim Dalı, İstanbul Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Tarık ASAR

Fizik Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Gökhan DEMİREL

Kimya Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 27/11/2020

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

.....

Prof. Dr. Cevriye GENCER

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.

.....

Tunç SERTEL

27/11/2020

III-V GRUBU UZAY KALİFİYE GÜNEŞ HÜCRELERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

(Doktora Tezi)

Tunç SERTEL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2020

ÖZET

Bu tez çalışmasında, ülkemiz yenilenebilir enerji ve uzay çalışmalarında bir kilometre taşı oluşturacak uzay kalifiye nitelikte güneş hücresi üretimi gerçekleştirildi. Bu amaçla tezin ana hedefi, uzay şartlarına dayanabilecek nitelikte, AM0 ışınımı altında verimi % 25'in üzerinde olan GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücrelerinin üretilmesi olarak belirlendi. Ardından amaca uygun olarak, GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücre yapısı moleküler demet epitaksi (MBE) tekniği ile epitaksiyel olarak büyütüldü. Fotolitografi ve metalizasyon süreçlerinin optimizasyon çalışmaları sonucunda yüksek tutunma dayanımına, düşük difüzyona ve düşük kontak direncine sahip yaklaşık 5 µm kalınlığındaki AuNiGe/Ag/Ti çok katmanlı metalizasyon yapısının hücre yapısı için en uygun metalizasyon olduğu görüldü. Yansıma önleyici katman oluşturulması çalışmaları, optik, morfolojik ve elektriksel özelliklerde en büyük iyileşmeyi yaratan SiO₂/Al₂O₃/TiO₂ üç-katmanlı ARC yapısının hücre yansıtıcılığını 300-1800 nm aralığında % 6'ya düşürdüğünü, hücre verimliliğini ise yaklaşık % 20 oranında arttırdığını gösterdi. Tez çalışmasının ana ürünü olan 17 cm² alana sahip prototip hücreler, AuNiGe/Ag/Ti metalizasyona ve SiO₂/Al₂O₃/TiO₂ yansıma önleyici katmana sahip olacak şekilde üretildi. Üretilen güneş hücrelerinin standartlara uygun biçimde gerçekleştirilen kalifikasyon testlerinin sonuçları, uzay şartlarına dayanabilecek nitelikte ve standartta belirtilen kriterleri karşılayan güneş hücresi üretiminin başarıldığını gösterdi. Tez çalışmasında üretilen GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücrelerinin AM0 ışınımı altındaki verimlilik değerlerinin % 25,74 ile % 26,71 aralığında olduğu görüldü. Elde edilen bu verimlilik değerleri, tezin ana hedefi olan yaklaşık % 25 verime ve uzay kalifiye niteliklere sahip prototip güneş hücresi üretiminin başarıldığını gösterdi. Bu tez çalışmasında üretilen, AM0 ışınımı altında yaklaşık % 27, AM1.5G ışınımında ise yaklaşık % 35 verime ulaşabilen güneş hücrelerinin, uzay uygulamaları için ülkemiz adına bir ilk olmasının yanı sıra, yeryüzü uygulamaları için de ülkemiz yenilenebilir enerji çalışmalarına önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bilim Kodu : 20227

Anahtar Kelimeler : Uzay kalifiye güneş hücreleri, III-V grubu yarıiletkenler, GaInP, GaAs, Ge

Sayfa Adedi : 195

Danışman : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

DEVELOPMENT OF III-V GROUP SPACE QUALIFIED SOLAR CELLS

(Ph. D. Thesis)

Tunc SERTEL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2020

ABSTRACT

In this thesis, a space-qualified solar cell was produced that will constitute a milestone in renewable energy and space studies in our country. For this purpose, the main goal of the thesis has been determined as the production of GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells with an efficiency over 25 % under AM0 radiation and capable of withstanding space conditions. Then, in accordance with the purpose, the GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cell structure was grown epitaxially by using molecular beam epitaxy (MBE) technique. As a result of the photolithography and metallization optimization studies, it was seen that the approximately 5 μm thick AuNiGe/Ag/Ti multilayer metallization structure with high bond strength, low diffusion and low contact resistance was the most suitable metallization for the cell structure. Anti-reflective layer formation studies showed that the cell reflectivity reduces up to 6 % in the 300-1800 nm range and the cell efficiency increases approximately 20 % by using $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ triple-layer ARC structure which creates the greatest improvement in optical, morphological and electrical properties. The prototype cells as the main product of the thesis with an area of 17 cm^2 were produced with AuNiGe/Ag/Ti metallization and $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ anti-reflective layer. The results of the space qualification tests of the produced solar cells which is performed in accordance with the standards showed that the production of solar cells that can withstand space conditions and meet the criteria specified in the standard was achieved. It was observed that the efficiency values of produced GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells were between 25,74 % and 26,71 % under AM0 radiation. The obtained efficiency values showed that prototype solar cells as the main goal of the thesis were successfully achieved with approximately 25 % efficiency and space-qualified quality. It is thought that the solar cells produced in this thesis study, which can reach approximately 27 % under AM0 radiation and approximately 35 % in AM1.5G radiation, are not only a first for our country for space applications but also will make a significant contribution to renewable energy studies in our country for terrestrial applications.

Science Code : 20227

Key Words : Space qualified solar cells, III-V group semiconductors, GaInP, GaAs, Ge

Page Number : 195

Supervisor : Prof. Dr. Suleyman OZCELIK

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca bana her türlü imkanı sağlayan, yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, önderliğiyle yolumu aydınlatan, engin bilgilerinden faydalandığım Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü, değerli danışman hocam Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK’e,

Çalışmalarım esnasında yardımlarıyla beni destekleyen, her zaman yanımda olan ve birlikte güzel işlere imza attığımız Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezindeki değerli hocalarım ve çalışma arkadaşlarımdan her birine,

Önce çalışma arkadaşlığı sonra hayat yoldaşlığı yaptığım, her zaman yanımda olan biricik eşim Dr. Buse CÖMERT SERTEL’e,

Öğrenim hayatım boyunca desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman yanımda gücüm kuvvetim olan canım aileme,

Bugünlere gelmemde emeği büyük olan, aktardığı hayat tecrübesi ile beni ben yapan, fikirlerini ve hayat görüşünü her zaman örnek aldığım rahmetli dedem Lütfi SERTEL’e

Tüm destek, emek ve sevgileri için şükran dolusu teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez 2011K120290 no’lu “Fotonik Araştırma Merkezi” isimli ve 2016K121220 no’lu “Fotonik Uygulama ve Araştırma Altyapısının Geliştirilmesi” isimli T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığı projeleri ile desteklenmiştir. Ayrıca bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Marmara Araştırma Merkezi (MAM) ile Gazi Üniversitesi arasındaki 2016/25 numaralı sözleşme ile yürütülen projenin bir çıktısıdır.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xx
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	7
2.1. Yarıiletken Malzemeler	7
2.1.1. Katkısız (saf) yarıiletkenler	10
2.1.2. Katkılı yarıiletkenler	11
2.2. Yarıiletken p-n Eklem Yapılar.....	13
2.3. III-V Grubu Yarıiletken Malzemeler	15
2.4. Malzeme Parametreleri	18
2.4.1. Germanyum (Ge) yarıiletkeni.....	18
2.4.2. Galyum arsenik (GaAs) yarıiletken bileşiği	18
2.4.3. Galyum indiyum fosfat (GaInP) yarıiletken alaşımı	20
3. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ HÜCRELERİ	23
3.1. Temel Kavramlar	23
3.1.1. Güneş enerjisi	23

Sayfa

3.1.2. Güneş spektrumu	24
3.1.3. Hava kütlesi (Air Mass: AM)	25
3.2. Güneş Hücrelerinin Yapısı ve Çalışma Prensipleri	28
3.3. Fotovoltaik Güneş Hücreleri	33
3.3.1. Kristal silikon güneş hücreleri	33
3.3.2. İnce film güneş hücreleri	35
3.3.3. Yeni nesil güneş hücreleri	38
3.3.4. III-V grubu güneş hücreleri	39
3.4. Çok Eklemlili Güneş Hücreleri	42
3.4.1. Güneş hücrelerinin optimizasyonu	49
3.5. GaInP/GaAs/Ge Üç Eklemlili Güneş Hücreleri	53
4. UZAY KALİFİYE GÜNEŞ HÜCRELERİ	55
4.1. Uzun Uygulamalarında Güneş Hücreleri	57
4.2. Uzun Ortamı Etkileri	60
4.2.1. AM0 ışınımı	60
4.2.2. Vakum ortamı	61
4.2.3. Radyasyon ortamı	62
4.2.4. Parçacık ortamı	64
4.2.5. Termal ortam	65
4.3. Güneş Hücrelerinin Uzun Kalifiye Niteliği	65
4.3.1. Uzun kalifiye güneş hücresi standartları	65
4.3.2. Kalifikasyon testleri	68
5. ÜÇ EKLEMLİ GÜNEŞ HÜCRESİ ÜRETİMİ	73
5.1. Optimal GaInP/GaAs/Ge Hücre Yapısı Modeli	73

Sayfa

5.2. GaInP/GaAs/Ge Hücre Yapısının Büyütülmesi	76
5.2.1. Moleküler demet epitaksi (MBE) sistemi.....	77
5.3. Hücre Katmanlarının Büyütülmesi	80
5.3.1. Ge birinci eklem (alt hücre) büyütülmesi	80
5.3.2. GaAs ikinci eklem (orta hücre) büyütülmesi.....	81
5.3.3. $Ga_{0,51}In_{0,49}P$ üçüncü eklem (üst hücre) büyütülmesi	84
6. GÜNEŞ HÜCRESİ AYGIT FABRİKASYONU	87
6.1. Fotolitografi Tekniği.....	87
6.1.1. Temel fotolitografi işlemleri.....	89
6.2. Fotolitografi Sistemleri.....	92
6.2.1. Fotomaske.....	93
6.2.2. Fotorezist malzeme.....	94
6.2.3. Dönel kaplama sistemi.....	95
6.2.4. Isıtıcı tabla	95
6.2.5. Maske hizalama sistemi.....	96
6.3. Güneş Hücresi Fotolitografi İşlemleri	98
6.4. Güneş Hücresi Metalizasyon İşlemi	100
6.4.1. Magnetron püskürtme sistemi	103
6.4.2. Termal buharlaştırma sistemi	105
6.4.3. Hızlı ısı tavlama (RTA) sistemi.....	106
6.5. Yansıma Önleyici Katman Tasarımı	107
6.6. Yansıma Önleyici Katman Oluşturulması.....	112
6.6.1. Eş-püskürtme sistemi.....	113
6.7. Yansıma Önleyici Katman Analizi.....	114

Sayfa

6.7.1. Profilometre sistemi.....	114
6.7.2. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM).....	115
6.7.3. Morötesi-görünür bölge (UV-Vis) spektrometresi	116
6.7.4. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrometresi	117
6.8. Güneş Hücresi Aygıt Karakterizasyonu	118
6.8.1. Akım-gerilim (I-V) ölçüm sistemi.....	119
6.8.2. Kuantum verimliliği (QE) ölçüm sistemi	119
7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	123
7.1. Yansıma Önleyici Katman Üretimi ve Karakterizasyonu	123
7.1.1. Ta ₂ O ₅ tek-katman ARC üretimi ve karakterizasyonu.....	123
7.1.2. SiO ₂ /Ta ₂ O ₅ çift-katman ARC üretimi ve karakterizasyonu	129
7.1.3. Al ₂ O ₃ /TiO ₂ çift-katman ARC üretimi ve karakterizasyonu	134
7.1.4. SiO ₂ /Al ₂ O ₃ /TiO ₂ üç-katman ARC üretimi ve karakterizasyonu	139
7.2. Güneş Hücresi Uzay Kalifikasyon Testleri	145
7.2.1. Fiziksel inceleme testleri	145
7.2.2. Elektriksel performans testi	153
7.2.3. Tutunma (Bant) testi.....	155
7.2.4. Ters beslem testi	156
7.2.5. Elektron radyasyon testi	157
7.2.6. Proton radyasyon testi	161
7.2.7. Vakum-termal döngü testi	164
7.2.8. Nem ve sıcaklık testi.....	167
7.3. Güneş Hücrelerinin AM0 Işınımı Altındaki Performans Testleri	169

Sayfa

8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	173
KAYNAKLAR.....	179
ÖZGEÇMİŞ	192



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Periyodik tabloda IIA ve VIA grupları arasında kalan bölge	8
Çizelge 2.2. Periyodik tablonun IIIA ve VIA grubunda bulunan elementler	16
Çizelge 2.3. Ge elementinin oda sıcaklığındaki bazı fiziksel parametreleri	18
Çizelge 2.4. GaAs bileşiğinin oda sıcaklığındaki bazı fiziksel parametreleri	20
Çizelge 2.5. $Ga_xIn_{1-x}P$ ve $Ga_{0,51}In_{0,49}P$ alaşımlarının oda sıcaklığındaki bazı özellikleri	22
Çizelge 4.1. AIAA S-111A-2014 standardında belirtilen bazı testler ve beklenen sonuçlar	67
Çizelge 5.1. GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücresi yapı tasarımı	76
Çizelge 5.2. GaAs orta eklemin büyütme parametreleri	83
Çizelge 5.3. $Ga_{0,51}In_{0,49}P$ üst eklemin büyütme parametreleri	86
Çizelge 6.1. Pozlama kaynağına göre litografi çeşitleri	88
Çizelge 6.2. AZ nLof-2070 fotorezistine ait bazı teknik bilgiler	95
Çizelge 6.3. Optimize edilmiş fotolitografi parametreleri	98
Çizelge 6.4. Ti metalizasyonunda kullanılan kaplama parametreleri	104
Çizelge 6.5. Ag ve AuNiGe buharlaştırma işleminde kullanılan kaplama parametreleri	106
Çizelge 6.6. ARC olarak kullanılan bazı malzemelerin kırılma indisleri	111
Çizelge 6.7. Tasarlanan ARC'lere ait parametreler ve ortalama yansıtıcılık değerleri ..	112
Çizelge 7.1. Ta_2O_5 tek-katmanlı yansıma önleyicinin kaplama parametreleri	124
Çizelge 7.2. Güneş hücresinin Ta_2O_5 ARC öncesi ve sonrası elektriksel parametreleri	127
Çizelge 7.3. Üç eklemlili güneş hücresinin ARC öncesi ve sonrası EQE ve J_{sc} değerleri.	129
Çizelge 7.4. SiO_2/Ta_2O_5 çift-katmanlı yansıma önleyicinin kaplama parametreleri	129
Çizelge 7.5. Güneş hücresinin SiO_2/Ta_2O_5 ARC öncesi ve sonrası elektriksel parametreleri	133

Çizelge	Sayfa
Çizelge 7.6. Üç eklemlı güneş hücresinin ARC öncesi ve sonrası EQE ve J_{sc} değeri.	134
Çizelge 7.7. Al_2O_3/TiO_2 çift-katmanlı yansıma önleyicinin kaplama parametreleri.....	134
Çizelge 7.8. Güneş hücresinin Al_2O_3/TiO_2 ARC öncesi ve sonrası elektriksel parametreleri.....	138
Çizelge 7.9. Üç eklemlı güneş hücresinin ARC öncesi ve sonrası EQE ve J_{sc} değeri.	139
Çizelge 7.10. $SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$ üç-katmanlı yansıma önleyicinin kaplama parametreleri.....	140
Çizelge 7.11. Hücrenin $SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$ ARC öncesi ve sonrası elektriksel parametreleri.....	143
Çizelge 7.12. Üç eklemlı güneş hücresinin ARC öncesi ve sonrası EQE ve J_{sc} değeri.....	145
Çizelge 7.13. SSC-022 kodlu güneş hücresinin elektriksel performans parametreleri ..	155
Çizelge 7.14. SSC-014 kodlu hücrenin ters beslem test sonuçları	157
Çizelge 7.15. SSC-001 kodlu hücrenin elektron radyasyon test sonuçları.....	159
Çizelge 7.16. SSC-015 kodlu hücrenin elektron radyasyon test sonuçları.....	160
Çizelge 7.17. SSC-053 kodlu hücrenin proton radyasyon test sonuçları	162
Çizelge 7.18. SSC-020 kodlu hücrenin vakum-termal döngü test sonuçları.....	166
Çizelge 7.19. SSC-018 kodlu hücrenin nem ve sıcaklık test sonuçları	168
Çizelge 7.20. Güneş hücresi kalifikasyon test sonuçları	169
Çizelge 7.21. Üretilen güneş hücrelerinin AM0 ışıınımlı altındaki elektriksel parametreleri.....	170

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Yalıtkan, yarıiletken ve metallerde enerji bant yapılarının şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.2. Katkısız (saf) yarıiletkenin enerji bant diyagramı	10
Şekil 2.3. n-tipi yarıiletkenler için enerji bant diyagramı.....	11
Şekil 2.4. p-tipi yarıiletkenler için enerji bant diyagramı.....	12
Şekil 2.5. p-n eklem oluşumu ve p-n eklem için enerji bant diyagramı.....	14
Şekil 2.6. Bazı yarıiletken malzemelerin örgü sabiti-bant aralığı diyagramı	17
Şekil 2.7. GaAs yarıiletken bileşiğinin kristal yapısı	19
Şekil 2.8. GaInP yarıiletken alaşımının kristal yapısı	21
Şekil 3.1. Güneş ışınımının spektral dağılımı.....	25
Şekil 3.2. Farklı güneş spektrumlarının hava kütlesi diyagramı	26
Şekil 3.3. AM0, AM1.5G ve AM1.5D için referans güneş spektrumları.....	28
Şekil 3.4. Basit bir fotovoltaik güneş hücre yapısı	29
Şekil 3.5. Yarıiletken malzeme ile foton arasındaki etkileşimlere ait diyagram.....	30
Şekil 3.6. Denge durumundaki ve ışık altındaki p-n eklem için enerji bant diyagramı	31
Şekil 3.7. Güneş hücresinin akım-voltaj ($I-V$) karakteristiği.....	32
Şekil 3.8. Kuantum kuyulu güneş hücre yapısı ve bant diyagramı	40
Şekil 3.9. Çok eklemli güneş hücrelerine ait yapı tasarımı	41
Şekil 3.10. Farklı güneş hücre türlerine ait verimlerin karşılaştırılması	42
Şekil 3.11. Çok eklemli güneş hücrelerinde farklı eklemlerde foton soğurumları	43
Şekil 3.12. a) Optik bağlantılı b) elektriksel bağlantılı çok eklemli güneş hücresi.....	44
Şekil 3.13. Tipik bir üç eklemli güneş hücre yapısının tasarımı ve katmanları	45
Şekil 3.14. Tünel diyotun a) şematik bant yapısı b) $I-V$ karakteristiği.....	46

Şekil	Sayfa
Şekil 3.15. N adet ekleme sahip güneş hücresinde üretilen akım ve voltaj.....	52
Şekil 4.1. AM0 ve AM1.5 spektrumlarının kıyaslaması	61
Şekil 4.2. a) Farklı yörüngelerdeki elektron akıları b) güç çıktısı değişimleri.....	63
Şekil 5.1. GaAs/Ge arayüzeyindeki AFB oluşumu	74
Şekil 5.2. MBE tekniğinin şematik gösterimi.....	77
Şekil 5.3. VG Semicon V80H MBE sisteminin şematik gösterimi.....	79
Şekil 5.4. Ge p-n eklemi içeren alt hücre yapısı.....	81
Şekil 5.5. Alt ve orta hücresi tamamlanan güneş hücresinin şematik gösterimi	83
Şekil 5.6. Büyütme işlemi tamamlanan üç eklemli güneş hücresinin şematik gösterimi	85
Şekil 6.1. Temel fotolitografi işlem adımları	89
Şekil 6.2. Desenleme ve fotorezist kaldırma işlemlerinin şematik gösterimi	92
Şekil 6.3. Büyütülen 3 inç çaplı hücre yapısından dilimlenen 17 cm ² alanlı hücre	93
Şekil 6.4. Fotolitografi işleminde kullanılan fotomaske.....	94
Şekil 6.5. İnce film yüzeyine gelen ışığın izlediği yol	108
Şekil 6.6. Tasarlanan ARC'lerin 300-1800 nm aralığındaki yansıtıcılık spektrumu	112
Şekil 7.1. Ta ₂ O ₅ tek-katmanlı yansıma önleyici filmin optik geçirgenlik spektrumu....	125
Şekil 7.2. Ta ₂ O ₅ tek-katmanlı yansıma önleyici filmin optik yansıtıcılık spektrumu	125
Şekil 7.3. Güneş hücresinin Ta ₂ O ₅ tek-katmanlı ARC a) öncesi b) sonrası AFM görüntüsü.....	126
Şekil 7.4. Üç eklemli güneş hücresinin Ta ₂ O ₅ kaplaması öncesi ve sonrası <i>I-V</i> eğrileri	127
Şekil 7.5. Güneş hücresinin Ta ₂ O ₅ kaplaması öncesi ve sonrası kuantum verimliliği...	128
Şekil 7.6. SiO ₂ /Ta ₂ O ₅ çift-katmanlı yansıma önleyici filmin optik geçirgenlik spektrumu	130
Şekil 7.7. SiO ₂ /Ta ₂ O ₅ çift-katmanlı yansıma önleyici filmin optik yansıtıcılık spektrumu	131

Şekil	Sayfa
Şekil 7.8. Güneş hücresinin $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ ARC sonrası AFM görüntüsü	131
Şekil 7.9. Üç eklemli güneş hücresinin $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ kaplaması öncesi ve sonrası $I-V$...	132
Şekil 7.10. Güneş hücresinin $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ kaplaması öncesi ve sonrası kuantum verimliliği	133
Şekil 7.11. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ çift-katmanlı yansıma önleyici filmin optik geçirgenlik spektrumu	135
Şekil 7.12. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ çift-katmanlı yansıma önleyici filmin optik yansıtıcılık spektrumu	136
Şekil 7.13. Güneş hücresinin $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC sonrası AFM görüntüsü	136
Şekil 7.14. Üç eklemli güneş hücresinin $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ kaplaması öncesi ve sonrası $I-V$ eğrileri.....	137
Şekil 7.15. Güneş hücresinin $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ kaplaması öncesi ve sonrası kuantum verimliliği	148
Şekil 7.16. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ yansıma önleyici filmin optik geçirgenlik spektrumu.....	140
Şekil 7.17. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ yansıma önleyici filmin optik yansıtıcılık spektrumu	141
Şekil 7.18. Güneş hücresinin $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC sonrası AFM görüntüsü	142
Şekil 7.19. Güneş hücresinin $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ kaplaması öncesi ve sonrası $I-V$ eğrileri.....	143
Şekil 7.20. Hücrenin $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ kaplaması öncesi ve sonrası kuantum verimliliği	144
Şekil 7.21. SSC-022 kodlu hücrenin elektriksel performans testi sonucu.....	154
Şekil 7.22. SSC-014 kodlu hücrenin ters beslem testi öncesi ve sonrası $I-V$ eğrileri.....	157
Şekil 7.23. SSC-001 kodlu hücrenin elektron radyasyon testi öncesi ve sonrası $I-V$ eğrileri.....	159
Şekil 7.24. SSC-015 kodlu hücrenin elektron radyasyon testi öncesi ve sonrası $I-V$ eğrileri.....	160
Şekil 7.25. SSC-053 kodlu hücrenin proton radyasyon testi öncesi ve sonrası $I-V$ eğrileri.....	163

Şekil	Sayfa
Şekil 7.26. SSC-020 kodlu hücrenin vakum-termal döngü testi öncesi ve sonrası I - V eğrileri.....	165
Şekil 7.27. SSC-018 kodlu hücrenin nem ve sıcaklık testine ait I - V eğrileri	168
Şekil 7.28. Üretilen güneş hücrelerinin AM0 ışınlamı altındaki I - V grafikleri.....	171



RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. a) Çok kristal ve b) tek kristal silikon güneş hücreleri	34
Resim 3.2. Esnek yapıya sahip CIGS ince film güneş hücresi	37
Resim 4.1. GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili uzay kalifiye güneş hücresi	56
Resim 4.2. Uluslararası uzay istasyonunda kullanılan güneş panelleri.....	59
Resim 5.1. Gazi-FOTONİK'te bulunan VG Semicon V80H MBE sistemi.....	78
Resim 6.1. SUSS MicroTec Delta-6RC dönel kaplama sistemi.....	96
Resim 6.2. SUSS MicroTec MJB4 maske hizalama sistemi	96
Resim 6.3. Gazi-FOTONİK'te temiz oda şartlarında kullanılan fotolitografi sistemleri	97
Resim 6.4. Fotolitografi işlemi tamamlanmış metalizasyona hazır hücre dilimi	100
Resim 6.5. Desen geliştirme adımı sonrası hücre yüzeyinin profilometre ölçümü.....	100
Resim 6.6. BesTec magnetron püskürtme sistemi.....	104
Resim 6.7. Nanovak NVTH-350 termal buharlaştırma sistemi.....	105
Resim 6.8. Hızlı ısı tavlama (RTA) sistemi	107
Resim 6.9. Metalizasyon, tavlama ve aşındırma işlemleri tamamlanan hücre dilimi	107
Resim 6.10. Nanovak NVTs-500 eş-püskürtme sistemi.....	114
Resim 6.11. Veeco Dektak-150 profilometre sistemi.....	115
Resim 6.12. NanoMagnetics AFM sistemi.....	116
Resim 6.13. Perkin Elmer Lambda 2S UV-Vis spektrometresi	117
Resim 6.14. Bruker Vertex 80 FTIR sistemi	118
Resim 6.15. Keithley 4200-SCS $I-V$ sistemi ve NewPort Oriel Sol3A güneş simülatörü.....	119
Resim 6.16. Gazi-FOTONİK kuantum verimliliği ölçüm sistemi	121
Resim 7.1. SSC-009 kodlu hücrenin ön yüzey görüntüsü.....	146

Resim	Sayfa
Resim 7.2. SSC-014 kodlu hücrenin ön yüzey görüntüsü.....	147
Resim 7.3. SSC-009 kodlu hücrenin ön yüzey boyutları	147
Resim 7.4. SSC-009 kodlu hücrenin a) arka yüzey görüntüsü b) arka yüzey boyutları.	148
Resim 7.5. SSC-009 kodlu hücrenin kontak bölgesi boyutları.....	148
Resim 7.6. SSC-014 kodlu hücrenin ön yüzey boyutları	149
Resim 7.7. SSC-014 kodlu hücrenin a) arka yüzey görüntüsü b) arka yüzey boyutları.	149
Resim 7.8. SSC-014 kodlu hücrenin kontak bölgesi boyutları.....	149
Resim 7.9. SSC-009 kodlu hücrenin sağ iki kontak ızgarasının profilometre ölçümü ..	150
Resim 7.10. Hücrenin a) orta b) sol iki kontak ızgarasının profilometre ölçümleri.....	151
Resim 7.11. SSC-014 hücresinin a) sağ b) orta iki kontak ızgarasının profilometre ölçümleri.....	152
Resim 7.12. SSC-014 kodlu hücrenin sol iki kontak ızgarasının profilometre ölçümü .	153
Resim 7.13. Güneş hücresinin bant testi a) öncesi b) sonrası yüzey görüntüsü (c) öncesi (d) sonrası EL görüntüsü.....	155
Resim 7.14. a) Cam petri kabı içerisine yerleştirilen ve azot ortamında tutulan hücreler b) General Electric Saturne 43 lineer hızlandırıcı sistemi.....	158
Resim 7.15. a) Vakum haznesine yerleştirilen güneş hücresi b) radyasyon test düzeneği	162
Resim 7.16. SSC-053 kodlu hücrenin proton radyasyon testi sonrası EL görüntüsü.....	163
Resim 7.17. Vakum-termal döngü testi a) öncesi b) sonrası elektrolüminesans görüntüleri	165
Resim 7.18. Nem ve sıcaklık testinin gerçekleştirildiği sistem.....	167
Resim 7.19. Nem ve sıcaklık testi a) öncesi b) sonrası hücre görselleri	169
Resim 7.20. Kontak bağlantıları yapılmış panel montajına hazır uzay kalifiye güneş hücresi.....	170

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A_c	Hücre aktif alanı
As	Arsenik
Al	Alüminyum
Al_2O_3	Alüminyum dioksit
$AlGaAs$	Alüminyum Galyum Arsenik
$AlInP$	Alüminyum İndiyum Fosfat
$AlInGaP$	Alüminyum İndiyum Galyum Fosfat
Ag	Gümüş
Ar	Argon
Au	Altın
AU	Astronomik birim
$\text{\AA}$	Angström
a	Örgü sabiti
$a-Si$	Amorf silikon
b	Bükülme parametresi
Be	Berilyum
cm^2	Santimetrekare
δ	Etkin optik kalınlık
E_i	İletkenlik bandı enerjisi
E_v	Valans bandı enerjisi
E_F	Fermi enerjisi
E_g	Yasak enerji aralığı
E_D	Donör enerji seviyesi
E_A	Akseptör enerji seviyesi
$E_{iç}$	İç elektrik alan
E_{Fn}	Azınlık elektronların fermi enerjisi
E_{Fp}	Azınlık boşlukların fermi enerjisi

Simgeler	Açıklamalar
eV	Elektron volt
FF	Dolum faktörü
Φ_B	Potansiyel bariyer yüksekliği
Ga	Galyum
GaAs	Galyum Arsenik
GaInP	Galyum İndiyum Fosfat
Ge	Germanyum
$h\nu$	Foton enerjisi
Hz	Hertz
I_{sc}	Kısa devre akımı
I_{max}	Maksimum akım
I_0	Sızıntı akımı
I_L	Fotoakım
$I-V$	Akım-gerilim
In	İndiyum
J_{sc}	Kısa devre akım yoğunluğu
J_0	Sızıntı akım yoğunluğu
K	Kelvin
k	Ters örgü dalga vektörü
k_B	Boltzman sabiti
λ	Dalgaboyu
μm	Mikrometre
mA	Miliamper
mc-Si	Tek kristal Silikon
N	Azot
N_A^-	İyonize akseptör yoğunluğu
N_D^+	İyonize donör yoğunluğu
Ni	Nikel
nm	Nanometre
n	Kırılma indisi
η	Enerji dönüşüm verimi

Simgeler**Açıklamalar**

P	Fosfor
P_{out}	Çıkış gücü
P_{in}	Giriş gücü
P_s	Yüzeye düşen ışıma gücü
P_{max}	Maksimum güç
pc-Si	Çok kristal Silikon
Si	Silikon
SiO₂	Silikon dioksit
°C	Santigrat derece
T_s	Alttaş sıcaklığı
Ta₂O₅	Tantalyum pentoksit
Ti	Titanyum
TiO₂	Titanyum dioksit
θ	Gelme açısı
V	Gerilim
V_{oc}	Açık devre gerilimi
V_{max}	Maksimum gerilim
W	Tungsten

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AFB	Anti-faz bölge
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
AIAA	Amerikan havacılık ve uzay bilimleri enstitüsü
AM	Hava kütlesi
AR	Yansıma önleyici
ARC	Yansıma önleyici kaplama
ASTM	Amerikan test ve malzeme kurumu
BOL	Ömür başlangıcı
BSF	Arka yüzey alanı
CPV	Yoğunlaştırıcı fotovoltaik
CZ	Czochralski

Kısaltmalar**Açıklamalar**

DC	Doğru akım
DMSO	Dimetil sülfoksit
ECSS	Avrupa uzay standardizasyon işbirliği
EOL	Ömür sonu
ESA	Avrupa uzay ajansı
EQE	Harici kuantum verimliliği
FTIR	Fourier dönüşümlü kızılötesi
FZ	Hareketli bölge
GR	Büyütme oranı
HEMT	Yüksek elektron mobiliteli transistör
IR	Kızılötesi
ISS	Uluslararası uzay istasyonu
LD	Lazer diyot
LED	Işık yayan diyot
LEO	Alçak dünya yörüngesi
MBE	Moleküler demet epitaksi
MEE	Göç destekli epitaksi
MJSC	Çok eklemli güneş hücresi
MLARC	Çok katmanlı yansıma önleyici kaplama
MOCVD	Metal organik kimyasal buhar birikimi
NASA	Amerikan uzay ve havacılık dairesi
NIR	Yakın kızılötesi
NREL	Ulusal yenilenebilir enerji laboratuvarı
PD	Fotodedektör
PR	Fotorezist
PV	Fotovoltaik
RF	Radyo frekans
RMS	Karekök ortalama
RHEED	Yüksek enerjili elektron yansıma kırınımı
RTA	Hızlı ısıtma
SC	Güneş hücresi
SLARC	Tek katmanlı yansıma önleyici kaplama

Kısaltmalar**Açıklamalar****TAEK**

Türkiye atom enerjisi kurumu

TJSC

Üç eklemli güneş hücresi

UNAM

Ulusal nanoteknoloji araştırma merkezi

UV

Morötesi

UV-Vis

Morötesi-görünür bölge

Vis

Görünür

WRC

Dünya ışınlım merkezi

QE

Kuantum verimliliği

QW

Kuantum kuyu

QWSC

Kuantum kuyulu güneş hücresi

1. GİRİŞ

Enerji, modern dünyanın gelişimini ve ilerlemesini sağlamış, sunduğu imkanlar ile insan hayatının iyileştirilmesinde önemli bir araç olmuş ve insanlık tarihinin başlangıcından bugüne kadar vazgeçilmez bir ihtiyaç haline gelmiştir [1,2]. Günümüzde kullandığımız pek çok aygıt ve teknoloji enerjiye gereksinim duymaktadır. İnsanoğlunun enerji ihtiyacı, dünya nüfusundaki hızlı artış, sanayileşme ve teknolojiadaki hızlı gelişim ile birlikte her geçen gün artmaktadır [3-5].

Dünya, enerji ihtiyacının büyük bir kısmını petrol, doğalgaz ve kömür gibi fosil kaynaklardan sağlamaktadır. Enerji talebindeki artış, fosil yakıtlara olan gereksinimi arttırmaktadır. Bu durum insan sağlığı, çevre ve doğal yaşamı olumsuz etkileyen karbonmonoksit (CO), karbondioksit (CO₂) ve metan (CH₄) gibi sera gazı salınımlarına neden olmaktadır [2,6-8]. Daha yaşanabilir bir dünya ve gelecek nesiller için daha temiz bir doğa sağlamak için sera gazı salınımlarının azaltılması, enerji üretiminde kullanılan geleneksel fosil kaynaklar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarının tercih edilmesi, enerjinin verimli kullanılması ve yenilenebilir enerji teknolojilerine yapılacak yatırımlarla sağlanabilir [9,10].

Yenilenebilir enerji, doğal kaynaklardan elde edilen, dünya döngüsü ile kendisini tekrar eden, sürekliliği olan ve çevre dostu enerji türü olarak bilinmektedir [11,12]. Güneş, rüzgâr, hidroelektrik ve jeotermal enerji en önemli yenilenebilir enerji kaynaklarıdır. Güneş enerjisi, sahip olduğu potansiyel bakımından elektrik enerjisi üretiminde en önde gelen enerji kaynağıdır [5,13,14]. Bugün kullanılan enerji kaynaklarının büyük bir kısmı direkt ya da dolaylı olarak güneş enerjisinden türemiştir [15].

Güneşten gelen enerjiyi kullanılabilir enerjiye dönüştürme noktasında malzeme, yöntem ve teknoloji açısından güneş enerjisi teknolojileri çeşitlilik göstermekle birlikte genel olarak iki ana gruba ayrılabilir. Bunlardan ilki, güneş enerjisinden faydalanılarak ısı enerjisi elde eden ve üretilen ısıнын, ısınma ve elektrik üretiminde kullanıldığı *Isıl Güneş Teknolojisi*'dir. Diğeri ise, güneş enerjisinden doğrudan elektrik enerjisi üretiminde kullanılan yarıiletken aygıtları temel alan *Fotovoltaik (PV) Güneş Hücresi Teknolojisi*'dir [5,16,17].

Bilim insanı Henri Becquerel tarafından 1839'da keşfedilen ve fotovoltaiik etki prensibi ile çalışan güneş hücreleri, güneşten gelen ışıının enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştürebilen aygıtlardır [18-20]. Fotovoltaiik güneş hücreleri, gürültü oluşturmeyen, hareketli mekanik parçalar içermeyen, bakım gerektirmeyen, çevreye zarar vermeyen, yüksek güvenilirliğe ve düşük işletim maliyetine sahip cihazlardır. Güneş hücreleri genel olarak aydınlanma, enerji gereksinimi olan sistemlerin beslenmesi ve haberleşme gibi temel ihtiyaçların karşılanmasına dayalı birçok uygulamada tercih edilmektedir [2,10].

Günümüzde fotovoltaiik güneş hücre teknolojisi hızla gelişmekte ve artan enerji dönüşüm verimlilikleri sayesinde kullanım alanları ve kullanılabilirlikleri hızla artmaktadır. Yeryüzünde insanoğlunun enerji ihtiyacının yenilenebilir enerji kaynaklarından karşılanması konusunda güneş hücreleri başı çekmektedir. Güneş hücrelerinin enerji kaynağı olarak kullanımı sadece yeryüzü uygulamaları ile sınırlı değildir. 1958 yılında uzaya fırlatılan Vanguard-I uydusu, güneş hücrelerinin dünya dışı ortamda da enerji ihtiyacını karşılayabilecek bir aygıt olduğunu göstermiştir [21,22]. Bu uzay görevinden beri insanoğlunun dünya dışı gezegenlere gönderdiği araştırma araçlarının, yer-gözlem, sivil, askeri ve haberleşme amacıyla kullanılan uyduların hemen hemen tamamı, enerji ihtiyacını güneş hücrelerini kullanarak karşılamaktadır [23,24].

Bir uydunun çalışabilmesi için gereken enerjiyi üreten güç sistemi, uydunun çalışma ömrünün, görev verimliliğinin ve maliyetinin belirlemede oldukça önemlidir. Uydu güç sistemleri genel olarak birincil enerji kaynakları, ikincil enerji kaynakları ve güç kontrolü olmak üzere üç ana bölümden oluşmaktadır [25-27]. Birincil enerji kaynakları enerji üretimini sağlayan güneş hücreleri, yakıt hücreleri, nükleer sistemler ya da radyoizotop termoelektriklerdir. Günümüzde en yaygın kullanılan birincil enerji kaynağı güneş hücreleridir [21,25,28]. Güneş hücreleri uzay görevlerinde yaygın kullanılmasına ve oldukça verimli olmalarına rağmen sadece dünya ve güneş yörüngesi gibi yeterli güneş ışıının olduğu uzay bölgelerinde çalışacak araçlarda kullanılabilir. Derin uzay görevlerinde ise daha karmaşık olan nükleer enerji sistemleri ön plana çıkmaktadır [25]. İkincil enerji kaynakları ise uydunun güneş görmediği karanlık döngüler sırasında birincil enerji kaynağının enerji üretmediği durumda uyduya elektrik gücü sağlayan ve enerjiyi depolayan bataryalardan oluşan sistemlerdir [25,29]. Güç kontrolü ise tüm enerji dağıtımından sorumludur.

Uzay teknolojisinde kullanılan güneş hücreleri, yüksek radyasyon ortamına ve uzayın ilgili bölgesindeki zorlu şartlara dayanıklı olmalıdır. Vanguard-I uydusu ile birlikte kullanılmaya başlanan Silikon (Si) tabanlı hücreler 20. yüzyılın sonlarından itibaren yerini radyasyon ve termal dayanımı daha fazla olan, yüksek enerji dönüşüm verimliliklerine ulaşabilen GaAs tabanlı hücre teknolojisine bırakmıştır [2,21,30,31]. Günümüzde kullanılan uydular, güneş spektrumunun geniş bir bölgesinden fotoakım üretimi sağlayan farklı yasak enerji aralıklarına sahip ardışık eklemli III-V grubu güneş hücrelerini kullanmaktadır. Standartlar ve bu teknolojiye uluslararası literatür, uzayda kullanıma aday güneş hücrelerinin en az % 25 verime sahip olması gerekliliğini ortaya koymuştur. Uzay teknolojisine % 14 verimle giriş yapan güneş hücreleri, günümüzdeki uydulara % 32'ye ulaşan verimleriyle enerji sağlamaktadır [21,32,33].

Güneş spektrumundan söğrulan bölgeyi maksimuma çıkartmak veya yüksek foton tuzaklama etkisi sağlamak, güneş hücresinin enerji dönüşüm verimliliğini arttırmada önemli bir konudur. Geniş bir spektral aralıktan fotoakım oluşturabilmek için çok eklemli güneş hücreleri [34-37], çoklu kuantum kuyulu güneş hücreleri [38] ve yüksek soğurma katsayılı ince film güneş hücreleri [39] gibi verim rekortmeni pek çok yeni tasarım güneş hücresi literatürde rapor edilmiştir.

Son yirmi yıldır, güneş spektrumunun daha geniş bir spektral bölümünü söğurabilen III-V grubu yarıiletken malzemelerin kullanıldığı ardışık p-n eklemlerin büyütülmesiyle oluşturulan çok eklemli hücreler üzerindeki araştırmalar hız kazanmıştır. Bu hücreler farklı yasak enerji aralığına sahip p-n eklemli yarıiletken katmanların ardışık olarak büyütülmesiyle oluşturulmaktadır. Çok eklemli güneş hücreleri, yüksek kristal kalitesine ve en iyi bant optimizasyonuna sahip olacak biçimde tasarlanarak metal-organik kimyasal buhar birikimi (MOCVD) ve moleküler demet epitaksi (MBE) gibi epitaksiyel büyütme teknikleri kullanılarak üretilmektedir [5,34,40]. Çok eklemli hücrelerde güneş spektrumunun daha geniş bölgesinden fotoakım sağlamak amaçlandığından yasak enerji aralığı en yüksek olan eklem en üst katmanda olacak şekilde tasarlanmaktadır. Günümüzde üç eklemli hücre yapısı olarak genellikle; GaInP (1,9 eV)/GaAs (1,4 eV)/Ge (0,6 eV) yapı tasarımı kullanılmaktadır. Bu tasarım ile SpectroLab firması uzay ortamı için % 31 verime ulaştığını rapor etmiştir [33]. Aynı tasarımın yeryüzü uygulamaları için ise tek güneşte yaklaşık % 38 verim sağladığı bildirilmiştir [41]. Günümüzde, III-V grubu yüksek verimli

güneş hücreleri elde etmek ve aygıt performansını arttırmak için aygıt karakteristikleri, tasarımları ve uygulamaları üzerine geliştirme çalışmaları halen devam etmektedir.

Uzay ortamındaki şartlara dayanabilecek nitelikte yani “uzay kalifiye” özelliklere ve bu literatürde kabul gören % 25 ve üzerinde verimliliğe sahip güneş hücrelerinin yerli imkanlar, milli kaynak ve bilgi birikimi ile geliştirilmesi stratejik öneme sahip bir ihtiyaçtır. Yapı tasarımından kristal büyütme ve fabrikasyon süreçlerine, yansıma önleyici katmanların oluşturulmasından uzay ortamında maruz kalacağı fiziksel etkilere dayanımının test ve analizine kadar yoğun bir ar-ge çalışması bu tezin kapsamında yer almaktadır. Yüksek verime ve uzay şartlarına karşı koyabilecek yeteneklere sahip III-V grubu üç eklemlili güneş hücrelerinin elde edilebilmesi için pek çok parametrenin dikkate alınması gerekmektedir. Hücre katmanları arasındaki örgü uyumu, akım uyumu, yasak enerji aralıkları, soğurma katsayıları, ısıl genleşme katsayıları, kristal büyütme süreçleri, aygıt fabrikasyon adımları, metalizasyon işleminde kullanılan malzemeler ve kullanılan yansıma önleyici katmanlar bu parametrelerden bazılarıdır. Bu tez çalışması, bahsedilen parametrelerin optimizasyon çalışmalarını da kapsamaktadır. Uzay kalifiye güneş hücresi ar-ge faaliyetlerinin gelişimi sayesinde, ülkemizin uzay teknolojisi sanayisine önemli katkı sağlanması hedeflenmektedir. Bu çalışma ile ortaya çıkacak ürün, sonuç, bilimsel yayın ve tecrübenin ülkemizin uzay teknolojisinde bilgi birikimi oluşturması açısından oldukça önemli olduğu düşünülmektedir.

Bu çalışma, tezin genel amacı ve hedefleri doğrultusunda aşağıdaki şekilde organize edildi.

- GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücre yapısı, önceki çalışmalar ile optimize edilmiş büyütme parametreleri kullanılarak 3 inç çaplı p-Ge alttaş üzerine MBE sistemi ile büyütüldü.
- Büyütülen hücre yapısı alttaş dilimleyici sistem kullanılarak dilimlendi. Dilimlenen 3 cm x 2 cm boyutundaki hücreler kullanılarak fotolitografi, metalizasyon ve yansıma önleyici kaplama (ARC) süreçleri için optimizasyon çalışmaları gerçekleştirildi. Ardından, 6 cm x 3 cm boyutunda ve 17 cm² alana sahip prototip hücrelerin aygıt fabrikasyonları, fotolitografi ve metalizasyon işlemleri ile gerçekleştirildi.
- Optik yansıma kayıplarını azaltmaya yönelik olarak yansıma önleyici katman tasarımı, üretimi ve karakterizasyonları gerçekleştirildi. En verimli ARC tasarımı prototip hücreler üzerine kaplandı.

- Tasarım, üretim ve geliştirme adımlarının sonucunda elde edilen güneş hücrelerinin uzay şartlarına dayanımının incelendiği çeşitli testler (Uzay kalifikasyon testleri) gerçekleştirildi. Test sonuçlarının uluslararası standartlar ve ticari olarak satılan ürünler ile uyumu incelenerek, üretilen GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücrelerinin uzay kalifiye niteliği değerlendirildi.
- Üretilen GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücrelerinin uzay ortamındaki performans parametrelerinin belirlenmesi amacıyla AM0 ışınımı altındaki elektriksel analizleri gerçekleştirildi.

Tez çalışmasında sunulan temel bilgiler, yapılan araştırmalar ve elde edilen sonuçlar şu şekilde sunuldu:

Tezin *1. Bölümü*'nde tez çalışmasının önemini ve genel amacını vurgulayan, ilgili konular hakkındaki temel bilgiler sunuldu. *2. Bölüm*'de yarıiletken malzemeler, III-V grubu yarıiletkenler ve bazı yarıiletkenlerin malzeme parametreleri hakkında genel bilgiler verildi. *3. Bölüm*'de fotovoltaik güneş hücresi temel kavramları, tarihsel gelişimi, çalışma prensibi, kullanım alanları ve türleri hakkında bilgiler sunuldu. Ayrıca, çok eklemlili güneş hücreleri ve GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücreleri ile ilgili bilgiler verildi. *4. Bölüm*'de uzay kalifiye güneş hücreleri, kalifikasyon testleri ve kalifikasyon standartları hakkında bilgiler sunuldu. *5. Bölüm*'de GaInP/GaAs/Ge güneş hücre yapısının tasarımı, büyütülmesi ve kullanılan deneysel teknikler hakkında bilgiler verildi. Güneş hücresi aygıt fabrikasyonu, fotolitografi ve metalizasyon süreçleri ile yansıma önleyici katman tasarımı tezin *6. Bölümü*'nü oluşturmaktadır. Ayrıca bu bölüm, kullanılan deneysel teknik ve analiz sistemleri hakkında bilgiler içermektedir. *7. Bölüm*'de uzay kalifiye güneş hücresi ar-ge çalışmaları sonucunda elde edilen bulgular sunuldu. Ayrıca bu bölümde kalifikasyon testleri ve AM0 ışınımı testlerine yer verildi. Tezin son bölümü olan *10. Bölüm*'de ise elde edilen sonuçlar sunulurak değerlendirme ve öneriler yapıldı.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan tüm deneysel çalışmalar, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nin sahip olduğu altyapı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın ülkemiz uzay sanayisine katkı sağlamasının yanında ülkemiz için uzay kalifiye nitelikte güneş hücresi üretiminde bir ilk olmasının haklı gururunu yaşamaktayız.



2. GENEL BİLGİLER

Bu bölüm; yarıiletken malzemeler, yarıiletken p-n eklem yapılar ve III-V grubu yarıiletken malzemeler hakkında genel bilgiler içermektedir. Ayrıca bölüm içerisinde, tez çalışmasında büyütülen güneş hücre yapılarında kullanılan Germanyum (Ge), Galyum Arsenik (GaAs) ve Galyum İndiyum Fosfat (GaInP) yarıiletken bileşikleri ve alaşımları tanıtıldı.

2.1. Yarıiletken Malzemeler

Yarıiletkenler, normal koşullarda elektriksel olarak yalıtkan olan ancak ısı, optik uyarım ve uygulanan gerilim gibi enerjik dış etkiler ile iletken özellik gösteren, öz dirençleri metaller ile yalıtkanlar arasında yer alan malzemelerdir [42,43]. Yarıiletken malzemeler, katıların en ilginç, kullanılabilir ve önemli sınıfını oluşturmaktadır [44]. Yarıiletkenlerin en önemli özelliği, serbest elektronların bulunduğu iletkenlik bandı ile bağlı elektronların yer aldığı valans bandı arasında bir yasak enerji aralığının bulunması ve yapılacak uygun atomik katkılamanın malzemenin fiziksel özelliklerine önemli ölçüde etki etmesidir [45]. Özellikle iletkenliklerinin kontrollü olarak değiştirilebilir olması, yarıiletkenlerin günümüzde yaygın biçimde kullanılmasının başlıca nedenidir [46].

Teknolojik uygulamalarda kullanılabilen, yüksek kristal kalitesine ve üstün özelliklere sahip yarıiletken malzeme geliştirme çalışmaları 19. yüzyılın başlarında başlamış ve günümüze kadar çok sayıda farklı tür malzeme geliştirilmiştir. Silikon (Si) ve Germanyum (Ge), en bilinen ve doğada kendiliğinden bulunan element yapıdaki yarıiletkenlere örnek olarak verilebilir. GaAs, GaP, AlGaAs, InGaAs, GaInP, GaN ve GaAsP gibi III-V grubu yarıiletkenleri ile CdTe, HgTe ve HgCdTe gibi bileşik ve alaşım yapıdaki II-VI grubu yarıiletkenleri, laboratuvar koşullarında farklı üretim teknikleri kullanılarak elde edilen yapay yarıiletkenlerdir [42,47,48]. Aygıt teknolojisinde yaygın olarak kullanılan bileşik ve alaşım yapıdaki yarıiletkenler, periyodik tablonun IIA ve VIA grupları arasında kalan elementlerin (Çizelge 2.1) bileşimiyle oluşturulmaktadır [42].

Çizelge 2.1. Periyodik tabloda IIA ve VIA grupları arasında kalan bölge [42]

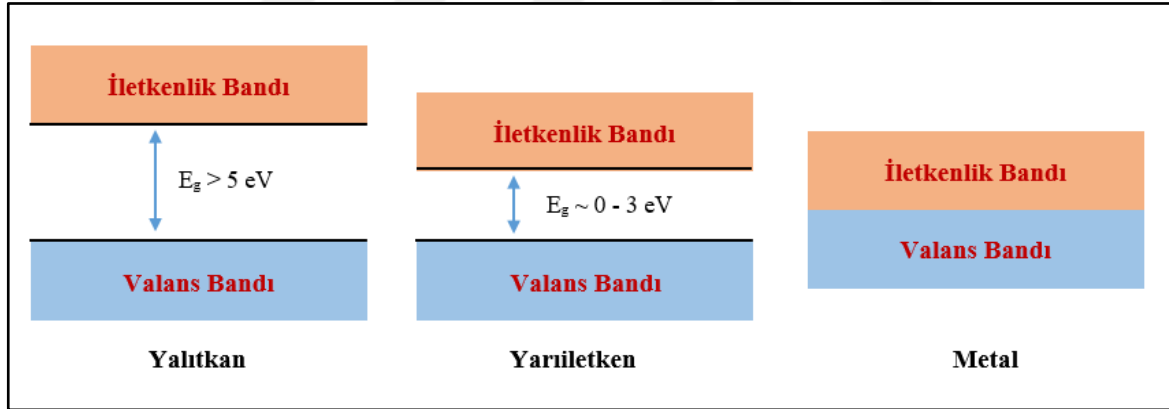
<i>IIA</i>	<i>IIIA</i>	<i>IVA</i>	<i>VA</i>	<i>VIA</i>
	5 B Bor	6 C Karbon	7 N Azot	8 O Oksijen
	13 Al Alüminyum	14 Si Silikon	15 P Fosfor	16 S Kükürt
30 Zn Çinko	31 Ga Galyum	32 Ge Germanyum	33 As Arsenik	34 Se Selenyum
48 Cd Kadmiyum	49 In İndiyum	50 Sn Kalay	51 Sb Antimoni	52 Te Tellür
80 Hg Cıva	81 Tl Talyum	82 Pb Kurşun	83 Bi Bizmut	84 Po Polonyum

Yasak enerji aralığı, yarıiletken malzemenin pek çok özelliğinin tanımlanmasında kullanılan, elektronik, optik, elektro-optik ve optoelektronik uygulamalarda kullanılabilirliğini belirleyen en önemli parametredir [43,47]. Yarıiletken malzemelerde kristal örgünün periyodikliği, izinli bant ve yasak bant olarak adlandırılan Şekil 2.1’deki gibi enerji bölgeleri meydana getirmektedir. Elektronlarca işgal edilemeyen enerji seviyelerinin bulunduğu yasak bant, iletkenlik ve valans bantlarını birbirinden eV mertebesinde bir enerji farkı kadar ayırmaktadır. Yasak enerji bandının altında bulunan valans bandındaki elektronlar, yasak enerji aralığını aşabilecek kadar enerji kazandıklarında iletkenlik bandına çıkarak elektriksel ilettime katılırlar. Yalıtkan malzemelerde yasak bant aralığı çok geniş olduğundan uygulanacak dış etki yasak enerji aralığını aşmaya yetmeyecektir. Metallerde iletkenlik ve valans bandı çakışık olduğundan aralarında enerji farkı yoktur. Dolayısıyla valans bandındaki bir elektron herhangi bir dış etki olmadan iletkenlik bandına geçerek iletkenlik sağlar. Yarıiletkenlerde ise optik, ısı veya elektriksel uyarımlar malzemenin elektriksel özelliklerini değiştirecektir [43,47,48].

Yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliği genellikle sıcaklığa, aydınlatmaya, manyetik alana, basınca ve safsızlık atomlarının yoğunluğuna bağlıdır. Dış etkiyle meydana gelen bu değişimler, günümüzde kullandığımız yarıiletken aygıt teknolojisinin temelini oluşturmaktadır. Özellikle fotovoltaiik güneş hücreleri, optik uyarılmayı temel alan aygıtlardır. Gelen foton, enerjisinin tamamını valans bandındaki elektrona aktarır ve

arkasında bir boşluk (hol) bırakarak iletkenlik bandına geçer. Geçişin mümkün olabilmesi için foton enerjisinin, kullanılan yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığına eşit veya büyük olması gerekmektedir. Bu uyarılma süreciyle foton, yarıiletken malzeme tarafından soğurulur ve akım iletimi yaratır [46,49,50].

Yarıiletken malzemeler, direk ve indirek olmak üzere iki farklı tür bant yapısına sahiptir. Yarıiletkenlerde valans bandı minimumu $k=0$ 'da bulunur. Eğer malzemenin iletkenlik bandı minimumu farklı k değerinde ise ($k \neq 0$) bu tür yarıiletkenler indirek bant yapısına sahiptir. Si, Ge ve AlAs indirek bant aralıklı yarıiletkenlere örnek olarak verilebilir. İletkenlik bandı minimumu valans bandı maksimumu ile aynı k değerinde ise ($k=0$) bu durumda direk bant yapısı mevcuttur. Bu tür yarıiletkenlere örnek olarak GaAs, GaInP ve InN verilebilir [45,51]. Işık yayan diyot (LED), güneş hücresi (SC), lazer diyot (LD) ve fotodedektör (PD) gibi yarıiletken tabanlı optoelektronik uygulamaların neredeyse tamamında direk bant aralığına sahip yarıiletken malzemeler kullanılmaktadır [51,52].

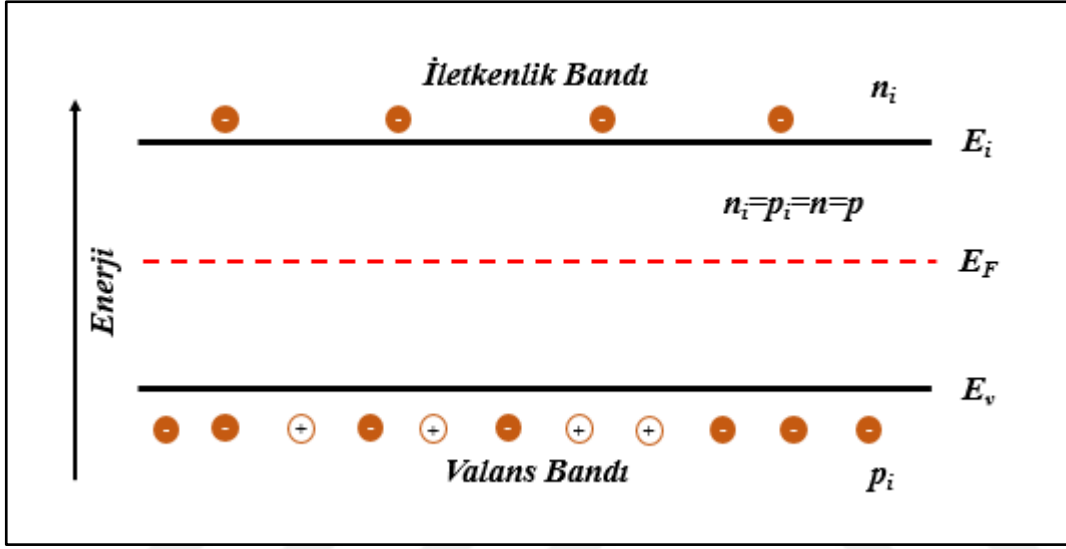


Şekil 2.1. Yalıtkan, yarıiletken ve metallerde enerji bant yapılarının şematik gösterimi [42]

Yarıiletken malzemeler üretilirken kontrollü şekilde uygun atomlar ile katkılanarak n-tipi ve p-tipi olmak üzere katkılı yarıiletken çeşitleri üretilebilir. Katkılama işlemi, yarıiletken malzemenin elektriksel ve optik başta olmak üzere fiziksel özellikleri üzerinde oldukça etkilidir. Yarıiletken malzemeleri katkısız (saf) ve katkılı olarak iki kategoride incelemek mümkündür.

2.1.1. Katkısız (Saf) yarıiletkenler

Katkısız yarıiletkenler, herhangi bir katkı atomu içermeyen ve bu nedenle saf (intrinsic) yarıiletkenler olarak da adlandırılan yarıiletken malzeme türüdür. Katkısız yarıiletkenlerin akım iletiminde hem elektronlar hem de boşluklar etkilidir ve bu tür malzemelerde elektron sayısı boşlukların sayısına eşittir [43,46,53,54].



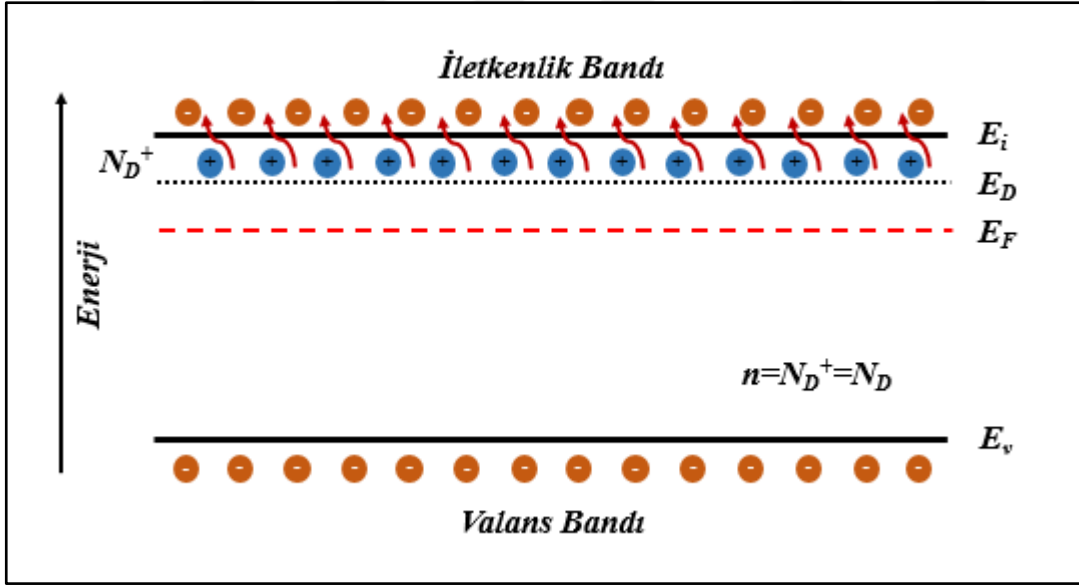
Şekil 2.2. Katkısız (saf) yarıiletkenin enerji bant diyagramı

Mutlak sıfır (0 K, -273 °C)'da yarıiletkenlerin valans bandı tamamen doludur ve yasak enerji aralığı kadar bir enerji farkı ile boş olan iletkenlik bandından ayrılmıştır. Bu durumda malzeme elektriksel olarak iletken değildir. Artan sıcaklık ile birlikte ısıl uyarım yardımıyla enerji kazanan elektronlar, valans bandından iletkenlik bandına geçer ve iletkenlik sağlar. Yeterli enerji ile iletkenlik bandına geçen elektron, valans bandında elektrona zıt yönde hareket eden boşluk (hol, deşik) bırakır. Katkısız yarıiletkende iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu, valans bandındaki boşluk yoğunluğuna eşittir. Akım iletiminde etkin rol oynayan bu taşıyıcıların yoğunluğu (saf taşıyıcı yoğunluğu), n_i ve p_i ile gösterilir ve katkısız yarıiletkenlerde $n_i=p_i$ 'dir. Mutlak sıfır sıcaklığında elektronlarca işgal edilen son enerji seviyesi Fermi seviyesidir (E_F). Fermi seviyesi, katkısız yarıiletkende valans ve iletkenlik bandının tam ortasında, yani yasak enerji aralığının ortasında ($E_g/2$) yer alır [47,48,51]. Katkısız yarıiletkenlerin enerji bant diyagramı Şekil 2.2'de verildi. Katkısız yarıiletkene yapılan katkılama işlemi, malzeme içerisindeki elektron veya boşluk

yoğunluklarının değişmesini ve böylece akım iletiminin çoğunlukla elektronlar ya da boşluklarla yapılmasını belirler.

2.1.2. Katkılı yarıiletkenler

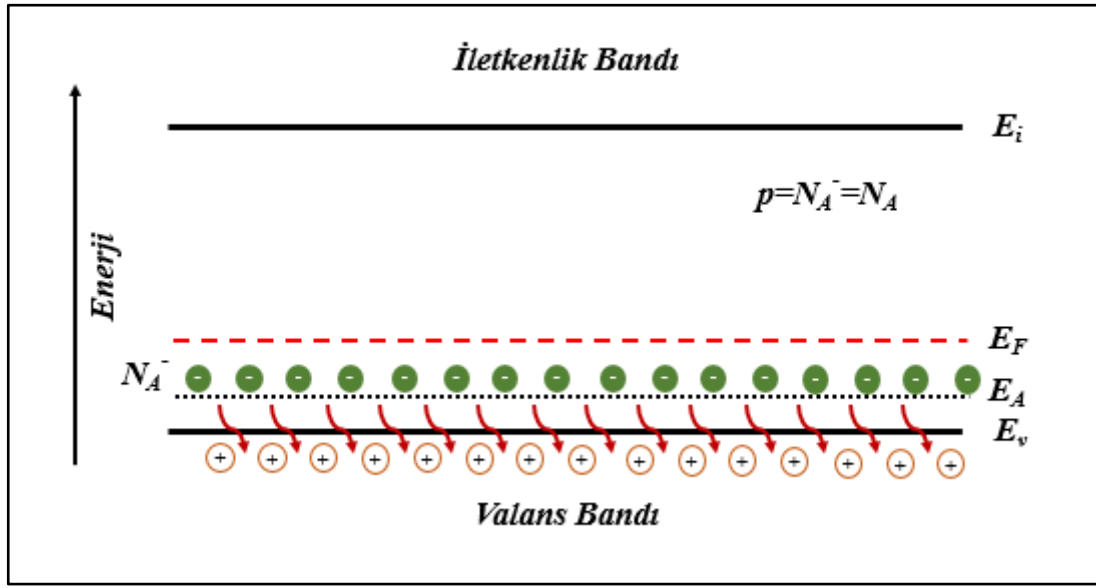
Katkısız yarıiletken malzemelerin elektronik ve optoelektronik aygıt teknolojisindeki sınırlı kullanılabilirliği, yarıiletkenlerin kontrollü bir şekilde uygun safsızlık atomları ile katkılanması çalışmalarının önünü açtı. 1950 yılında başlayan çalışmalar ile birlikte katkılı yarıiletken türü üzerine araştırmalar yoğunlaştı [46,51]. Katkılama, yarıiletken kristalini oluşturan atomlardan bazılarının yerine uygun atomların yerleştirilmesi ile yapılmakta ve bu durum elektronik dağılımda değişikliğe neden olmaktadır. Yarıiletken kristale katkılanan atom malzemeye elektron veriyor ve elektronların çoğunlukta olduğu bir akım iletim mekanizması yaratıyorsa bu atom elektron verici (donör) ya da elektron alarak boşlukların çoğunlukta olduğu bir malzeme oluşturuyorsa bu atom elektron alıcı (akseptör) olarak adlandırılır [13,51].



Şekil 2.3. n-tipi yarıiletkenler için enerji bant diyagramı

Katkılı yarıiletkenler, çoğunluk taşıyıcılarının negatif yüklü elektronlar veya pozitif yük merkezleri olarak düşünülen boşlukların varlığına göre n-tipi ve p-tipi olarak adlandırılır. n-tipi yarıiletkenlerde elektron sayısı boşluk sayısından oldukça fazladır. Elektronlar çoğunluk (n_n), boşluklar ise azınlık taşıyıcı (p_n) durumundadır [43]. Katkılanan n-tipi bir yarıiletkende kristale eklenen donör atomlarının yasak enerji aralığı içerisinde oluşturduğu donör enerji

seviyesi (E_D), iletkenlik bandının donör atomlarının iyonlaşma enerjisi kadar altında yer alır. Bu seviyedeki donör atomları küçük bir enerji ile iyonize olarak elektron verir ve elektronlar iletkenlik bandına geçer. n-tipi katkılanan yarıiletkende akım iletimi elektronlarca kontrol edilir. Şekil 2.3’de n-tipi bir yarıiletken malzemenin enerji bant diyagramı görülmektedir. Farklı yarıiletken malzemeler için farklı donör atomları kullanılmaktadır. Örneğin IVA grubu element yarıiletkenleri Si ve Ge, VA grubu elementleri (P, As, vb.) ile katkılandığında n-tipi, III-V grubu bileşik ve alaşım yarıiletkenleri ise IVA grubundan Si ile katkılandığında n-tipi özellik sergilemektedir [46,55,56].



Şekil 2.4. p-tipi yarıiletkenler için enerji bant diyagramı

Yarıiletkenlerin alıcı atomlar ile katkılanması sonucu elde edilen p-tipi yarıiletkenlerde boşluklar çoğunluk (p_p), elektronlar ise azınlık taşıyıcısıdır (n_p). Alıcı atomların oluşturduğu enerji seviyesi (E_A), Şekil 2.4’de görüldüğü gibi yasak enerji aralığında ve valans bandının hemen üzerinde yer alır. Uygulanan enerji, valans bandındaki elektronları hemen yakınındaki akseptör seviyesine çıkartır. Akseptör atomları aldığı enerji ile elektron olarak iyonlaşır. Bu durumda valans bandındaki boşluk sayısı iletkenlik bandındaki elektron sayısından fazla olur. p-tipi yarıiletken malzemelerde elektriksel iletkenliğe katkı, boşlukların hareketliliğinden gelmektedir [43,57,58]. n-tipi yarıiletkenlerde olduğu gibi p-tipi yarıiletken elde etmek için de farklı yarıiletkenlere farklı alıcı atomlar katkılanmaktadır. Örneğin, IVA grubu yarıiletkenleri Si ve Ge, IIIA grubundan atomlar (B, Al, vb.) ile katkılanırsa p-tipi bir yarıiletken oluşacaktır. III-V grubu bileşik ve alaşım yapıdaki

yarıiletken malzemeler için ise IIA grubundan katkılanan Be atomu alıcı atom gibi davranıp p-tipi yarıiletken elde edilmesini sağlayacaktır.

Katkılamanın miktarı, taşıyıcı yoğunluğunu ve dolayısıyla iletkenliği belirleyeceğinden oldukça önemlidir. Belirli bir sınırın üzerinde yapılan katkılama, kristal yapıda ve yarıiletken malzemenin özelliklerinde bozulmaya (dejenere yarıiletken) neden olur. Bu nedenle uygulanacak katkı yoğunluğunun optimizasyonu oldukça önemlidir. Katkılı yarıiletkenlerin kullanıldığı p-n eklem yapılar yarıiletken aygıt teknolojisinin temelini oluşturmaktadır [13,43,54].

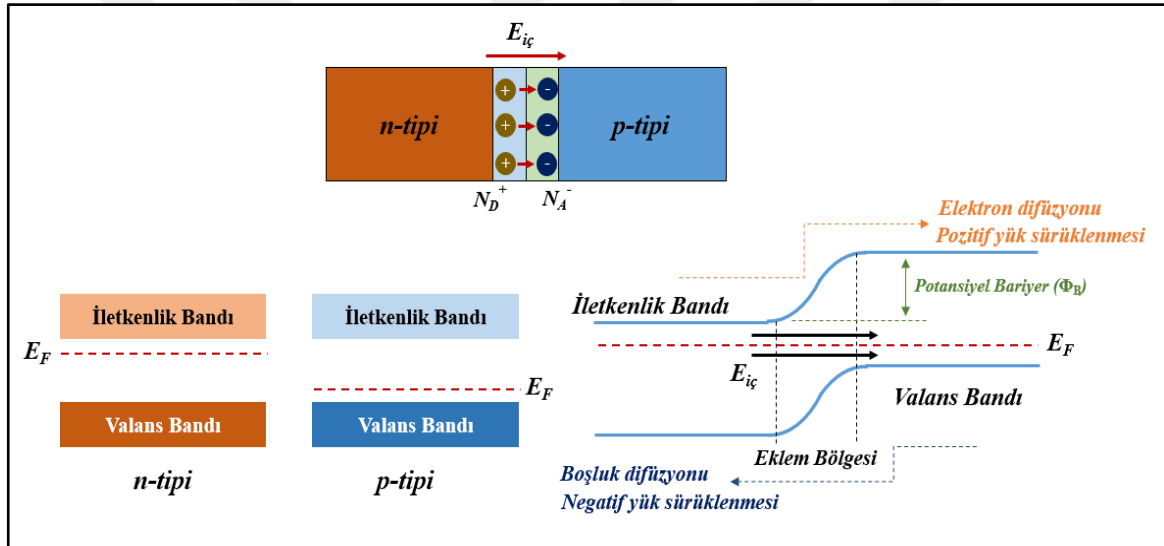
2.2. Yarıiletken p-n Eklem Yapılar

Çoğunluk yük taşıyıcılarının elektronlar olduğu n-tipi yarıiletkenler ile çoğunluk yük taşıyıcısı boşluklar olan p-tipi yarıiletkenlerin bir araya getirilmesiyle elde edilen yapılar p-n eklem olarak adlandırılır. Yarıiletken endüstrisinin temelini oluşturan p-n eklem yapılar, doğrultucu diyot, güneş hücresi, lazer diyot, ışık yayan diyot, transistör ve fotodedektör gibi pek çok elektronik ve optoelektronik aygıtta kullanılmaktadır [42-45].

Yarıiletken p-n eklem yapılar, iyon ekimi, termal tavlama, difüzyon, oksidasyon ve p-tipi ile n-tipi katmanların üst üste kaplanması/büyütülmesi gibi yöntemlerle oluşturulabilmektedir. Başta optoelektronik aygıtlarda kullanılacak p-n eklem yapılar olmak üzere, yüksek kristal kalitesine ve üstün performansa sahip eklem oluşturmak için epitaksiyel büyütme süreçlerinde birbiri üzerine büyütülen tabakaların uygun elementler kullanılarak n-tipi ve p-tipi katkılanmasıyla elde edilmektedir [43,59].

n-tipi ve p-tipi yarıiletken malzemelerin bir araya getirilmesi, malzemelerdeki elektron ve boşluk yoğunluklarının dolayısıyla Fermi seviyelerinin farklı olması nedeniyle taşıyıcı difüzyonu oluşmasına neden olmaktadır. Boşluk yoğunluğunun fazla olduğu p-tipi yarıiletkendeki boşluklar yoğunluğun az olduğu n-tipi tarafa, elektron yoğunluğunun fazla olduğu n-tipi bölgedeki elektronlar ise p-tipi tarafa doğru difüzyon akımı oluşturur. Difüzyon süreci n-tipi ve p-tipi bölgelerdeki Fermi seviyeleri birbirine eşitlenene kadar devam eder. Elektronlar p-tipi tarafa, boşluklarda n-tipi tarafa difüz ettiğinde çoğunluk taşıyıcılarıyla yeniden birleşir. Elektronların difüzyonu, n-tipi tarafta ekleme yakın bölgede iyonize olmuş donör atomlarının (N_D^+) yerleşmesine neden olur. Benzer şekilde p-tipi tarafın

ekleme yakın bölgesinde ise iyonize alıcı atomları (N_A^-) dengelenmemiş halde bulunur. Eklem yakınında oluşan bu iyonize atom yerleşimi, eklem n-tipi tarafında pozitif yüklü, p-tipi tarafında ise negatif yüklü bir tabaka oluşmasına neden olur. Pozitif yüklü bölgeden negatif yüklü bölgeye doğru bir iç elektrik alan ($E_{iç}$) oluşur. $E_{iç}$, eklem bölgesinde bir potansiyel engel meydana getirir. Elektrik alan nedeniyle bu bölgeye giren yüklü bir parçacık, pozitif veya negatif yüklü olmasına göre n-tipi ya da p-tipi bölgeye doğru sürüklenerek sürüklenme akımlarını meydana getirir. Denge durumunda hareketli taşıyıcı yoğunluğunun olmadığı bu bölge tüketim bölgesi (uzay yükü bölgesi) olarak adlandırılır [43,45,48,60]. Eklem oluşumu sırasındaki taşıyıcı hareketi ve p-n eklem enerjisi bant diyagramı Şekil 2.5’de verildi.



Şekil 2.5. p-n eklem oluşumu ve p-n eklem enerjisi bant diyagramı

Termal denge durumunda difüzyon akımı ve sürüklenme akımı dengededir. Doğru beslemde gerilim uygulanan p-n ekleme difüzyon ve sürüklenme akımları arasındaki denge bozulmaktadır. Azalan bariyer potansiyeli nedeniyle sürüklenme akımı azalır. Boşluklar p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye, elektronlar ise n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye doğru difüzyon akımı oluşturur. Difüzyon sürecinde elektron ve boşluklar eklem yakın bölgede yeniden birleşir. Yeniden birleşme mekanizması p-n eklemden foton salınımı ile sonuçlanmaktadır. Yarıiletken p-n eklem uygulanan doğru beslemde eklem bölgesinden foton salınımı, ışık yayan diyot ve lazer diyotların çalışma mekanizmasını oluşturmaktadır. Benzer çalışma prensibini temel alan güneş hücreleri ve fotodedektörlerde ise p-n eklem ışık düşürülmesi, gelen fotonun eklem bölgesinde elektron-boşluk çiftlerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Elektron ve boşluklar E_{ic} etkisiyle n-tipi ve p-tipi bölgelere doğru sürüklenerek elektrik akımı meydana getirir [45,52].

Yarıiletken p-n eklemler, p-tipi ve n-tipi katkılanan yarıiletken malzemenin aynı veya farklı olmasına göre iki çeşittir [43,60]. Aynı tür eklem (homoecklem), aynı yarıiletken malzemenin n-tipi ve p-tipi olarak katkılanması ile elde edilir. Örneğin GaAs bileşiğinin katkılanması ile elde edilen p-n eklem yapı aynı tür ekleme örnek olarak verilebilir. Farklı tür eklem (heteroecklem) ise n-tipi ve p-tipi katkılanan farklı yarıiletken malzemeler ile oluşturulmaktadır. Örneğin, n-tipi GaAs ile p-tipi AlGaAs kullanılarak oluşturulan eklem yapısı farklı tür eklemdir.

2.3. III-V Grubu Yarıiletken Malzemeler

Silikon, yarıiletken endüstrisinin temel taşıdır. Yarıiletken malzeme çalışmalarının başlamasından günümüze kadar uzanan bir geçmişi vardır ve halen en popüler yarıiletkendir. Silikonun popülerliğine, üzerinde kazanılan bilgi birikimine ve yaygın kullanımına rağmen sahip olduğu bazı özellikler optoelektronik ve yüksek hızlı elektronik gibi önemli uygulamalar için kullanımını sınırlamaktadır. Silikon yerine kullanılan çok çeşitli bileşik ve alaşım yapıdaki yarıiletken malzeme, yüksek performans uygulamaları için alternatif olmaktadır [61].

Silikon, indirek bant aralığına sahip bir yarıiletken malzemedir. Bu tür malzemelerde foton yayılımını/soğurulmasını ciddi şekilde sınırlayan, bant aralığı boyunca elektron-boşluk çiftine kristal örgü içerisindeki fononun eşlik ettiği bir fiziksel mekanizma mevcuttur. Taşıyıcıların kristal örgüyle olan yakından etkileşimi, kuantum verimliliğini büyük ölçüde sınırlamaktadır. GaAs, $Al_xGa_{1-x}As$, $Ga_xIn_{1-x}P$, $In_xGa_{1-x}N$, $Al_xGa_{1-x}N$ ve $Al_xIn_yGa_{1-x-y}P$ gibi bileşik ve alaşım yapıdaki yarıiletkenlerin büyük bir kısmı fonon etkileşimlerinin olmadığı direk bant yapısına sahiptir. Böylece bu tür malzemelerin kullanıldığı ışık yayan diyotlardan, güneş hücrelerinden, lazer diyotlardan yüksek performans ve verim elde edilebilmektedir. Ayrıca, bu alaşım sistemlerinde atomik konsantrasyonlar (x , y) değiştirilerek yasak enerji aralığı istenildiği gibi ayarlanabilmekte ve bant mühendisliği yapılabilmektedir. Özellikleri ayarlanabilen malzemeler kullanılarak istenilen dalgaboyunda ışıma yapan, güneş spektrumunun arzu edilen bölgelerinden fotoakım meydana getirebilen aygıtlar üretilmektedir [61].

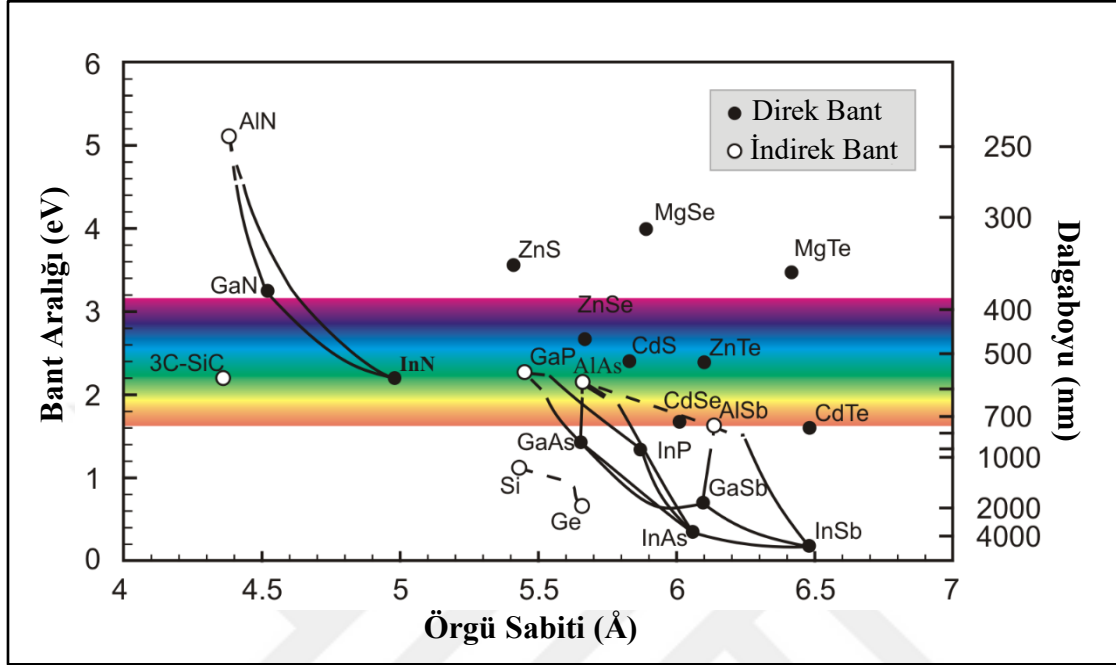
Çizelge 2.2. Periyodik tablonun IIIA ve VA grubunda bulunan elementler [42]

IIIA	IVA	VA
5 B Bor	6 C Karbon	7 N Azot
13 Al Alüminyum	14 Si Silikon	15 P Fosfor
31 Ga Galyum	32 Ge Germanyum	33 As Arsenik
49 In İndiyum	50 Sn Kalay	51 Sb Antimoni
81 Tl Talyum	82 Pb Kurşun	83 Bi Bizmut

Bileşik ve alaşım yapıdaki yarıiletkenlerin en önemli kısmını Çizelge 2.2’de verilen IIIA ve VA grubu elementlerinin bir araya getirilmesiyle elde edilen III-V grubu yarıiletkenleri oluşturmaktadır. Son 40 yılda bu malzemeler kullanılarak yapılan çalışmalar GaAs ve InP ile başlamış, 20 yıldır ise özellikle GaN tabanlı malzemeler dikkat çekmiştir [61]. GaAs ve InP bileşiklerinin yüksek taşıyıcı hareketliliği (mobilitesi), 100 GHz’in üzerinde çalışan yüksek hızlı transistörlerin üretimini sağlamıştır. Yüksek elektron mobiliteli transistörlerin (HEMT) teknolojik gelişimi ile birlikte AlGaIn/GaN yapısı ön plana çıkmıştır. Düz beslemde çalıştırılan p-n eklem GaAs ve GaN bileşik yarıiletkenleri, yüksek verimli bir şekilde ışık yaymaktadır. Işık spektrumunun UV bölge, mavi ve yeşil kısmı InGaIn tabanlı LED’ler tarafından üretilirken, kehribar, kırmızı ve kızılötesi (IR) dalgaboyu bölgesindeki kısmı ise GaP veya GaAs tabanlı LED’ler tarafından üretilmektedir. Fiber optik iletişimde kullanılan 1,3 ve 2 µm arasındaki dalgaboyu bölgesi, InGaP bazlı yarıiletken lazerler yardımıyla elde edilmektedir [62].

III-V grubu yarıiletkenlerin bir diğer önemli kullanım alanı fotovoltaik güneş hücreleridir. Seçilen atomların uygun oranlarda birleşimi ile oluşturulan bileşik ya da alaşım yapıdaki yarıiletkenler istenilen dalgaboyu bölgesinin soğurulmasını sağlamaktadır. Bu yolla üretilen çoklu güneş hücre yapıları güneş spektrumunun çok geniş bir bölgesinden fotoakım üreterek enerji dönüşüm verimliliklerinin artmasını sağlamaktadır. Kuantum kuyulu AlGaAs, GaAs, GaInP, InGaAs tabanlı güneş hücreleri ve farklı yasak enerji aralığına sahip ardışık

eklemlerden oluşan GaInP/GaAs/Ge gibi çok eklemlili güneş hücrelerinde III-V grubu malzemeler kullanılmaktadır [5,13,34].



Şekil 2.6. Bazı yarıiletken malzemelerin örgü sabiti-bant aralığı diyagramı [63,64]

Farklı atomlar ile oluşturulan III-V grubu yarıiletken malzemeler farklı örgü sabitlerine sahip olacaktır. Çok katmanlı yapılar oluşturulduğunda örgü uyumlu malzemelerin üst üste büyütülmesi, üretilecek aygıt performansı için büyük önem taşımaktadır [43,63,64]. Aksi durumda oluşacak gerilmeli yapılar, kristal örgüde oluşan süreksizlikler nedeniyle yasak enerji aralığında yüzey durumları olarak adlandırılan çok sayıda enerji seviyesine neden olmaktadır. Bu seviyeler, yeniden birleşme (rekombinasyon) merkezleri gibi davranarak taşıyıcıları tuzaklar ve taşıyıcı ömrünü azaltır. Çok katmanlı yapılar ve bu yapılarda kullanılan III-V grubu kompleks yarıiletken malzemelerin örgü sabiti, kristal yapıları, kalınlıkları ve alaşım kompozisyonlarının birbirleriyle uyumlu olması, istenilen özellikte ve performansta aygıt üretilmesi için oldukça önemlidir. Şekil 2.6'da bazı yarıiletken malzemelerin örgü sabiti-bant aralığı diyagramı verildi. Bu tür malzemelerin üretilmesi, parametrelerin hassas şekilde kontrolüne imkan veren MBE ve MOCVD gibi gelişmiş kristal büyütme teknikleri ile gerçekleştirilmektedir [43].

2.4. Malzeme Parametreleri

Tez çalışmasında üretilen üç eklemli güneş hücre yapısında kullanılan Ge yarıiletken elementi, GaAs yarıiletken bileşiği ve GaInP yarıiletken alaşımının kristal yapıları ve oda sıcaklığındaki fiziksel parametreleri hakkında temel bilgiler aşağıda sunuldu.

2.4.1. Germanyum (Ge) yarıiletkeni

Germanyum, periyodik tablonun IVA grubunda yer alan, uluslararası literatürde Ge simgesi ile gösterilen, optik ve elektriksel özellikleri açısından oldukça dikkat çekici olan bir malzemedir. Ge, gümüş grisi renge ve metalik görünüme sahip bir malzemedir. Atom numarası 32 olan Ge elementi, 4 valans elektronuna sahiptir ve elektronik dizilimi $[Ar] 3d^{10} 4s^2 4p^2$ şeklindedir [65]. Germanyum günümüz teknolojisinde radyasyon dedektörleri, lazer diyot, kızılötesi optik pencere ve çok eklemli güneş hücresinde hem alttaş hem de alt hücre olarak kullanılmaktadır [66]. Elmas yapıda kristalleşen Ge elementinin oda sıcaklığındaki (~ 300 K) bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.3’de verildi.

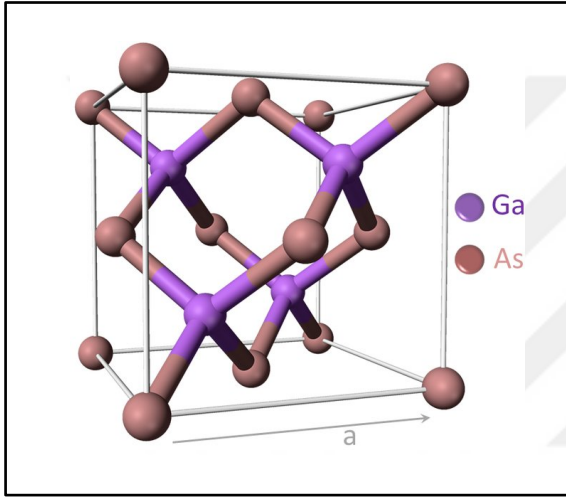
Çizelge 2.3. Ge elementinin oda sıcaklığındaki bazı fiziksel parametreleri [66]

<i>Özellik</i>	<i>Parametre</i>
<i>Kristal Yapısı</i>	Elmas
<i>Simetri Grubu</i>	O_h^2 -Fd3m
<i>Birim hacimdeki e^- sayısı</i>	$4,4 \times 10^{22}$
<i>Yoğunluk (g/cm^3)</i>	5,3234
<i>Dielektrik Sabiti</i>	16,2
<i>Elektron İlgisi (eV)</i>	4,0
<i>Yasak Enerji Aralığı (eV)</i>	0,661
<i>Örgü Sabiti (Å)</i>	5,658

2.4.2. Galyum arsenik (GaAs) yarıiletken bileşiği

Galyum arsenik (GaAs), periyodik tablonun IIIA grubundaki Galyum (Ga) ile VA grubundaki Arsenik (As) elementlerinin bileşiminden oluşan III-V grubu yarıiletken

bileşiklerinden en bilineni ve en yaygın kullanılanıdır. GaAs, direk bant yapısı sayesinde indirek bant yapısına sahip olan Si ve Ge yarıiletkenlerine elektronik ve optoelektronik uygulamalar için güçlü bir alternatif olmuştur. GaAs, elmas kristal yapının iki farklı atomdan oluşan hali olan Şekil 2.7'deki çinko sülfür (zinc blende) yapıda kristalleşir. Bu yapı iç içe geçmiş iki yüzey merkezli kübik (fcc) yapıdan meydana gelmektedir. Kristal yapının a örgü sabitli birim hücresinde $(0,0,0)$ ve $a(1/4,1/4,1/4)$ noktalarına yerleşen iki atom bulunmaktadır. GaAs yarıiletken malzemesinin oda sıcaklığındaki bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.4'de verildi [34,54].



Şekil 2.7. GaAs yarıiletken bileşiğinin kristal yapısı [67]

GaAs yarıiletken bileşiği, sahip olduğu fiziksel özellikler sayesinde fotovoltaik uygulamalarda sıklıkla kullanılan bir III-V grubu malzemedir. GaAs tabanlı güneş hücreleri, güneş spektrumunun yakın kızılötesi bölgesini yüksek kuantum verimliliğinde soğurabilmektedir. Bu tür güneş hücreleri Si tabanlı hücrelere göre daha yüksek sıcaklıklarda daha yüksek performansta çalışabilmektedir. Ayrıca, GaAs tabanlı hücreler yüksek radyasyon dayanımına sahiptir [2,68].

Çizelge 2.4. GaAs bileşiğinin oda sıcaklığındaki bazı fiziksel parametreleri [34,69]

Özellik	Parametre
Kristal Yapısı	Çinko Sülfür
Simetri Grubu	T _d ² -F43m
Birim hacimdeki e^- sayısı	4,42x10 ²²
Yoğunluk (g/cm ³)	5,32
Dielektrik Sabiti <i>statik</i>	12,9
Dielektrik Sabiti <i>yüksek frekans</i>	10,89
Elektron İlgisi (eV)	4,07
Yasak Enerji Aralığı (eV)	1,42
Örgü Sabiti (Å)	5,650

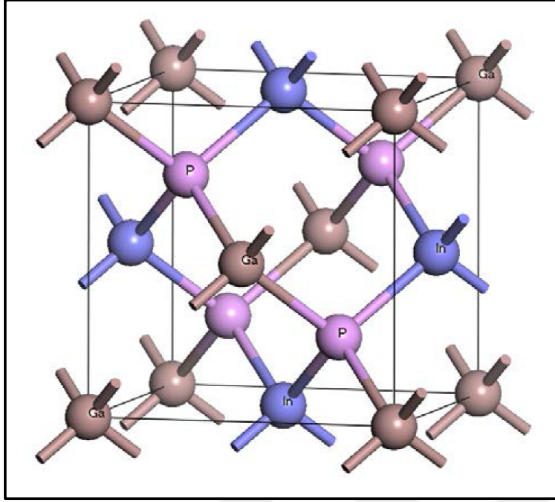
2.4.3. Galyum indiyum fosfat (GaInP) yarıiletken alaşımı

Periyodik tablonun IIIA grubundan Galyum (Ga) ve İndiyum (In), VA grubundan ise Fosfat (P) elementlerinin bileşiminden oluşan GaInP yarıiletken üçlü alaşımı, III-V grubu yarıiletkenleri arasında en yüksek direk yasak enerji aralığına sahip malzemelerden bir tanesidir [2,70]. GaInP yarıiletken alaşımı, özellikle güneş spektrumunun görünür bölgesini soğurabildiği için yüksek verimli güneş hücreleri başta olmak üzere elektronik ve optoelektronik pek çok uygulamada kullanılabilmektedir [2,34]. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi GaAs bileşiğine benzer şekilde çinko sülfür kristal yapısına sahip olan GaInP, GaP ve InP yarıiletken bileşiklerinden meydana gelmektedir.

Çoklu yapıya sahip alaşım yapıdaki malzemelerde alaşım oranının (x) değiştirilmesi, elde edilen malzemenin yasak enerji aralığı ve örgü parametresi başta olmak üzere pek çok fiziksel özelliğini etkilemektedir. Ga _{x} In_{1- x} P yarıiletken alaşımının x alaşım oranına bağlı yasak enerji aralığı,

$$E_g(x) = xE_g^{GaP} + (1-x)E_g^{InP} + bx(1-x) \quad (2.1)$$

ifadesi kullanılarak elde edilmektedir. Burada E_g^{InP} ve E_g^{GaP} sırasıyla InP ve GaP bileşiklerinin yasak enerji aralıklarıdır. b ise, alaşım oranına bağlı olarak yasak enerji aralığının bükülme (bowing) parametresidir [2].



Şekil 2.8. GaInP yarıiletken alaşımının kristal yapısı [2]

Alaşım oranı, yasak enerji aralığının yanı sıra örgü parametresini de değiştirmektedir. x oranına bağlı olarak $Ga_xIn_{1-x}P$ alaşımının örgü parametresi Eşitlik 2.2'deki Vegard yasası denklemi ile ifade edilmektedir [70,71].

$$a_{Ga_xIn_{1-x}P} = xa_{GaP} + (1-x)a_{InP} \quad (2.2)$$

Eşitlikteki a_{InP} ve a_{GaP} sırasıyla InP ve GaP yarıiletken bileşiklerinin örgü parametreleridir.

Çok eklemli güneş hücresi uygulamalarında GaAs üzerine örgü uyumlu olarak büyütülebilen ve görünür bölgede optimum soğurma sağlayan $Ga_{0,51}In_{0,49}P$ alaşım yapısının teknolojik önemi oldukça fazladır. Tez çalışmasında $x=0,51$ alaşım oranı ile büyütülen $Ga_{0,51}In_{0,49}P$ ve $Ga_xIn_{1-x}P$ alaşımlarının oda sıcaklığındaki bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.5'de verildi.

Çizelge 2.5. $Ga_xIn_{1-x}P$ ve $Ga_{0,51}In_{0,49}P$ alaşımlarının oda sıcaklığındaki bazı özellikleri [34]

Özellik	Parametre	
	$Ga_xIn_{1-x}P$	$Ga_{0,51}In_{0,49}P$
Kristal Yapısı	Çinko Sülfür	Çinko Sülfür
Simetri Grubu	T_d^2-F43m	T_d^2-F43m
Birim hacimdeki e^- sayısı	$(3,96+0,98x) \times 10^{22}$	$4,46 \times 10^{22}$
Yoğunluk (g/cm^3)	$4,81-0,67x$	4,47
Dielektrik Sabiti <i>statik</i>	$12,5-1,4x$	11,8
Dielektrik Sabiti <i>yüksek frekans</i>	$9,61-0,5x$	9,35
Elektron İlgisi (eV)	$4,38-0,58x$	4,10
Yasak Enerji Aralığı (eV)	$1,34+0,51x+0,60x^2$	1,76
Örgü Sabiti (Å)	$0,58687-0,418x$	5,653

3. FOTOVOLTAİK GÜNEŞ HÜCRELERİ

Güneş hücreleri, güneşten gelen ışıyım enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren aygıtlardır. Günümüzde güneş hücreleri, güneşin sağladığı potansiyeli yüksek enerjiden pek çok karasal uygulamanın yanı sıra uydu ve uzay araçları gibi stratejik önemi yüksek teknolojiler için güç sağlamaktadır. Fotovoltaik (PV) ilkeye dayalı olarak çalışan fotovoltaik güneş hücreleri, üzerine düşen fotonların oluşturduğu elektron-boşluk çiftleri yardımıyla elektrik akımı meydana getirir. Fotovoltaik güneş hücreleri, yüksek teknolojiye sahip elektronik ve optoelektronik aygıtların pek çoğunda olduğu gibi yarıiletken p-n eklem yapısına sahiptir. Eklemde kullanılan yarıiletken malzemenin türü, oluşturulan yapı tasarımı, kuantum kuyu ve çoklu eklem yapısı güneş hücresinden elde edilecek fotoakımı ve enerji dönüşüm verimliliğini belirlemektedir. Güneş spektrumundan maksimum verimi elde edecek biçimde tasarlanan güneş hücreleri ve bu teknolojide kullanılacak ileri malzemeler geliştirilmesi üzerine yapılan ar-ge çalışmaları günümüzde popülerliğini korumaktadır [19,42,45]. Güneş hücresi teknolojisinde kullanılan temel kavramlar, güneş hücrelerinin yapısı ve çalışma prensibi, kullanım alanları ve fotovoltaik hücre türleri bu bölüm içerisinde ayrıntılı olarak anlatıldı. Ayrıca, tez çalışmasında kullanılan çok eklemli güneş hücreleri ve GaInP/GaAs/Ge üç eklemli güneş hücreleri üzerine detaylı bilgiler verildi.

3.1. Temel Kavramlar

Kullandığı ham maddesi güneş olan güneş hücrelerinin ve çalışma prensiplerinin iyi anlaşılabilmesi için bazı temel kavramlar hakkında bilgi verilmesi gerekmektedir. Bu nedenle temel kavramlar başlığı altında, güneş enerjisi, güneş spektrumu ve hava kütlesi (air mass: AM) hakkında bilgiler sunuldu.

3.1.1. Güneş enerjisi

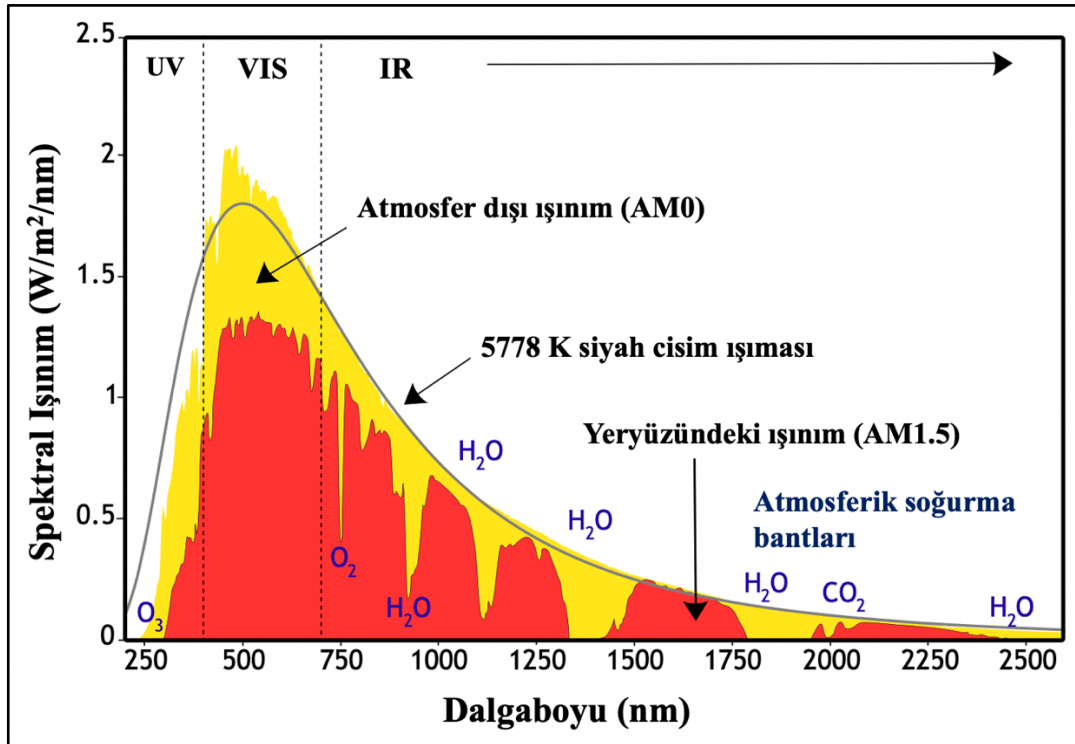
Güneş, yeryüzünden yaklaşık $1,5 \times 10^{11}$ m uzakta olan, $1,4 \times 10^9$ m çapında, kütlesi 2×10^{30} kg olan ve dünyamızın da içinde bulunduğu Samanyolu galaksisinin yıldızıdır. Yüksek yoğunluktaki gazlardan meydana gelen güneş, yaklaşık 40×10^6 K sıcaklığa sahip devasa bir nükleer reaktördür [5,72,73]. Güneşten gelen ısı ve ışık, tüm evrendeki hayatı beslemektedir.

Güneş enerjisi, güneşin çekirdeğinde meydana gelen hidrojen gazının helyuma dönüştüğü füzyon süreci sırasında açığa çıkan ışıma enerjisidir. Günümüzden yaklaşık 4,5 milyar yıl önce başlayan bu nükleer füzyon süreci, güneşin çekirdeğinde bulunan tüm hidrojenler helyuma dönüşene kadar, yani yaklaşık 5 milyar yıl daha devam edecektir [74]. Farklı dalgalarda yaklaşık 62 MW/m² enerji yayan güneş, bütün enerjisinin sadece iki milyarda birini yeryüzüne ulaştırabilmektedir [75]. Bu enerjinin 1370 W/m²'lık kısmı atmosferin dış yüzeyine, 0-1100 W/m² aralığındaki kısmı ise yeryüzüne ulaşmaktadır. Güneş enerjisi yeryüzüne elektromanyetik ışıma yoluyla ulaşırken yaklaşık %30'luk bir kısmını atmosferde kaybetmektedir. Atmosferik moleküllerden dolayı meydana gelen Rayleigh saçılması, atmosferdeki aerosol ve toz parçacıklarının neden olduğu saçılmalar ve atmosferdeki su buharı, CO₂, O₂ ve ozon güneş ışığının atmosfer katmanlarında soğurulmasına neden olarak yeryüzüne ulaşan güneş enerjisini azaltmaktadır [5,76]. Atmosferik soğuruma rağmen dünya yüzeyine düşen güneş enerjisi miktarı, dünyada bir yılda tüketilen toplam enerjinin yaklaşık 20 bin katına eşittir [5]. Bu büyük miktardaki enerji, morötesi bölgeden kızılötesi bölgeye kadar uzanan elektromanyetik radyasyon olarak yayılmaktadır. Nükleer füzyon reaksiyonları tarafından üretilen bu enerji, herhangi bir yan reaksiyon ürünü üretmediği için temiz ve yenilenebilir bir enerji kaynağıdır. İnsanoğlu son 50 yıldır bu enerjiyi en verimli şekilde kullanabilmek için ileri teknolojiye sahip güneş hücrelerinin geliştirilmesi üzerine yoğun araştırmalar gerçekleştirmektedir.

3.1.2. Güneş spektrumu

Güneş hücreleri, üzerine ışık düşürüldüğünde eklemine kullanılan yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığından daha büyük enerjiye sahip olan fotonları soğurarak elektrik enerjisi üreten aygıtlardır. Bu nedenle yüksek enerji dönüşüm verimliliğine sahip güneş hücre tasarımı için güneş ışığının spektral doğası oldukça önemlidir [6,21]. Güneş spektrumu, yaklaşık 6000 K sıcaklığındaki bir kara cismin yayınladığı elektromanyetik spektruma benzemektedir. Güneşten uzaya yayılan ve yeryüzüne ulaşan enerji, farklı dalgalarda ve farklı şiddetlerde elektromanyetik radyasyondan oluşur. Güneş spektrumu yaklaşık 0,5 eV ile 4,5 eV enerjiye sahip fotonları içermektedir [77]. Yeryüzüne düşen ve atmosfer dışı ortamdaki güneş ışınımının spektral dağılımı ile siyah cisim ışımasına ait spektrum Şekil 3.1'de verildi.

Farklı dalgalıboylarında elektromanyetik radyasyonlardan oluşan güneş spektrumu, morötesi (UV), görünür (VIS) ve kıızıltesi (IR) olmak üzere üç spektral bölgeye ayrılmaktadır. Güneş ışıınının yaklaşık % 5'i morötesi bölgede (300-400 nm), yaklaşık % 43'lk kısmı görünür bölgede (400-700 nm) ve % 52'lik bölümü ise kıızıltesi bölgede (700-2500 nm) bulunmaktadır. 300 ile 2500 nm dalgalıboyu aralığı gibi geniş bir spektral aralıkta ışıma sağlayan güneş, güneş hücreleri için geniş bir çalışma aralığı yaratmaktadır. Bir güneş hücresinin verimi, güneş ışıınının ne kadarının fotoakıma dönüştürülebildiği ile ilgilidir. Bu nedenle güneş spektrumunun daha geniş bir bölgesinden fotoakım üretebilecek güneş hücresi tasarımları, hücre verimlerinin arttırılmasında önemli rol oynamaktadır [2,78].



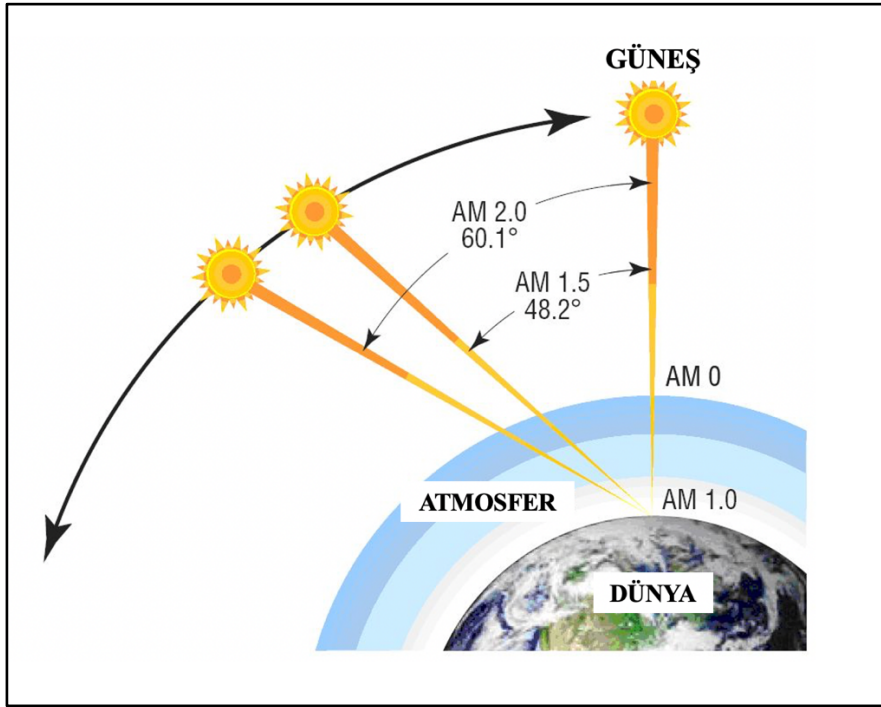
şekil 3.1. Güneş ışıınının spektral dağılımı [51,79]

3.1.3. Hava kütlesi (Air Mass: AM)

Güneş ışıınlarının yoğunluğu ve spektral dağılımı, atmosferik soğurumla oldukça ilişkili olmakla birlikte bağlı olduğu parametrelerden en etkin olanı güneş ışıınlarının atmosfer katmanlarını geçerken izlediği yoldur. Güneş ışıınlarının atmosferden geçerken izlediği yolu tanımlamak için ‘‘Hava Kütlesi (Air Mass: AM)’’ kavramı kullanılır. Güneş ve yeryüzü arasındaki hava kütlesi, yeryüzünde ve atmosfer dışında farklı güneş spektrumlarının olmasına neden olmaktadır. Hava kütlesi,

$$AM = \frac{\text{Güneş ışınlarının aldığı yol}}{\text{Güneş ışınlarının atmosferde aldığı en kısa yol}} = \frac{1}{\cos \theta} \quad (3.1)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada θ , güneşten gelen ışığın gelme açısı olarak tanımlanmaktadır [2,5]. Gelme açısına bağlı olarak güneşten gelen ışınım farklı AM değerleri ile ifade edilir. Yeryüzüne ulaşan radyasyon şiddetinin miktarı, birim alana gelen güneş gücü (W/m^2) olarak da tanımlanır ve $\cos\theta$ 'ya bağlı olarak değişir. Atmosfer dışındaki ve yeryüzüne farklı açılarla gelen güneş ışınları Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Farklı güneş spektrumlarının hava kütlesi diyagramı [80]

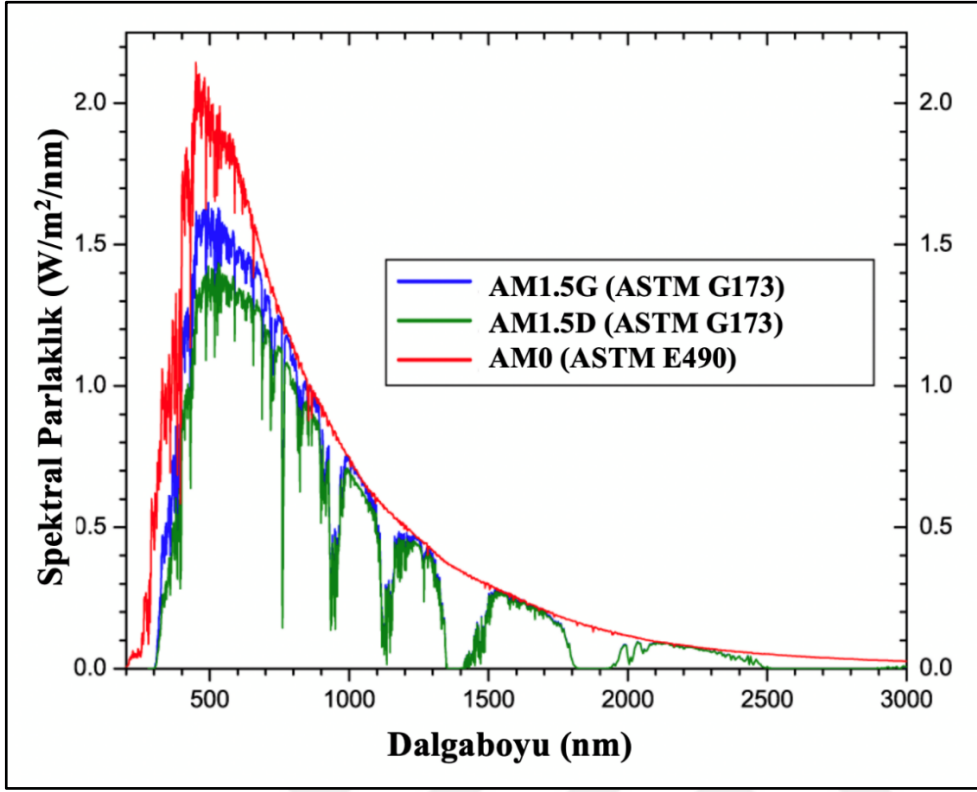
“Hava Kütle 0” yani AM0 spektrumu, güneş ışınlarının atmosfer dışındaki spektral dağılımını ifade etmektedir ve “güneş sabiti” olarak bilinir [81]. AM0 spektrumu, Dünya Işınım Merkezi (WRC) tarafından kabul edilen 1367 W/m^2 ışınım yoğunluğuna sahiptir [81]. Atmosfer dışındaki uzay görevlerinde kullanılmak üzere tasarlanan uydu ve uzay araçlarının enerji ihtiyacını karşılayan güneş hücreleri AM0 ışınımına maruz kalmakta ve karakteristiklerinin değerlendirilmesinde bu spektrum referans alınmaktadır [82].

Dünya yüzeyine dik şekilde ulaşan ($\theta=0^\circ$) güneş ışınları, atmosferden en az yol alarak geçer. Bu spektrum AM1 olarak adlandırılır ve 925 W/m^2 ışınım yoğunluğuna sahiptir [45]. AM1

spektrumu, güneşe dik konumda kullanılan güneş hücrelerinin karakteristiklerinin belirlenmesinde referans alınmaktadır.

Güneş ışınları atmosferik soğurum nedeniyle yeryüzüne ulaşınca kadar zayıflar ve yaklaşık olarak enerjisinin yaklaşık % 30'unu kaybeder. Yeryüzüne belirli bir gelme açısıyla ulaşan güneş ışınları AM1.5 güneş spektrumlarını meydana getirir. Yeryüzüne 48,2°'lik açıyla gelen güneş ışınları, AM1.5G ve AM1.5D güneş spektrumlarını oluşturur. AM1.5D güneş spektrumu, atmosferde saçılmaya uğramadan yani doğrudan dünya yüzeyine gelen güneş ışınlarını tanımlar. AM1.5D spektrumu 900 W/m² ışınım yoğunluğuna sahiptir [19]. Bu spektrum genellikle konsantre fotovoltaik uygulamalarda aygıt karakteristiklerinin değerlendirilmesinde referans olarak kullanılmaktadır. Fotovoltaik uygulamalar için standart ışınım haline gelmiş olan AM1.5G spektrumu ise, hem doğrudan hem de atmosferde saçıldıktan sonra dünya yüzeyine ulaşan güneş ışınlarından meydana gelmektedir. AM1.5G spektrumu, 1000 W/m² ışınım yoğunluğuna sahiptir ve karasal uygulamalarda kullanılan güneş hücrelerinin performans analizinde referans olarak kullanılır [19]. Birim alana ulaşan 1000 W güneş ışınımının 23-30 W'lık kısmı UV bölgeye, 445 W'lık kısmı VIS bölgeye, 527 W'lık kısmı ise IR bölgeye karşılık gelmektedir. Görüldüğü gibi, yeryüzüne ulaşabilen güneş ışınımının büyük bir kısmını IR bölge oluşturmaktadır [2].

Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (ASTM) tarafından standartlaştırılan spektral parlaklık dağılımı Şekil 3.3'de verildi. Dalgaboyunun bir fonksiyonu olarak verilen bu dağılım, farklı doğal ve yapay ışık kaynakları altında güneş hücrelerinin performans değerlendirmesi için uluslararası literatürde kabul edilen ortak referanstır.



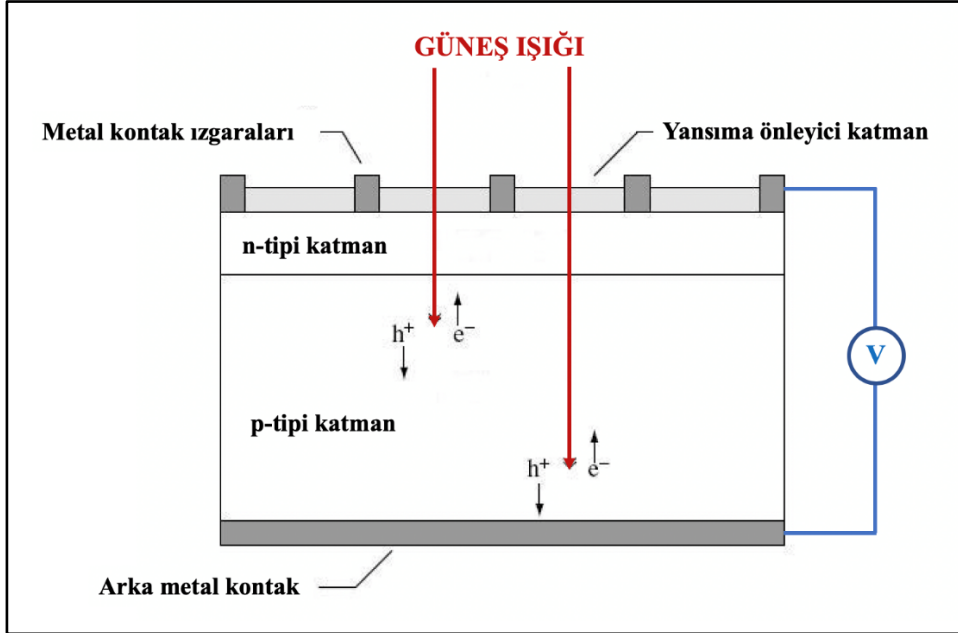
Şekil 3.3. AM0, AM1.5G ve AM1.5D için referans güneş spektrumları [83]

3.2. Güneş Hücrelerinin Yapısı ve Çalışma Prensibi

Güneşin ışınlam enerjisinden elektrik enerjisi üreten optoelektronik aygıtlar fotovoltaik güneş hücresi olarak tanımlanır. Güneş hücrelerinin temelinde yatan fotovoltaik etki, iki farklı yarıiletken malzeme birbirine temas ettiğinde oluşan eklem bölgesinin foton ışınlamına maruz bırakılması sonucunda malzemeler arasında oluşan elektriksel potansiyel fark olarak bilinir. Fotovoltaik terimi, Yunancada ışık anlamına gelen “Phos” kelimesi ile elektrik anlamına gelen “voltaic” kelimelerinin bir araya gelmesiyle oluşmuştur [5].

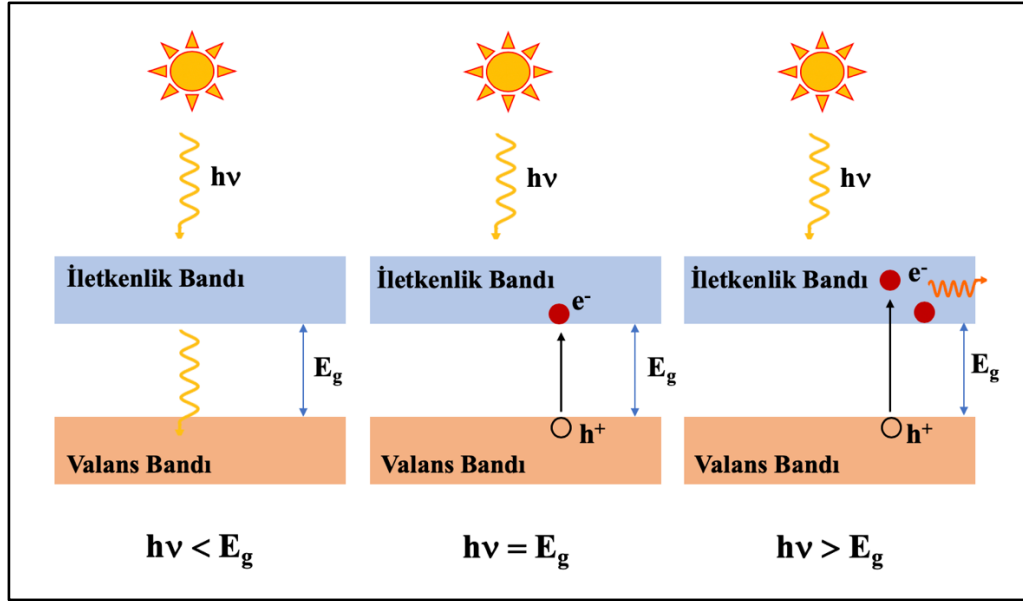
Fotovoltaik güneş hücreleri, elektronların akım iletiminde çoğunlukta olduğu n-tipi ve boşlukların çoğunlukta olduğu p-tipi katkılı yarıiletken malzemelerin kullanıldığı en az iki katmandan oluşan bir p-n eklem yapıya sahiptir. Basit bir güneş hücre yapısına ait şematik gösterim Şekil 3.4’de verildi. Üzerine ışık düşürülen bir güneş hücresini oluşturan yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığı, hücrenin fotovoltaik özelliklerini belirlemektedir [2]. Bir güneş hücresinin fotoakım üretebilmesi için hücreyi oluşturan yarıiletken malzeme içerisinde elektron-boşluk çifti oluşturulması gerekmektedir. Oluşan elektron-boşluk çifti eklem bölgesine yakın olduğunda, yaratılan fazlalık taşıyıcılar $E_{iç}$

etkisiyle sürüklenme akımı meydana getirir. Foton uyarımı sonucunda güneş hücresinin oluşturduğu elektrik akımını “fotoakım” olarak tanımlanır.



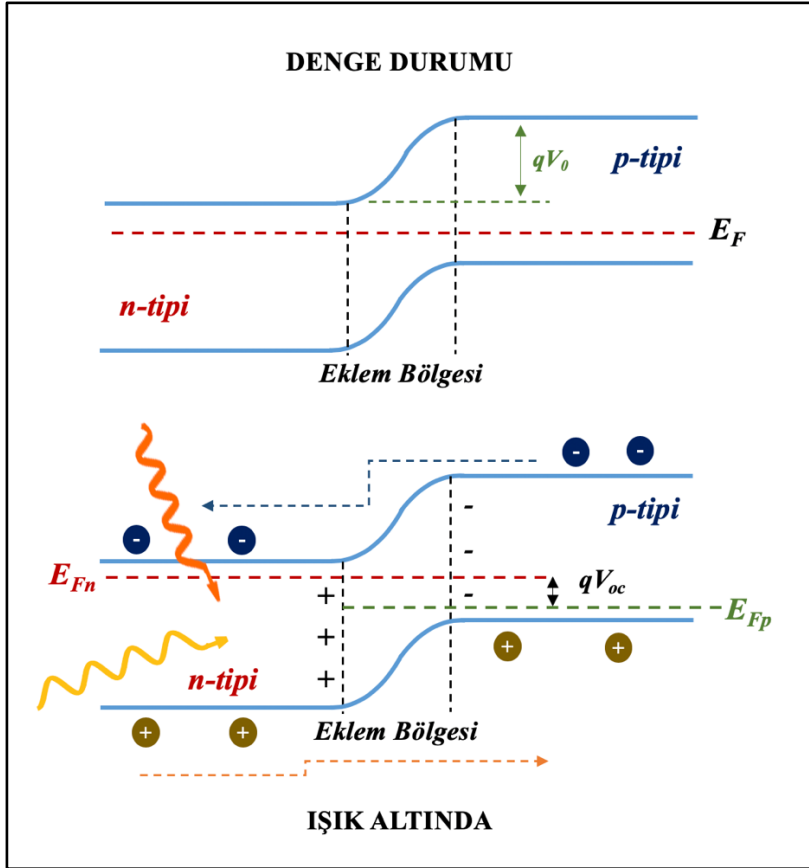
Şekil 3.4. Basit bir fotovoltaiik güneş hücre yapısı

Güneşten gelen fotonun enerjisi ($h\nu$), yarıiletken malzemede elektron-boşluk çifti oluşup oluşmayacağını belirler. Yarıiletken malzeme ile foton arasındaki etkileşimleri gösteren diyagram Şekil 3.5’de verildi. Enerjisi yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığından daha düşük olan fotonlar ($h\nu < E_g$), elektronları iletkenlik bandına çıkartabilecek kadar enerjiye sahip olmadıkları için güneş hücresi tarafından soğurulmaz. Bu fotonlar doğrudan hücreden geçer ve fotoakım üretimine katkıda bulunamaz [84,85]. Yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığından daha büyük enerjiye sahip olan fotonlar ($h\nu \geq E_g$) valans bandındaki elektronları iletkenlik bandına çıkartabilecek enerjiye sahiptir. Bu durumda serbest elektron ve arkasında bıraktığı boşluk, güneş hücresinde elektron-boşluk çifti oluşturur. İç elektrik alan etkisiyle sürüklenen taşıyıcılar fotoakım meydana getirir. Yasak enerji aralığı ile foton enerjisi arasındaki enerji farkı ($h\nu - E_g$) ise, yarıiletken malzemenin kristal örgüsünde titreşime neden olarak, malzemedan ısı enerjisi şeklinde açığa çıkar. Hücrede ısınmaya sebep olan ve elektriksel performansı olumsuz etkileyen bu durum termalizasyon kayıpları olarak adlandırılır [51,86]. Güneş hücre performansına en büyük katkı, enerjisi yasak enerji aralığına yakın olan fotonlardan gelmektedir. Termalizasyon kayıplarını engellemek ve foton soğurumunu maksimuma çıkartmak için güneş hücresi tasarımları ve kullanılacak yarıiletken malzemelerdeki bant aralığı mühendisliği büyük öneme sahiptir.



Şekil 3.5. Yarıiletken malzeme ile foton arasındaki etkileşimlere ait diyagram

Güneş hücreleri p-n eklem tabanlı aygıtlardır. Bu nedenle bir güneş hücresinin çalışma prensibi Bölüm 2.2’de verilen p-n eklem çalışması ilkesine dayanmaktadır. Güneş hücresine foton düşürüldüğünde, $h\nu \geq E_g$ durumunda yaratılan fazlalık elektronlar ve boşluklar p-n eklem ulaşımına kadar tüketim bölgesine difüz eder. p-tipi tarafta oluşan elektronlar n-tipi tarafa, n-tipi tarafta oluşan boşluklar ise p-tipi tarafa doğru hareket eder. Oluşan taşıyıcı hareketi, termal denge durumundaki E_F ’nin azınlık elektronların Fermi enerji seviyesi (E_{Fn}) ve azınlık boşlukların Fermi enerji seviyesi (E_{Fp}) olmak üzere ikiye ayrılmasına neden olur [45]. Fermi seviyeleri arasında $E_{Fn}-E_{Fp}$ kadar bir enerji farkı meydana gelir. Bu enerji farkı, güneş hücresinin uçları arasında oluşan elektriksel potansiyel farka eşittir ve açık devre voltajı (V_{oc}) olarak adlandırılır. Açık devre voltajı, $V_{oc}=(E_{Fn}-E_{Fp})/q$ eşitliği ile ifade edilir [87]. Denge durumunda ve ışık altında p-n eklem enerji bant diyagramı Şekil 3.6’da verildi. Güneş hücresine foton düşürüldüğünde, tüketim bölgesinde meydana gelen taşıyıcı konsantrasyon gradyenti, azınlık taşıyıcılarının artmasına neden olur. Bu durumda, eklemde difüzyon akımları baskın hale gelir. Foton uyarımı ile oluşan azınlık taşıyıcılar, güneş hücresinde n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye doğru bir akım yoğunluğu yaratır [88]. Tüm negatif yüklerin n-tipi tarafa, tüm pozitif yüklerin ise p-tipi tarafa toplanması, güneş hücresinde uyarılmış ileri beslem durumuna neden olur.



Şekil 3.6. Denge durumundaki ve ışık altındaki p-n eklemi enerji bant diyagramı

Güneş hücrelerinin elektriksel özelliklerini belirten dört temel parametre vardır. Bunlar, kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre voltajı (V_{oc}), dolun faktörü (FF) ve enerji dönüşüm verimliliği (η)'dir. İdeal bir güneş hücresinde I_{sc} , hücresinden geçebilen maksimum akıma (I_{max}) eşittir ($I_{sc} = I_{max}$). V_{oc} değeri ise, güneş hücresinde kullanılan yarıiletken malzemenin özelliklerine bağlı olan sızıntı akımı (I_0) değeri kullanılarak Eş. 3.2 ile elde edilir.

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{e} \ln \left(1 + \frac{I_L}{I_0} \right) \quad (3.2)$$

Burada k_B Boltzman sabiti, T Kelvin biriminde sıcaklık, I_L ise ışınlımla oluşan fotoakımdır. V_{oc} ve I_{sc} bir güneş hücresindeki en yüksek voltaj ve akım değeridir. Ancak Şekil 3.7'de görüldüğü gibi bu iki parametrenin biri maksimum iken diğeri sıfır olduğundan güneş hücresinden elde edilen güç çıktısı sıfır olacaktır. Bu nedenle, grafiksel olarak güneş hücresinin I - V karakteristiğinin ideal olan kare şekline ne kadar yaklaştığının bir ölçüsü olan

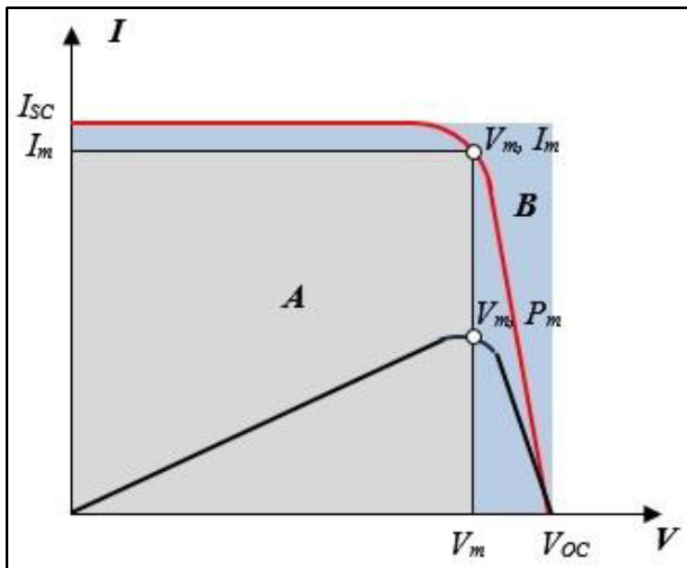
dolum faktörü terimi kullanılmaktadır. Dolum faktörü bir güneş hücresinden elde edilecek en yüksek verimi belirleyen bir faktördür ve aşağıdaki gibi ifade edilir,

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}} \quad (3.3)$$

Dolum faktörü ifadesi, eşitlikten de görüldüğü gibi güneş hücresinden elde edilen maksimum gücün V_{oc} ile I_{sc} 'nin çarpımıyla elde edilen teorik güce oranını tanımlamaktadır. FF , I - V eğrisi içerisinde kalan en büyük alanı ifade eder. Çoğu güneş hücresinde bu değer % 70'in üzerindedir. Yüksek dolum faktörü, güneş hücresinden daha fazla verim sağlanması anlamına gelmektedir [51].

Enerji dönüşüm verimliliği (η), güneş hücresinin performansını gösteren en önemli parametredir. Bir güneş hücresinin verimliliği, güneş hücresinden elde edilen çıkış gücünün (P_{out}) hücre yüzeyine düşen toplam ışıyım gücüne (P_{in}) oranı olarak tanımlanmaktadır. Güneş hücrelerinin enerji dönüşüm verimlilikleri aşağıdaki eşitlik yardımıyla belirlenmektedir [5,89].

$$\eta = \frac{P_{in}}{P_{out}} = \frac{I_{sc} V_{oc}}{A_c P_s} FF \quad (3.4)$$



Şekil 3.7. Güneş hücresinin akım-voltaj (I - V) karakteristiği [5]

Eş. 3.4’de yer alan A_c , güneş hücresinin toplam aktif alanını, P_s ise hücre yüzeyine düşen ışınım gücünü ifade etmektedir. P_s değeri karasal uygulamalarda kullanılan güneş hücrelerinde referans spektrum olarak kabul edilen AM1.5G için 1000 W/m^2 , uzay uygulamalarında kullanılan hücreler için ise AM0 spektrumu için 1367 W/m^2 ’dir. Güneş hücrelerinin verimliliğini arttırabilmek için, güneş spektrumunun daha geniş bir bölgesinde soğurma sağlanarak I_{sc} arttırılmalı, sızıntı akımları (I_0) azaltılarak V_{oc} arttırılmalı ve etkili bir metalizasyon süreci optimizasyonu ile seri direnç etkisi azaltılarak FF arttırılmalıdır [5,51].

3.3. Fotovoltaik Güneş Hücresi Türleri

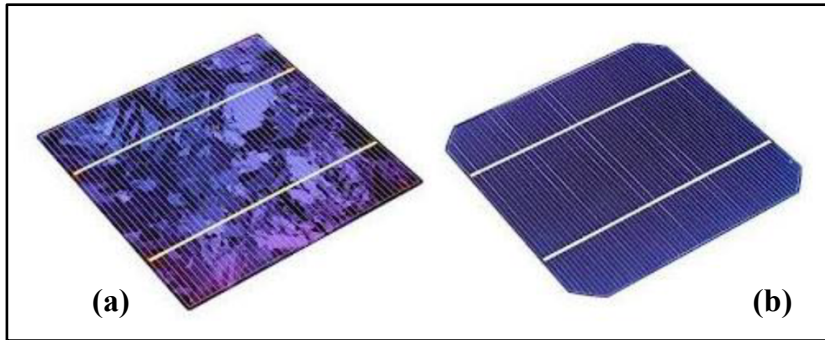
Fotoakım üreten aktif bölgelerinde farklı fiziksel, kimyasal, elektronik ve optik özelliklere sahip organik ya da inorganik malzemelerin kullanıldığı birçok farklı fotovoltaik güneş hücresi türü bulunmaktadır. Bu hücreler, birinci, ikinci ve üçüncü nesil güneş hücreleri olarak sınıflandırılmaktadır. Birinci nesil güneş hücreleri, çok kristal (polikristal) ve tek kristal (monokristal) silikon teknolojisine dayanmaktadır. İkinci nesil güneş hücreleri, ince film tabanlı güneş hücreleridir. Bu hücre sınıfında, Kadmiyum Tellür (CdTe), Amorf Silikon (a-Si), Bakır İndiyum Galyum Selenyum (CIGS) ve Bakır Çinko Kalay Sülfür (CZTS) gibi farklı malzemelerden elde edilen ince filmleri aktif katman olarak kullanan birçok farklı güneş hücresi bulunmaktadır. İnce film güneş hücreleri için alttaş malzemesi olarak cam ve esnek malzemeler kullanılabilir. Yeni nesil güneş hücreleri olarak da adlandırılan üçüncü nesil güneş hücreleri ise, aktif katmanında çeşitli organik ve inorganik malzemeleri ve çok eklemlili yapıları (tandem güneş hücreleri) kapsamaktadır. Üçüncü nesil güneş hücrelerinde temel hedef, düşük maliyetli ve yüksek verimli güneş hücreleri üretmektir. Boya duyarlı güneş hücreleri (DSSC), organik/polimer bazlı güneş hücreleri, perovskit güneş hücreleri ve kuantum nokta güneş hücreleri üçüncü nesil güneş hücresi sınıfını oluşturmaktadır [90]. III-V grubu yarıiletken malzemeleri kullanılarak üretilen III-V grubu güneş hücreleri sınıfını ise kuantum kuyulu ve çok eklemlili güneş hücreleri oluşturmaktadır. Bu sınıfta yer alan hücreler verim rekortmeni hücreler olarak bilinmektedir.

3.3.1. Kristal silikon güneş hücreleri

Silikon, elektronik ve optoelektronik uygulamaların çoğunda olduğu gibi güneş hücresi üretiminde de en yaygın kullanılan malzemedir. Günümüz ticari güneş hücresi pazarının lideri, % 90’ın üzerinde pazar payına sahip olan tek kristal (c-Si) ve çok kristal (pc-Si)

yapıdaki Si güneş hücreleridir. Silikon tabanlı güneş hücrelerinin çoğunlukla tercih edilmesinin başlıca nedenleri; optik, elektriksel ve yapısal özelliklerini uzun süre koruyabilmeleri ve üretim maliyetlerinin düşüklüğüdür. Ayrıca Si tabanlı teknolojiler üzerine uzun yıllardır kazanılan tecrübe ve bilgi birikimi pazar liderliği için silikonu ön plana çıkartmaktadır [91]. Silikon tabanlı güneş hücreleri, yasak enerji aralıkları sebebiyle kızılötesi spektral bölgedeki ışıma duyarlıdır. Elektromanyetik spektrumun IR bölgesindeki ışıma enerjisi, UV ve VIS bölgesindeki ışıma göre daha düşük olması nedeniyle bu hücre türünün verimi yaklaşık % 25 ile sınırlıdır [91].

Kristal Si güneş hücreleri tek kristal ve çok kristal Si hücreler olmak üzere iki çeşittir. Tek kristal Si hücreler üstün kristal kaliteleri ve homojen yapıları nedeniyle % 24'lere ulaşan verimlere sahiptir [5]. Ancak saf tek kristal Si üretimi, üstün teknoloji ve yüksek maliyet gerektirmektedir. Günümüzde kullanılan tek kristal Si tabanlı hücreler Czochralski (CZ), Float Zone (FZ) ve Bridgman gibi kristal büyütme yöntemleri kullanılarak üretilmektedir [34]. Bir diğer kristal Si güneş hücresi çeşidi çok kristal Si güneş hücreleridir. Çok kristal Si güneş hücreleri, tek kristal Si güneş hücrelerine göre daha düşük maliyetlidir ve üretimleri daha kolaydır. Ancak verimleri daha düşüktür ve % 18'lere ulaşabilmektedir. Bu hücre türünün üretiminde sıklıkla tercih edilen yöntemlerden biri dökme yöntemidir [5,73,92]. Tek kristal Si hücrelerde olduğu gibi homojen bir kristal yapı olmadığından çok kristal Si hücrelerde verim sınırlanmaktadır. Tek kristal ve çok kristal Si hücrelere ait görsel Resim 3.1'de verildi.



Resim 3.1. a) Çok kristal ve b) tek kristal silikon güneş hücreleri

3.3.2. İnce film güneş hücreleri

İkinci nesil güneş hücreleri olarak da adlandırılan ince film güneş hücreleri, katı, esnek ve cam gibi farklı alttaşlar üzerine kaplanan foton emici katmanlar kullanılarak oluşturulmaktadır. İnce film güneş hücreleri, güneş hücre piyasasında yaklaşık % 7'lik pazar payına sahiptir ve % 7 ile % 20 arasında değişen verimlilik sunmaktadır [5,93].

Soğurma katsayısı yüksek yarıiletken malzemelerin geniş yüzeyler üzerine ince film olarak kaplanması prensibine dayanan bu yöntem, farklı karakteristik özelliklere sahip güneş hücrelerinin üretimine imkan sağlamaktadır. Genellikle çok kristal yapıya sahip olan ince film hücreler, kristal silikon güneş hücrelerine göre daha basit teknikler kullanılarak üretilmektedir [73]. Bu hücre türü üzerine yapılan çalışmalar, güneş hücresi üretiminde kullanılabilecek birçok yarıiletken malzeme, düşük maliyetli alttaşlar ve geniş fotovoltaiik yüzeyler kullanılabileceğini göstermektedir.

İnce film güneş hücrelerinin temel avantajı, soğurucu katman olarak kullanılan malzemelerin yüksek soğurma katsayısına sahip olması ve bu sayede küçük ve ince aktif katmanın gelen fotonların soğurulması için yeterli olmasıdır. Bu güneş hücre sınıfının dezavantajları ise stabilite sorunları ve sızıntı akımlarının yüksekliğidir [94]. İnce film güneş hücreleri, a-Si, CdTe, CIGS ve CZTS gibi farklı aktif katmanlar içeren güneş hücrelerinden meydana gelmektedir.

Amorf silikon (a-Si) güneş hücreleri

İçerisinde rastgele dizilmiş Si atomlarının bulunduğu amorf yapıdaki malzemenin iletkenliği düşüktür. Bu durum fotovoltaiik verimliliği olumsuz etkilemektedir. Amorf silikon malzemedeki atomların rastgele dizilimi, yasak enerji aralığında çok sayıda izinli enerji seviyesi, yani yeniden birleşme merkezleri oluşmasına neden olur. Bu malzemelere % 5-10 oranında katkılanan hidrojen (H) boş Si bağlarına tutunarak izinli enerji seviyelerini azaltır. Oluşan hidrojenleştirilmiş Si yapısı (a-Si:H) elektriksel özellikleri fotovoltaiik çevrime uygun düzeye getirmektedir. Kristal Si güneş hücrelerine göre daha kolay ve daha düşük maliyetle üretilibilmelerine rağmen enerji dönüşüm verimlilikleri daha düşüktür. Amorf silikon güneş hücrelerinde % 11'e ulaşan verim değerleri rapor edilmiştir [95,96]. Bu hücre

türü, kimyasal buhar birikimi (CVD) ve plazma destekli kimyasal buhar birikimi (PECVD) gibi teknikler kullanılarak üretilmektedir [96].

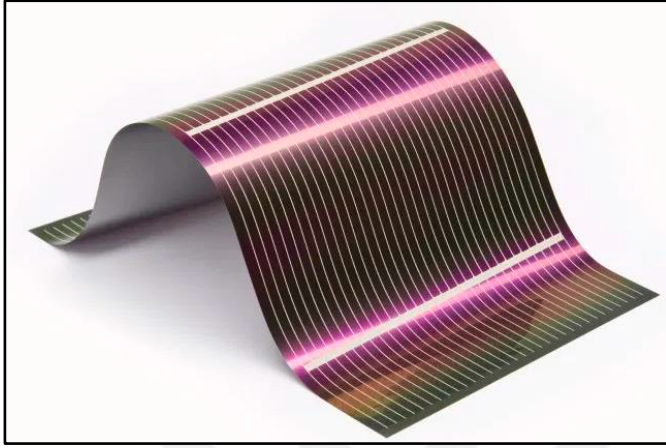
Kadmiyum tellür (CdTe) güneş hücreleri

CdTe yarıiletken malzemesi, Kadmiyum (Cd) ve Tellür (Te) elementlerinin bir araya gelmesiyle oluşan çok kristal yapıda ve yüksek soğurma katsayısına sahip bir malzemedir. CdTe güneş hücreleri, farklı alttaşlar üzerinde ince film teknolojisi kullanılarak kolaylıkla elde edilebildiğinden güneş hücresi maliyetlerini düşürmektedir. Bu hücreler fotovoltaiik pazarda yaklaşık % 6'lık pay ile yer almaktadır. II-VI yarıiletken bileşiğı olan CdTe, oda sıcaklığında 1,5 eV yasak enerji aralığına sahiptir [97]. Bu değeri, spektrumundan yüksek enerji dönüşümü elde edilebilecek spektral bölgeye karşılık gelmektedir. CdTe fotovoltaiik hücre teknolojileri üzerine çalışmalar yürüten First Solar firması CdTe güneş hücrelerinde % 22'ye ulaşan verim değeri rapor etmiştir [98]. Bu hücre türünün teorik verimi ise % 27'dir [99]. Sanayide ve teknolojik araştırmalarda CdTe bazlı ince film güneş hücreleri üzerinde yoğun bir ar-ge çalışması olmasına rağmen, Cd elementinin toksik doğası ve Te elementinin zor bulunur olması bu hücre türünün olumsuz özelliğı olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bakır indiyum galyum selenyum (CIGS) güneş hücreleri

IB-IIIA-VIA grubu elementlerinden meydana gelen üçlü, dörütlü veya beşli ince film tabanlı yapılardan olan CIS ve CIGS güneş hücreleri, direk bant yapısı ve yüksek soğurma katsayısı gibi üstün elektronik ve optik özelliklerinden dolayı günümüzün popüler teknolojileri arasındadır. Bakır (Cu), İndiyum (In) ve Selenyum (Se) elementlerinden oluşan üçlü CIS (CuInSe_2) bileşik yapısı, bu hücre türünün ilk çalışmalarını oluşturmuştur. CIS soğurucu katmana sahip güneş hücrelerinin en büyük dezavantajı, yasak enerji aralıklarının düşük olmasıdır. Yasak enerji aralığını arttırmak ve spektral ışınım gücünün yüksek olduğı bölgeye ulaştırmak amacıyla CIS katmanlara Galyum (Ga) elementinin katkılanmasıyla oluşturulan CIGS (CuInGaSe_2) güneş hücreleri üretilmiştir. Ga katkısı, yasak enerji aralığını düşürmesinin yanı sıra güneş hücresinde V_{oc} ve η değeri arttırmaktadır [5,97]. CIGS soğurucu katmanlı ince film güneş hücreleri, teorik olarak % 30 verime ulaşabilmektedir [99]. CIGS güneş hücreleri, yaklaşık % 2'lik pazar payına ve % 20'lere ulaşan enerji dönüşüm verimliliklerine sahiptir [100]. Özellikle karasal esnek ve hafif teknolojik

uygulamalarda ve uzay teknolojisinde yüksek potansiyele sahip olan CIGS güneş hücreleri günümüzde ar-ge niteliği yüksek hücreler arasındadır. Esnek yapıya sahip CIGS güneş hücresine ait görsel Resim 3.2’de verildi.



Resim 3.2. Esnek yapıya sahip CIGS ince film güneş hücresi [90]

Bakır çinko kalay sülfür (CZTS) güneş hücreleri

Güneş hücrelerinde kullanılan In ve Ga’un yeni nesil teknolojik uygulamalardaki kullanımı bu malzemelerin ve dolayısıyla bu malzemeler kullanılarak üretilen CIGS güneş hücrelerinin maliyetlerini arttırmaktadır [101,102]. Bu nedenle, CdTe ve CIGS gibi ince film güneş hücrelerine alternatif olabilecek, düşük maliyetli, çevre dostu, kolay üretilen ve doğada bol bulunan elementlerin kullanıldığı ince film soğurucu yarıiletken malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) yarıiletken malzemesi, sahip olduğu uygun özellikler nedeniyle son yıllarda oldukça fazla çalışılmaktadır. CZTS ince film güneş hücreleri, kullanılan üretim teknikleri ve aygıt yapısı bakımından CIGS yapılara oldukça benzemektedir [103,104]. CZTS ince filmleri, sahip olduğu yaklaşık 1,5 eV direk yasak enerji aralığı ve yüksek soğurma katsayısı sayesinde güneş hücreleri için oldukça uygun bir malzemedir. CZTS soğurucu katmana sahip güneş hücrelerinde teorik verim değeri % 32 olarak hesaplanmaktadır [105]. Deneysel çalışmalarda ise, ince film güneş hücrelerinin bu türü için % 12’lere ulaşan verim değerleri rapor edilmiştir [106].

3.3.3. Yeni nesil güneş hücreleri

Üçüncü nesil güneş hücreleri olarak da adlandırılan yeni nesil güneş hücreleri, gelecek vaat eden ancak henüz ticari olarak kullanıma başlamamış teknolojileri içermektedir. Yeni nesil güneş hücrelerinin gelişmiş türlerini, boya duyarlı, organik polimer bazlı, perovskit ve kuantum noktalı güneş hücreleri oluşturmaktadır. Sentezlenen organik ve polimer tabanlı malzemelerin soğurucu katman olarak kullanıldığı güneş hücrelerinin üretim maliyetlerinin düşük olmasına, hafif, esnek ve geniş alandaki uygulanabilirliklerine rağmen verimlilik değerleri oldukça düşüktür [107].

Boyaya duyarlı güneş hücreleri (Dye synthesized solar cells: DSSC), iletken elektrotlar arasına yerleştirilen, foton soğurumu yüksek malzemelerden elde edilmiş boya moleküllerinden oluşmaktadır. Boya duyarlı güneş hücreleri, fotosentez benzeri bir prensip ile çalışmaktadır. Işığı soğuran DSSC sistemler, genellikle iyodür tabanlı boyar maddeler yardımı ile enerji üretimi gerçekleştirir [5]. Elektron-boşluk çiftleri organik malzemelerden elde edilen boya moleküllerinde meydana gelir ve TiO_2 nanopartikülleri aracılığıyla taşınır. Günümüzde boya duyarlı güneş hücrelerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir ve farklı organik/polimer bazlı boyar maddeler kullanılarak % 14'lere ulaşan verim değerleri rapor edilmektedir [108].

Organik güneş hücreleri, FTO ve ITO gibi optik olarak geçirgen olan iki elektriksel iletken elektrot arasına organik tabanlı malzemelerin yerleştirilmesiyle meydana gelmektedir. Organik güneş hücrelerinde organik temelli malzemeler olarak, PCBM, P3HT, PEDOT:PSS gibi yarıiletken polimerler kullanılmaktadır. Bu hücre türünde kullanılan foton soğurucu malzemelerin moleküler özelliklerinin istenildiği gibi kolaylıkla değiştirilebilmesi, ucuz olmaları ve kolay üretim teknikleriyle elde edilebilmeleri gibi avantajları nedeniyle yoğun bir araştırma konusudur. Organik güneş hücrelerinde kullanılan malzeme istenilen soğurma aralığına ayarlanarak güneş spektrumunun uygun bölgelerinin soğurulması sağlanabilir. Bu güneş hücresi türünün verimleri diğer hücre türlerine göre daha düşüktür. Güncel çalışmalar çok katmanlı organik hücrelerde % 17'ye ulaşan verimler bildirmektedir [109]. Ayrıca bu tip hücrelerde stabilite ve yüksek sızıntı akımı gibi problemler verimi sınırlamaktadır.

Kuantum noktalı güneş hücreleri, geniş bir spektral bölgeden foton soğurumu için yasak enerji aralıklarının ayarlanabilir olması, kolay üretim, düşük maliyet, yüksek verimlilik,

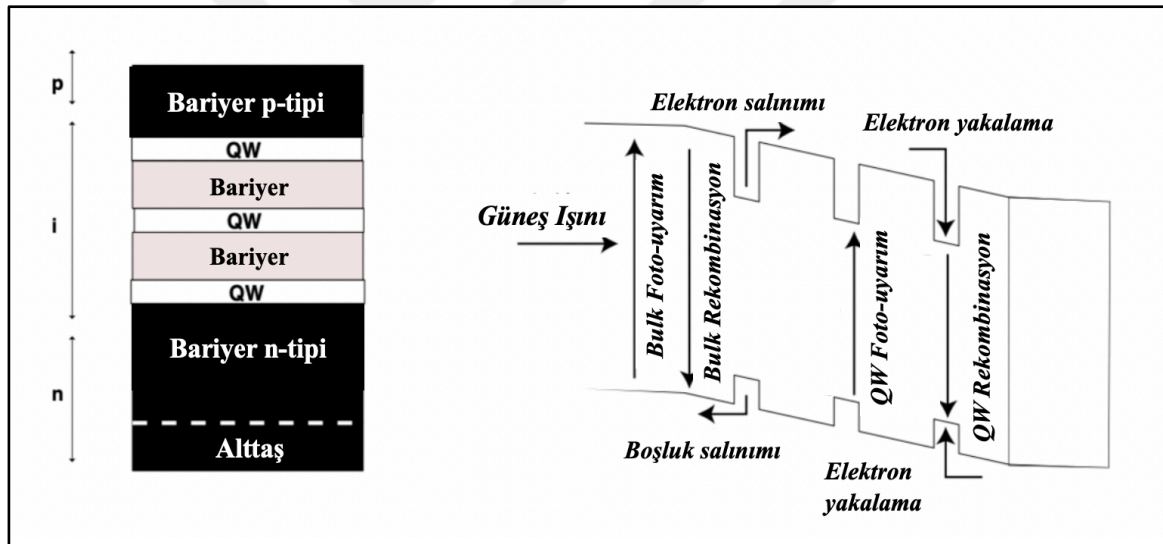
esnek ve cam alttaşlar üzerine uygulanabilirlikleri gibi özellikleri nedeniyle son yıllarda dikkat çekmektedir. Kuantum noktaları, farklı üretim teknikleri kullanılarak oluşturulan nanometre boyutundaki yarıiletken kristallerdir [99]. Kuantum noktalarının çapı üretim sırasında değiştirilerek, soğurma bölgesinin ayarlanması sağlanır. İnce film yapıdaki yarıiletkenlerde sabit yasak enerji aralığı mevcutken, kuantum nokta yapısındaki yarıiletkenler boyuta bağlı bant aralığına sahiptir. Kuantum noktaları genelde yapay atomlar olarak adlandırılır. Bu noktalar, atomların dalga fonksiyonlarını 3 boyutta kısıtlayarak, yük taşıyıcılarının kontrolünü sağlar. Son yıllarda popülerlik kazanan kuantum noktalı güneş hücrelerinde % 12'lere ulaşan verimlilikler elde edilmiştir [110,111]. Bu hücre teknolojisinin zamanla gelişmesi ve yapılan ar-ge faaliyetinin artması beklenmektedir.

Perovskit tabanlı malzemelerin kullanıldığı güneş hücreleri, üçüncü nesil güneş hücrelerinin en güncel üyesidir ve verimlerindeki ciddi artışın başladığı 2008 yılında beri oldukça popüler araştırma konuları arasındadır. Perovskit malzemeler ABO_3 veya ABX_3 formunda bulunan mineral yapılardır ve kübik yapıda kristalleşirler. Yüksek verim, kolay üretilebilirlik, uygun maliyet ve fotovoltaiik endüstrisine kolay entegrasyon gibi avantajları perovskit hücreleri ön plana çıkartmaktadır. Özellikle kurşun (Pb) ve kalay (Sn) içeren perovskit güneş hücreleri üzerine yoğun çalışmalar yürütülmektedir. Kullanılan perovskit malzemeler, oluşturulan katmanlı yapılar ve geliştirilen üretim teknikleri ile verimlilik değerleri % 21'e ulaşmıştır [112]. Silikon tabanlı güneş hücreleri ile hibrit biçimde üretilen perovskit güneş hücrelerinde % 28'e ulaşan verim değerleri bildirilmiştir [91]. Kararlılık, stabilite ve sızıntı akımı problemleri bu güneş hücrelerinin dezavantajları olarak bilinmektedir.

3.3.4. III-V grubu güneş hücreleri

III-V grubu güneş hücreleri, foton soğurucu aktif katmanlarında IIIA grubundan (Ga, In, Al) ve VA grubundan (As, P, N, Sb) elementlerin bileşimiyle elde edilen III-V grubu bileşik veya alaşım yapıdaki yarıiletken malzemelerin kullanıldığı güneş hücreleridir [5,34]. III-V grubu güneş hücrelerinde kullanılan kuantum kuyu ve çok eklemlı yapılar, bu hücre türünün verim rekortmeni hücre sınıfında yer almasını sağlamaktadır. Yüksek verime sahip III-V grubu güneş hücreleri, karasal uygulamalarda konsantre fotovoltaiik sistemlerde ve uzay teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [5,40].

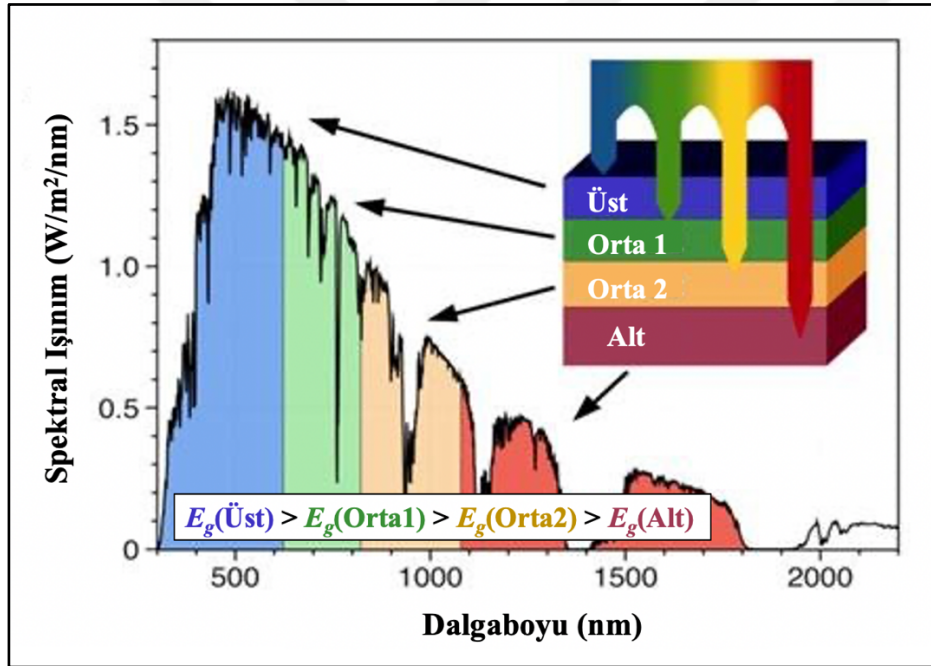
Kuantum kuyulu güneş hücreleri (Quantum-well solar cell: QWSC) yasak enerji aralığı yüksek yarıiletken malzeme arasına yasak enerji aralığı düşük yarıiletkenin çok ince katmanlar halinde üretilmesi ile elde edilen Şekil 3.8'deki gibi p-i-n yapısına sahip aygıtlardır. Kuyu ve bariyer katmanların ardışık büyütülmesi ile elde edilen kuantum kuyulu güneş hücrelerinde kullanılan malzemeler, kuyu/bariyer kalınlıkları ve kuyu sayısı değiştirilerek güneş spektrumunun istenilen bölgesinin soğrulması sağlanır. Kuantum kuyulu bir güneş hücresinde kuantum kuyusu içermeyen tasarıma göre fotoakımda iyileşme meydana gelirken voltajda kayıp oluşmaktadır [13]. QWSC yapılarında teorik verim sınırı % 44 civarındadır [34]. Güncel çalışmalarda AlGaAs/GaAs kuantum kuyulu güneş hücresinde % 28,3'e ulaşan verim değeri rapor edilmiştir [113]. Kuantum kuyulu güneş hücre teknolojisi yüksek verimlilikte aygıtların geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır.



Şekil 3.8. Kuantum kuyulu güneş hücre yapısı ve bant diyagramı

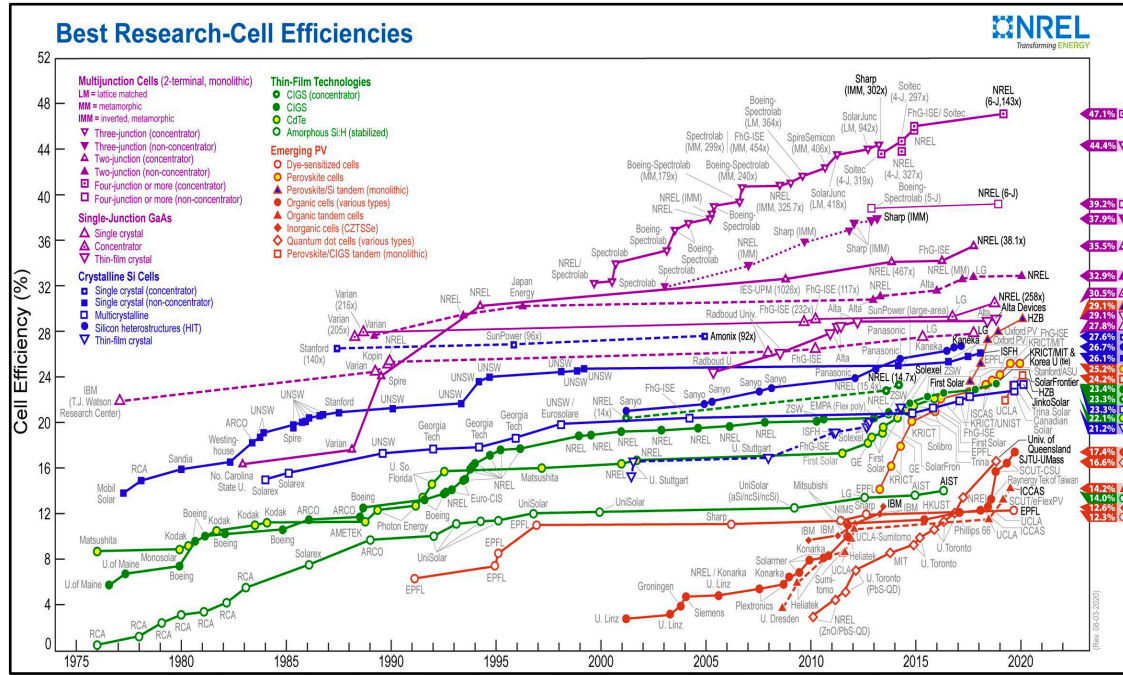
Çok eklemli güneş hücreleri (Multi-junction solar cell: MJSC) farklı yasak enerji aralığına sahip yarıiletken malzemelerden oluşturulan p-n eklemelerinin birbiri ardına büyütülmesi ile elde edilmektedir. Tek eklemli güneş hücrelerinde kullanılan yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığına eşit ve yüksek enerjiye sahip fotonlar fotoakım üretimine katkıda bulunmaktadır. Ancak yüksek foton enerjisi hücrede termalizasyon kayıplarına neden olmaktadır. Bu durum, Shockley-Queisser limitinde belirtildiği gibi teorik hücre verimlerini sınırlandırmaktadır [105,114]. Birden fazla farklı yarıiletkenin kullanıldığı çok eklemli yapılar sayesinde güneş spektrumunun daha geniş bir bölgesi soğurulabilmekte, fotoakım artmakta ve termalizasyon kayıpları azaltılmaktadır. Çok eklemli güneş hücrelerine ait yapı

tasarımı Şekil 3.9’da verildi. Çok eklemli güneş hücresi yaklaşımı, teorik verim limitlerini tek eklem için % 31’den iki eklemde % 42,9’a, üç eklemde % 49,3’e ve dört eklemde ise % 52’nin üzerine çıkartmaktadır [2,115]. Günümüzde uzay uygulamaları ve karasal konsantre fotovoltaik uygulamalarda sıklıkla kullanılan çok eklemli güneş hücreleri, AM0 spektrumunda % 32’lere [32], AM1.5G spektrumunda tek güneşte 6 eklemli yapı tasarımı ile % 39,2’ye [116] ulaşan verimler elde etmektedir. Konsantre fotovoltaik uygulamalarda ise üç eklemli güneş hücre yapısı ile 508 güneşte % 46 verim literatüre sunulmuştur [117]. Çok eklemli güneş hücrelerinde eklem sayısının artırılması, yeni nesil yarıiletken malzeme geliştirilmesi, üstün üretim teknikleri, farklı hücre katmanlarının birbiriyle entegrasyonu ve yüksek verimli yapıların esnek yüzeyler üzerinde oluşturulması ile ilgili yapılan çalışmalar güncelliğini korumaktadır.



Şekil 3.9. Çok eklemli güneş hücrelerine ait yapı tasarımı [118]

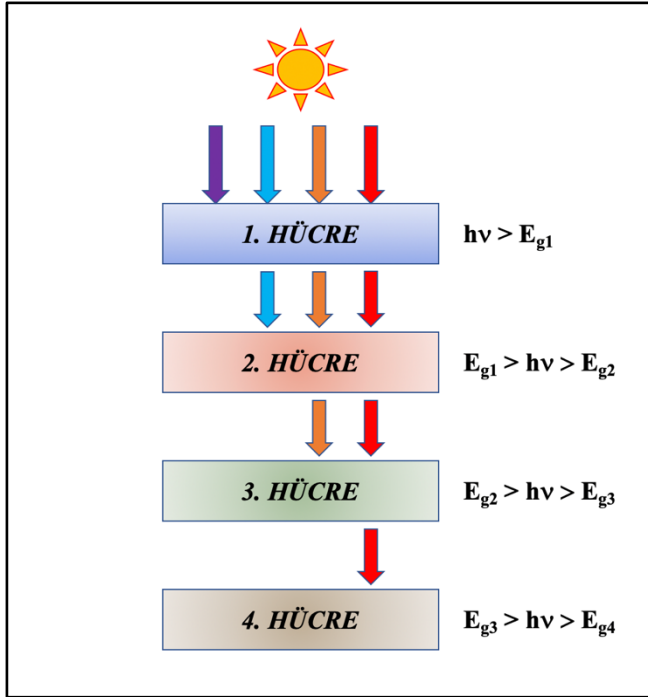
Güneş hücresi türlerini ve en güncel verimlilik değerlerini özetlemek amacıyla Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı (NREL) tarafından 2020 yılında güncellenen, hücre türlerine ve yıllara göre hücre verimlerinin değişimini gösteren grafik Şekil 3.10’da verildi.



Şekil 3.10. Farklı güneş hücre türlerine ait verimlerin karşılaştırılması [41]

3.4. Çok Eklemli Güneş Hücreleri

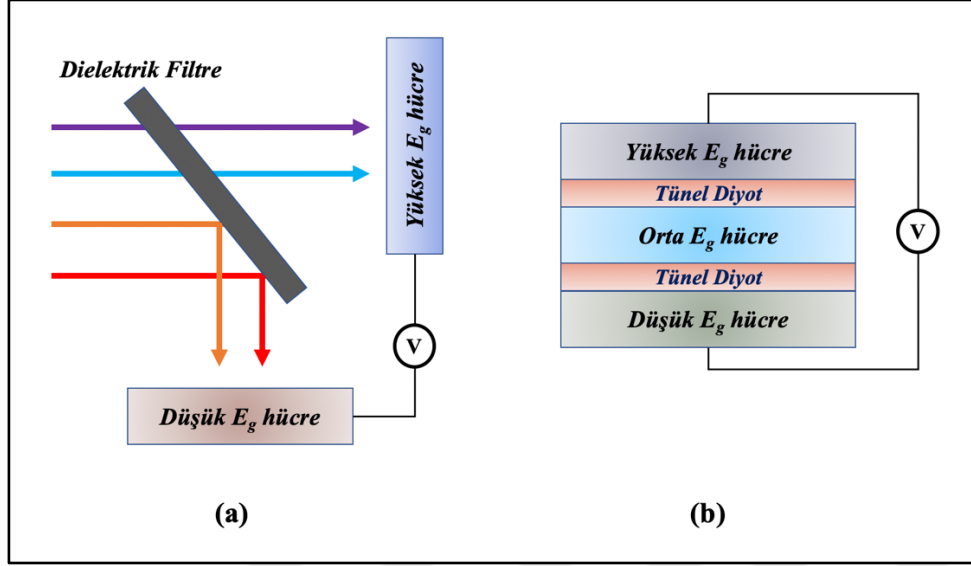
Yüksek verimli güneş hücresi elde edebilmek için kullanılan etkin yöntemlerden bir tanesi, güneş spektrumunun farklı bölgelerini farklı yarıiletken malzemelerin kullanıldığı güneş hücreleri yardımıyla soğurmak ve fotoakım üretmektir. Bu yöntem, kullanılan farklı yarıiletken malzemelerin farklı yasak enerji aralıkları nedeniyle farklı dalgaboylarının soğurulmasını sağlamaktadır. Farklı yasak enerjili p-n eklem yapısındaki katmanların birbiri ardına büyütülmesi ile elde edilen çok eklemli yapılarda en yüksek bant aralığına sahip yarıiletkenin kullanıldığı eklem en üst katmanda yer almaktadır. Üst katmanda yer alan yarıiletkenin yasak enerji aralığına eşit ve yüksek enerjideki fotonlar bu katmanda soğurulmakta ve fotoakıma dönüşmektedir. Daha düşük enerjideki fotonlar üst eklemde soğurulmadan geçer ve ikinci eklemeye ulaşır. İkinci katmanda yer alan yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığı üst katmandan daha düşük olduğundan üst katmandan soğurulmadan geçen fotonlar bu eklemde fotoakıma dönüşür. İkinci eklemde bant aralığından düşük enerjideki fotonlar ise yasak enerji aralığı en düşük olan alt eklemeye geçer. En alt katman bant aralığı en düşük olan katmandır ve diğer katmanlarda soğurulamayan düşük enerjili fotonları fotoakıma dönüştürür. Bu mekanizma, daha geniş bir foton enerji aralığının soğurularak fotoakıma dönüştürülmesini sağlar [51]. Çok eklemli güneş hücrelerinde farklı katmanların foton soğurumuna ait şematik gösterim Şekil 3.11’de verildi.



Şekil 3.11. Çok eklemli güneş hücrelerinde farklı eklemlerde foton soğurumları

Farklı yarıiletkenlerden ve ardışık eklemlerden meydana gelen güneş hücrelerinin birbirleriyle olan bağlantısı optik ve elektriksel olmak üzere iki çeşittir. Optik olarak birbirleriyle bağlantılı olan hücrelerde bir dielektrik filtre kullanılarak farklı dalgalı boylarındaki fotonlar uygun yasak enerji aralığına sahip yarıiletkenlerden meydana gelmiş ekleme yönlendirilir. Her ekleme oluşun fotoakım toplanarak devreden akım çıkıtısı elde edilir (Şekil 3.12a). Elektriksel bağlantılı hücrelerde ise ardışık olarak birbiri üzerine büyütülen p-n eklemler arasına yerleştirilen optik geçirgenliği ve elektriksel iletkenliği yüksek tünel diyotlar bulunmaktadır (Şekil 3.12b). Tünel diyotlar ya da bir diğeri ismiyle tünel eklemler, hücreler arasında elektron akışını sağlar, hücrelerin elektrik alanını birbirinden ayırır ve iki p-n eklem arasındaki potansiyel farkı azaltır. Ticarileşen ve ar-ge çalışmaları süren çok eklemli güneş hücrelerinin çok büyük bir kısmı tünel eklem kullanarak eklemler arası bağlantıyı sağlamaktadır. Çok eklemli güneş hücrelerinde ardışık p-n eklem büyütme ve eklemler arası tünel diyot içeren yapı, birbirine seri olarak bağli güneş hücrelerinin oluşturacağı tasarımla benzerdir [51]. Bu tür hücrelerden elde edilecek toplam akım, en düşük akımı oluşturan hücrenin akımı ile sınırlıdır. Bu nedenle hücrelerin birbiriyle uyumlu akım oluşturmalarını sağlayacak tasarımlar oldukça önemlidir. Bu noktada eklemlerde kullanılan yarıiletken malzemelerin kalınlıkları, katkı konsantrasyonları, soğurma katsayıları, örgü sabitleri, termal genişleme katsayıları, yasak enerji aralıkları, vb. fiziksel özelliklerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Çok eklemli güneş hücrelerinde 1978 yılında başlayan ve GaInP/GaAs iki eklemli yapıya sahip güneş hücresi çalışmaları % 14 verim değerleri ile başlamış [119] günümüzde gelişen teknoloji, yeni nesil malzeme, teknikler ve farklı malzemeler arası entegrasyon yardımıyla altı eklemli hücrelerden elde edilen % 39,2'lere [116] kadar ulaşmıştır.



Şekil 3.12. a) Optik bağlantılı b) elektriksel bağlantılı çok eklemli güneş hücresi

Çok eklemli güneş hücrelerindeki yapı tasarımını ve oluşturulan katmanları ayrıntılı olarak incelemek amacıyla Şekil 3.13'de örnek bir GaInP/GaAs/Ge üç eklemli güneş hücre yapısı verildi. Bu hücre yapısı, ön metal kontaklar, kep tabaka, yansımaya önleyici (AR) katman, pencere tabaka, aktif eklem katmanları, tünel eklem, arka yüzey alanı (BSF) ve arka metal kontakten meydana gelmektedir. Her bir katman yüksek verimli hücre üretmek için ayrı ayrı optimize edilmektedir. Bu katmanların ve fiziksel işlevlerinin bilinmesi, çok eklemli güneş hücre tasarımlarının anlaşılması ve bu literatüre hakim olunabilmesi için gereklidir.



Şekil 3.13. Tipik bir üç eklemli güneş hücre yapısının tasarımı ve katmanları [40]

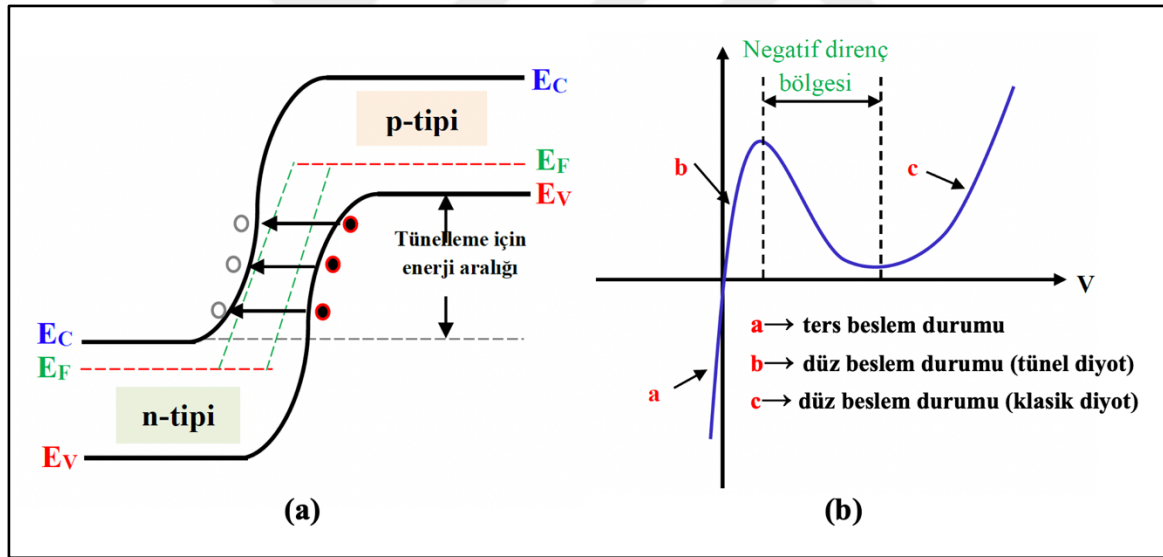
Tünel diyot

Çok eklemli güneş hücrelerinde aktif eklem katmanları arasındaki elektriksel iletimi sağlamak amacıyla yüksek katkı konsantrasyonuna sahip tünel diyot yapısı oluşturulmaktadır [120]. Tünel diyot yapısının temel işlevi, farklı hücre katmanları arasında düşük optik kayıplı ve düşük elektriksel dirence sahip kontak oluşturmaktır [121]. Şekil 3.13’de verilen üç eklemli güneş hücresi tasarımında görüldüğü gibi, n-p polarizasyonunda büyütülen orta hücre, üst hücre ile p-n polarizasyonundaki tünel eklem ile bağlantılıdır. Ters polarize tünel diyot tasarımı, üst hücre ile orta hücre arasında ters p-n eklem oluşumunu engeller [122]. Bu sayede üst hücrede üretilen voltaja karşı, orta hücrede ters bir voltaj üretilmesi engellenerek voltaj kayıpları azaltılır. Tünel diyotlar, hücreler arasındaki potansiyel farkı azaltarak elektronların bu bölgeyi tünelleme yoluyla geçmesini ve böylece fotoakımın minimum kayıpla iletilmesini sağlar. Tünel diyot tasarımları çok eklemli güneş hücrelerinin performans parametrelerinin iyileştirilmesinde büyük öneme sahiptir [89].

Tünel diyotların çalışma prensibi kuantum mekaniksel tünelleme olayına dayanmaktadır. Tünel diyotların sahip olduğu yüksek katkı konsantrasyonu nedeniyle, tünel eklemde

yaklaşık 10 nm kalınlığında ince bir bariyer oluşarak dar bir tüketim bölgesi meydana gelmesine neden olur. Yüksek katkı konsantrasyonu sebebiyle Fermi enerji seviyeleri p-tipi yarıiletkenin valans bandının ve n-tipi yarıiletkenin iletkenlik bandının içine kadar genişler. Oluşan bant yapısı, elektron ve boşlukların Şekil 3.14a’da görüldüğü gibi eklem potansiyel bariyerini aşmak yerine, bariyerin içinden tüketim bölgesinin diğer tarafına tünelleme yoluyla geçmesini sağlar.

Tünel diyota voltaj uygulandığında bir tünelleme akımı oluşur ve düz beslem durumunda uygulanan voltaj değeri artırılırsa tünelleme akımı artarak maksimum değere ulaşır. Eğer voltaj değeri belirli bir sınırın üzerine çıkarsa tünel akımı azalmaya başlar ve diyot bu bölgede negatif direnç özelliği gösterir. Uygulanan voltaj arttırılmaya devam ederse tünel diyot, difüzyon akımlarının hakim olduğu klasik p-n eklem I - V karakteristiğini göstermeye başlar [42]. Bir tünel diyotun I - V karakteristiği Şekil 3.14b’de verildi.



Şekil 3.14. Tünel diyotun a) şematik bant yapısı b) I - V karakteristiği [2]

III-V grubu çok eklemli güneş hücrelerinde, hücreler arası örgü uyumu, düşük elektriksel direnç ve optik geçirgenlik önemli olduğundan tünel diyot yapılarında genellikle AlGaAs, GaInP ve GaAs yarıiletken bileşikleri kullanılmaktadır [123]. Tünel diyot yapıları foton geçirgenliğini korumak amacıyla $E_g(üst) > E_g(tünel) > E_g(alt)$ olacak şekilde tasarlanmaktadır. Bu malzemeler kullanılarak oluşturulan p+GaAs/n+GaAs, p+AlGaAs/n+GaAs, p+AlGaAs/n+AlGaAs ve p+AlGaAs/n+GaInP tünel diyot yapıları çok eklemli güneş hücrelerinde iletim sağlaması için yaygın olarak kullanılmaktadır [89,123,124].

Pencere tabaka

Çok eklemli güneş hücrelerinde kullanılan farklı yarıiletken malzemeler farklı örgü sabitlerine sahiptir. Örgü sabiti farklı malzemelerin üst üste büyütülmesi, taşıyıcıları tuzaklayan boş bağlar ve yapısal kusur meydana getiren gerilmelerin oluşmasına neden olur. Örgü sabitleri farklı olan katmanların üst üste büyütülmesinin gerektiği durumlarda istenmeyen yüzey birleşmelerini engellemek için tabakalar arasına çok ince bir alaşım katmanının büyütüldüğü pencereleme yöntemi kullanılır. Pencere tabaka, örgü farkını azaltan bir tampon oluşturur [5].

Güneş hücrelerinde kullanılan pencere katmanının bir diğer önemli görevi hücrelerin yüksek rekombinasyon hızını düşürmektir. Pencere tabaka, hücre üzerine gelen fotonların hücre içerisine en fazla sayıda girmesini sağladığı için kalınlığı çok ince ve optik geçirgenliği yüksek olmalıdır. Pencere tabakanın yasak enerji aralığı ise altında bulunan hücreden daha büyük olmalıdır. Ayrıca pencere tabaka, hücre katmanı ile örgü uyumlu olmalı, yüksek katkı konsantrasyonuna ve yüksek kristal kalitesine sahip olmalıdır. Pencere tabaka sayesinde maksimum güneş ışınımının güneş hücresinin içerisine girmesi sağlanır. III-V grubu yarıiletkenleri kullanılarak oluşturulan çok eklemli güneş hücrelerinin pencere tabakalarında AlGaAs, AlInP ve GaInP alaşımları yaygın olarak kullanılmaktadır [125]. Şekil 3.13’de verilen hücre tasarımında görüldüğü gibi üç hücre katmanı için üç adet pencere tabaka yer almaktadır.

Kep tabaka

Kep tabakası, güneş hücre yapısının en üst katmanında yer alır ve üst hücrenin pencere tabakası üzerine yüksek katkı yoğunluğuna sahip olacak şekilde büyütülür. Pencere tabakasının fabrikasyon süreçleri ve ön kontak metalizasyonu sırasında oluşabilecek etkilere karşı korunmasını sağlamaktır. Ayrıca bu tabakanın en önemli görevi, yüksek katkı yoğunluğu sayesinde ön metal kontağın omik özellik göstermesine katkı sağlamasıdır [2]. GaAs yarıiletken bileşiği, III-V grubu yarıiletken malzemelerin pek çoğu ile örgü uyumlu olması nedeniyle kep tabaka malzemesi olarak tercih edilmektedir. Şekil 3.13’de verilen üç eklemli güneş hücre tasarımında da kep tabakası olarak n^+ -GaAs kullanılmıştır.

Arka yüzey alanı (Back Surface Field: BSF)

Güneş hücresinde foto-uyarım oluştuğunda azınlık taşıyıcılar eklem bölgesine doğru hareket eder. Fakat bir miktar taşıyıcı hücre eklemi yerine hücrenin arka bölgesine yani eklemden uzak bölgeye doğru ilerler. Bu durum taşıyıcı kaybına neden olur ve fotoakımı azaltır. Hücrenin altına büyütülen yüksek katkılı tabaka oluşturduğu elektrik alan yardımıyla taşıyıcıların eklem bölgesine doğru sürüklenmesini sağlar. Tek eklemli hücrelerde genellikle alttaşın üzerinde, çok eklemli hücrelerde ise hücre katmanlarının altına büyütülen yüksek katkılı, ince ve optik geçirgenliği yüksek tabaka, arka yüzey alanı olarak adlandırılır [5]. Şekil 3.13’de hücre katmanları arasındaki BSF tabakasının kullanımı görülmektedir.

Ön ve arka metal kontaklar

Güneş hücrelerinde metalizasyon işlemleri ile oluşturulan metal kontaklar, hücre eklemlerinde oluşan taşıyıcıların toplanarak üretilen fotoakımın devreye iletilmesini sağlamaktadır. Düşük öz dirence sahip olmaları nedeniyle kontak malzemesi olarak altın (Au), gümüş (Ag) ve alüminyum (Al) gibi metaller tercih edilir. Güneş hücre yapısının ön ve arka yüzeylerine kaplanan metal kontaklar omik özellik göstermektedir. Omik kontaklarda metal ile yarıiletken malzeme arasında bir potansiyel engeli olmadığından, elektronlar kontak boyunca serbestçe hareket edebilir ve taşıyıcı kaybı yaşanmaz.

Ön yüzeyde oluşturulan metal kontaklar, güneş hücresi üzerinde oluşabilecek gölgelenmeyi minimuma indirmek, aktif alanı arttırmak ve rekombinasyonu önlemek amacıyla metal ızgara şeklinde kaplanmaktadır. Ön yüzeyde oluşturulan kontaklar hücre yüzeyinde en fazla % 10’luk bir alan kaplamaktadır. Böylece gelen güneş ışığının hücre içine maksimum girmesi sağlanarak, daha fazla foton soğurumu gerçekleşir. Bu durum daha fazla aktif alan sayesinde daha fazla foton soğurulmasını ve böylece güneş hücresinin yüksek fotoakım üretmesini sağlar.

Güneş hücresinin arka yüzeyinde oluşturulan metal kontak, rekombinasyonu önlemek amacıyla yüzeyi tamamen kapatacak şekilde kaplanır. Arka yüzey kontakları aynı zamanda elektron-boşluk çifti oluşturmadan hücreden geçen fotonları hücreye geri döndürmek için yansıtıcı bir yüzey olarak da kullanılmaktadır [2].

Yansima önleyici (AR) katman

Güneş hücresi üretiminde kullanılan yarıiletken malzemeler yüksek kırılma indislerine sahiptir. Yüksek kırılma indisli malzemelerin kullanılması, gelen güneş ışınlarının büyük bir kısmının geri yansımaya dolayısıyla optik yansima kayıplarına neden olur. Optik yansima kayıpları hücre verimini etkileyen en önemli kayıp mekanizmasıdır [40]. Gelen güneş ışınımının yaklaşık % 30'unun yansima sonucunda kaybedilmesi fotoakım üretimini sınırlamaktadır. Optik yansima kayıplarını en aza indirmek amacıyla kırılma indisi düşük ince filmlerin hücre yüzeyine kaplanması ile oluşturulan yansima önleyici kaplamalar (ARC), güneş hücresinde oluşan % 30'luk yansimayı % 5'in altına düşürmektedir [126]. Bu sayede daha fazla güneş ışığı soğurularak hücrenin ürettiği fotoakımın artması ve hücre performansının iyileşmesi sağlanır.

Yansima önleyici filmler tek katmanlı ya da çok katmanlı olarak oluşturulabilmektedir. Yansima önleyici malzeme olarak, geniş bir spektral aralıkta yansıtıcılığı az olan ve geniş optik bant aralığına sahip malzemeler tercih edilmektedir [127]. Tek katmanlı ARC olarak, TiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 ve Ta_2O_5 , çok katmanlı ARC olarak ise, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, MgF_2/ZnS , $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ ve $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ tasarımları yaygın olarak kullanılmaktadır [40,127,128].

3.4.1. Güneş hücrelerinin optimizasyonu

Güneş hücrelerinden teorik verim değerlerine yakın verimler elde edebilmek için tasarım, geliştirme, optimizasyon ve üretim süreçlerine yoğun zaman harcanması gerekmektedir. Güneş hücrelerinin tasarımından ya da üretim süreçlerinden kaynaklanan kayıplar, hücre performansında azalmaya neden olmaktadır. Güneş hücrelerinde meydana gelen iletim, termalizasyon ve voltaj kayıpları fiziksel limitler nedeniyle tamamen engellenemez ancak en aza indirilebilir [129]. Diğer kayıp mekanizmaları ise optik ve elektriksel kayıplardır. Optik kayıplar, gelen güneş ışınlarının yüzeyden yansması ve metal kontakların neden olduğu gölgeleme etkisinden dolayı elektron-boşluk çifti oluşumunun azalmasıdır. Bu durum fotoakımda kayıplara neden olur [130]. Güneş hücresi tarafından soğurulan ancak optik kayıplar ve rekombinasyonlar nedeniyle oluşan fotoakım düşüşü, elektriksel kayıpları oluşturmaktadır. Tüm bu kayıp mekanizmaları hücre verimini olumsuz etkilemektedir.

Kayıpları en aza indirmek, tasarım çalışmaları, malzeme seçimi ve hücre parametrelerinin optimizasyonu ile mümkündür. Öncelikle hücre katmanlarını oluşturan yarıiletken malzemeler birbirleriyle uyumlu yasak enerji aralığına sahip olmalıdır. Yarıiletken malzemelerle oluşturulacak katmanlı yapılarda dikkat edilmesi gereken bir diğer kritik nokta örgü uyumunun sağlanmasıdır. Çok eklemli hücreler, birbirine seri olarak bağlanmış hücreler olarak düşünülebilir. Bu hücrelerden elde edilen toplam akım, en düşük akımı üreten hücrenin akımı ile sınırlıdır. Bu nedenle, hücreler arasında akım uyumu olmalıdır. Uygun malzemelerin seçiminin ardından hücre kalınlıklarının optimizasyonu, farklı malzemelerin farklı soğurma katsayısına sahip olması nedeniyle performansı etkileyen bir diğer faktördür. Kayıpları minimize edecek şekilde belirlenen ve parametreleri optimize edilen güneş hücreleri, yüksek enerji dönüşüm verimleri elde etmeye adaydır.

Yasak enerji aralığı

Bir güneş hücresinde kullanılan malzemenin yasak enerji aralığı, güneş spektrumunun hangi bölgesindeki fotonların soğurulacağını belirler. Yasak enerji aralığı yüksek olan malzemeler, yüksek enerjili fotonların soğurulmasında kullanılmaktadır. Yüksek bant aralıklı güneş hücreleri yüksek voltaj değerine sahipken, ürettikleri fotoakım değeri düşüktür. Düşük yasak enerji aralıklı malzemeler ise düşük enerjili fotonların soğurulmasında kullanılmaktadır. Bu hücrelerin voltaj değerleri düşük, ürettikleri fotoakım ise yüksektir. Eklemde kullanılan yarıiletken malzemelerin yasak enerji aralığı foton soğurma bölgesini, hücre voltajını ve fotoakımı belirlediğinden çok eklemli güneş hücrelerinin tasarımında malzeme seçimi oldukça önemlidir [131,132].

III-V grubu bileşik ve alaşım yapıdaki yarıiletken malzemelerin yasak enerji aralıklarının alaşım oranlarına bağlı olarak uygun değerlere ayarlanabilmesi, çok eklemli güneş hücre tasarımlarında sıklıkla kullanılmasını sağlamaktadır. GaAs, AlGaAs, GaInAs, InGaAsN ve GaInP konsantre fotovoltaik ve uzay uygulamaları için tasarlanan çok eklemli güneş hücre yapılarında yaygın olarak kullanılan yarıiletken malzemelerdir [2,5,40]. Çok eklemli güneş hücrelerinde, en üst hücreden en alt hücreye doğru azalan yasak enerji aralıklı malzemelerin seçimi, güneş spektrumunun etkin kullanımını sağlayarak verim kayıplarının en aza inmesini ve hücre performansının artmasını sağlamaktadır.

Örgü uyumu

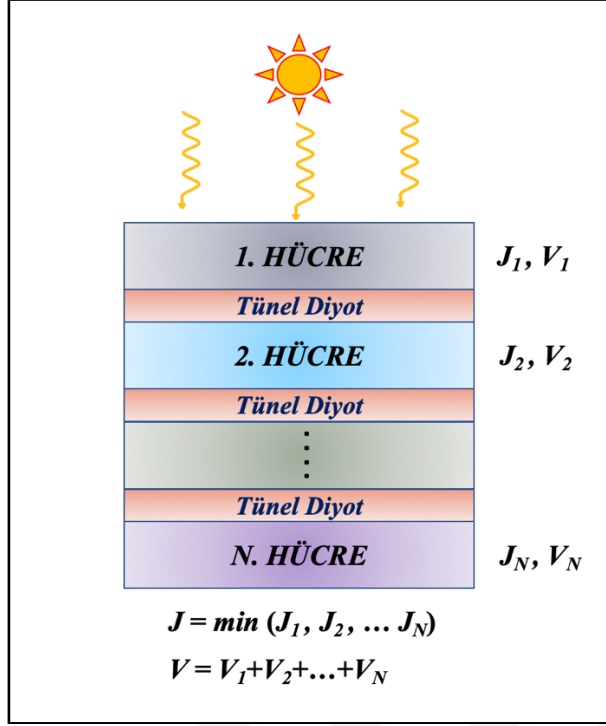
Çok eklemlı güneş hücreleri aynı alttaş üzerine (monolitik) ardışık olarak büyütölmeleri nedeniyle örgü sabitlerinin birbirleriyle uyumlu olması kritik öneme sahiptir. Malzemenin kristal örgüsünde yer alan atomların birbirleri arasındaki mesafe olarak tanımlanan örgü sabiti, iki farklı yarıiletken malzeme için yakın değlerlerde ise bu malzemeler arasında örgü uyumu vardır. Eğer örgü sabitleri birbirinden farklı olan yarıiletkenler bir araya getirilirse örgü uyumsuz yapılar elde edilir. Yapıdaki örgü uyumsuzluğu, dislokasyon kusurları yaratır ve foto-uyarımla meydana gelen taşıyıcıların tuzaklanmasına neden olur [86]. Hücre katmanlarında meydana gelen dislokasyon kusurları, kristal kalitesini bozarak güneş hücresinin performansını belirleyen, I_{sc} , V_{oc} , FF ve dolayısıyla η değlerinin azalmasına neden olur [133].

III-V grubu yarıiletken alaşımların örgü sabiti, Şekil 2.6'daki gibi alaşım oranı değıştirilerek ayarlanabilmekte, örgü uyumsuz yapılar örgü uyumlu hale getirilebilmekte ve yüksek performanslı optoelektronik aygıtların temelini oluşturan çoklu yapıların geliştirilmesi mümkün olmaktadır. Şekil 3.13'de verilen tipik bir $Ga_xIn_{1-x}P/GaAs/Ge$ üç eklemlı güneş hücre yapısı, $x=0,51$ alaşım oranında büyütöldüğünde $Ga_{0,51}In_{0,49}P$ (5,653 Å), $GaAs$ (5,650 Å) ve Ge (5,658 Å) yarıiletkenlerinin örgü sabitleri birbirine yakın olduğundan, örgü uyumlu ve yüksek kristal kalitesine sahip hücre yapısı elde edilebilmektedir.

Akım uyumu

Çok eklemlı güneş hücrelerinde en önemli parametrelerden bir tanesi akım uyumudur. Bu tür güneş hücreleri, seri bağılı hücre tasarımında olduklarından çıkış voltajları yüksektir. Fakat seri bağılı devre elemanlarının doğası gereğı, ardışık eklemlı yapı Kirchhoff yasasına uymakta ve üretilen akım hücreler tarafından sınırlandırılmaktadır [122]. Kirchhoff yasası, birinci hücrenin akım yoğunluğu ile ikinci hücrenin akım yoğunluğunun eşit olduğunu ve voltaj değlerinin lineer olarak toplandığını belirtir. Bu durum, Şekil 3.15'de göröldüğü gibi güneş hücresinde üretilen toplam akım yoğunluğunun, akım yoğunluklarının en küçüğü ile sınırlandırılması anlamına gelmektedir [134,135]. Çok eklemlı güneş hücrelerindeki bu durum, farklı hücrelerde üretilen akım yoğunluklarının eşit ya da birbirine çok yakın olması gerektiğini göstermektedir. Çok eklemlı güneş hücrelerinde akım uyumunun elde edilebilmesi için, her bir hücrenin güneş spektrumundan aynı oranda foton soğurması

gerekmektedir. Hücre katmanlarında kullanılan yarıiletken malzemelerin soğurma katsayıları ve katman kalınlıkları, akım uyumunun ayarlanması için oldukça önemlidir.



Şekil 3.15. N adet ekleme sahip güneş hücresinde üretilen akım ve voltaj

Katman kalınlıklarının optimizasyonu

Çok eklemlili güneş hücrelerinde eklemleri oluşturan katmanların kalınlıkları etkin foton soğurumu için oldukça önemlidir. Katman kalınlığının düşük olduğu bir tasarımda gelen fotonların az bir kısmı soğurulurken, büyük bir kısmı soğurulmadan geçer. Katman kalınlığı fazla olduğu durumda ise soğurulan fotonların büyük bir kısmı katman boyunca rekombinasyona uğrar. Bu nedenle katman kalınlıklarının optimize edilmesi, yüksek verimli çok eklemlili güneş hücresi tasarımlarının en önemli adımıdır.

Kalınlık optimizasyonunda dikkate alınması gereken en önemli parametre, kullanılan yarıiletken malzemenin fotonları katmanın ne kadar derininde soğuracağını belirleyecek olan soğurma katsayısıdır [2]. Kullanılan yarıiletken malzemenin soğurma katsayısı büyükse, fotonlar malzeme içerisinde çok kısa bir mesafede soğurulacaktır. Eğer soğurma katsayısı düşük olan bir malzeme kullanılırsa, foton soğurumu malzemenin daha derin bölgelerinde meydana gelecektir. Örneğin, Şekil 3.13’de verilen hücre tasarımında en üst

hücrede kullanılan GaInP yarıiletkeninin yasak enerji aralığı yüksek olduğundan soğurma katsayısı da yüksektir. GaInP katmanı yüzeye yakın bir bölgede soğurma gerçekleştirdiğinden, bu katman ince yapılarak soğurulmadan geçen düşük enerjili fotonların alt hücreye daha kolay iletilmesi sağlanır. Alt hücrede kullanılan düşük bant aralıklı Ge ise düşük soğurma katsayısına sahiptir. Bu durum foton soğurumunun daha derinlerde olacağı anlamına gelmektedir. Hücrede üretilen elektron-boşluk çiftinin rekombinasyona uğramadan iletme katılması için Ge alt hücrenin katmanları daha kalın olacak şekilde tasarlanmaktadır.

3.5. GaInP/GaAs/Ge Üç Eklemlı Güneş Hücreleri

Üç eklemlı güneş hücreleri, üst hücre, orta hücre ve alt hücre olmak üzere üç eklemden meydana gelmektedir. Bu üç eklem arasındaki elektriksel iletim, p-n eklemlerin birbirine yüksek katkılı p+/n+ tünel diyotlar ile bağlanmasıyla sağlanır. Üç eklemlı güneş hücrelerinde GaInP/GaAs/Ge yapısı, en yaygın kullanılan hücre tasarımıdır ve hem karasal hem de uzay uygulamaları için ticarileşmiş bir hücre türüdür. Tipik bir GaInP/GaAs/Ge üç eklemlı güneş hücresine ait yapı tasarımı Şekil 3.13’de verildi. GaInP/GaAs/Ge üç eklemlı güneş hücresinde üst hücre olan GaInP güneş spektrumunun görünür bölgesindeki (300-700 nm) fotonları soğururken, GaAs orta hücre (700-900 nm), alt hücre olan Ge ise yakın kızılötesi bölgeyi (900-1800 nm) soğurarak fotoakıma dönüştürmektedir [40]. Bu hücre tasarımı, güneş spektrumundan en verimli şekilde yararlanabilmektedir. GaInP/GaAs/Ge hücre tasarımı, yasak enerji aralığı uyumuyla birlikte bu üç katman yaklaşık olarak aynı örgü sabitine sahip olduğundan aynı zamanda örgü uyumludur.

GaInP/GaAs/Ge üç eklemlı güneş hücreleri üzerine yapılan çalışmalar, 1994 yılında Bertness ve arkadaşlarının tasarımıyla başlamıştır. Bu çalışmada elde edilen % 29’luk verim değeri, tüm dikkatleri bu hücre türü üzerine çekmiştir [136]. Hızla gelişen fotovoltaik teknolojisi ile birlikte GaInP/GaAs/Ge güneş hücreleri verimlerini ve ticari uygulamalardaki kullanımlarını hızla arttırmıştır. Yüksek kristal kalitesine, hassas kalınlık, katkı konsantrasyonu ve alaşım oranı kontrolüne imkan veren, üstün teknolojiye sahip kristal büyütme yöntemleri olan, moleküler demet epitaksi (MBE) ve metal organik kimyasal buhar birikimi (MOCVD) sistemleriyle üretilen GaInP/GaAs/Ge güneş hücreleri, verim rekortmeni olarak tabir edilen hücreler arasında yer almaktadır. Günümüzde konsantre fotovoltaik uygulamalarda ve uzay teknolojisinde kullanılan bu hücre tasarımı için AM0

spektrumunda % 31, AM1.5G spektrumunda % 38 ve konsantre fotovoltaik uygulamalarda % 46'ya ulaşan verim değerleri literatürde rapor edilmiştir [40]. III-V grubu güneş hücreleri sınıfının en popüler üyesi olan GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili hücreler üzerine yapılan çalışmalar günümüzde halen pek çok araştırma grubu tarafından sürdürülmektedir.



4. UZAY KALİFİYE GÜNEŞ HÜCRELERİ

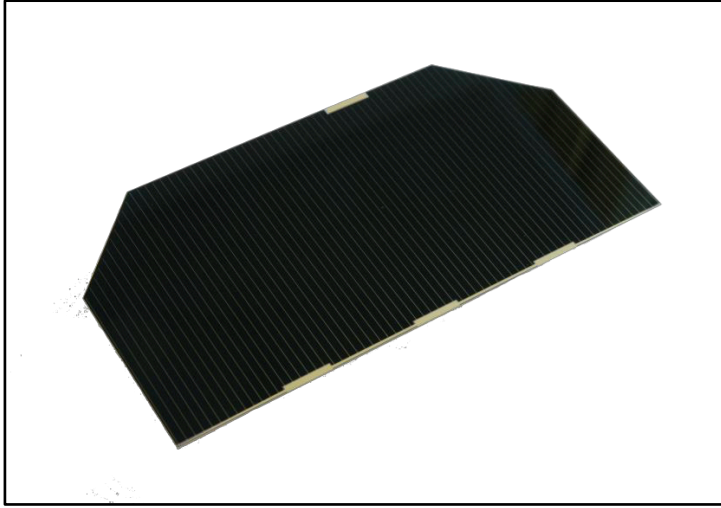
Fotovoltaik güneş hücreleri, Vanguard-1 uydusunda ilk kez kullanımlarından beri dünya yörüngesinde bulunan uydular ve gezegenler arası uzay araçları için günümüzde en yaygın kullanılan birincil enerji kaynağıdır. Yüksek güvenilirlikleri, üretim teknolojilerinde kazanılan tecrübeler, gerekli güç seviyelerine göre ölçeklenebilir olmaları ve nükleer reaktörler gibi diğer alternatiflerine göre uygun maliyetleri nedeniyle bugüne kadar üretilen tüm uydular güneş enerjisinden faydalanmış ve güç sistemleri için fotovoltaik teknolojiler vazgeçilmez olmuştur. Uzay uygulamalarında kullanılan günümüze kadar ki tüm uzay araçları, tek kristal silikon, tek eklemlili, çift eklemlili ve şu anda en yaygın kullanılan tür olan üç eklemlili GaAs tabanlı fotovoltaik güneş hücresi teknolojisini kullanmıştır [21,88,137].

III-V grubu güneş hücrelerinin yüksek enerji dönüşüm verimlilikleri ve yüksek radyasyon dirençleri, bu hücre sınıfının birçok uydu ve uzay aracında yaygın kullanılan Si tabanlı hücre teknolojisinin yerini almasını sağlamış ve bu hücre sınıfı üzerine yapılan ar-ge çalışmalarını arttırmıştır. Gelişen teknoloji ile birlikte III-V grubu çok eklemlili güneş hücreleri, yeni uydu geliştirme görevlerinde güç sistemlerinin vazgeçilmez parçası haline gelmiştir. III-V grubu hücrelerin en yaygın kullanılan türü olan GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücreleri, Si tabanlı hücrelerle benzer şekilde modüllere entegre edilebilme, yüksek voltaj ve akım üretebilme gibi avantajlarının yanı sıra uzayın radyasyon ortamına dayanabilecek mükemmel radyasyon direncine sahiptir. Ayrıca bu hücreler Si tabanlı hücrelerden daha düşük bir sıcaklık katsayısına sahiptir. Bu durum, uzay uygulamalarında karşılaşılan yüksek ve düşük sıcaklıktaki çalışma koşullarında daha iyi performans sergileyebilmeleri anlamına gelmektedir [21]. Resim 4.1’de ticari uzay kalifiye güneş hücresi üreticilerinden biri olan AZUR Space firması tarafından üretilen GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili uzay kalifiye güneş hücresine ait bir görsel verildi.

Güneş hücresi tasarımları, Vanguard-1 uydusundan bu yana sürekli gelişmiş ve gelişimini halen sürdürmektedir. İlk uydular, Si tabanlı güneş hücreleri kullanarak sadece birkaç yüz watt güç çıktısı üretmekteydi. Bugün ise uydular, gelişen iletişim teknolojisiyle birlikte artan güç ihtiyaçlarını birkaç kilowatt güç üretebilen düşük kütleli ve düşük boyuttaki güneş hücreleri kullanılarak oluşturulan panellerden sağlamaktadır [21]. Artan fırlatma maliyetleri ve uydularda kullanılan faydalı yüklerin artan güç gereksinimi, daha fazla gücün daha az

sayıda güneş hücresi kullanılarak elde edilmesi gereksinimini ortaya çıkartmıştır. Aynı zamanda artan maliyetler, fırlatılan uydudan beklenen çalışma ömrünü 15-20 yıl aralığına ulaştırmıştır. Verimliliğini uydunun çalışma ömrü boyunca koruyacak ve bu süre boyunca uzayın zorlu ortamından en az şekilde etkilenecek hücreler uzay kalifiye niteliği yüksek hücreler olarak tanımlanmaktadır. Uzay uygulamalarında kullanılacak güneş hücrelerinin aşağıda sıralanan özelliklere sahip olması gerekmektedir [21].

- Yüksek özgül güç (W/kg)
- Yüksek W/m² oranı
- Düşük üretim maliyeti (\$/W)
- Yüksek güvenilirlik



Resim 4.1. GaInP/GaAs/Ge üç eklemlı uzay kalifiye güneş hücresi [138]

Uzay uygulamalarında kullanılan güneş hücreleri, karasal uygulamalarda kullanılanlardan tamamen farklı bir ortamda çalışmaktadır. Uzay ortamı, geniş bir enerji aralığında değişen birçok farklı türdeki yüklü parçacıktan oluşan zorlu bir radyasyon ortamı ile karakterize edilir. Yüklü parçacık maruziyeti, yarıiletken elektronik aygıtların özellikle daha az korunan güneş hücresi panellerinin elektriksel performansını düşürür ve güneş hücrelerinin ömrü sınırlanır. Bu nedenle uzayda kullanılmak üzere tasarlanan güneş hücrelerinin radyasyon tepkisinin anlaşılması, görev ömrünün öngörülebilmesi için son derece önemlidir. Uzay ortamında güneş hücrelerini zorlayan bir diğer etken, uzaydaki parçacık ortamıdır. Uzay çöpleri ve mikro meteorların oluşturduğu yüksek hızla ilerleyen parçacıklar hücre üzerine bombardıman ederek fiziksel kusurlara sebep olabilir.

Uydu güneş panellerinde hücreler üzerine yerleştirilen koruyucu camlar, hem radyasyon hem de parçacık ortamına dayanımı arttırmaktadır. Güneş hücrelerinin karşılaştığı bir diğer durum yüksek sıcaklık değişimidir. Uzaydaki aydınlık ve karanlık döngüler sırasında oluşan yüksek sıcaklık değişimi (yaklaşık -200 ile +200 °C arası), güneş hücrelerini zorlayan bir diğer durumdur [137]. Yeni güneş hücre türlerinin hızla gelişmesiyle birlikte, uydu tasarımcıları ve uzay güneş hücresi üreticilerinin güneş hücrelerinin uzayda kullanımı için yeni hücre teknolojilerini ve mevcut teknolojilerin yeni nesillerini sürekli olarak geliştirmesi gerekmektedir.

Uzay kalifiye güneş hücrelerinin uzay ortamına olan dayanımları, yeryüzünde belirli standartlara göre yapılan testler ile belirlenmektedir. Sadece bu testlerden başarıyla geçebilen hücreler uzay kalifiye niteliği kazanmakta ve uzay uygulamalarında kullanılabilir. Bu bölümde, güneş hücrelerinin uzay uygulamalarındaki kullanımı, uzay ortamı etkileri ve güneş hücrelerinin kalifikasyon test standartları hakkında detaylı bilgiler sunuldu.

4.1. Uzay Uygulamalarında Güneş Hücreleri

Tek kristal Si güneş hücresi teknolojisinin fotovoltaiik aygıtlar üzerindeki ilgiyi arttırması ve yeryüzü uygulamalarındaki performanslarının % 14'e ulaşması, 1950'li yılların sonunda hız kazanan uzay teknolojisinde fotovoltaiik güneş hücrelerinin kullanımının kapısını açmıştır [21,25]. 1958 yılında fırlatılan Vanguard-1 uydusu, güneş hücrelerinin uydu teknolojisinde kullanımının kilometre taşı olmuştur. 48 adet kristal Si güneş hücresi içeren Vanguard-1 uydusu, ürettiği gücü radyo vericilerine iletmekteydi. İki adet radyo vericisinin bir tanesi bataryadan beslenirken diğeri güneş hücrelerinden beslenmekteydi. Bataryadan beslenen verici fırlatmadan 20 gün sonra ömrünü tamamlarken, güneş hücresiyle beslenen verici 1964 yılına kadar çalışmaya devam etmiştir. Elde edilen bu sonuç, güneş hücrelerinin uydu ve uzay teknolojisindeki kullanımını kanıtlamıştır [21]. Güneş hücrelerinin 1958 yılında başlayan uzay macerası, günümüzde hemen hemen tüm iletişim uydusu, askeri uydular, yer-gözlem ve araştırma uyduları için gereken enerjinin sağlanmasında başrol olarak devam etmektedir [21].

Yaklaşık 60 yıl önce kullanılan ilk uyduların güç ihtiyacı birkaç watt ile birkaç yüz watt arasında değişmekteydi [21]. İlk uydu tasarımlarında güneş hücresi dizilerinin montajı

sadece uydu gövdesine yapılabildiğinden hücre yerleşim alanı gövde boyutu ile sınırlıydı. Bu durumun üretilebilecek gücü kısıtlaması nedeniyle uydularda kullanılacak güneş hücrelerinin performansının artırılmasına yönelik çalışmalar ön plana çıkmıştır. % 14'lük verim değerleri zaman içerisinde değişen teknolojilerle 2020 yılında %32'lere ulaşmıştır. Uydu teknolojisindeki gelişime paralel olarak güç gereksinimleri de artmıştır. Artan güç ihtiyacı, bu ihtiyacı karşılayacak güneş hücre panellerinin boyutunun artmasını gerektirmiştir. Uydu boyutunda meydana gelen artış, toplam uydu ağırlığının artmasına ve yaklaşık 10,000 \$/kg olan fırlatma maliyetlerinin yükselmesine neden olmuştur. Artan kütle ve ilişkilendiği maliyet problemini çözmek amacıyla CuS_2/CdS farklı eklemlili ince film güneş hücreleri geliştirilmiştir. Bu hücreler oldukça hafif ve esnek formda üretilebilmekteydi. Ancak bu hücrelerin güvenilirlik, kararlılık, zamanla deforme olma ve parçacık ortamına dayanıksızlık gibi sorunları nedeniyle kullanımları yaygınlaşmamıştır. Ayrıca Cd elementinin çevre kirletici ve zehirli doğası bu hücre türünün tercih edilmemesine neden olmuştur [139]. Kristal Si, GaAs ve InP tabanlı güneş hücrelerinin deneysel verimleri 1980'li yıllardan itibaren teorik değerlere yaklaştırmaya başlamıştır. Aynı zamanda a-Si:H ve CIGS ince film güneş hücreleri üzerine yapılan çalışmalar yüksek performanslı, esnek ve hafif özelliklerde hücre üretebilme potansiyelini ortaya koymuştur. Uzay uygulamaları için üretilen yeni nesil ince film güneş hücreleri, maliyetleri düşüreceği için günümüzün yoğun araştırma konularından biridir. Fakat Si ve GaAs teknolojisinin üstün performansı, çalışma ömrü, kararlılığı ve güvenilirliği, uydu güç sistemlerinde halen yaygın şekilde kullanılmasını sağlamaktadır [21].

1950'li yılların diğer bir uzay aracı olan Explorer-1 uydusunun en önemli keşfi, Van Allen radyasyon kuşakları olmuştur. Bu keşif, uzay ortamındaki yüksek enerjili parçacık ortamı nedeniyle güneş hücrelerinin elektron ve proton radyasyona maruz kalması problemini ortaya çıkartmıştır. 1962 yılında uzaya fırlatılan Telstar-1 uydusu 14 W ömür başlangıç (BOL) gücüne sahipti. Uzaydaki yüksek enerjili elektron ve protonlardan oluşan radyasyon ortamı güneş hücrelerinin güç çıkışını zamanla azaltmış ve ömür sonu (EOL) gücünü yaklaşık 8 W'a düşürmüştür. Elde edilen sonuçlar ve kazanılan tecrübe, uzay uygulamalarında kullanılan güneş hücrelerinin yüksek radyasyon dayanımına sahip olması gerektiğini ortaya koymuştur [21]. Yüksek performansa ve radyasyon toleransına sahip III-V grubu güneş hücreleri üzerine yapılan çalışmalar 1990'lı yıllarda hız kazanmıştır. Çok eklemlili tasarımlara imkan veren III-V grubu hücreler, uzay teknolojisinde kullanılan güneş hücrelerinin bugününü oluşturmaktadır [2,32,40].



Resim 4.2. Uluslararası uzay istasyonunda kullanılan güneş panelleri [88]

1998 yılında kullanıma giren Deep Space-1 uzay aracı, yüksek güç çıktısı gerektiren iyon itki motorlarına enerji sağlayan III-V grubu yoğunlaştırıcı güneş hücrelerini (CPV) kullanan ilk araç olmuştur. Bu hücreler güneş ışığını daha küçük boyuttaki güneş hücresine yönlendirmek için fresnel optikleri kullanmaktadır. Derin uzay görevlerinde kullanılan Deep Space-1 gibi uzay araçları güneşten uzaklaştıkça ışık miktarı azaldığı için güneş hücrelerinin güç çıktıları azalmaktadır. III-V grubu yoğunlaştırıcı hücreler sayesinde mesafeye bağlı performans değişiminin engellenmesi hedeflenmiştir [21,140]. Ayrıca CPV teknolojisi sayesinde çok daha az alandan yüksek güç çıktısı elde edilebilmiştir.

Uzay teknolojisinde kullanılan ve kullanılmaya aday güneş hücreleri içerisinde en önemlisi III-V grubu çok eklemlili güneş hücreleridir [21,141]. Bu hücre türü, uzay sanayisinin genel isterlerinden olan % 25 ve üzeri hücre verimlerini sağlayabilmektedir. III-V grubu çok eklemlili güneş hücreleri yüksek güvenilirliğe, mükemmel radyasyon dayanımına ve düşük sıcaklık katsayılarına sahip olmasının yanında yüksek voltaj ve akım üretebilmektedir. Ayrıca yüksek W/kg oranı, III-V grubu güneş hücrelerinin uzay uygulamalarında kullanılmaya ideal hücreler olduğunu göstermektedir [21,88]. Kullanılan hücre türü uzayın zorlu ortamına ne kadar dayanıklı olursa olsun aygıt performansı ve çalışma ömrü bu ortamdan olumsuz etkilenmektedir. Uzay ortamı etkilerinin bilinmesi, hücre tasarımlarının ve performans artırıcı yöntemlerin belirlenmesi için oldukça önemlidir.

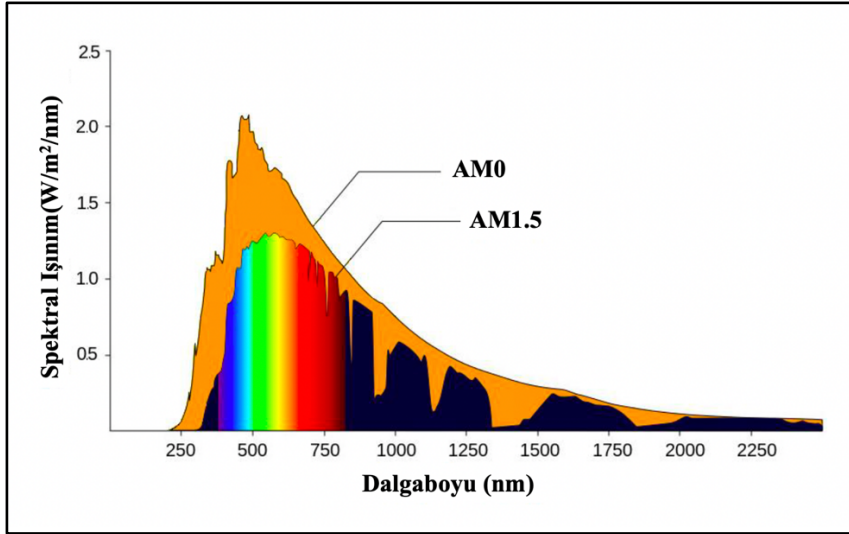
4.2. Uzay Ortamı Etkileri

Uzayda kullanılmak üzere geliştirilen tüm güneş hücreleri, uzay ortamının özellikleri dikkate alınarak tasarlanmalıdır. Uzay uygulamalarında kullanılan güneş hücrelerinin tasarımı ve fiziksel özellikleri, yeryüzü uygulamalarında kullanılanlara göre farklılık göstermektedir [21]. Özellikle uzay teknolojisinde kullanılan tüm sistem ve komponentlerin hafif ve hacminin az olması beklenmektedir. Böylece fırlatma maliyetinin daha az ve yörüngedeki kontrolünün daha kolay olması sağlanır. Yüksek ve sürekli güç çıkışı, bir diğer uzay teknolojisi gereksinimidir [29]. Performans kaybı ve çıkış gücünün istikrarsızlığı, planlanan uzay görevinin başarısız olmasına neden olur. Performans kaybının en büyük sebebi, güneş hücresinin uzay ortamı içerisinde maruz kaldığı şartlar nedeniyle oluşan fiziksel bozulmalardır. Güneş hücrelerinde uzay görevleri sırasında oluşan bozulmalar genel olarak AM0 ışınımı, vakum ortamı, radyasyon ortamı, yüksek hızlı parçacık ortamı ve termal ortam gibi uzay ortamı etkenlerinden kaynaklanmaktadır [142].

4.2.1. AM0 ışınımı

Uzayda mevcut olan güneş ışınımı atmosfer tarafından filtrelenmediği için yeryüzündeki güneş ışınımından farklıdır. Güneş ile dünya arasındaki mesafe 1 astronomik birim (AU) olarak adlandırılır. Güneşten 1 AU mesafedeki birim alana dik olarak düşen ışınım enerjisi, güneş sabiti olarak tanımlanır ve 1367 W/m^2 olarak kabul edilir. Bu aynı zamanda AM0 spektrumunun ışınım enerjisine karşılık gelmektedir. Uzay güneş hücreleri, AM0 spektrumunda çalışacak şekilde tasarlanır ve test edilir [21].

AM0 spektrumu, yeryüzü uygulamalarında kullanılan güneş hücrelerini test etmek için standart olarak kabul edilen AM1.5 güneş spektrumunun yaklaşık olarak bir buçuk katıdır. Bu durum, uzay güneş hücrelerinin farklı bir güneş spektrumu ile karşılaşması anlamına gelmektedir. Şekil 4.1’de görüldüğü gibi AM0 ışınımında ışık yoğunluğu daha yüksektir ve bu durum oluşan fotoakımı, dolayısıyla I_{sc} ’yi arttırmaktadır. Fakat yüksek ışınım enerjisi, güneş hücresinin çalışma sıcaklığını artırarak V_{oc} değerinin düşmesine neden olmaktadır. Hücre veriminde V_{oc} ’nin baskın etkisi, yüksek ışınım altında verimde azalma yaratmaktadır [21]. Güneş hücresinin yüksek foton soğurumu yaptığı dalgaboyu bölgelerinde yüksek optik geçirgenliğe, düşük soğurumlu bölgede ise yüksek optik yansıtıcılığa sahip ince film kaplamalar kullanılarak oluşan performans kayıpları azaltılabilmektedir.



Şekil 4.1. AM0 ve AM1.5 spektrumlarının kıyaslaması [25]

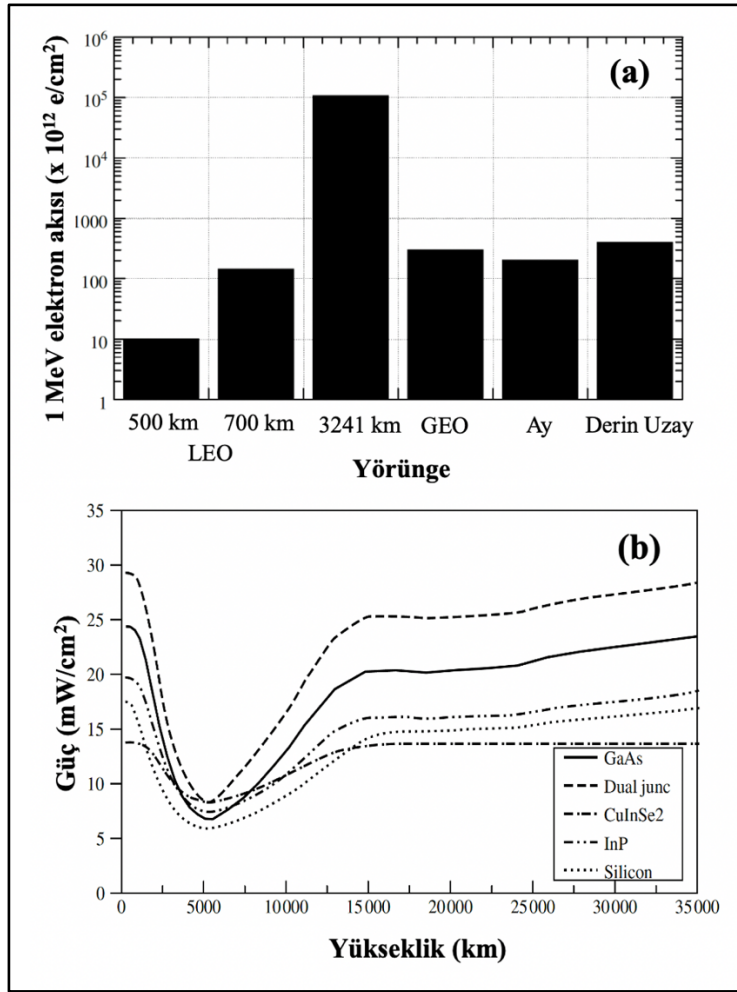
4.2.2. Vakum ortamı

Uzay araçları deniz seviyesinden yükseldikçe üzerine etkiyen basınç azalmaktadır. Yörüngeye ulaşan uydunun basınç seviyesinin önemli miktarda azalması ile vakum ortamı oluşmaktadır. Alçak dünya yörüngesinde (LEO) görev yapan bir uydu, yaklaşık 10^{-7} Torr vakum ortamına maruz kalmaktadır [143]. Özellikle insanlı görevlerde kullanılan uzay araçlarında iç ve dış basınç farkı, kullanılan malzemelerde büyük bir baskı yaratmaktadır. Uzay ortamında karşılaşılan yüksek vakum ortamı, malzemelerden gaz çıkışına (outgassing) neden olur. Farklı kimyasal malzemelerin bileşiminden oluşan güneş hücreleri için bu gaz çıkışı önemli bir problemdir [144]. Uzay ortamındaki sıcaklık ve vakum ortamının etkisiyle As ve P gibi elementler kolayca uzay ortamına karışabilmektedir. Ayrıca oluşan gaz çıkışı elementel kompozisyonda da değişime neden olarak hücre performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar gaz çıkışı nedeniyle uzay ortamına yayılan kimyasalların ince tabaka halinde güneş hücreleri ve diğer kritik optik parçaların hassas yüzeylerinde biriktiğini göstermiştir [145]. Vakum ortamı nedeniyle oluşabilecek etkilerin değerlendirilebilmesi için uzay uygulamalarında kullanılacak malzemeler Amerikan Test ve Malzeme Kurumu (ASTM) tarafından belirlenen ASTM-E595 veya Avrupa Uzay Standardizasyonu İşbirliği (ECSS) tarafından belirlenen ECSS-Q-ST-70-02C standartları ile test edilmektedir. Si ve GaAs tabanlı güneş hücreleri bu standartlara uygun sonuçlar vermesi, ticari uygulamalarda tercih edilmelerinin sebeplerinden bir tanesidir [144].

4.2.3. Radyasyon ortamı

Radyasyon ortamı, uzay araçlarının görev süreleri boyunca karşılaştığı en zorlu ve performans üzerinde ciddi sonuçları olan çevresel etkidir. Uzay radyasyonu ortamı, yüksek enerjili elektron, proton ve diğer ağır iyonlardan oluşur. Bu parçacıklar uzay sistemlerinde hem iyonlaşma hem de kristal kusuru etkisine neden olabilir. Sistemin parçacıklara maruz kalması, uzaydaki konuma, güneş döngüsüne ve sistemin hassas kısımlarına sağlanan koruma miktarına bağlı olarak değişir. Şekil 4.2’de farklı yörüngelerde uydunun maruz kaldığı elektron akıları ve radyasyon etkisi nedeniyle oluşan performans değişimi görülmektedir. Güneş hücrelerine en fazla zarar veren radyasyon türü, yüksek enerjili elektronlar ve protonlardır [137,146].

Uzaydaki radyasyon ortamının kaynağı, galaktik ve güneş kaynaklı kozmik ışınlar ile Van Allen kuşaklarıdır [25]. Süpernova patlamaları tüm galaksiye enerjisi 25 MeV ile 20 GeV arasında değişen parçacıkları her yönde ve eşit yoğunlukta yaymaktadır. Galaktik ışıma olarak adlandırılan bu radyasyon kaynağının yaklaşık % 88’i hidrojen ve % 10’u helyum atomlarından % 2’lik kısmı ise ağır iyonlardan oluşmaktadır [147]. Güneş kozmik ışınları ise güneş rüzgarları nedeniyle sürekli olarak yayılan düşük enerjili parçacıklardır. Yüksek enerjili plazmadan oluşan güneş rüzgarları, 1,5 ile 10 keV arasında enerjiye sahip proton, elektron ve alfa parçacıklarından meydana gelmektedir [148]. Dünya, çekirdeğinde bulunan erimiş demirin hareketi nedeniyle güçlü bir manyetik alana sahiptir. Bu manyetik alan, kozmik ışın etkilerinden ve yüklü parçacıkların bombardımanından dünyayı koruyan bir kalkan görevindedir. Dünyanın manyetik alanının etkisiyle sapan radyasyon, dünya çevresinde radyasyon bantları meydana getirmektedir. Oluşan bu radyasyon bantları, Van Allen kuşakları olarak adlandırılır. Van Allen kuşakları, güneş kozmik ışınlarını, düşük enerjili galaktik kozmik ışınlarını ve iyonize parçacıkları toplar ve hapseder [25]. Bu radyasyon kaynakları içerdikleri proton, elektron ve iyonlar nedeniyle radyasyon ortamının temel bileşenleri olan elektromanyetik ve parçacık radyasyonunu oluşturmaktadır [21].



Şekil 4.2. a) Farklı yörüngelerdeki elektron akıları b) güç çıktısı değişimleri [21]

Elektromanyetik radyasyon, farklı dalgalı boylarında ve enerjideki elektromanyetik dalgalarından meydana gelmektedir. Elektromanyetik spektrumda iyonize radyasyona sebep olan enerjisi eV mertebesindeki morötesi (UV), keV mertebesindeki X-ışınları ve MeV seviyesindeki gama ışınları bulunmaktadır [25]. Farklı enerjideki ışınların uydu komponentlerin üzerindeki etkisi de farklıdır. UV ve X-ışınlarının malzemede soğurulması sonucunda fotoelektrik olay meydana gelmektedir. Uydu materyalindeki fotoelektrik olay sonucu dış yüzeyde bir elektriksel yüklenme oluşmaktadır. Özellikle bu elektriksel yüklenmenin iç kısımdaki elektronik bölümlere ulaşması uydu alt sistemlerinde ciddi problemler ortaya çıkartabilmektedir. Gama ışınları ise doğrudan elektronik alt sistemlerde bozulmaya neden olmaktadır. Yüksek enerjili elektron ve proton parçacıkları ise uzay ortamındaki parçacık radyasyonunu oluşturmaktadır. Elektron radyasyonu, güneş hücrelerinde özellikle elektrostatik yüklenmeye, kristal kusurlara ve elektronik kusur seviyelerine neden olur. Ağır proton bombardımanı ise yasak enerji seviyesinde tuzak

seviyeleri yaratarak taşıyıcı kayıplarına sebep olmaktadır. Yüksek enerjili parçacık bombardımanı aynı zamanda, güneş hücreleri üzerindeki malzemede renk merkezleri ya da f merkezleri oluşturarak kararmalar meydana getirmektedir. f merkezleri, çok eklemli güneş hücrelerinde üst hücrenin soğurma gerçekleştirdiği dalgalıboylarına kadar uzanan düşük dalgalıboylu fotonları soğuran optik kusur merkezleri olarak tanımlanabilir [149]. Güneş hücrelerinde foton kaybı fotoakımı doğrudan etkilediğinden hücre performansı parçacık radyasyonu nedeniyle olumsuz etkilenmektedir.

Güneş hücrelerini radyasyon ortamından koruyan kaplamalar oldukça önemlidir. Bu kaplamalar hem yansıma kayıplarını hem de radyasyon etkilerini azaltmaya yönelik olarak tasarlanmaktadır. İnce film şeklinde güneş hücresi yüzeyine yapılan kaplamalarda genellikle TiO_2 , Al_2O_3 , Ta_2O_5 , SiO_2 ve CeO_2 gibi oksit bazlı malzemeler tercih edilmektedir [40,149]. Oksit bazlı ince filmlerde bulunan oksijen boşlukları, özellikle elektron ve proton radyasyonunun hapsedilmesinde oldukça etkilidir. Güneş hücrelerini radyasyon ortamından koruyan bir diğer yöntem hücre panellerinde kullanılan ince koruyucu cam katmandır. Ce katkılı borosilikat cam formunda üretilen koruyucu katman, radyasyon soğurulmasını arttırmanın yanı sıra hücreleri parçacık ortamından da korumaktadır.

4.2.4. Parçacık ortamı

Uzaydaki parçacık ortamı, hem uydu parçaları ve diğer insan kaynaklı uzay çöplerinden hem de göktaş ve kuyruklu yıldızlardan kalan mikro meteorlardan oluşmaktadır. Uzay araçları ve uydu platformları için zararlı etkileri bulunan parçacıklar 10^{-3} ile 10^{-6} gram arasında kütleyle sahip olanlardır. Uzay ortamında 10^{-3} gramdan daha yüksek kütleli olan parçacıklar oldukça azdır. Kütleli 10^{-6} gramdan daha az olan parçacıklar ise düşük enerjilerinden dolayı hasara neden olmazlar. Mikro meteorlar ve küçük göktaşları ortalama olarak 20 km/s hıza sahiptir. Yörüngedeki uzay çöpleri ile uydunun yörünge hızı birbirine yakın olduğundan uzay çöplerinin hasarı daha azdır. Uzayda bulunan parçacık ortamı, uydulara güç sağlayan ve geniş yüzey alanına sahip panellerde bulunan güneş hücrelerine fiziksel zarar vermektedir. Güneş hücrelerinin aşınması, çatlaması, delinmesi ve parçalanması güç kayıplarına neden olmaktadır [21]. Güneş hücrelerini parçacık ortamının zararlı etkilerinden korumak amacıyla panellerin üst yüzeyinde kullanılan koruyucu cam önemli bir role sahiptir [149].

4.2.5. Termal ortam

Uzay ortamında görev yapan bir güneş hücresinin çalışma sıcaklığı, güneş ışımasının yoğunluğuna ve ısıma altında geçen süreye bağlı olarak değişmektedir. Alçak dünya yörüngesinde (160-2000 km) görev yapan Uluslararası Uzay İstasyonunda (ISS) kullanılan güneş hücrelerinin çalışma sıcaklıkları, güneş gördüğü aydınlık döngüde 55 °C'ye kadar çıkmaktadır. Dünyanın gölgesinde kaldığı karanlık döngüde ise sıcaklık -80 °C seviyelerine kadar düşmektedir. Uydunun bulunduğu yörüngeye göre sıcak ve soğuk döngülerin periyodu değişmektedir. Dünya etrafında bir günde 16 kez dönen ISS, bu sıcaklık değişim döngüsüne bir yılda yaklaşık olarak 5800 kez maruz kalmaktadır. Güneşe daha yakın yörüngelerde ortalama sıcaklık daha yüksek, daha uzak yörüngelerde ise daha düşüktür [25]. Örneğin, Merkür'ün yörüngesinde aydınlık döngüde sıcaklık 140 °C'ye ulaşırken, Jüpiter'in yörüngesinde ise ortalama aydınlık döngü sıcaklığı -125 °C'dir. Sıcaklığın güneş hücresi performansına olan olumsuz etkisi nedeniyle güneş hücrelerinde kullanılacak malzemelerin sıcaklık etkilerine dayanıklı ve düşük sıcaklık katsayılı malzemeler olması gerekmektedir. Uzay uygulamalarında kullanılan güneş hücrelerinin pek çoğu, -100 ile +100 °C arasında doğrusal güç çıkışı sağlamaktadır [21,88].

4.3. Güneş Hücrelerinin Uzay Kalifiye Niteliği

Uzayda görev yapma yeterliliğine sahip hücreler “uzay kalifiye güneş hücresi” olarak adlandırılmaktadır. Uzay kalifiye güneş hücrelerinin uzay şartlarına uygunluğu ve kalifiye niteliği, üretilen hücrelerin uzay ortamındaki zorlu şartların laboratuvar ortamında taklit edildiği çeşitli testler ile belirlenmektedir. Kalifikasyon testleri olarak adlandırılan bu testler, uluslararası kabul gören standartlara sahiptir. Birçok ticari uzay kalifiye güneş hücresi üreticisi, ürünlerini bu standartlara göre test etmektedir. Standartlarda belirtilen deney koşullarında yapılan ve sonuçları yine aynı standartta belirtilen kriterlere uyan güneş hücreleri panel montajının ardından panel düzeyindeki kalifikasyon testlerine tabii tutulur. Bu testlerden de geçen güneş hücrelerinin uçuş modeli testleri için uyduya montajları yapılır.

4.3.1. Uzay kalifiye güneş hücresi standartları

Güneş hücrelerinin kullanıldığı bir uydu fırlatıldıktan sonra güneş hücresinde bir arıza meydana gelmesi, güç dalgalanması yaratacağından aracın kritik parçalarında problem

oluşturabilmektedir. Benzer şekilde güneş hücrelerinin uzay ortamındaki koşullardan etkilenmesi, uydunun görev süresinden daha erken devre dışı kalmasına neden olabilir. Bu nedenle güneş hücrelerinin uzay ortamındaki davranışları hakkında bilgi edinmek ve sağlıklı ömür planlaması yapabilmek için fırlatmadan önce uzay ortamındaki koşulların yeryüzünde laboratuvar ortamında oluşturulduğu testlerin yapılması gerekmektedir. Güneş hücrelerinin kalifikasyon testlerinde tüm uzay ortamı etkileri aynı anda oluşturulamadığı için hücreler tüm testlerden ayrı ayrı geçmiş olsa bile fırlatma ve diğer etkilerden kaynaklanan hata payları ön görülmüştür [140]. Günümüzde hem ar-ge amaçlı üretilen hem de ticari güneş hücresi üreticileri tarafından piyasaya sürülen uzay kalifiye güneş hücreleri, Amerikan Uzay ve Havacılık Dairesi (NASA) veya Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından kabul edilen kalifikasyon test standartlarına göre test edilmektedir. Bu iki kurum tarafından belirlenen standartlar birbirine benzemekle birlikte test koşulları ve kullandıkları terminoloji açısından küçük farklılıklar bulunmaktadır.

AIAA S-111A-2014 standardı

NASA tarafından kabul edilen ve Amerikan Havacılık ve Uzay Bilimleri Enstitüsü (AIAA) tarafından hazırlanan Uzay Güneş Hücreleri için Kalifikasyon ve Kalite Gereklilikleri (AIAA S-111A-2014) standardı, uzay kalifiye güneş hücrelerinin kalifikasyon test standartlarını belirlemektedir [150]. AIAA standardı, genellikle güneş hücresi üretimi yapan Amerikan menşeli firmalar tarafından kullanılmaktadır. Bu standartlara göre uzay uygulamalarında kullanıma aday güneş hücreleri; elektron ve proton radyasyon testi, nem testi, hızlandırılmış ömür testi, kırılma yükü testi, termal döngü testi, kuantum verimliliği testi, sıcaklığa bağlı I-V testleri, kapasitans testi ve ATOX testi gibi test adımlarından geçmeli ve belirtilen kriterlere göre başarılı olmalıdır. Tüm testlerden başarı ile geçen güneş hücreleri, NASA görevlerinde kullanılan uydu ve uzay araçlarında uzay kalifiye güneş hücresi olarak kullanılabilir. AIAA S-111A-2014 standardına göre gerçekleştirilen testler ve beklenen sonuçları Çizelge 4.1’de verildi.

Çizelge 4.1. AIAA S-111A-2014 standardında belirtilen bazı testler ve beklenen sonuçlar

<i>Kalifikasyon Testi</i>	<i>Test İşlemi</i>	<i>Beklenen Sonuç</i>
<i>Görsel İnceleme Testi</i>	Hücredeki fiziksel kusurlar incelenir, ARC ve kontaklar gözlenir.	Kırık, çatlak olmamalıdır. Kusurlar tüm alanın % 3'ünden az olmalıdır.
<i>Nem Testi</i>	45 °C, % 95 nem ortamında 60 gün maruz bırakılır.	Test sonrası P_{max} değişimi % 3'ü geçmemelidir.
<i>Elektron Radyasyon Testi</i>	Farklı enerji ve akılarda elektronlarla yapılabilir. Örneğin; 1 MeV, 1×10^{16} e/cm ²	Test sonrası P_{max} en fazla % 5 azalmalıdır.
<i>Proton Radyasyon Testi</i>	Farklı enerji ve akılarda protonlarla yapılabilir. Örneğin; 3 MeV, 1×10^{13} p/cm ²	Test sonrası P_{max} en fazla % 5 azalmalıdır.
<i>Kırılma Testi</i>	Hücre üzerine 0,1 N aralıkla yük uygulanır.	Hücresinin kırıldığı en yüksek ve en düşük yük belirlenir.
<i>Sıcaklık Testi</i>	20 °C aralıkla -150 ile +150 °C aralığında sıcaklık uygulanır.	Her sıcaklık için $I-V$ eğrisi ve verim incelenir.
<i>Ömür Testi</i>	50 °C, 80 °C ve 110 °C'lerde ortalama ilk bozulma süresi ve zaman içinde bozulma belirlenir.	Ortalama ilk bozulma süresi ve zaman içerisindeki bozulmalar tespit edilir.
<i>Termal Döngü Testi</i>	-95 ile +140 °C aralığında termal döngüye maruz bırakılır.	Elektriksel parametrelerde en fazla % 10'luk değişim kabul edilir.

ECSS-E-ST-20-08C standardı

Avrupa Uzay Ajansı tarafından kabul edilen ve Avrupa Uzay Standardizasyonu İşbirliği (ECSS) tarafından hazırlanan ECSS-E-ST-20-08C standardı, güneş hücrelerinin uzay kalifiye niteliklerinin değerlendirilmesinde kullanılan testleri ve gerekli test koşullarını içermektedir [151]. AIAA standardına benzer testlerden oluşan ECSS standardı, ESA tarafından gerçekleştirilen uzay görevlerinde ve Avrupa ülkelerinde üretim yapan ticari şirketler tarafından kullanılmaktadır. ECSS standardı, bu standartta belirtilen test koşulları altında genel olarak şu kalifikasyon testlerini içermektedir: Fiziksel inceleme testleri, elektriksel performans testi, tutunma testi, ters beslem testi, elektron radyasyon testi, proton radyasyon testi, vakum-termal döngü testi, nem ve sıcaklık testi, spektral tepki testi.

Bu tez çalışması kapsamında üretilen üç eklemlili güneş hücrelerinin uzay kalifiye niteliklerinin değerlendirilmesi için ECSS-E-ST-20-08C standardında belirtilen testler kullanıldı. Hücreler bu standartta belirtilen test koşulları yaratılarak test edildi ve elde edilen sonuçlar standartta belirtilen isterlere göre değerlendirildi. Bölüm 4.3.2'de tez çalışması

kapsamında ECSS standardına göre yapılan kalifikasyon testlerinden ayrıntılı olarak bahsedilmektedir.

4.3.2. Kalifikasyon Testleri

Güneş hücrelerinin kalifikasyon testleri, üretilen hücrelerin uzay ortamında karşılaştıkları şartlara dayanımlarının test edilmesi için oldukça önemlidir. Uzay kalifiye güneş hücrelerinin yapılan testler ile belirlenen uzay kalifiye nitelikleri, kullanılacakları uzay uygulaması için yapılacak güç planlaması için büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle, kritik kalifikasyon testleri, belirli standartlar kullanılarak yapılmalıdır. Bu tez çalışması kapsamında yapılan kalifikasyon testleri, ECSS-E-ST-20-08C standardına göre gerçekleştirilmiştir. Üretilen güneş hücrelerinin uzay kalifikasyonlarında aşağıdaki testler uygulandı.

Fiziksel inceleme testleri

Fiziksel inceleme testleri, görsel inceleme, boyut ve ağırlık ile kontak homojenliği testlerini içermektedir. ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.1 maddesinde belirtilen görsel inceleme testi, hücre yüzeyindeki gözlemlenebilir kusurlara ilişkin gereksinimleri ve kalifikasyon için gerekli sınırları belirtmektedir. Standartta göre hücre yüzeyindeki metal kontak ızgaralarındaki kalkma/kopma sayısı 3 ile sınırlıdır. Yine aynı standart, hücre yüzeyinde oluşan görsel kusur ve lekelenmelerin toplam alanın % 2'sinden az olması gerektiğini belirtmektedir. Ayrıca nokta kusurların maksimum yarıçapı için 0,25 mm sınırı bulunmaktadır.

ECSS standardın 7.5.2 maddesinde açıklanan boyut ve ağırlık testi, üretilen hücrelerin tasarlanan geometri ile uygunluğunun ve aynı zamanda hücrelerin boyut ve ağırlıklarının birbiriyle uyumlu olduğunun doğrulanması amacıyla yapılmaktadır. Boyut ve ağırlık testinin kalibre edilmiş hassas terazi ve hassas mikrometre yardımıyla yapılması gerekmektedir. Bir diğer önemli parametre olan metal kontak homojenliği testi ise, hücre yüzeyindeki metal kontak kalınlıklarının aynı olduğunu doğrulamak amacıyla yapılmaktadır. Kontak homojenliği, hedef metal kalınlığına tüm hücre boyunca ulaşarak akım kayıplarının en aza indirilmesi için oldukça önemlidir. Kontak homojenliği testinin, yüzey profilometresi gibi hassas yüzey kalınlık analizi yapabilen sistemler yardımıyla yapılması gerekmektedir.

Elektriksel performans testi

Güneş hücrelerinin I_{sc} , V_{oc} , I_{max} , V_{max} , FF ve η gibi elektriksel parametrelerinin belirlenmesi için elektriksel performans testleri gerçekleştirilmektedir. Uzay kalifiye güneş hücrelerinin elektriksel performans testleri, ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.3 maddesine göre yapılmaktadır. Standardın ilgili maddesine göre güneş hücreleri, sabit bir ışınlım sağlayan güneş simülatörü altında test edilmelidir. Uzay ortamındaki performans parametrelerinin belirlenmesinde AM0 ışınlımı referans spektrum olarak kullanılmaktadır. Standardın 7.5.3 maddesine göre elektriksel performans testleri oda sıcaklığında (25 ± 5 °C) yapılmalıdır. Ayrıca ölçüm hassasiyeti için en az 200 farklı voltaj noktasından ölçüm alınarak akım değerleri dijital olarak kaydedilmeli ve grafiğe dönüştürülmelidir. Elde edilen veriler yardımıyla elektriksel çıktı parametreleri hesaplanarak çizelge haline getirilmelidir. Diğer kalifikasyon test işlemlerinin öncesinde ve sonrasında gerçekleştirilen elektriksel performans testleri yardımıyla uygulanan testin hücre performansı üzerindeki etkisi değerlendirilmektedir.

Tutunma (Bant) testi

Tutunma (Bant) testi, metal kontakların ve yansıma önleyici kaplamanın yüzeydeki tutunumunun değerlendirilmesi ve dayanıklılığının doğrulanması amacıyla yapılmaktadır. Tutunma test işlemi, ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.8 maddesine göre yapılmaktadır. Test için ilgili standardın 7.5.8.2.c maddesinde belirtilen özelliklere sahip bir bant kullanılmalıdır. Bu bant hücre yüzeyine yapıştırıldıktan sonra hücre sabitlenerek bant zemine paralel bir açı ile çekilmelidir. Yüzeyden kalkan/kopan metal kontak ızgarası veya yansıma önleyici kaplamada meydana gelen deformasyon, standartta belirtilen kriterlere göre değerlendirilmektedir. ECSS standardına göre bant testi sonrası kalkan/kopan kontak ızgarası sayısı en fazla 3 olmalıdır. Oluşan kusurların yüzeyde kapladığı alan toplam alanın % 5'inden küçük olmalıdır. Ayrıca, oluşan nokta kusurların yarıçapı 0,25 mm'den az olmalıdır. Uzay kalifiye güneş hücreleri için yapılan bant testi, hücreler birbirlerine metal kontakları kullanılarak bağlandığından fiziksel dayanımın belirlenmesi için oldukça önemlidir. Özellikle fırlatma sırasında oluşan titreşim bu metal kontaklar üzerinde yoğun bir gerilim yaratmaktadır. Güneş hücresinin bant testinden geçememesi uzay kalifiye olarak değerlendirilmesini engellemektedir.

Ters beslem testi

Ters beslem testinin amacı, güneş hücresinin ters beslenmesi durumunda hücre performansında meydana gelebilecek değişimin izlenmesidir. Test işlemi, ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.16 maddesine uygun biçimde yapılmalıdır. Test işleminde, oda sıcaklığında bulunan hücre güneş simülatörü altında ters besleme maruz bırakılmaktadır. Test öncesi ve test sonrası elektriksel performans testi gerçekleştirilmeli ve parametreler değerlendirilmelidir. ECSS-E-ST-20-08C standardı, elektriksel parametrelerde % 2 ve altındaki değişimi başarı kriteri olarak belirtmektedir.

Elektron ve proton radyasyon testleri

Elektron ve proton radyasyon testleri, uzay kalifiye güneş hücrelerinin en önemli kalifikasyon testlerinden bir tanesidir. Bu testin amacı, güneş hücrelerinin uzayda faaliyet göstereceği yörüngede maruz kalacağı, uzay ortamında bulunan yüksek enerjili elektron ve proton parçacıklarının neden olduğu, radyasyonun hücre performansı üzerindeki etkisini izlemektir. ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.13 ve 7.5.14 maddesine göre yapılan radyasyon testleri öncesinde, test edilecek hücrelere elektriksel performans testi uygulanmaktadır. Radyasyon maruziyeti sırasında oluşabilecek oksidasyonun önüne geçebilmek amacıyla hücreler vakum ya da asal gaz ortamında tutulmalıdır. Ayrıca test işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilmelidir. Elektron radyasyon testi için 1 MeV elektron enerjisi ve 1×10^{16} e/cm² elektron akısı önerilmektedir. Proton radyasyon testi için ise 1 MeV enerjili elektronların radyasyon dozuna eşdeğer iki farklı enerji ve proton akısı gerekmektedir. ECSS standardı, elektron ve proton radyasyon testi sonrasında yapılan elektriksel performans testi sonuçlarına göre elektriksel parametrelerde % 10 ve altında oluşan düşüşü kabul etmektedir. Ayrıca hücreler bu testten herhangi bir fiziksel kusura (kırık, delik, kararma, kalkan/kopan kontak ızgarası, vb.) uğramadan geçmelidir. Elektron ve proton radyasyon testi sonuçları standartta belirtilen kriterleri sağlayan hücreler, uzayın radyasyon ortamına dayanıklılıklarını kanıtlamaktadır.

Vakum-termal döngü testi

Bu testin amacı, güneş hücrelerinin yörüngede meydana gelen sıcaklık değişimlerine karşılık gelen bir termal stres yaratılarak yörüngedeki sıcaklık değişiminin hücre üzerindeki fiziksel

etkilerinin incelenmesidir. Vakum-termal döngü testi, ECSS-E-ST-20-08C standardına uygun biçimde yapılmaktadır. Standardın 5.5.3.7.3a maddesine göre vakum-termal döngü testi 4 ile 10 kez arasında tekrar edilmeli ve her çevrim sonunda elektriksel parametreler test edilmelidir. Örneğin, vakum ortamında -80 ile +100 °C sıcaklık aralığında 6 termal döngüye maruz bırakılan güneş hücresinin test öncesi ve test sonrası elektriksel performans test sonuçları değerlendirilmelidir. ECSS standardı, elektriksel parametrelerde en fazla % 10'luk bir değişimi kabul etmektedir. Ayrıca termal streslerin fiziksel kusur ve kısa devre durumu oluşturmaması gerektiğini bildirmektedir. Standarda göre başarı kriterlerini sağlayan hücre, uzayın termal ortamına dayanıklılığını kanıtlamaktadır.

Nem ve sıcaklık testi

Bu kalifikasyon testi, nemli bir ortam içerisinde hücre yüzeyindeki metal kontakların ve yansıma önleyici kaplamanın stabilitesini izlemek amacıyla yapılan hızlandırılmış bir raf ömrü testidir. Hücrelerin saklama ömrü boyunca kalabilecekleri yüksek nemli ortamdan ne kadar etkileneceğinin tanımlanması amacıyla yapılmaktadır. Nem ve sıcaklık testi, ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.7.2 (HT2) maddesine uygun biçimde yapılmaktadır. 95 °C sıcaklık ve > % 90 nem ortamında 24 saat bekletilen hücrenin test öncesi ve test sonrası elektriksel parametreleri elektriksel performans testi ile belirlenmelidir. ECSS standardına göre hücrenin nem ve sıcaklık testinden başarı ile geçebilmesi için metal kontaklarda ve yansıma önleyici kaplamada deformasyon oluşmaması gerekmektedir.

Spektral tepki testi

Spektral tepki testi, uzay kalifiye güneş hücrelerinde kullanılan çok eklemlili güneş hücrelerinin akım uyumunun incelenmesi ve hücrenin kuantum verimliliğinin (*EQE*) değerlendirilmesi amacıyla yapılmaktadır. ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.5 maddesine göre oda sıcaklığında yapılan test işleminde, 300-1800 nm dalgaboyu aralığında hücrenin kuantum verimliliği ve alt hücrelerin ürettiği akım yoğunlukları (*J*) belirlenmelidir.



5. ÜÇ EKLEMLİ GÜNEŞ HÜCRESİ ÜRETİMİ

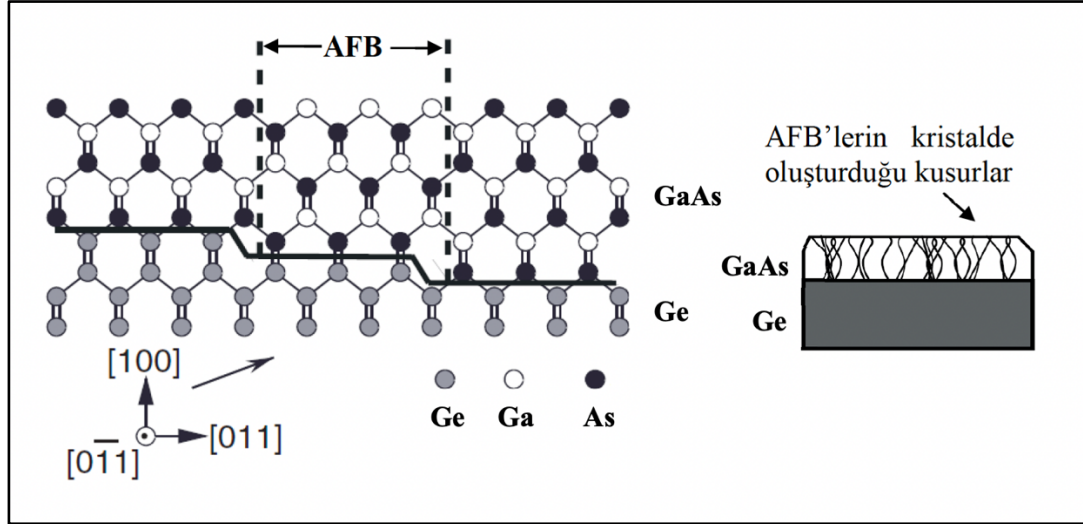
Bu bölümde, güneş hücresi üretiminin en önemli adımlarından olan güneş hücre yapısının tasarlanması ve büyütülmesi hakkında bilgi verildi. İlk olarak GaInP/GaAs/Ge üç eklemlî güneş hücre yapısının tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar anlatıldı ve optimal hücre yapısı modeli tanıtıldı. Ardından, üç eklemlî güneş hücre yapısının büyütme işleminin gerçekleştirildiği moleküler demet epitaksi (MBE) sistemi detaylıca tanıtılarak hücre yapısının büyütme işlem adımları ayrıntılı biçimde anlatıldı.

5.1. Optimal GaInP/GaAs/Ge Hücre Yapısı Modeli

Üç eklemlî GaInP/GaAs/Ge güneş hücre yapısının büyütme işleminden önce ayrıntılı bir tasarım adımının uygulanması, yüksek enerji dönüşüm verimliliği ve kristal kalitesi elde edilebilmesi için oldukça önemlidir. Güneş hücre tasarımında büyütme yöntemleri, katman kalınlıkları, katkı konsantrasyonları, örgü sabiti uyumu ve alaşım oranları hassas biçimde ayarlanmalıdır. Hücrenin kristal kalitesini ve elektriksel performansını arttırmaya yönelik yapılan tasarımlar çok eklemlî güneş hücresi üretiminin önemli bir adımıdır.

Tasarım adımları alttaştan başlanarak yapılmaktadır. GaInP/GaAs/Ge güneş hücre yapısında Ge, hem alttaş hem de alt hücre görevindedir. Ge ile III-V grubu yarıiletkenleri arasındaki örgü uyumu, yasak enerji aralığının uygun değeri ve kızılötesi bölgedeki foton soğurum özellikleri, germanyumun bu hücre yapılarındaki kullanımını yaygınlaştırmıştır. IV. grupta bulunan Ge üzerine III-V grubu yarıiletkenlerin büyütülmesi, önemli ölçüde atomik difüzyona ve istenmeyen katkılı tabaka oluşumuna neden olmaktadır. IIIA ve VA grubu atomlarının Ge içerisine ters difüzyonu, p-tipi veya n-tipi katkılı ara tabaka oluşturmaktadır. Ters difüzyon sonucu oluşan katkılı ara tabaka, cihaz performansını ve epitaksiyel filmin kalitesini önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu sorun, alttaş olarak Ge'un kullanıldığı III-V grubu fotovoltaiik güneş hücresi uygulamaları için önemlidir. GaAs büyütme sıcaklığında As için difüzyon katsayısı Ga'dan daha büyük olduğu için, As atomları Ge içerisine kolayca difüz ederek arayüzeyde n-tipi katman meydana getirmektedir. Ters difüzyonun ve performansı olumsuz etkileyen ters p-n eklem oluşumunun önüne geçmek amacıyla, n-tipi yerine p-tipi Ge alttaş kullanılarak üzerine yapılacak kontrollü As birikimi ile alttaş içerisinde kolayca p-n eklem oluşturulmaktadır. Bu tez çalışmasında, p-Ge alttaş üzerinde

p-n eklem Ge alt hücrenin oluşturulması için yüksek sıcaklıkta As birikimi gerçekleştirilerek kalibre edilmiş kalınlıkta n-tipi katman oluşturuldu.



Şekil 5.1. GaAs/Ge arayüzeyindeki AFB oluşumu [152]

Ge üzerine GaAs büyütülmesi, III-V/IV farklı eklemli yapılara örnektir. Ge ve GaAs birbirine yakın örgü sabitlerine sahip olmasına rağmen aralarındaki örgü simetrisi farkı, kristal yüzeylerin atomik basamaklı yapısı ve epitaksiyel arayüzeyin polar-nonpolar doğası, GaAs-Ge arayüzeyinde anti-faz bölgelerin (AFB) oluşmasına neden olmaktadır (Şekil 5.1) [34,43]. AFB'ler Ga-Ga ve As-As metalik bağlarının oluşturduğu anti-faz sınırlarıyla ayrılmaktadır. Metalik bağlanmalar elektronik olarak yüklü olduğundan yeniden birleşme merkezi gibi davranır. Bu durum, p-n eklem performansını önemli ölçüde düşürür [153,154]. Ayrıca AFB'ler, örgüyü her iki taraftan bükülmeye maruz bırakarak örgüde kaymalara ve dizilme kusurlarına neden olur. Yapısal kusurlar ise Ge üzerine büyütülen GaAs'ın kristal kalitesini bozar. Uygulanacak çeşitli yöntemler ile GaAs-Ge arayüzeyindeki AFB oluşumunun en aza indirilmesi, aygıt performansı için oldukça önemlidir. AFB oluşumunu azaltan yöntemler aşağıda sıralandı [34].

- 1) Genellikle [111] yönelimine 6° açı ile kesilmiş Ge alttaş kullanımı, atomik basamaklı yüzeyin neden olduğu AFB oluşumunu azaltmaktadır.
- 2) İki atomik basamaklı Ge yüzeyi elde ederek metalik bağlanmaları engellemek için Ge alttaşın yaklaşık 20 dakika boyunca 640°C 'de tavlınması sağlanabilir.
- 3) Ge alttaş yüzeyine As atomları gönderilerek düzgün bir çekirdekleşme sağlandıktan sonra $350\text{--}400^\circ\text{C}$ 'de ardışık olarak yüzeye gönderilen Ga ve As atomlarının yüzeydeki

göçü/yerleşimi kontrolüne dayanan epitaksiyel büyütme tekniği (migration enhanced epitaxy, MEE) kullanılabilir.

- 4) Bir bariyer katman gibi davranacak olan yaklaşık 100 nm kalınlığındaki GaAs tabakasının saatte 0,1µm hızla ve 500 °C’de büyütülmesi sağlanabilir.

Bu tez çalışmasında, GaAs-Ge arayüzeyinde meydana gelen kusurların giderilmesi ve yüksek kristal kalitesine ulaşılabilmesi için [111] 6° yönelimli alttaş kullanılması, As ile çekirdekleşme tabakası oluşturma ve ardından MEE tekniğinin kullanımını içeren yöntemler planlandı ve uygulandı.

Üç eklemlili güneş hücrelerinde akım uyumu oldukça önemlidir. Çok eklemlili hücrelerde üretilen akım, en düşük akımı üreten hücre tarafından sınırlanır. Bu nedenle yapılan tasarımda her hücrenin oluşturacağı akımın birbirine yakın olması gerekmektedir. Akım, her bir katmanda soğurulan foton sayısı ile orantılıdır. Soğurulan bölgedeki foton sayısı ve malzemenin soğurma katsayısı, hücre katmanlarının kalınlıklarının belirlenmesinde oldukça önemlidir. Bölüm 3.4.1’de bahsedildiği gibi hücre tasarımında, yarıiletken malzemelerin soğurma katsayıları ve diğer fiziksel parametreleri dikkate alınmıştır [34].

GaInP/GaAs/Ge gibi çok katmanlı yapıların oluşturulmasında örgü uyumu kritik öneme sahiptir. Örgü uyumunun % 0,01 değerlerinde olması tercih edilmelidir [34]. Özellikle $Ga_xIn_{1-x}P$ gibi üçlü alaşım yapılar, alaşım oranı değiştirilerek örgü uyumu ve bant aralığı ayarlamasını mümkün kılmaktadır. GaAs ile çok iyi bir örgü uyumuna sahip olan ve yasak enerji aralığı görünür bölgenin soğurulmasını sağlayacak değerdeki $Ga_{0,51}In_{0,49}P$ alaşım yapısı üst katman tasarımı için kullanılmaktadır.

Hücre tasarımının ana bileşenleri olan aktif hücre katman kalınlıkları, taşıyıcı yoğunlukları, tünel diyot, pencere katman ve BSF kalınlıklarının belirlenmesinde Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi (Gazi-FOTONİK) bünyesinde yapılan önceki çalışmalar referans alındı [5,34,40]. Bu çalışmalarda yapılan kalibrasyonlar ve tasarımlardan yararlanıldı. Tez çalışmasında büyütülen GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücre yapısı için Çizelge 5.1’de verilen yapı tasarımı kullanıldı.

Çizelge 5.1. GaInP/GaAs/Ge üç eklemlı güneş hücresi yapı tasarımı

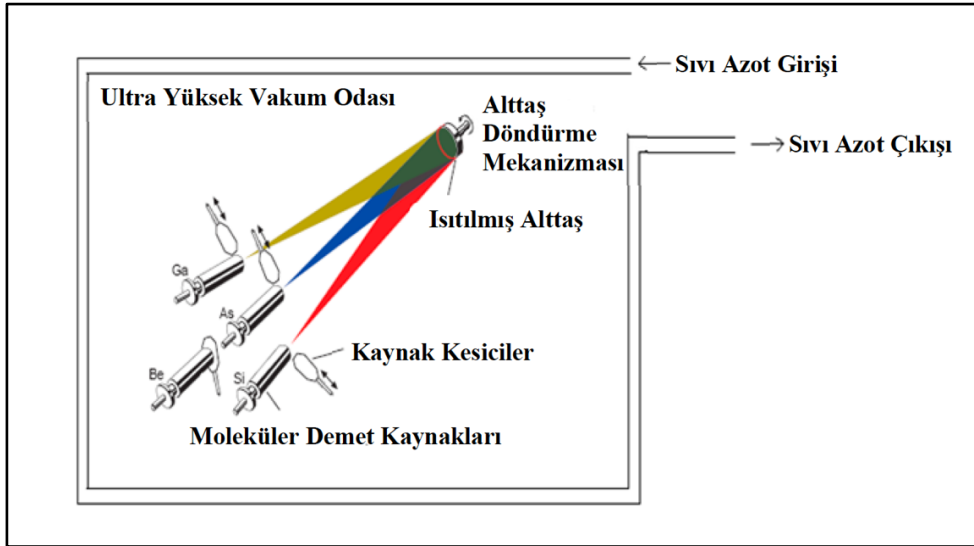
	<i>Katman</i>	<i>Kalınlık (nm)</i>	<i>Taşıyıcı Yoğunluğu (cm⁻³)</i>
<i>Kep Tabaka</i>	n+GaAs	100	5 x10 ¹⁸
<i>Pencere Tabaka</i>	n+AlInP	20	1 x10 ¹⁹
<i>Üst Hücre</i>	n-Ga _{0,51} In _{0,49} P	170	1,8 x10 ¹⁸
	p- Ga _{0,51} In _{0,49} P	800	1 x10 ¹⁸
<i>BSF</i>	p+AlInGaP	20	1 x10 ¹⁹
<i>Tünel Diyot</i>	p++GaAs	15	3 x10 ¹⁹
	n++GaAs	15	5 x10 ¹⁹
<i>Pencere Tabaka</i>	n+GaInP	20	1 x10 ¹⁹
<i>Orta Hücre</i>	n-GaAs	150	2 x10 ¹⁸
	p-GaAs	300	2 x10 ¹⁶
<i>BSF</i>	p+GaInP	20	1 x10 ¹⁹
<i>Tünel Diyot</i>	p++GaAs	15	3 x10 ¹⁹
	n++GaAs	15	5 x10 ¹⁹
<i>Pencere Tabaka</i>	n+AlGaAs	20	1 x10 ¹⁹
<i>Alt Hücre</i>	n-Ge (As difüzyonu)	180	2 x10 ¹⁷
	p-Ge	Altaş (175 µm)	2 x10 ¹⁷

5.2. GaInP/GaAs/Ge Hücre Yapısının Büyütülmesi

Çok eklemlı güneş hücreleri gibi üstün özelliklere sahip elektronik ve optoelektronik aygıtlar, MOCVD ve MBE gibi gelişmiş kristal büyütme teknikleri kullanılarak üretilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında tasarımı yapılan GaInP/GaAs/Ge üç eklemlı güneş hücre yapısı, Gazi-FOTONİK bünyesinde bulunan katı kaynaklı VG-Semicon V80H MBE sistemi kullanılarak büyütüldü. Bu başlık altında, kullanılan MBE sistemi hakkında bilgiler verildi. Ayrıca, hücre katmanlarının büyütme adımları detaylıca anlatıldı.

5.2.1. Moleküler demet epitaksi (MBE) sistemi

Ultra yüksek vakum ortamında (10^{-10} - 10^{-11} mbar) yüksek saflıktaki kaynak malzemelerin buharlaştırılarak alttaş yüzeyinde biriktirildiği Moleküler Demet Epitaksi (Molecular Beam Epitaxy, MBE) tekniği, yüksek kalitede ince film tek kristal büyütmek için geliştirilmiş en üstün yöntemlerden bir tanesidir [155]. Bu epitaksiyel büyütmek tekniğinde, uygun elementlerin termal Knudsen kaynaklarında buharlaştırılmasıyla elde edilen atomik/moleküler demetler, ısıtılmış bir alttaş üzerine gönderilerek tek kristal katmanların oluşması sağlanır. MBE tekniğinin şematik gösterimi Şekil 5.2’de verildi.

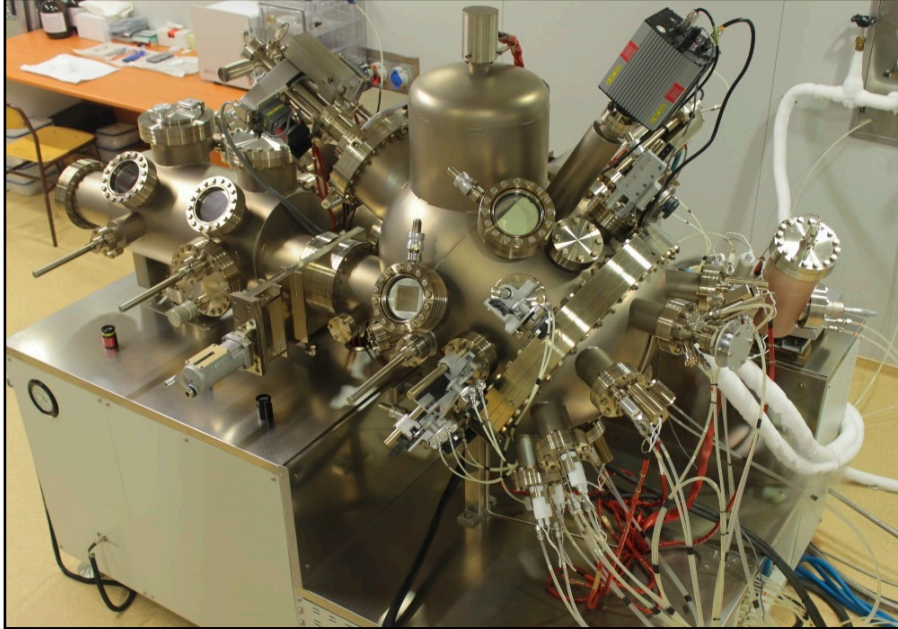


Şekil 5.2. MBE tekniğinin şematik gösterimi [43]

MBE tekniği, yüksek vakum ortamı ve kullanılan yüksek saflıktaki (en az 8N) kaynak malzemeler sayesinde oldukça düşük kusur yoğunluğuna sahip epitaksiyel katmanlara imkan vermektedir. MBE tekniğinde büyütmek oranı (GR), MOCVD gibi diğer epitaksiyel büyütmek tekniklerine göre oldukça düşüktür. III-V grubu yarıiletkenlerinin çoğunda büyütmek hızı $1 \mu\text{m/s}$ 'dir. Bu düşük büyütmek oranı, istenilen alaşım oranı ve katkı konsantrasyonunun ayarlanabilmesini sağlamaktadır. MBE tekniğinde kaynak hücrelerin önünde yüksek hızla hareket eden kaynak kesiciler bulunmaktadır. Hareketini 1 saniyeden daha kısa bir sürede tamamlayan kaynak kesiciler, büyütmek ve katman kalınlığının hassas kontrolü için oldukça önemlidir. MBE tekniğinde büyütmek sıcaklığı, diğer tekniklere göre daha düşüktür. Düşük sıcaklıkta yapılan büyütmek işlemi, birbiri üzerine büyütmek tabakalar arasında meydana gelebilecek difüzyonun engellenmesini sağlar. Bu, özellikle çok eklemlili

güneş hücrelerinde 10-15 nm kalınlığındaki yüksek katkılı tünel diyotların başarıyla büyütülmesi için bir avantajdır. MBE tekniği, büyütme odasına farklı analiz sistemlerinin eklenmesine imkan vermektedir. MBE sistemine entegre edilecek analiz aygıtları ile büyütme işleminden önce, büyütme işlemi sırasında veya büyütme işleminden sonra epitaksiyel katmanların kimyasal ve yapısal özellikleri belirlenebilmektedir. Günümüz teknolojisinde büyütme işlemi sırasındaki bütün parametreler ve tüm büyütme süreçleri bilgisayarlar yardımıyla tam olarak kontrol edilebildiğinden, büyütme işlemi eksiksiz olarak yapılabilmektedir [43].

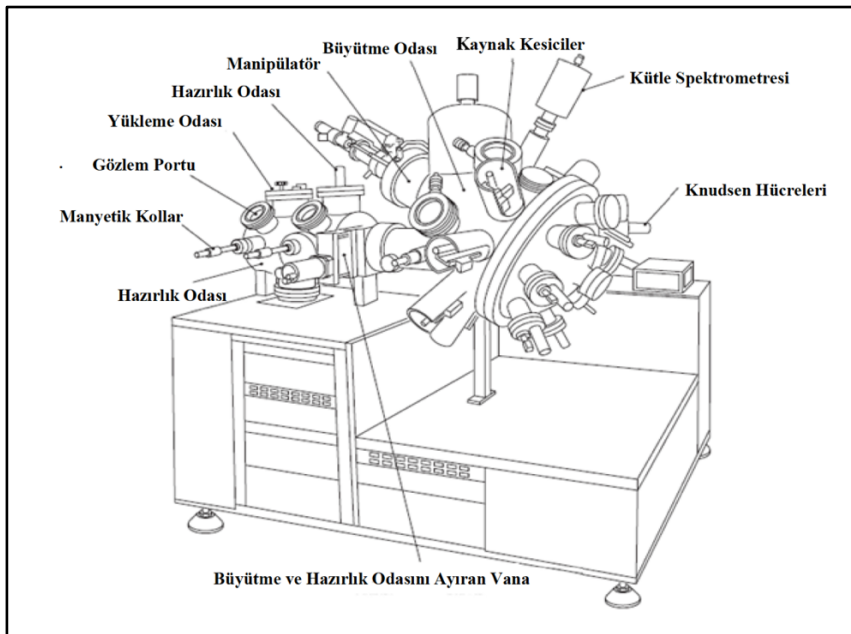
Gazi-FOTONİK'te kurulu bulunan ve tez çalışmasındaki güneş hücre yapılarının büyütüldüğü VG-Semicon V80H MBE sisteminin resmi Resim 5.1'de ve bu sisteme ait şematik gösterim Şekil 5.3'de verildi. V80H sistemi, Knudsen kaynaklarında buharlaştırılan katı malzemeler ile demet ürettiğinden katı kaynaklı MBE sınıfındadır. Gazi-FOTONİK'te bulunan sistem özellikle III-V grubu tabanlı yarıiletken bileşik ve alaşım yapıların büyütülmesi amacıyla tasarlanmıştır. Sistem, VA grubundan yüksek saflıktaki As, P, N kaynaklarına, IIIA grubundan Ga, In, Al ve katkı olarak kullanılan Si ve Be kaynaklarına sahiptir. V80H MBE sistemi, en fazla 3 inç çaplı alttaşlar üzerine büyütme yapabilmektedir.



Resim 5.1. Gazi-FOTONİK'te bulunan VG Semicon V80H MBE sistemi

MBE sistemi, yükleme odası, hazırlık odası ve büyütme odası olmak üzere birbirinden ayrılmış 3 farklı vakum odasından oluşmaktadır. Ayrıca sistem, vakum odaları arasında

numune alışverişini sağlayan transfer mekanizmasını ve bilgisayara bağlı elektronik kontrol ünitesini içermektedir. Vakum odaları ultra yüksek vakum şartları altında tutulmaktadır. Sadece yükleme odası numune yüklenmesi ve alınması sırasında atmosfere açılmaktadır. Yükleme odası asansörlü sisteme sahiptir ve alttaşların yerleştirildiği raflı mekanizmayı içermektedir. Uygun vakum şartlarında asansörlü sistem açılarak alttaşın transfer mekanizması yardımıyla hazırlık odasına yüklenmesi sağlanır. Yükleme odasının yaklaşık 10^{-9} mbar mertebesindeki vakum ortamı, turbo moleküler pompa ile sağlanmaktadır. Hazırlık odasında, transfer mekanizması, vakum odası içerisinde numune hareketini sağlayan hareketli magnetler ve ilk temizleme bölümü bulunmaktadır. Bu oda yaklaşık 10^{-10} mbar vakum değerine sahiptir ve turbo moleküler pompa ile iyon pompasını içerir. Büyütme odası, alttaş ısıtıcısı, homojenlik sağlamak için alttaş döndürücü, numune yüklemek ve transfer yapabilmek için hareket edebilen magnetler, kaynak hücreleri, kaynak kesicileri, RHEED (Yüksek Enerjili Elektron Yansıma Kırınımı) cihazının bileşenleri, kütle spektrometresi, demet akısı ölçümü için iyon sayacı ve gözlem pencerelerini içermektedir. Büyütme odasındaki yaklaşık 10^{-11} mbar mertebesindeki vakumu sağlayan iyon pompası, titanyum süblimleşme pompası, turbo moleküler pompa ve soğuk pompa (cryo pompa) mevcuttur. Büyütme odasının dış kısmını çevreleyen sıvı azot ile soğutulmuş yüzeyler, tuzaklama etkisi ile ortam vakum değerinin yükseltilmesine yardımcı olur.



Şekil 5.3. VG Semicon V80H MBE sisteminin şematik gösterimi [156]

Sistem, elektronik kontrol ünitesi ve bilgisayar sistemi tarafından kontrol edilmektedir. Isıtıcı ve kaynakların sıcaklıkları, kaynak kesicilerin hareketleri ve alttaş döndürücüsü, bilgisayar sistemi yardımıyla devamlı kontrol edilmektedir. Kullanılan yazılım, tanımlanan büyütme reçetesinin otomatik olarak ilerlemesini sağlayarak büyütmenin otomasyonuna yardımcı olur.

5.3. Hücre Katmanlarının Büyütülmesi

Yapı tasarımı Çizelge 5.1’de verilen GaInP/GaAs/Ge üç eklemi güneş hücre yapısı, Gazi-FOTONİK bünyesinde bulunan katı kaynaklı V80H MBE sistemi kullanılarak büyütüldü. Tasarlanan hücrenin büyütülmesinde kullanılan adım ve işlemler, önceki güneş hücresi büyütme çalışmalarından [5,34] faydalanılarak gerçekleştirildi. Büyütmeler, bu çalışmalarda kullanılan kalibrasyon ve optimizasyonlar referans alınarak yapıldı.

5.3.1. Ge birinci eklem (alt hücre) oluşturulması

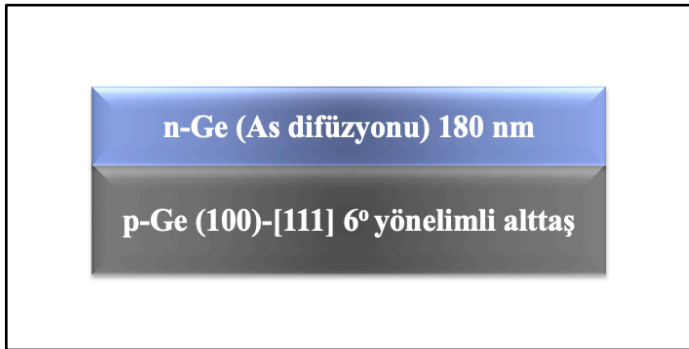
p-Ge alttaş üzerinde p-n eklem Ge alt hücrenin oluşturulması için literatürde çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Bu teknikler arasında en yaygın kullanılan yöntem, p-Ge alttaşa arsenik (As) veya fosfor (P) difüzyonu ile n-Ge katmanının oluşturularak p-n eklem elde edilmesidir. Difüzyon işlemi, alttaş yüzeyine biriktirilen As atomlarının yüksek sıcaklıkla yüzeyin derin bölgelerine hareket etmesi ile gerçekleşmektedir.

Bölüm 5.1’de belirtildiği gibi AFB oluşumunun engellenmesi için kullanılan yöntemlerden bir tanesi yönelimli alttaş kullanmaktır. Ge alt hücre ile üzerine büyütülecek GaAs orta hücre arasında düzgün bir kristalleşme sağlamak amacıyla alttaş olarak 3 inç çaplı, [111] yönelimine göre 6° açılı ile kesilmiş (100) yönelimli galyum (Ga) katkılı ve 175 µm kalınlığında p-tipi Ge alttaş kullanıldı. Ge alt hücrenin oluşturulmasında izlenen adımlar aşağıda sıralandı.

- 1) Epitaksiyel büyütmeye hazır (epi-ready) p-tipi Ge (100)-[111] 6° yönelimli alttaş MBE sisteminin yükleme odasına yerleştirildi.
- 2) Alttaş, uygun vakum değerine ulaşıldıktan sonra transfer mekanizması kullanılarak hazırlık odasına yüklendi. Hazırlık odasına transfer edilen alttaşın ilk temizlik işlemi, 400

°C’de 2 saat bekletilerek yapıldı. Böylece alttaş yüzeyindeki buharlaşabilen kirliliklerin temizlenmesi sağlandı.

- 3) İlk temizlik işleminin ardından, hazırlık odası uygun vakum değerine ulaştığında alttaş büyütme odasına transfer edilerek alttaş tutucuya (manipülatör) yerleştirildi.
- 4) Alttaş sıcaklığı kontrollü olarak önce 600 °C’ye çıkartıldı. RHEED desenindeki belirginleşme ile oksit tabakasının kalkmaya başladığı anlaşıldı. Sıcaklık 650 °C’ye çıkartılarak 30 dk boyunca tam oksit kaldırma (full oxide desorption) işlemi gerçekleştirildi. Yüzeydeki oksit tabakasının kaldırıldığı RHEED deseninde meydana gelen netleşme ile gözlendi. Daha sonra alttaş sıcaklığı 350 °C’ye indirildi. As hücre sıcaklığı 350 °C, As kırma hücresi sıcaklığı 950 °C’ye set edildi.
- 5) Alttaş 350 °C’ye, As hücre sıcaklıkları da set edilen değerlere ulaştıktan sonra alttaş yüzeyine, 10 saniye boyunca kırma hücresinden çıkan As₂ molekülleri gönderildi. Böylece As zengin bir yüzey oluşturuldu. As₂ demeti altında alttaş sıcaklığı 900 °C’ye çıkartıldı ve 150 dakikalık tavlama süresinde As moleküllerinin Ge içerisine difüzyonu sağlandı.
- 6) Böylece p-Ge üzerinde As difüzyonu yoluyla n-tipi Ge tabakası oluşturularak Şekil 5.4’de verilen p-n eklem Ge alt hücre büyütme adımları tamamlandı.



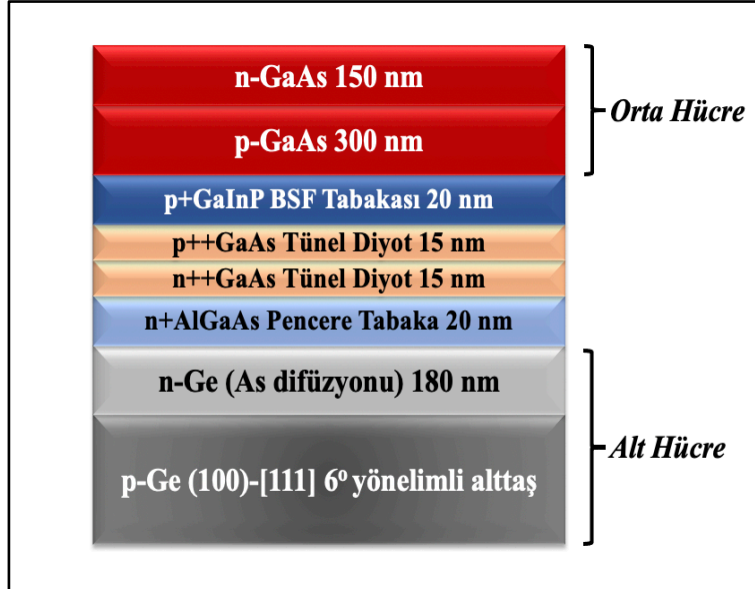
Şekil 5.4. Ge p-n eklemi içeren alt hücre yapısı

5.3.2. GaAs ikinci eklem (orta hücre) oluşturulması

p-Ge alttaş üzerine As difüzyonu ile oluşturulan p-n eklem Ge alt hücre üzerine p-n eklem GaAs eklemi büyütülerek orta eklem oluşturuldu ve iki eklemli hücre yapısı elde edildi. GaAs/Ge arayüzeyinde meydana gelebilecek AFB oluşumlarını azaltmak amacıyla MEE tekniği ile çekirdekleşme tabakası oluşturuldu. GaAs orta hücrenin büyütülmesinde izlenen adımlar aşağıda sıralandı.

- 1) p-n Ge alt hücre oluşumunun ardından, büyütme odasında bulunan numunenin alttaş sıcaklığı 350 °C'ye düşürüldü. Ga kaynak hücresinin sıcaklığı önceki çalışmalarda kalibre edilen $7,4 \times 10^{-7}$ mbar Ga akısının elde edildiği 850 °C'ye set edildi. As hücre sıcaklığı 350 °C, As kırma hücresi sıcaklığı 950 °C'ye set edildi. Böylece 1 $\mu\text{m/s}$ büyütme hızı oluşturuldu.
- 2) Ge yüzeyi üzerine ilk olarak 10 saniye As daha sonra 10 saniye Ga ardışık olarak biriktirilerek MEE tekniği uygulandı. Bu işlem 10 kez tekrarlandı. Böylece arayüzeyde düzgün bir çekirdekleşme sağlandı. Arayüzeyde oluşabilecek kusurların ve AFB'lerin üst katmanlara ilerlemesi engellendi.
- 3) MEE tekniği ile oluşturulan çekirdekleşmenin ardından GaAs ile Ge arasındaki örgü farkını azaltan bir eğim oluşturan ve ayrıca Ge alt hücre yüzeyindeki yüksek rekombinasyon hızını düşürerek hücreye giren foton sayısını arttıran pencere tabakası büyütüldü.
MEE sonrası alttaş sıcaklığı 600 °C'ye, Al kaynak hücresinin sıcaklığı 1150 °C'ye çıkartıldı. Ayrıca n-tipi katkılama için kullanılacak Si hücresinin sıcaklığı yüksek katkı oranı için 1175 °C'ye set edildi. Si, Ga, As ve Al kaynak kesicileri açılarak yaklaşık 20 nm kalınlığında ve $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ katkı yoğunluğunda n+AlGaAs pencere katmanı oluşturuldu.
- 4) Farklı hücre katmanları arasında elektriksel iletkenliğin sağlanması ve hücrelerin seri bağlı hale gelmesi için tünel diyot yapısı büyütülmektedir. Pencere katman üzerine ilk tünel diyot yapısı büyütüldü.
Si hücresinin sıcaklığı 1180 °C'ye, Be katkı hücresinin sıcaklığı 880 °C'ye set edildi. Sırasıyla 15 nm n++GaAs ve üzerine 15 nm p++GaAs katmanları büyütülerek Ge alt hücre ile GaAs orta hücre arasındaki tünel diyot yapısı oluşturuldu.
- 5) Tünel diyotun ardından oluşturduğu elektrostatik alan yardımıyla azınlık taşıyıcılarını hücre eklemine doğru itilmesini sağlayan arka yüzey alanının (BSF) büyütülmesine geçildi.
In kaynak hücresinin sıcaklığı 787 °C'ye, GaP kaynak hücresinin sıcaklığı 1040 °C'ye, Be katkı hücresi ise 875 °C'ye set edildi. Be, Ga, In ve P kaynak kesicileri açılarak 20 nm kalınlığında p+GaInP BSF katmanı büyütüldü.
- 6) Tünel diyot ve BSF katmanlarının büyütülmesinden sonra GaAs orta hücreyi oluşturacak olan p-n eklem GaAs katmanları büyütüldü. Si hücresi sıcaklığı 1150 °C'ye, Be hücre sıcaklığı ise 850 °C'ye set edildi. İlk olarak 300 nm kalınlığında p-GaAs, ardından 150 nm kalınlığında n-GaAs katmanı büyütüldü. Orta ve alt hücre ile ara katmanları

tamamlanan güneş hücre yapısının şematik gösterimi Şekil 5.5’de verildi. GaAs orta eklemin büyütme parametreleri Çizelge 5.2’de sunuldu.



Şekil 5.5. Alt ve orta hücresi tamamlanan güneş hücresinin şematik gösterimi

Çizelge 5.2. GaAs orta eklemin büyütme parametreleri

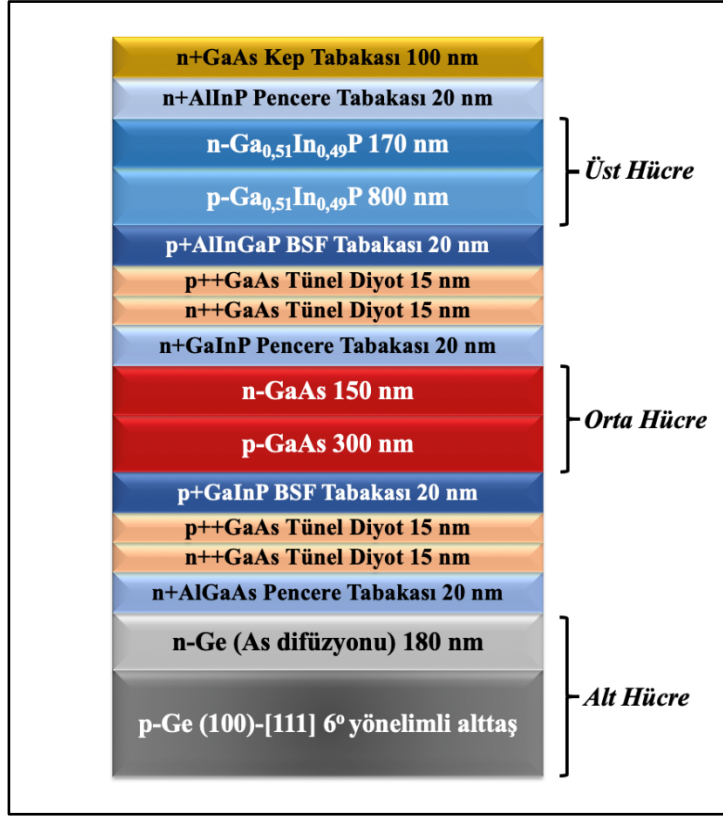
Hücre	Sıcaklık (°C)	Akı (mbar)	Katman
Altaş	350		MEE
	600		Diğer tüm katmanlar
Ga	850	$7,4 \times 10^{-7}$	Ga içeren tüm katmanlar
As	$A_{SB}=350$		As içeren tüm katmanlar
	$A_{SC}=950$		
In	787	$3,7 \times 10^{-7}$	In içeren tüm katmanlar
GaP	1040		P içeren tüm katmanlar
Al	1150		Al içeren tüm katmanlar
Si	1150		n katkılı katmanlar
	1175		n+ katkılı katmanlar
	1180		n++ katkılı katmanlar
Be	850		p katkılı katmanlar
	875		p+ katkılı katmanlar
	880		p++ katkılı katmanlar

5.3.3. $\text{Ga}_{0,51}\text{In}_{0,49}\text{P}$ üçüncü eklem (üst hücre) oluşturulması

p-n eklem GaAs orta hücre üzerine ara katmanlar ve p-n eklem GaInP eklemi büyütülerek üst hücre oluşturuldu. Üst hücrenin büyütülmesi ile üç eklemli güneş hücre yapısı tamamlandı. GaInP üst hücrenin büyütülmesinde izlenen adımlar aşağıda sıralandı.

- 1) Büyütmesi tamamlanan GaAs orta hücre üzerine 600 °C alttaş sıcaklığında 20 nm kalınlığında n+GaInP pencere katmanı büyütüldü. Bu katmanda Si katkı hücrelerinin sıcaklığı 1175 °C olarak kullanıldı.
- 2) Si ve Be katkı hücrelerinin sıcaklıkları sırasıyla 1180 ve 880 °C'ye set edildi. Pencere katman üzerine ilk olarak 15 nm kalınlığında n++GaAs ve üzerine 15 nm kalınlığında p++GaAs katmanları büyütülerek GaAs orta hücre ile GaInP üst hücre arasındaki tünel diyot yapısı oluşturuldu.
- 3) Be hücrelerinin sıcaklığı 875 °C'ye set edildi. Al, In, Ga, GaP ve Be kaynak kesicileri açılarak GaAs tünel diyot yapısının üzerine 20 nm kalınlığında p+AlInGaP BSF tabakası büyütüldü.
- 4) Tünel diyot ve BSF katmanlarının büyütülmesinden sonra GaInP üst hücreyi oluşturacak olan p-n eklem $\text{Ga}_{0,51}\text{In}_{0,49}\text{P}$ katmanları büyütüldü. Alaşım oranının hassas biçimde ayarlanması için Ga ve In akılarının kalibre edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle önceki çalışmalarda belirlenen akıları elde edecek şekilde kaynak hücre sıcaklıkları belirlendi. Ga hücresi $6,6 \times 10^{-7}$ mbar akı için 840 °C'ye, In hücresi ise 4×10^{-7} mbar akı için 790 °C'ye set edildi. Si ve Be katkı hücreleri sırasıyla 1150 ve 850 °C'ye set edildi. İlk olarak 800 nm kalınlığında p- $\text{Ga}_{0,51}\text{In}_{0,49}\text{P}$ katmanı, ardından 170 nm kalınlığında n- $\text{Ga}_{0,51}\text{In}_{0,49}\text{P}$ katmanı büyütüldü. Böylece üst hücrenin büyütme işlemi tamamlandı.
- 5) Üst hücre katmanlarının büyütülmesinin ardından Si kaynak hücrelerinin sıcaklığı 1175 °C'ye set edildi. 20 nm kalınlığa sahip n+AlInP pencere katmanı büyütüldü.
- 6) Hücre yapısının en üstüne büyütülen yüksek katkılı n+GaAs kep tabaka, yaklaşık 100 nm kalınlığında büyütüldü. Kep tabakasının büyütülmesi ile birlikte güneş hücre yapısının büyütme işlemi tamamlandı.
- 7) Kep tabakasının büyütülmesinin ardından alttaş sıcaklığı 200 °C'ye, kaynak hücre sıcaklıkları stand-by sıcaklıkları olan 300 °C'ye set edildi.
- 8) Büyütme odası uygun vakum değerine ulaştığında, büyütülen hücre yapısı transfer mekanizması yardımıyla transfer odasına oradan da yükleme odasına transfer edildi. Yükleme odası atmosfere açılarak güneş hücre yapısı dışarıya alındı. Büyütme işlemi

tamamlanan güneş hücre yapısının şematik gösterimi Şekil 5.6’da verildi. $\text{Ga}_{0,51}\text{In}_{0,49}\text{P}$ üst eklemin büyütme parametreleri Çizelge 5.3’de verildi.



Şekil 5.6. Büyütme işlemi tamamlanan üç eklemlı güneş hücresinin şematik gösterimi

Çizelge 5.3. $\text{Ga}_{0,51}\text{In}_{0,49}\text{P}$ üst eklemin büyütme parametreleri

<i>Hücre</i>	<i>Sıcaklık (°C)</i>	<i>Akı (mbar)</i>	<i>Katman</i>
Altaş	600		Tüm katmanlar
Ga	850	$7,4 \times 10^{-7}$	Ga içeren diğer katmanlar
	840	$6,6 \times 10^{-7}$	p-n $\text{Ga}_{0,51}\text{In}_{0,49}\text{P}$ katmanlar
As	$A_{SB}=350$		As içeren tüm katmanlar
	$A_{SC}=950$		
In	787	$3,7 \times 10^{-7}$	In içeren diğer katmanlar
	790	$4,0 \times 10^{-7}$	p-n $\text{Ga}_{0,51}\text{In}_{0,49}\text{P}$ katmanlar
GaP	1040		P içeren tüm katmanlar
Al	1150		Al içeren tüm katmanlar
Si	1150		n katkılı katmanlar
	1175		n+ katkılı katmanlar
	1180		n++ katkılı katmanlar
Be	850		p katkılı katmanlar
	875		p+ katkılı katmanlar
	880		p++ katkılı katmanlar

6. GÜNEŞ HÜCRESİ AYGIT FABRİKASYONU

Yüksek verime sahip güneş hücresi üretiminde, iyi nitelikli kristal büyütmenin yanında litografi, metalizasyon ve yansıma önleyici kaplama oluşturulması süreçlerini içeren aygıt fabrikasyonunun etkisi oldukça fazladır. Büyütülen güneş hücre yapısının tasarlanan boyutlarda dilimlenmesinin ardından, sırasıyla litografi, metalizasyon ve yansıma önleyici kaplama oluşturulması süreçlerinin son ürünü olarak güneş hücresi aygıtı elde edilir. 3 inç çapında büyütülen hücre yapısının maksimum alan ve maksimum dilim sayısı elde edilecek şekilde dilimlenmesinden fabrikasyon süreçlerinin her bir adımının optimize edilmesine kadar yapılan tüm deneysel çalışmalar, niteliği yüksek ürün elde edilmesinin temelini oluşturmaktadır. Bu bölüm içerisinde, uzay kalifiye güneş hücresi fabrikasyon adımları ve bu işlemler için kullanılan deneysel sistemler ayrıntılı olarak tanıtıldı. Fotolitografi tekniği, bu teknikte kullanılan sistemler, güneş hücresi fotolitografi işlemleri, metalizasyon işlemleri, yansıma önleyici katman tasarımı ve üretimi ile güneş hücresi aygıt karakterizasyonu hakkında detaylı bilgiler verildi.

6.1. Fotolitografi Tekniği

Litografi işlemi; bir yüzey üzerine, hazırlanmış fotomaskede bulunan desenin fotorezist (PR) adı verilen özel dalgaboylarındaki ışığa duyarlı polimer bir madde aracılığıyla aktarılması olarak tanımlanabilir. Litografi işleminde tasarlanan maskedeki desenin yüzeye aktarılması işlemine pozlama denir. Farklı kaynaklar kullanılarak pozlanan bölgelerin çeşitli kimyasallarla aşındırılması ile litografi işlemi sonucu elde edilen desenlerin kristal dilimine işlenmesi amaçlanmaktadır. Litografi işleminin farklı çeşitleri mevcuttur. Pozlama ve maske ile yüzeyin birbirine hizalanması işlemlerinin gerçekleştirildiği maske hizalama (mask aligner) sisteminde kullanılan pozlama kaynağına göre litografi çeşitleri değişmektedir. Çizelge 6.1’de kullanılan pozlama kaynağına göre değişen litografi çeşitleri verildi.

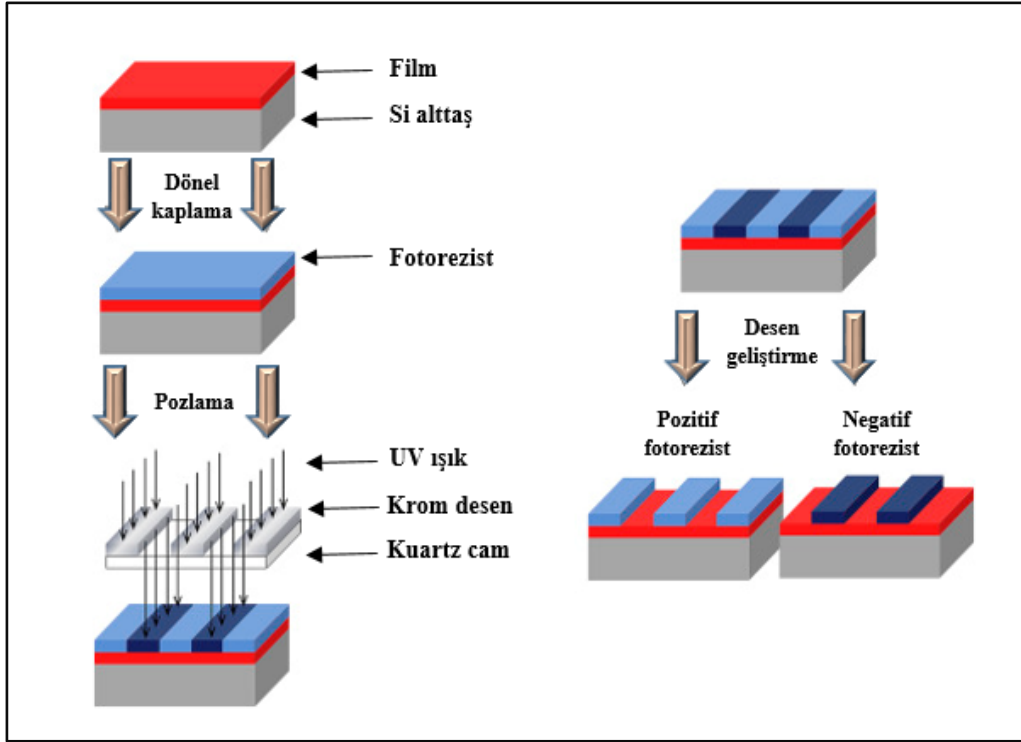
Litografi işleminde maskedeki desen yüzeye morötesi (UV) ışık kaynağı kullanılarak aktarıldığında fotolitografi olarak adlandırılır. Fotolitografi tekniğinin pozlama adımı ışık kaynağı olarak genellikle 365 nm dalgaboyuna sahip UV ışık kullanılmaktadır. Temel bir fotolitografi işlemi; numune temizliği, yüzeye PR kaplanması, PR içindeki çözücülerin buharlaşması için tavlama, pozlama işlemi ile desenin transfer edilmesi, gerekiyorsa

pozlama sonrası tavlama ve desenin geliştirilmesi adımlarını içermektedir. Fotolitografi tekniğinin ilk adımında, krom kaplanmış cam üzerinde yüzeye aktarılması istenen desenin oluşturulması yani fotomaske üretimi vardır. Fotomaske tasarımı ve üretiminin ardından desen oluşturulacak yüzey, dönel kaplama (spin coater) sistemi yardımıyla fotorezist malzeme ile kaplanır. Kullanılacak fotorezist malzemenin seçimi, yapılacak kaplama türü, kaplama kalınlığı, kullanılan pozlama kaynağı, kullanılacak kimyasallara dayanıklılığı ve pozitif/negatif türe göre değişmektedir. Fotorezist malzemenin yüzeye kaplanmasının ardından yapılan tavlama işlemi, polimer malzeme içerisindeki çözücülerin buharlaşmasını ve böylece fotorezistin yüzeye daha iyi tutunmasını sağlar. Maske hizalama sistemi kullanılarak desenlenecek yüzey ve fotomaske birbirine hizalanarak pozlama işlemi gerçekleştirilir. Pozlanan bölgelerin desen geliştirme çözeltisinde (developer) çözünmesi ile fotolitografi sonucu elde edilen desenlerin yüzeye işlenmesi sağlanır. Temel fotolitografi süreçleri Şekil 6.1’de özetlendi [5].

Çizelge 6.1. Pozlama kaynağına göre litografi çeşitleri

<i>Pozlama Yöntemi</i>	<i>Kullanılan Kaynak</i>	<i>Litografi Çeşidi</i>
<i>UV ışık</i>	$\lambda=157-436$ nm	Fotolitografi
<i>X-ışınları</i>	$\lambda=0,4-5$ nm	X-Işını Litografisi
<i>Elektronlar</i>	$E=10-100$ keV	Elektron Demet Litografisi
<i>İyonlar</i>	$E=50-200$ keV	İyon Demet Litografisi

Fotolitografi işleminde uygulanan en önemli adım pozlama işlemidir. Pozlama işlemi, fotomaskedeki desenin aktarılmasını sağladığından uygulanan pozlamanın türü çözünürlüğü yani minimum desen boyutunu belirler. Maske hizalama sistemlerinde pozlama işlemi, temaslı pozlama, temassız pozlama ve projeksiyon pozlama şeklinde üç farklı türde yapılabilmektedir. Temaslı pozlama işleminde fotomaske ve desen oluşturulacak yüzey birbirine temas edecek kadar yakın mesafede bulunur. Aralarında herhangi bir mesafe yoktur. Bu pozlama türü için fotorezist malzemenin yüzeyde tutunumunun yüksek olması gerekmektedir. Temaslı pozlama ile $< 1\mu\text{m}$ çözünürlük elde edilebilir. Temassız pozlama işleminde fotomaske ile yüzey arasında belirli bir mesafe (s) bulunmaktadır ($3\mu\text{m} < s < 50\mu\text{m}$). Bu pozlama türü hassas yüzeyler ve düşük ayrıntılı desenlerin basılmasında uygulanmaktadır. Temassız pozlamada çözünürlük $2\mu\text{m}$ ’nin üzerindedir. Projeksiyon pozlamada ise fotomaskedeki desen belirli oranda küçültülerek (x5, x10 gibi) yüzeye aktarılmaktadır [157].



Şekil 6.1. Temel fotolitografi işlem adımları

Güneş hücresi fabrikasyonunda hücre yüzeyinde oluşturulacak metal kontak ızgaralarının desenlenmesi genellikle fotolitografi tekniği kullanılarak yapılmaktadır. Bu teknik ile elde edilen çözünürlük güneş hücresi için yeterlidir. Ancak fotodedektör ve nanoboyutlu transistör gibi uygulamalar için çok yüksek çözünürlük sağlayan (1-5 nm) X-ışını litografisi veya elektron demeti litografisi teknikleri kullanılmaktadır.

6.1.1. Temel fotolitografi işlemleri

Fotolitografi işlemleri, yüzeyi desenlenecek malzemenin fabrikasyona hazırlanmasından desen geliştirme çözeltisinde desenin oluşturulması ve metalizasyon işlemi sonrası fotorezist kaldırma (lift-off) işlemine kadar uzanan çoklu adımları kapsamaktadır. Temel fotolitografi işlem adımları aşağıda özetlenmiştir.

Yüzey temizliği

Temizlik işlemi, yüzeydeki safsızlıkların desene zarar vermesini ve kirliliklerin metal kontakların kalitesini etkilemesini engellemek amacıyla yapılmaktadır. Ayrıca, yüzeydeki istenmeyen organiklerin temizlenmesi sağlanmaktadır. Birkaç mikrometre kalınlığında olan

kontak ızgaralarının partiküller nedeniyle bozulması akım iletimini engelleyerek performans kaybı yaratacağından temizlik işlemi oldukça önemli bir adımdır. Temizlenmiş yüzeylere fotorezist malzeme daha iyi tutunmakta ve yüksek kalitede fotolitografi gerçekleşmektedir. Yüzeyin oksit ve diğer yüzey kirliliklerinden temizlenmesi için sırasıyla;

- Asidik çözelti [hidroflorik asit (HF) + Deiyonize su (DI-H₂O)] kullanarak oksit temizliği ve yüzey aşındırması,
- Ultrasonik banyo içerisinde sırasıyla aseton ve izopropil alkol kullanılarak organik kirliliklerden arındırma,
- DI-H₂O kullanarak durulama,
- Yüksek saflıkta kuru azot (N₂) gazı ile kurutma,

işlemleri uygulanır.

Fotorezistin yüzeye kaplanması

Fotorezist, ışığa duyarlı olan polimer tabanlı bir malzemedir. Farklı fotorezist türleri farklı dalgaboylarındaki ışığa duyarlıdır. Fotorezist malzemelerin büyük bir çoğunluğu aseton ve dimetil sülfoksit (DMSO) gibi organik çözücülerde kolayca çözünmektedir. Yapısı içerisindeki polimer malzeme, pozlama ile yapısını değiştiren bileşendir. Fotoaktif bileşen kimyasal reaksiyonu kontrol ederken, çözücü bileşen fotorezistin viskozitesini kontrol eder. Yapılacak uygulama için seçilen fotorezist malzemenin yüzeye iyi tutunması, ıslak aşındırma süreçlerinde kullanılacak kimyasallara dayanıklı olması, metalizasyon süreçlerinde ise maruz kalacağı iyon bombardımanı ve sıcaklığa dayanıklı olması gerekmektedir.

Fotorezist malzemeler pozitif ve negatif olmak üzere iki çeşittir. Pozitif fotorezistlerde pozlama sırasında UV ışık gören kısımlar kimyasal yapısını değiştirir ve fotoreziste özel olarak üretilmiş desen geliştirme çözeltisi içerisinde çözünür. Bu sayede ışık gören kısımlar yüzeyden kaldırılmış olur ve geriye sadece ışık görmeyen kısımlar yani fotomaskede krom kaplı olan bölümler kalır. Negatif fotorezist kullanımında ise durum tam tersidir [158]. Bu türde UV ışık, fotorezist malzemedeki ışık gören yerlerde kimyasal dayanımı artırır. Desen geliştirme çözeltisi, ışık görmeyen bölgeleri çözerken ışık gören yerler aynen kalır. Bu

durumda fotomaskedeki desenin tam tersi yani fotomaskede krom kaplı olmayan bölümler yüzeye işlenir. Pozitif ve negatif fotorezisti açıklayan gösterim Şekil 6.1’de verildi.

Fotorezist malzemeler yüzeye döndürerek kaplama, püskürterek kaplama, elektroliz ile kaplama ve rulo üzerine sererek kaplama gibi yöntemler kullanılarak kaplanmaktadır. En yaygın kullanılan yöntem döndürerek kaplama tekniğidir. Bu teknik oldukça homojen bir kaplama sağlar ve döndürme hızı değiştirilerek istenilen kalınlıkta fotorezist kaplanmasını mümkün kılar.

Fotorezistin tavllanması

Tavlama işlemi, fotorezist malzeme yüzeye kaplandıktan sonra gerçekleştirilir. Pozlama işleminden önce yapılan tavlama işlemi, ön ısıtma ya da ilk tavlama olarak da adlandırılmaktadır. Tavlama işleminin amacı, fotorezist içerisindeki çözücü bileşenin buharlaştırılması ve böylece yüzeye tutunumunun sağlanmasıdır. Tavlama işlemi için fırın veya ısıtıcı tabla kullanılmaktadır. Uygulamalarda genellikle ısıtıcı tabla kullanımı tercih edilmektedir. Tavlama işlemi, fırın kullanılarak genellikle 110 °C’de 30 dk beklenerek yapılır. Isıtıcı tabla kullanımında ise 110 °C’de 1-2 dk tavlama tercih edilmektedir.

Pozlama işlemi

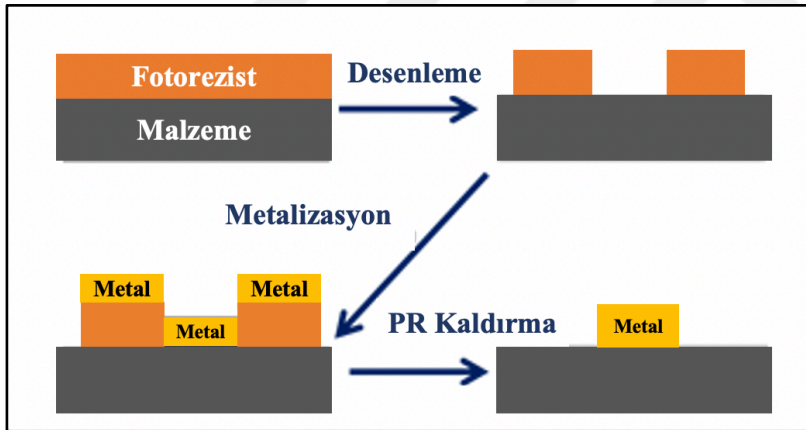
Fotorezist malzemenin kaplanması ve tavllanması işlemlerinin ardından pozlama işlemi gerçekleştirilmektedir. Pozlama işlemi, maske hizalama sistemi kullanılarak yapılmaktadır. Fotomaske ve fotorezist kaplı yüzey sistem içerisinde birbirine hizalandıktan sonra pozlama kaynağı kullanılarak pozlama adımı uygulanır. Pozlama işleminde en önemli parametreler pozlama sisteminin kaynak enerjisi ve pozlama süresidir. Pozlama süresi ayarlanarak en düzgün desen oluşumunu sağlayacak enerji değeri yüzeye gönderilir. Yüksek pozlama süresi desenlerin genişlemesine ve bozulmasına neden olur. Düşük pozlama süresinde ise yeterli kimyasal değişim olmadığından desen oluşmaz. Fotorezist malzeme ve kullanılan pozlama kaynağına göre pozlama süresinin tespit edilmesi oldukça önemlidir.

Desenin geliştirilmesi

Pozlama işleminin ardından fotorezist kaplı malzeme, desen geliştirme çözeltisi (developer) ile banyo edilir. Bu çözelti fotoreziste özeldir ve içerisindeki bileşenleri kolayca çözer. Desen geliştirme adımı sonucunda kullanılan fotorezistin türüne göre UV ışık gören veya görmeyen bölgeler yüzeyden kaldırılır ve böylece maskedeki desen numune yüzeyine aktarılmış olur.

Fotorezistin kaldırılması

Fotorezist kaldırılma (lift-off) işlemi, desen geliştirme işleminin ardından yapılan metalizasyon işleminden sonra uygulanmaktadır. Metalizasyon işleminden sonra malzeme yüzeyinde bulunan fotorezist, aseton veya DMSO gibi organik çözücüler ile aşındırılarak istenmeyen metal kısımların kaldırılması sağlanır. Bu işlem adımları sonucunda hücre yüzeyi metalizasyon süreci tamamlanmış olur.



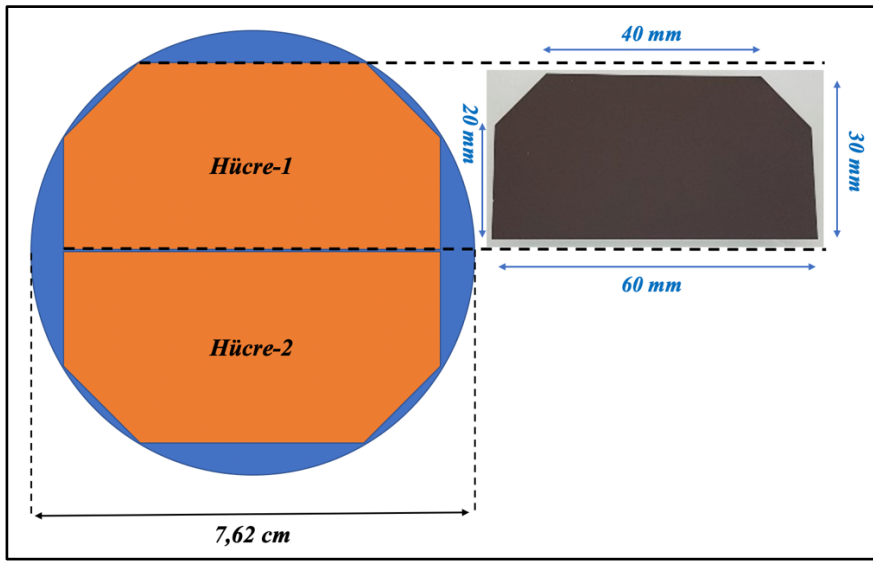
Şekil 6.2. Desenleme ve fotorezist kaldırma işlemlerinin şematik gösterimi

6.2. Fotolitografi Sistemleri

Tez kapsamında büyütülen güneş hücrelerinin fotolitografi işlemleri, Gazi-FOTONİK'te bulunan sistemler kullanılarak yapıldı. Kullanılan fotomaske, fotorezist malzeme, dönel kaplama sistemi, ısıtıcı tabla ve maske hizalama sistemleri aşağıda detaylıca tanıtıldı.

6.2.1. Fotomaske

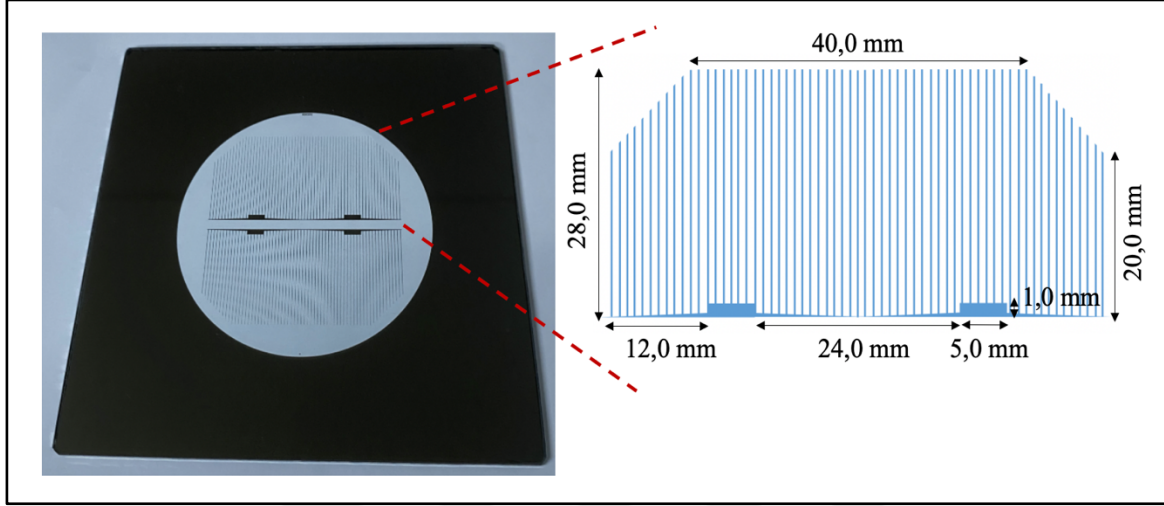
Fotomaske, güneş hücresinin yüzeyinde oluşturulacak metal kontak ızgaralarının şeklini içermektedir. Güneş hücre yapısına en uygun fotomaskenin tasarımı, aygıt performansını etkileyen etkenlerdendir. 3 inç çapındaki Ge alttaş üzerine büyütülen hücre yapısı, Şekil 6.3’de görüldüğü gibi maksimum alan ve parça sayısı elde edilecek şekilde 17 cm² toplam alana sahip iki parçaya ayrılabilir.



Şekil 6.3. Büyütülen 3 inç çaplı hücre yapısından dilimlenen 17 cm² alanlı hücre

Her bir hücre parçası üzerine, hücrenin oluşturduğu fotoakımı toplayan ızgaralı yapı meydana getirilmelidir. Tez çalışmasında tasarlanan fotomaske, 2 adet kontak pedine, 1 ana toplayıcıya ve 63 adet ince ızgara toplayıcıya sahiptir. Izgara toplayıcılar, fotoakımın daha yoğun olduğu ana toplayıcıya yakın noktalarda daha geniş ve uçlara gidildikçe incelecek biçimde 35-75 µm genişliğinde tasarlanmıştır. Bu sayede akım daha az kayıpla toplanırken aktif alan kaybı engellenmiştir. Ayrıca ızgaralar arası yaklaşık 800 µm mesafe bulunmaktadır. Tez çalışmasında kullanılacak fotomaske, negatif fotorezist kullanımına uygun biçimde, metal kaplanacak bölgeleri krom kaplı olarak tasarlanmıştır. Gazi-FOTONİK tarafından tasarımı yapılan fotomaske, Bilkent Üniversitesi Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi (UNAM) tarafından krom kaplı kuartz cam üzerine işlenmiştir. Tez çalışmasındaki güneş hücresi fabrikasyonunda kullanılan fotomaske Şekil 6.4’de verildi.

Şekil 6.4’de verilen ve GaInP/GaAs/Ge güneş hücre yapısının fabrikasyonunda kullanılan fotomaske, yaklaşık $1,5 \text{ cm}^2$ metal alanına sahiptir. Bu durumda fabrikasyon sonrası güneş hücresinin fotoakım üretebildiği toplam alan $15,5 \text{ cm}^2$ ’dir. Elektriksel performans analizinde hücre aktif alanı $15,5 \text{ cm}^2$ olarak kullanıldı.



Şekil 6.4. Fotolitografi işleminde kullanılan fotomaske

6.2.2. Fotorezist malzeme

Tez çalışmasında büyütülen GaInP/GaAs/Ge üç eklemli güneş hücre yapısının aktif bölgesinin ürettiği fotoakımı en az kayıpla toplamak metalizasyon işleminin başlıca amacıdır. Metallerde artan kalınlık, dirençte azalmaya neden olduğundan daha fazla akım taşınabilmesini sağlamaktadır. Metalizasyon işleminde daha yüksek kalınlıklara ulaşabilmek için fotolitografi adımıyla yüzeye kaplanan fotorezist kalınlığının etkisi oldukça fazladır. Benzer hücre yapısına sahip ticari uzay kalifiye güneş hücrelerinde, 5-8 μm arasında değişen metal kalınlıkları kullanılmaktadır [32,159]. Böylesine yüksek metalizasyonda başarı elde edebilmek için yaklaşık 9-10 μm kalınlığa ulaşabilen fotorezist kullanılması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, yaklaşık 5 μm olarak hedeflenen metal kalınlığına ulaşabilmek için dönel kaplama sisteminde uygun parametreler kullanılarak yapılan kaplamada, yaklaşık 10-12 μm kalınlığa ulaşabilen, negatif fotorezist türünde MicroChemicals markasına ait AZ nLof-2070 isimli fotorezist malzeme kullanıldı. Kullanılan fotoreziste ait bazı teknik bilgiler Çizelge 6.2’de verildi.

Çizelge 6.2. AZ nLof-2070 fotorezistine ait bazı teknik bilgiler

<i>Özellik</i>	<i>Açıklama</i>
<i>Fotorezist Türü</i>	Negatif
<i>Pozlama Kaynağı</i>	i-line (365 nm)
<i>Kaplama Kalınlığı</i>	2-12 μm (1750 rpm’de 10 μm)
<i>Viskozite</i>	~ 500 cSt
<i>Pozlama Öncesi Tavlama</i>	110 °C’de 90 sn
<i>Pozlama Sonrası Tavlama</i>	110 °C’de 90 sn
<i>Desen Geliştirme Çözeltisi</i>	AZ 400K veya AZ 726 MIF
<i>Kaldırma Çözeltisi</i>	Aseton veya DMSO

6.2.3. Dönel kaplama sistemi

Dönel kaplama (spin coating) sistemi, belirli bir viskoziteye sahip akışkan malzemenin numune yüzeyine damlatılıp yüksek hızda döndürülmesiyle ince film kaplanmasını sağlayan bir üretim tekniğidir. Fotorezist malzemelerin yüzeye kaplanmasında en yaygın kullanılan yöntemdir. Tez çalışmasında uygulanan fotolitografi işleminde fotorezist malzemenin hücre yüzeyine kaplanması için Gazi-FOTONİK’te bulunan ve temiz oda şartlarında çalıştırılan SUSS MicroTec marka Delta-6RC model dönel kaplama sistemi kullanıldı (Resim 6.1). Sistem 6000 rpm’e kadar arttırılabilen dönme hızıyla malzeme yüzeyinin homojen bir şekilde kaplanmasını sağlayabilmektedir. Dönme süresi ve artış hızı kullanıcı tarafından ayarlanabilmektedir. Kaplama esnasında numunenin sabitlenmesi için mekanik pompa ile çalışan, üzerine numunenin yerleştirildiği vakum tutuculu başlık bulunmaktadır.

6.2.4. Isıtıcı tabla

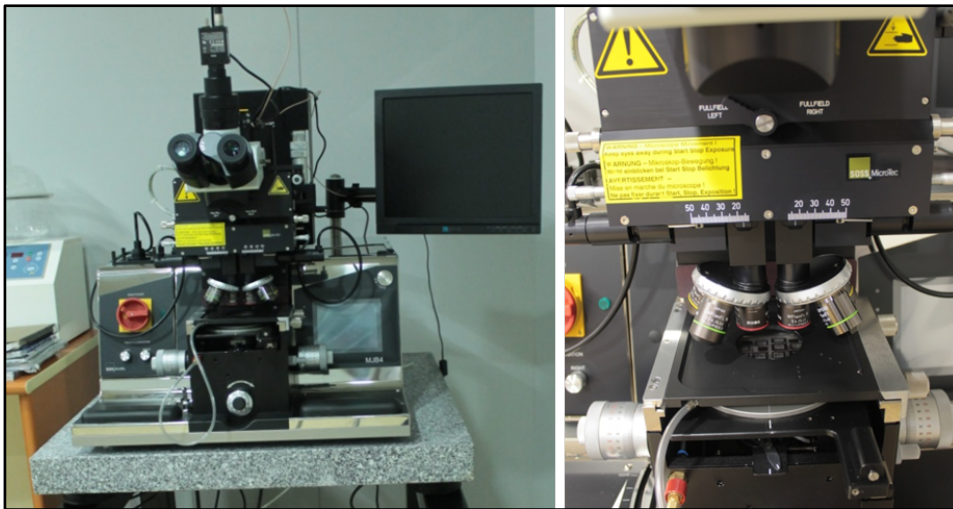
Dönel kaplama sisteminde yüzeye kaplanan fotorezistin yüzeydeki tutunumunun arttırılması amacıyla yapılan tavlama işlemi, Gazi-FOTONİK’te bulunan WiseStir MSH-20D ısıtıcı tabla (hot plate) kullanılarak yapıldı. Sistem 400 °C’ye kadar ısıtma işlemi yapabilmektedir. Ayrıca bu sistem manyetik karıştırıcı özelliğine de sahiptir. Isıtıcı tablaya ait görsel Resim 6.3’de verilmiştir.



Resim 6.1. SUSS MicroTec Delta-6RC dönel kaplama sistemi

6.2.5. Maske hizalama sistemi

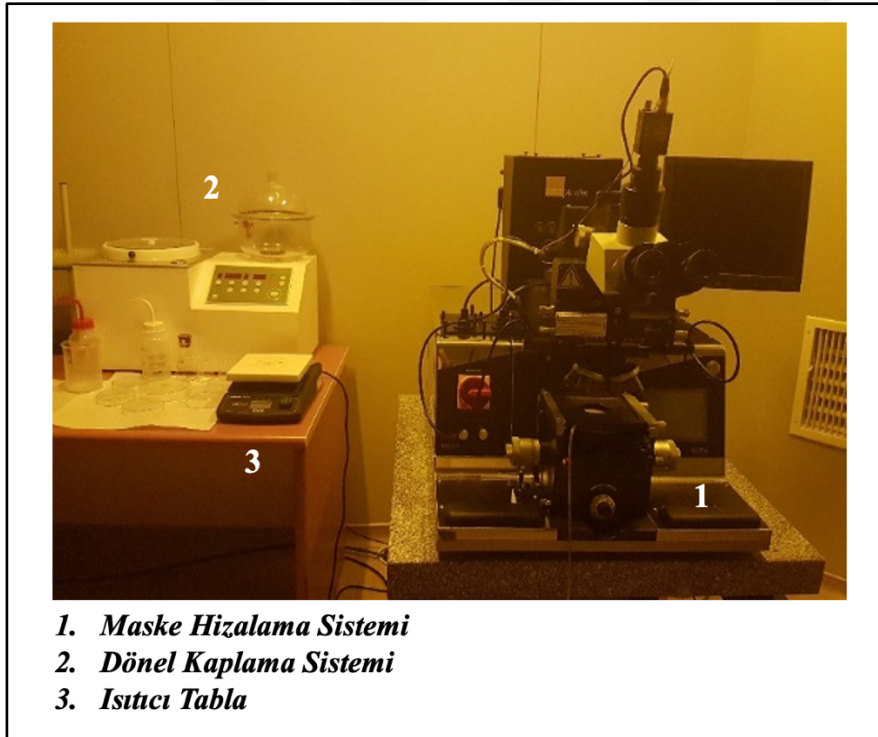
Maske hizalama (mask aligner) sistemi, fotolitografi tekniğinin en temel cihazıdır. Maske hizalama sistemi, fotomaske ile numunenin birbirine hizalanmasında ve fotorezist kaplanmış malzemenin UV ışık yardımıyla pozlanmasında kullanılmaktadır. Bu sistemlere entegre edilmiş optik mikroskop yardımı ile fotomaskenin yüksek hassasiyetle hizalanması sağlanmaktadır. x, y ve z doğrultularında bağımsız olarak kontrol edilen numune tutucu, kullanıcı tarafından yönlendirilerek hizalama gerçekleştirilmektedir. Maske hizalama sistemlerinde pozlama işleminde kullanılan kaynak, bir optik düzenek yardımıyla numune yüzeyine gönderilmektedir.



Resim 6.2. SUSS MicroTec MJB4 maske hizalama sistemi

Tez kapsamında gerçekleştirilen fotolitografi işlemlerinde, Gazi-FOTONİK’te bulunan SUSS MicroTec MJB4 maske hizalama sistemi kullanıldı (Resim 6.2). Bu sistem, 365 nm dalgaboyunda Hg-Arc pozlama lambasına sahiptir. Ayrıca sistemde, 3 eksenli bağımsız hareket imkanı sağlayan hizalama mekanizması ve optik mikroskop sistemi bulunmaktadır. Bu sistem yardımıyla elde edilen çözünürlük, yüzey ve çevre şartları göz önüne alınarak vakum kontak modunda $< 0,8 \mu\text{m}$, yumuşak kontak modunda $2 \mu\text{m}$, ve sert kontak modunda $1 \mu\text{m}$ civarındadır. Mikrometre hassasiyetinde yapılan fotolitografi işleminin oda ve çevre koşullarından korunarak maskedeki desenin düzgün biçimde numune yüzeyine aktarması amacıyla maske hizalama sistemi temiz oda şartlarında tutulmaktadır.

Gazi-FOTONİK bünyesinde bulunan ve tez kapsamında yapılan fotolitografi işlemlerinde kullanılan tüm sistemler Resim 6.3’de verildi.



Resim 6.3. Gazi-FOTONİK’te temiz oda şartlarında kullanılan fotolitografi sistemleri

6.3. Güneş Hücresi Fotolitografi İşlemleri

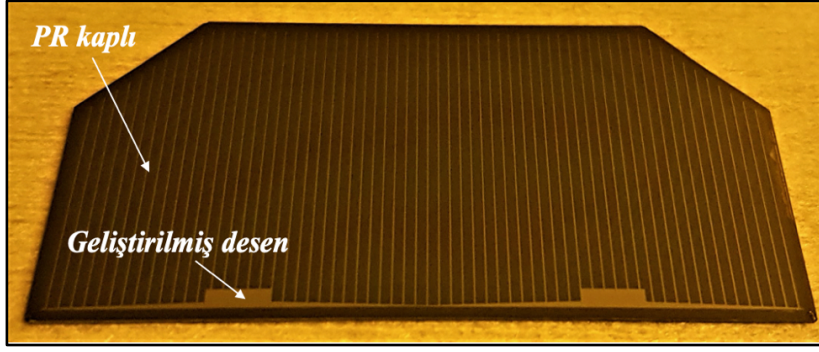
Güneş hücresi fabrikasyonu, yüksek enerji dönüşüm verimlilikleri elde edilebilmesi için üzerinde yoğun bir ar-ge çalışması gerektiren işlemlerin başında gelmektedir. Özellikle fotolitografi işlem adımlarının optimize edilmesi, düzgün litografi ve ardından yapılacak metalizasyonun kalitesini etkilemektedir. Bu nedenle prototip hücre boyutu olan 17 cm² alana sahip hücrelerin litografi işlemlerinden önce 3 cm x 2 cm boyutunda kesilmiş 6 cm² alanlı hücreler üzerinde deneme çalışmaları yapıldı. Deneme çalışmaları yardımıyla yaklaşık 10 µm fotorezist kalınlığına ulaşılabilecek döndürme hızının, homojen kaplama için döndürme süresinin, fotorezistin yüzeydeki düzgün tutunumu için ilk tavlama sıcaklığı ve süresinin, pozlama süresinin, desen geliştirme çözeltisinin oranı ve bu çözeltide beklenmesi gereken sürenin belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirildi. Yapılan optimizasyon sonucu elde edilen parametreler Çizelge 6.3’de sunuldu. Fotolitografi süreçlerinin optimizasyonunda kullanılan 6 cm² alanlı hücreler, daha sonra metalizasyonun optimizasyon çalışmalarında da kullanıldı.

Çizelge 6.3. Optimize edilmiş fotolitografi parametreleri

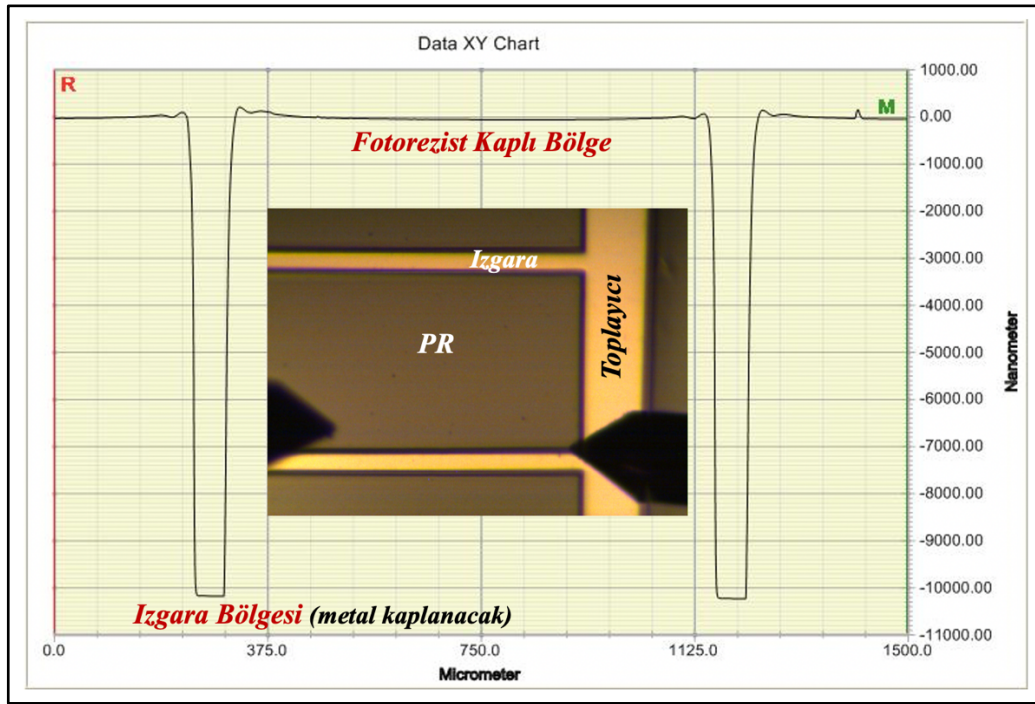
<i>Parametre</i>	<i>Belirlenen Değer</i>
<i>Fotorezist</i>	AZ nLof-2070
<i>Döndürme Hızı ve Süresi</i>	1750 rpm, 40 sn
<i>Fotorezist Kalınlığı</i>	~ 9-10 µm
<i>İlk Tavlama Sıcaklığı ve Süresi</i>	110 °C, 90 sn
<i>Pozlama Süresi</i>	30 sn
<i>Son Tavlama Sıcaklığı ve Süresi</i>	110 °C, 90 sn
<i>Desen Geliştirme Çözeltisi</i>	1 AZ400K: 3 DI-H ₂ O
<i>Desen Geliştirme Süresi</i>	1 dk

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen optimizasyon çalışmalarının ardından, belirlenen parametreler (Çizelge 6.3) kullanılarak 17 cm² alana sahip prototip hücrelere uygulanan fotolitografi işlem adımları aşağıda sıralandı.

- 1) Fotolitografi işleminin ilk adımı temizliktir. Hücre yüzeyinde oluşan oksit tabakası ve diğer organik kirliliklerin uzaklaştırılması amacıyla temizlik işlemi uygulandı. Hücre dilimleri asidik çözelti (1 HF: 80 DI-H₂O) içerisinde 1 dakika bekletildi ve hemen ardından DI-H₂O ile durulandı. Temizliğin ikinci adımında organik kirlilikleri uzaklaştırmak için sırasıyla aseton ve alkol içerisinde 1'er dakika bekletilen hücreler, DI-H₂O ile durulanarak N₂ gazı altında kurutuldu.
- 2) Temizlik işlemi tamamlanan hücre dilimleri, dönel kaplama sisteminin vakum tutuculu başlığına yerleştirildi ve vakum anahtarı açılarak hücrenin sabitlenmesi sağlandı. AZ nLof-2070 negatif fotorezisti, tüm hücre yüzeyini kaplayacak ve hava kabarcığı oluşmayacak biçimde yayıldı. Sistemin kaplama haznesi kapatıldıktan sonra dönme hızı 1750 rpm, dönme süresi ise 40 saniye olarak set edildi. Döndürme işlemine başlanarak belirlenen hız ve sürede fotorezist malzemenin hücre yüzeyine düzgünce yayılması beklendi.
- 3) Kaplama işleminin ardından vakum tutucudan alınan hücre, ısıtıcı tabla üzerine yerleştirildi. Optimizasyon çalışmalarıyla belirlenen ilk tavlama işlemi için 110 °C'de 90 saniye boyunca beklendi. Böylelikle fotorezist malzeme içerisindeki çözücülerin buharlaşması ile yüzeye güçlü biçimde tutunmuş kaplama elde edildi.
- 4) İlk tavlama işleminin ardından hücre dilimi, maske hizalama sistemine yerleştirildi. Şekil 6.4'de verilen fotomaske, hücre dilimi üzerine ortalı biçimde hizalandı. Sert kontak modunda UV ışık altında 30 saniye pozlama işlemi gerçekleştirildi.
- 5) Pozlama işlemi sonrası son tavlama işlemi gerçekleştirildi. Pozlanan hücre dilimi, ısıtıcı tabla üzerine alınarak 110 °C'de 90 saniye boyunca beklendi.
- 6) Son tavlama işleminin ardından yüzeye işlenen desenin ortaya çıkartılması için desen geliştirme adımına geçildi. AZ400K ve DI-H₂O içeren çözelti 1:3 oranında hazırlandı. Hücre dilimleri bu çözelti içerisinde yaklaşık 1 dakika boyunca bekletilerek ışık görmeyen bölgelerin çözünmesi sağlandı. Desen geliştirme çözeltisinden sonra hücre dilimi DI-H₂O ile durulandı ve N₂ gazı ile kurutuldu. Fotolitografi işlemi tamamlanmış ve metalizasyon işlemine hazır hücre dilimi Resim 6.4'de verildi. Resim 6.5'de verilen profilometre ölçüm sonucu yaklaşık 10 µm fotorezist kalınlığı elde edildiğini göstermektedir. Ayrıca, aynı resim içerisinde hücre dilimi üzerindeki fotorezist kaplı ve desenlenmiş bölgeler görülmektedir.



Resim 6.4. Fotolitografi işlemi tamamlanmış metalizasyona hazır hücre dilimi



Resim 6.5. Desen geliştirme adımı sonrası hücre yüzeyinin profilometre ölçümü

Desen geliştirme adımıyla birlikte tamamlanan fotolitografi işleminden sonra metalizasyon işlemine geçildi. Metalizasyon işlemi ile, hücre yüzeyinde desenlenen metal ızgaralı yapı elde edildi.

6.4. Güneş Hücresi Metalizasyon İşlemi

Güneş hücresinin arka metal kontak ve litografi sonrası ön ızgara metal kontak yapısı, metalizasyon işlemi ile oluşturuldu. Güneş hücresi aygıt fabrikasyonunda, hücrede oluşan fotoakımın toplanmasını sağlayan metalik kontaktların metalizasyon işlemi oldukça önemli bir adımdır. Fotolitografik teknikler yardımıyla desenlenen hücre yüzeyine, buharlaştırma

(evaporation) veya püskürtme (sputtering) gibi farklı sistemlerde metal kaplama işlemi gerçekleştirilmektedir. Metal kontak malzemesinin seçimi, yüzeyine kaplandığı yarıiletken malzeme ile ohmik kontak oluşturarak seri direnci en aza indirecek şekilde yapılmalıdır. Seçilen metal malzemenin, kaplandığı yüzeye tutunumu da oldukça önemli bir durumdur. Ayrıca, hücrenin maruz kalacağı yüksek sıcaklıklarda difüzyonunun oldukça az olması gerekmektedir. Düşük özdirenci ve n-GaAs yarıiletkeni ile oluşturduğu düşük seri dirençli metal/yarıiletken kontak yapısı nedeniyle gümüş (Ag), GaAs tabanlı güneş hücrelerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır. Çok eklemli güneş hücrelerinin ürettiği akım 500 mA'lere kadar ulaşabilmektedir. Bu yüksek akımı düşük dirençli kontaklar kullanarak en az kayıpla toplamak için kontak kalınlığının yüksek olması gerekmektedir. Literatürde uzay kalifiye özellikte ticari olarak satılan, 17 ile 32 cm² arasında değişen alana sahip güneş hücrelerinde yaklaşık 5-8 µm metal kontak kalınlığı kullanılmaktadır. Ayrıca bu hücreler, Au/Ag metal kontak yapısına sahiptir [32,159]. Düşük özdirençli Ag metali üzerine kaplanan Au katmanı, kolay oksitlenen ve direnci artan gümüşün oksitlenmesini engellemektedir.

Tez çalışmasında kullanılacak metal kontak yapısının belirlenmesi amacıyla 6 cm² alanlı hücreler üzerinde kalibrasyon çalışmaları yapıldı. Fotolitografi adımının optimizasyonunda kullanılan bu hücreler, metalizasyon optimizasyon adımı da kullanıldı. İlk olarak, desenlenmiş yüzey üzerinde buharlaştırma tekniği ile Au (20 nm)/Ag (5 µm) kontak yapısı denendi ancak yüzey tutunumunda başarı sağlanamadı. Ayrıca Ag'nin yüksek difüzyon hızı nedeniyle tavlama işlemi sırasında hücre yapısı içerisine kolayca difüz ettiği ve hücrenin sönt direncini (R_h) düşürdüğü gözlemlendi. Bu durum hücrede kısa devre akımının artmasına ve kısa devre durumuna neden olmaktadır.

Yapılan ikinci deneme çalışmasında, n-GaAs keş tabaka ile Ag metali arasına difüzyonun engellenmesini ve yüzey tutunumunun artırılmasını sağlayacak AuNiGe metalik alaşımı kaplandı. Ni ve Ge metallerinin yüksek atomik boyutu ve düşük difüzyonu nedeniyle Au ile oluşturacakları alaşımın özelliklerinden faydalandı. Ag metalinin oksitlenmesini engellemek amacıyla kaplanan Au metali yerine yine tavlama sırasında Au/Ag arasında oluşacak difüzyonun önlenmesi için AuNiGe alaşımı tercih edildi. İkinci metalizasyon denemesinde buharlaştırma tekniği ile elde edilen AuNiGe (20 nm)/Ag (5 µm)/AuNiGe (20 nm) çok katmanlı kontak yapısı kullanıldı. Ancak bu metalizasyon yapısının yüksek sıcaklıkta (> 250 °C) yapılan tavlama işlemlerinde metal/yarıiletken arayüzeyinde metal difüzyonu yaratarak R_h 'da ve hücre veriminde azalmaya neden olduğu gözlemlendi. Ayrıca bu

metalizasyon yapısının, uzay kalifiye güneş hücrelerinin yeterliliğini belirleyen testlerden biri olan tutunma (bant) testi (ECSS-E-ST-20-08C, 7.5.8) sonuçlarının isterleri karşılayamadığı belirlendi.

Metal/yarıiletken kontaklarda oluşabilecek difüzyonun engellenmesi için difüzyon bariyeri kullanımı uygulanan yöntemlerden biridir [160-162]. Literatürde difüzyon bariyeri olarak kullanımı olan TiN bileşiği püskürtme sistemiyle biriktirilerek, AuNiGe (20 nm)/Ag (5 μ m)/TiN (15 nm) metalizasyon yapısı uygulandı ancak TiN/Ag arayüzeyinde olduğu tahmin edilen gerilmeler nedeniyle hücre yüzeyinde tutunum sağlanamadı. Ayrıca dielektrik bir malzeme olan TiN katmanının kontak direncini arttırdığı ve toplanan akımda azalma meydana geldiği gözlemlendi.

Diğer çalışmada ise, güneş hücre yapısının alt yüzeyinde bulunan p-Ge alttaş ve üst yüzeyinde bulunan n-GaAs kep tabakası içerisinde difüzyon katsayısı oldukça düşük olan Ti metalinin hem tutunumu artırıcı hem de difüzyon bariyeri olarak kullanılması denendi. Yapılan optimizasyon sonucu AuNiGe (20 nm)/Ag (5 μ m)/Ti (20 nm) metalizasyon yapısının uygun olduğu belirlendi. Optimize edilen metalizasyon yapısının ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.8 maddesine göre uygulanan tutunma testinden başarıyla geçtiği görüldü. Ayrıca uygulanan yeni kontak yapısının yüksek sıcaklıklı tavlama işleminde (> 250 °C) difüzyonu ve seri direnci azaltarak hücre veriminde artışa neden olduğu belirlendi.

Tez çalışmasında büyütülen GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücre yapısı için tutunma testinden geçebilecek dayanımda, düşük seri dirençli ve yüksek sıcaklık tavlamlarında difüzyonu düşük olan AuNiGe (20 nm)/Ag (5 μ m)/Ti (20 nm) çok katmanlı metalizasyon yapısının en uygun tasarım olduğu belirlendi. Fotolitografi işlemleri tamamlanan 17 cm² alanlı hücre dilimleri üzerine Gazi-FOTONİK bünyesinde bulunan sistemler yardımıyla tasarlanan metalizasyon yapısı kaplandı. 20 nm kalınlığındaki Ti katmanı magnetron püskürtme sistemi, 5 μ m kalınlığındaki Ag ve 20 nm kalınlığındaki AuNiGe katmanları ise termal buharlaştırma sistemi kullanılarak oluşturuldu. Ön ve arka yüzey metalizasyon işleminin ardından ohmik kontak oluşturulması ve yüzey tutunumunun artırılması amacıyla hücreler hızlı ısı tavlama (RTA) sisteminde tavlandı. Metalizasyon işleminde kullanılan sistemler ve kaplama parametreleri ayrıntılı biçimde tanıtıldı.

6.4.1. Magnetron püskürtme sistemi

Püskürtme işlemi, alttaş üzerine kaplanacak olan hedef (target) malzemenin, hedef yüzeyine yakın bölgede oluşturulan plazmanın içerdiği iyonlar ve yüksek enerjili yüksüz parçacıklarla bombardıman edilmesidir. Bombardıman sonucu hedeften kopan atomlar/moleküller alttaş üzerinde birikerek ince film meydana getirir. Püskürtme tekniği, vakum ortamında ince filmlerin biriktirilmesini sağlayan en önemli fiziksel biriktirme yöntemlerinden biridir.

Püskürtme tekniği ile ince film birikimi sürecinde yüksek enerjili argon (Ar) plazması, hedef malzemeye yönlendirilir ve parçacık bombardımanı yoluyla malzemedan kopan atomların alttaş üzerine biriktirmesi sağlanır. Püskürtme işleminde kaplama sıcaklıkları, buharlaştırma tekniğinde kullanılanlardan daha düşüktür. Bu nedenle farklı sıcaklıklarda ve oranlarda buharlaşabilen bileşikler aynı oranda püskürtülebilmektedir. Özellikle yüksek buharlaşma sıcaklığına sahip malzemelerden ince film oluşturulmasında bu teknik yaygın olarak kullanılmaktadır. Püskürtme tekniği ile kaplanan malzemeler, fotovoltaik uygulamalar ve optoelektronik aygıtlar gibi yarıiletken endüstrisinin pek çok uygulamasında kullanılmaktadır. Yüksek kaplama homojenliği nedeniyle çoğunlukla tercih edilen magnetron püskürtme sistemi, doğru akım (DC) veya radyo frekans (RF) ile çalıştırılabilmektedir. Metal gibi iletken malzemelerin kaplamasında genellikle DC kaynak kullanılırken, dielektrik ve oksit bazlı malzemelerin kaplamasında ise RF püskürtme kaynağı tercih edilmektedir.

Tez çalışmasında tasarlanan çok katmanlı metalizasyon adımının ilk katmanı olan Ti metal, yüksek buharlaşma sıcaklığına sahiptir ($\sim 1750\text{ }^{\circ}\text{C}$). Bu durum, buharlaştırma tekniğinde çok yüksek sıcaklıklara çıkılmasını gerektirmektedir. Fotorezist malzemenin $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ üzerinde kimyasal yapısının bozulması, hücre yüzeyinin zarar görmesine ve desen kaldırma işleminin başarısız olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle Ti metalizasyonu için magnetron püskürtme sistemi tercih edilmiştir. Ti metalizasyonu, Gazi-FOTONİK'te bulunan ve Resim 6.6'da verilen BesTec marka magnetron püskürtme sistemi kullanılarak gerçekleştirildi. Sistem, 3 DC ve 2 RF püskürtme kaynağına sahip olup reaktif ve reaktif olmayan kaplamalara imkan vermektedir. 3 inç alttaşlara püskürtme işlemi yapabilen sistem, iki vakum odasından oluşmaktadır. Giriş odasında alttaşların yerleştirildiği kasetlik ve ters püskürtme sistemi bulunmaktadır. Silindir biçimli kaplama odası, püskürtme kaynakları, kaynak kesiciler ve silindirik koordinatlarda hareket edebilen numune tutucudan

oluşmaktadır. Sistem, turbo moleküler pompa kullanmakta ve 10^{-8} mbar vakum değerine ulaşabilmektedir.



Resim 6.6. BesTec magnetron püskürtme sistemi

Çok katmanlı metalizasyon işleminin 20 nm kalınlığındaki Ti katmanı, Çizelge 6.4’de verilen kaplama parametreleri kullanılarak biriktirildi.

Çizelge 6.4. Ti metalizasyonunda kullanılan kaplama parametreleri

Parametre	Değer
P_{base} (mbar)	$4,1 \times 10^{-8}$
$P_{kaplama}$ (mbar)	$1,7 \times 10^{-3}$
Ar Gaz Akışı (sccm)	5
DC Kaplama Gücü (W)	100
Alttaş Sıcaklığı (°C)	Oda sıcaklığı
Kaplama Hızı (Å/sn)	0,6
Hedef alttaş mesafesi (mm)	90
Kalınlık (Å)	200

P_{base} : Sistemin taban basıncı, $P_{kaplama}$: Sistemin kaplama basıncı

6.4.2. Termal buharlaştırma sistemi

Metalizasyon işlemlerinde kullanılan en yaygın tekniklerden biri buharlaştırmadır. Yüksek buhar basıncına sahip metal malzemeler, vakum ortamında tungsten (W) potalar içerisinde uygulanan yüksek akımla buharlaştırılarak alttaş üzerinde biriktirilir. Buharlaştırma işlemi homojen kaplamaya imkan vermektedir.

Tez çalışması kapsamında güneş hücresi metalizasyonunun Ag ve AuNiGe kaplama adımları, Gazi-FOTONİK'te bulunan ve Resim 6.7'de verilen Nanovak marka NVTH-350 model termal buharlaştırma sistemi kullanılarak yapıldı. Sistem, maksimum 4 inç çaplı numunelerin metal kaplamasında kullanılmaktadır. Dört adet bağımsız buharlaştırma potası ve güç kontrol ünitesine sahip sistemde aynı veya farklı metaller aynı anda buharlaştırılabilmektedir. Sistem, 10^{-7} Torr'a kadar inebilen vakum ortamında Ag, Au, Pt, Ni ve Al gibi metallerin ve AuZn, AuGe, AuNiGe ve NiCr gibi metalik alaşımların uygulanan akımla buharlaştırılmasını ve numune yüzeyine kaplanmasını sağlamaktadır. Ayrıca buharlaştırma sisteminin alttaş tutucusu 400 °C'ye kadar ısıtılabilmekte ve homojen kaplama sağlanması için alttaş 30 rpm'e kadar döndürülebilmektedir.



Resim 6.7. Nanovak NVTH-350 termal buharlaştırma sistemi

Püskürtme sisteminde yapılan Ti metalizasyonunun ardından termal buharlaştırma sistemine transfer edilen hücrenin AuNiGe (20 nm)/Ag (5 μ m) katmanlı metalizasyon işlemi, yüksek saflıkta (% 99,99) Ag ve AuNiGe parçaları kullanılarak termal buharlaştırma sisteminde

Çizelge 6.5’de verilen parametrelerle kaplandı. Buharlaştırma işleminde bir pota AuNiGe, iki pota ise Ag kaplaması için kullanıldı ve Ag potalar aynı anda buharlaştırıldı.

Çizelge 6.5. Ag ve AuNiGe buharlaştırma işleminde kullanılan kaplama parametreleri

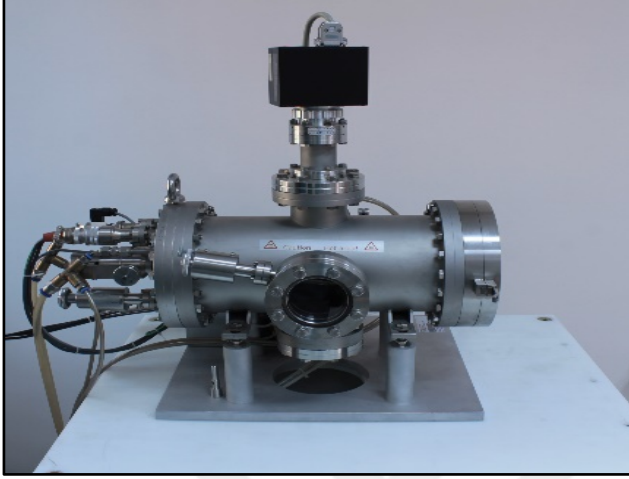
<i>Parametre</i>	<i>Değer (AuNiGe)</i>	<i>Değer (Ag)</i>
P_{base} (Torr)	$3,5 \times 10^{-6}$	$3,5 \times 10^{-6}$
$P_{kaplama}$ (Torr)	$7,8 \times 10^{-6}$	$8,5 \times 10^{-6}$
Alttaş Dönme Hızı (rpm)	5	5
Alttaş Sıcaklığı (°C)	Oda sıcaklığı	Oda sıcaklığı
Kaplama Gücü (W)	270	270
Kaplama Hızı (Å/sn)	0,4	52
Kalınlık (Å)	200	50,000

6.4.3. Hızlı ısıt tavlama (RTA) sistemi

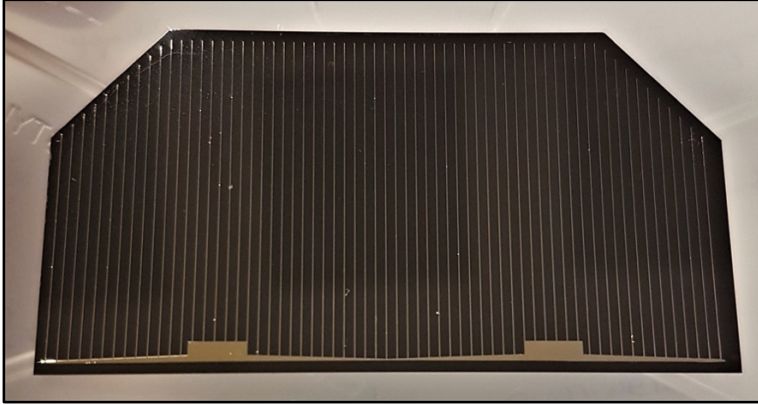
Hızlı ısıt tavlama (RTA) sistemi, vakum ortamında (10^{-6} mbar) veya çeşitli gaz ortamlarında halojen lambalı ısıtıcı ile yüksek sıcaklıklara (1000 °C) hızlı bir şekilde çıkabilen ve hızlı soğumaya imkan tanıyan bir tavlama fırınıdır. Bu tez çalışmasında, metalizasyon işlemleri tamamlanan güneş hücreleri, RTA sisteminde tavlansak metal kontakların ohmikleştirilmesi ve yüzey tutunumlarının artırılması sağlandı. Sistem içerisine yerleştirilen hücre dilimi, 10^{-6} mbar vakum ortamında 300 °C’de 90 saniye boyunca tavlandı. Gazi-FOTONİK’te bulunan ve tez çalışmasında kullanılan RTA sistemi Resim 6.8’de verildi.

Metalizasyon ve tavlama işlemlerinin ardından asidik aşındırma çözeltisi kullanılarak metal kaplanmamış bölgelerdeki n+GaAs kep tabakasının kaldırılması gerekmektedir. Kep tabakası hücre katmanlarını litografi ve metalizasyon süreçlerinde zarar görmesinden korurken foton geçişini engellemektedir. Aşındırma işlemi pencere katmana kadar yapılmakta ve 15,5 cm²’lik aktif alan elde edilmektedir. Yaklaşık 100 nm kalınlığındaki n+GaAs kep tabakasının aşındırılmasında kimyasal ıslak aşındırma yöntemi kullanıldı. Aşındırma çözeltisi olarak GaAs aşındırmasında yaygın biçimde kullanılan sitrik asit çözeltisi uygulandı. Kullanılan çözelti; 10 (10 gr C₆H₈O₇+10 ml DI-H₂O) : 4 H₂O₂’dir. Bu

çözelti GaAs keş tabakayı aşındırırken AlInP pencere katmanı aşındırmamaktadır. Fotolitografi, metalizasyon, tavlama ve aşındırma işlemleri tamamlanarak yansıma önleyici kaplama (ARC) adımına hazır hale getirilen güneş hücresine ait görsel Resim 6.9’da verildi.



Resim 6.8. Hızlı ısı tavlama (RTA) sistemi



Resim 6.9. Metalizasyon, tavlama ve aşındırma işlemleri tamamlanan hücre dilimi

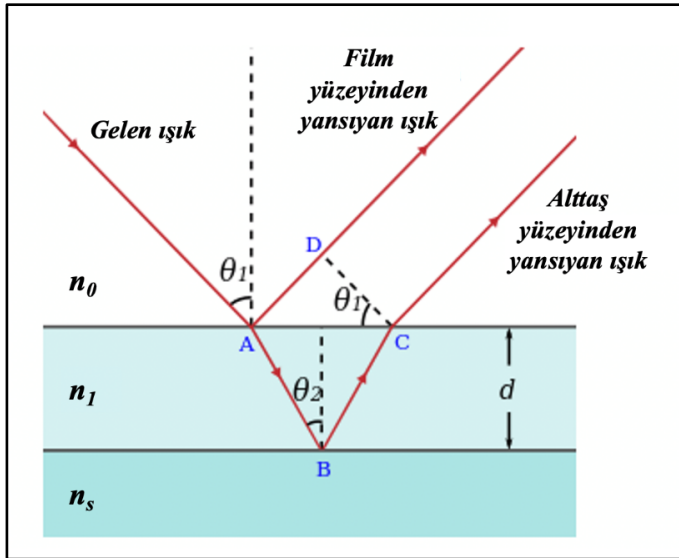
6.5. Yansıma Önleyici Katman Tasarımı

Güneş hücreleri, üretildikleri yarıiletken malzemelerin yüksek kırılma indisi ($n>3$) nedeniyle yaklaşık % 30’luk bir optik yansıma kaybına uğramaktadır [40]. Optik yansıma kayıpları, güneş hücresinin aygıt çıktı parametreleri üzerinde oldukça etkilidir. Yüzeyden geriye yansıyan fotonlar, hücrede foton-elektron dönüşümüne katkı sağlayamadığından aygıt performansını sınırlamaktadır. Özellikle, FF ve I_{sc} değerlerinin optik yansılardan dolayı azalması, hücre veriminin önemli ölçüde düşmesine neden olur. Yüzeyde meydana gelen yansımayı azaltmak için yüzeyi kontrollü pürüzlendirme (texturing) ve yüzeydeki yansımayı

azaltıcı bir ince film ile kaplama yöntemleri uygulanmaktadır. Bu yöntemlerin ortak amacı, güneş hücresi yüzeyinde meydana gelen yaklaşık % 30'luk yansıtıcılık değerini güneş hücresinin spektral soğurma bölgesi boyunca ortalama % 5'in altına düşürmektir [40].

Güneş hücresi yüzeyinin uygun kırılma indisine sahip bir malzeme ile kaplanması, optik yansıma kayıplarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu amaçla tek katmanlı yansıma önleyici kaplamalar (SLARC) veya çok katmanlı yansıma önleyici kaplamalar (MLARC) kullanılmaktadır. Özellikle güneş spektrumun çok geniş bir bölgesinde (300-1800 nm) % 5'in altında yansıma değeri istendiğinden, uygun kırılma indislerine sahip malzemelerin üst üste kaplanması ile elde edilen MLARC'ler tercih edilmektedir [40].

Yansıma önleyici kaplamalar (ARC), yüzeye kaplanan düşük kırılma indisli ($n < 3$) ince filminden yansıyan ışık ile film/yüzey arayüzeyinden yansıyan ışığın faz değişimine uğraması ve oluşan faz farkının yıkıcı girişim meydana getirerek yansıyan ışıkta azalma oluşturmaya prensibine dayanmaktadır. n_s kırılma indisli alttaş üzerine n_1 kırılma indisine ve d kalınlığına sahip bir ince film oluşturulduğunda, gelen ışığın bir kısmı film yüzeyinden yansır diğer kısmı ise geçer. Geçen ışık ise filmin kalınlığı kadar yol aldıktan sonra alttaş yüzeyinden tekrar yansır ve bir kısmı geçer. Alttaş yüzeyinden yansıyan ışık tekrar film kalınlığı kadar yol aldıktan sonra ortamı terk eder. İnce film yüzeyinden ve alttaş yüzeyinden yansıyan ışık arasında optik yol farkı (Δ) meydana gelmektedir. İnce film üzerine gelen ışığın izlediği optik yol Şekil 6.5'de verildi.



Şekil 6.5. İnce film yüzeyine gelen ışığın izlediği yol

Yansıyan ışıklar arasındaki optik yol farkı Eş. 6.1 ile ifade edilmektedir.

$$\Delta = 2n_1d \cos \theta_2 \quad (6.1)$$

Optik yol farkı dalgaboyunun tam katlarına eşit olduğunda, yani m bir tamsayı olmak üzere $\Delta = m\lambda$ durumunda farklı yüzeylerden yansıyan ışık arasında yapıcı girişim meydana gelir ve toplam yansıyan ışık maksimum olur. 180° 'lik optik yol farkına karşılık $\lambda/2$ kadar faz farkı meydana gelmektedir. Oluşan $\lambda/2$ faz farkı, yansıyan ışınların birbirini sönmülmesine neden olarak yansıtıcılığı sıfıra indirir.

Yıkıcı girişim şartı, çeyrek dalgaboyu kuralı olarak da bilinmekte ve yüzeye dik gelen ışık durumunda ($\theta_2=0$) Eş. 6.2 ile gösterilmektedir. Burada, λ gelen ışığın dalgaboyu, n_1 yansıma önleyici ince film malzemenin kırılma indisi ve d yansıma önleyici filmin kalınlığıdır. Bu eşitlik, λ dalgaboyunda yansıma oluşturmeyen ($R=0$) kaplama için gerekli kırılma indisi ve kalınlığın hesaplanmasında kullanılmaktadır.

$$\lambda = 4dn_1 \quad (6.2)$$

Yansıma önleyici kaplamaların optik performansını etkileyen en önemli parametreler, kaplamayı oluşturan katmanların kırılma indisleri ve kalınlıklarıdır. Kırılma indisi, kaplanan yüzeyin kırılma indisinden büyük olan filmlerle yansıtma arttırılırken (yüksek yansıtıcı kaplamalar), kırılma indisi küçük olan filmlerle yansıtma azaltılmaktadır (yansıtma azaltıcı kaplamalar). Yansımayı minimuma indirecek yansıma önleyici malzemenin kırılma indisi (n_1), hava (n_0) ve filmin kaplandığı yüzeyin kırılma indisinin (n_s) geometrik ortalaması ile belirlenir (Eş. 6.3). Kalınlığın değişimi de hem optik geçirgenlik hem de çeyrek dalgaboyu kuralı gereği optik yansıtıcılıkta etkilidir [165].

$$n_1 = \sqrt{n_0 n_s} \quad (6.3)$$

Eş. 6.3, tek katmanlı filmler için ideal kırılma indisinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. N katmanlı yansıma önleyici filmler için bu eşitlik genişletildiğinde, Eş. 6.4'de verilen denklem kullanılarak minimum yansıtıcılığı sağlayan optimum kırılma indisi belirlenebilmektedir [166,167].

$$n_j = n_0^{\frac{N-j+1}{N+1}} n_s^{\frac{j}{N+1}} \quad (6.4)$$

Burada N , yüzeye kaplanan yansıma önleyici katman sayısını ifade ederken j , yansıma önleyicinin j . katmanını tanımlamaktadır. n_0 ve n_s ise sırasıyla havanın ve yansıma önleyici katmanların kaplandığı yüzeyin kırılma indisidir [40].

Fresnel denklemlerinin kompleks matris formuna dayanan optik matris yaklaşımı, film yansıtıcılığının teorik olarak hesaplanmasında kullanılan en etkili yöntemlerden bir tanesidir [40,168,169]. Her katman için tanımlanan matris, o katmanın kırılma indisi ve kalınlığını içermektedir. λ dalgaboylu ışığın N katmanlı bir ARC sistemine dik gelme açısında oluşturduğu teorik yansıma değeri optik matris yaklaşımı kullanılarak şu şekilde hesaplanır [40,169],

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^N \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \sin \delta_j \\ i n_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ n_s \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \quad (6.6)$$

burada n_j ve d_j , sırasıyla j . katmanın kırılma indisi ve kalınlığıdır. δ , katmanın λ dalgaboyundaki etkin optik kalınlığıdır. n_s ise, yansıma önleyici filmin kaplandığı yüzeyin kırılma indisidir. Y , optik admittans olarak tanımlanır ve C / B 'ye eşittir. Bu durumda, film yüzeyinin toplam yansıtıcılığı (R) şu şekilde ifade edilir;

$$R = |r^2| = \left| \frac{n_0 - Y}{n_0 + Y} \right|^2 \quad (6.7)$$

Kompleks matrisin çözümüne dayanan ve farklı dalgaboylarındaki yansıtıcılığın hesaplanmasında kullanılan pek çok program bulunmaktadır. Filmetrics yansıma hesaplama programı, teorik yansıtıcılık hesabında kullanılan basit ve kullanıma açık yazılımlardan bir tanesidir [170]. Bu yazım aracılığıyla, kalınlık ve kırılma indisi girilerek tasarlanan tek veya çok katmanlı ince film yapısının yansıtıcılığı, istenilen dalgaboyu aralığında belirlenebilmektedir.

Pencere katmanında kullanılan AlInP yarıiletken bileşiği, 650 nm dalgaboyunda 3,15 kırılma indisine sahiptir [171]. Ayrıca GaInP/GaAs/Ge üç eklemli güneş hücrelerinde yaygın olarak kullanılan yansıma önleyici malzemelerin kırılma indisleri Çizelge 6.6’da verildi.

Eş. 6.4 ve Çizelge 6.6 göz önüne alındığında, tez çalışmasında üretilen üç eklemli GaInP/GaAs/Ge güneş hücresinde kullanılacak tek katmanlı ($N=1$) yansıma önleyici film için uygun kırılma indislerine sahip olan Al_2O_3 , Si_3N_4 ve alternatif olarak Ta_2O_5 malzemeleri kullanılabilir. Özellikle Ta_2O_5 , son yıllarda mekanik ve radyasyon dayanımı ile dikkat çekmekte ve yansıma önleyicilerde kullanımı yaygınlaşmaktadır. Benzer şekilde çift katmanlı ($N=2$) ARC için Al_2O_3/TiO_2 ve SiO_2/Ta_2O_5 tasarımları kullanılabilir. Üç katmanlı ($N=3$) tasarımda ise $SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$ kaplaması ön plana çıkmaktadır.

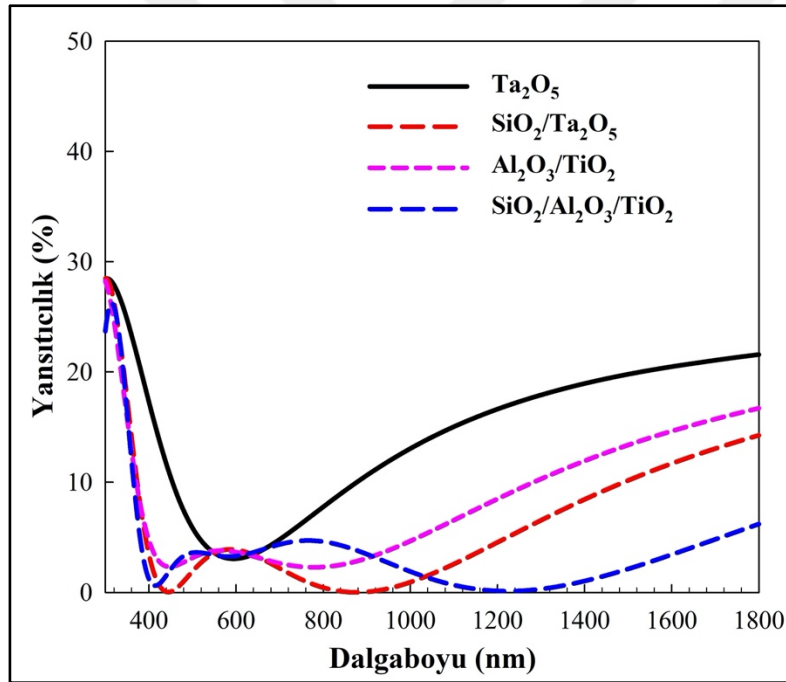
Çizelge 6.6. ARC olarak kullanılan bazı malzemelerin kırılma indisleri

<i>Malzeme</i>	<i>Kırılma İndisi ($\lambda=650$ nm)</i>
SiO_2	1,46
TiO_2	2,62
Ta_2O_5	2,12
Al_2O_3	1,76
Si_3N_4	2,00
MgF_2	1,36
ZnS	2,36

Ta_2O_5 , SiO_2/Ta_2O_5 , Al_2O_3/TiO_2 ve $SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$ ARC’lerin büyütülen üç eklemli güneş hücre yapısı üzerindeki teorik tasarım parametreleri ve Filmetrics programı ile elde edilen ortalama yansıtıcılık değerleri Çizelge 6.7’de verildi. Ayrıca bu yapıların üç eklemli güneş hücrelerinin soğurma bölgesi olan 300-1800 nm dalgaboyu aralığındaki λ -% R grafikleri Şekil 6.6’da sunuldu. Elde edilen sonuçlar, tez çalışmasında üretilen üç eklemli güneş hücresi için 300-1800 nm dalgaboyu aralığında en düşük ortalama yansıtıcılığa sahip olan $SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$ üç katmanlı ARC tasarımının en uygun yansıma önleyici yapısı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 6.7. Tasarlanan ARC'lere ait parametreler ve ortalama yansıtıcılık değerleri

ARC Tasarımı	Katman	Kırılma İndisi $\lambda=650\text{ nm}$	Kalınlık (nm)	Yansıtıcılık (%) $\lambda=300-1800\text{ nm}$
Ta_2O_5	Ta_2O_5	2,12	70	14,49
SiO_2/Ta_2O_5	SiO_2	1,46	100	6,01
	Ta_2O_5	2,12	70	
Al_2O_3/TiO_2	Al_2O_3	1,77	80	8,43
	TiO_2	2,57	55	
$SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$	SiO_2	1,46	120	3,50
	Al_2O_3	1,77	80	
	TiO_2	2,57	55	



Şekil 6.6. Tasarlanan ARC'lerin 300-1800 nm aralığındaki yansıtıcılık spektrumu

6.6. Yansıma Önleyici Katman Oluşturulması

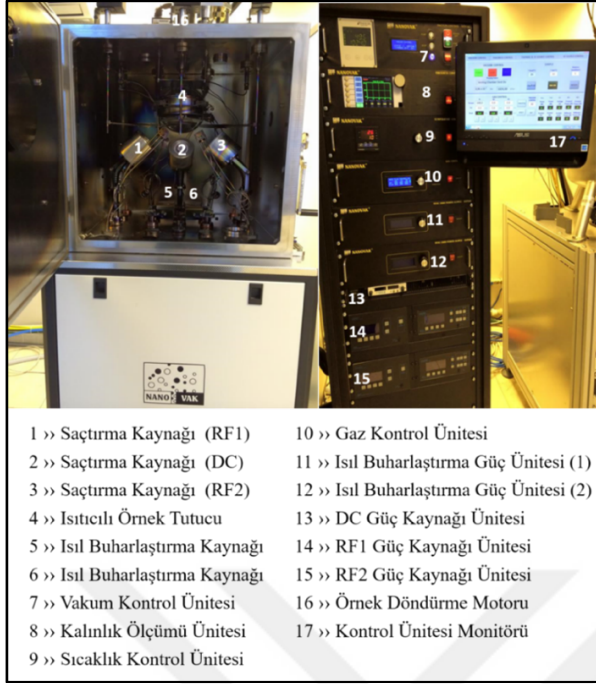
ARC tasarım adımının ardından, tasarlanan katmanların metalizasyonları tamamlanan hücreler üzerine kaplaması gerçekleştirildi. Deneme çalışmaları 3 cm x 2 cm boyutlu hücre parçaları kullanılarak yapıldı. Teorik ve deneysel sonuçların incelenmesinin ardından belirlenen en optimize ARC tasarımı 17 cm² alanlı prototip hücreler üzerine kaplandı. Yansıma önleyici ince filmlerin kaplama işlemi, eş-püskürtme (co-sputtering) ve Bölüm

6.4.1’de tanıtılan magnetron püskürtme sistemleri kullanılarak yapıldı. ARC tasarımı belirlenen malzemelerden Ta_2O_5 ve SiO_2/Ta_2O_5 kaplamaları eş-püskürtme sistemi kullanılarak yapıldı. Diğer tasarımlar olan Al_2O_3/TiO_2 ve $SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$ çok katmanlı AR kaplamaları ise magnetron püskürtme sistemi kullanılarak gerçekleştirildi.

6.6.1. Eş-püskürtme sistemi

Eş-püskürtme (co-sputtering), reaktif ve reaktif olmayan ince filmler, çok katmanlı kaplamalar, oksitli, nitrürlü, karburlu ve metalik kaplamalar için kullanılan, temel püskürtme tekniği ile benzer fiziksel olayları içeren bir ince film üretim tekniğidir. Eş-püskürtme tekniğinde de püskürtme tekniğinde olduğu gibi, katota yerleştirilen hedef malzemenin yüksek enerjili iyonlar ile bombardımanından yararlanır. Plazma ortamında hedeften kopan atomlar alttaşa tutunur ve ince film üretimi gerçekleşir. Vakum odası içerisinde her bir kaynak hedefe giden gücün bağımsız olarak kontrol edilebildiği birden fazla kaynak hedef kullanılan eş-püskürtme sistemi, farklı bileşimli, ardışık katmanlı ve katkılı ince filmlerin üretimine imkan vermektedir. Eş-püskürtme sisteminde biriktirme hızını arttırmak için aynı hedef malzemenin yerleştirildiği birden fazla kaynak aynı anda kullanılabilir. Ayrıca bu sistemler yardımıyla, ince filmlerde çok farklı bileşimler oluşturmak için farklı türde hedef malzemenin kullanılması mümkündür.

Tez çalışmasında metalizasyonları gerçekleştirilen güneş hücreleri üzerine kaplanan yansıma önleyici malzemelerin üretimi, Gazi-FOTONİK’te bulunan Nanovak marka NVTs-500 model eş-püskürtme sisteminde (Resim 6.10) gerçekleştirildi. Sistem, 1 adet DC ve 2 adet RF beslemeli 2 inç çaplı kaynak hedef içermektedir. Sistem içerisinde püskürtmenin yanı sıra buharlaşma potalarının yer aldığı termal buharlaştırma ünitesi de bulunmaktadır. Sistemde, ortak odak noktası numune tutucusu olan dairesel düzende yerleştirilmiş toplam 3 adet hedef kaynağına sahip bir konfigürasyon mevcuttur. Üretilen filmin homojenliği için alttaşı ısıtıcısı döndürülebilmekte ve yüksek sıcaklıktaki kaplamalar için 600 °C’ye kadar ısıtılabilir. Turbo moleküler pompa kullanılan sistemin temel basıncı yaklaşık 10^{-8} Torr’dur. Bilgisayar kontrolü ile kaplama parametreleri manuel olarak kontrol edilebilmektedir.



Resim 6.10. Nanovak NVTS-500 eş-püskürtme sistemi

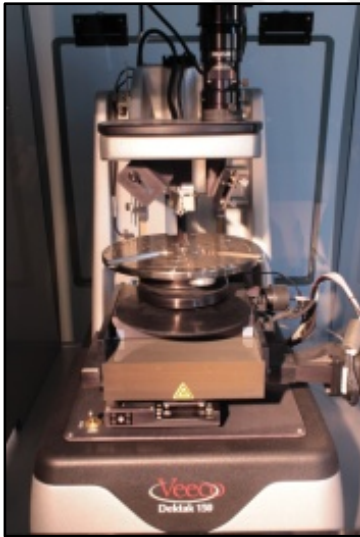
6.7. Yansıma Önleyici Katman Analizi

Tasarım ve kaplama işlemleri gerçekleştirilen yansıma önleyici malzemelerin özellikle yansıtıcılık analizlerinin yapılması kritik öneme sahiptir. Yansıma önleyiciler gibi optik kaplamalarda yüzeye kaplanan filmlerin geçirgenliği de bir diğer önemli parametredir. Optik kaplamalarda film kalınlığının etkisi oldukça fazladır. Yüzeye kaplanan filmlerin istenilen kalınlıkta olup olmadığının analiz edilmesi gerekmektedir. Optik özelliklerin yanında, kaplanan film yüzeyinin morfolojik özelliklerinin belirlenmesi de yansıma önleyici katman niteliğinin belirlenmesini sağlamaktadır. Tez kapsamında üretilen güneş hücrelerine kaplanan tek katman Ta_2O_5 , çift katman SiO_2/Ta_2O_5 ve Al_2O_3/TiO_2 ve üç katman $SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$ ARC'lerin film kalınlıkları profilometre sistemi ile belirlendi. Morfolojik özelliklerin incelenmesinde atomik kuvvet mikroskobu (AFM), optik yansıtıcılık ve geçirgenlik ölçümleri için ise morötesi-görünür bölge (UV-Vis) spektrometresi ile Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrometre sistemleri kullanıldı.

6.7.1. Profilometre sistemi

Yüzey profilometresi, özellikle ince film kalınlıklarının ölçümünde kullanılan basamak yüksekliği analiz sistemidir. Nanometre mertebesindeki yüzey ölçümlerini yapabilen yüzey

profilometreleri, tarayıcı iğnenin (stylus) üzerinde gezdiği yüzeydeki basamak yüksekliklerini algılayarak film kaplı olan ve olmayan bölgelerdeki yükseklik farkı yardımıyla film kalınlığını belirler. Kalınlık ölçümü yapılacak numune hareketli tabla üzerine yerleştirilir ve tabla kullanıcının tarama uzunluğu, tarama hızı ve tarayıcı iğne baskı gücü gibi parametreleri programlamasına göre hareket eder. Üzerinde numunenin bulunduğu tabla hareket ettikçe, tarayıcı iğne yüzeyi belirlenen uzunlukta dikey olarak tarar. Tez çalışmasında kaplanan filmlerin kalınlık analizinde, Gazi-FOTONİK'te bulunan Veeco Dektak-150 stylus tipi profilometre sistemi kullanıldı (Resim 6.11). Sistemde tarama uzunluk aralığı 50 μm -55 mm arasındadır. Ölçüm alındıktan sonra sisteme entegre yazılım programı ile ölçümler 2 veya 3 boyutlu şekilde incelenebilmekte, x-y doğrultusunda yüzey profili çıkarılabilmekte, yüzeyin biçimi, düzlükler, pürüzlülük ve dalgalanmalar incelenebilmekte, ayrıca basamak yüksekliği ölçülebilmektedir.

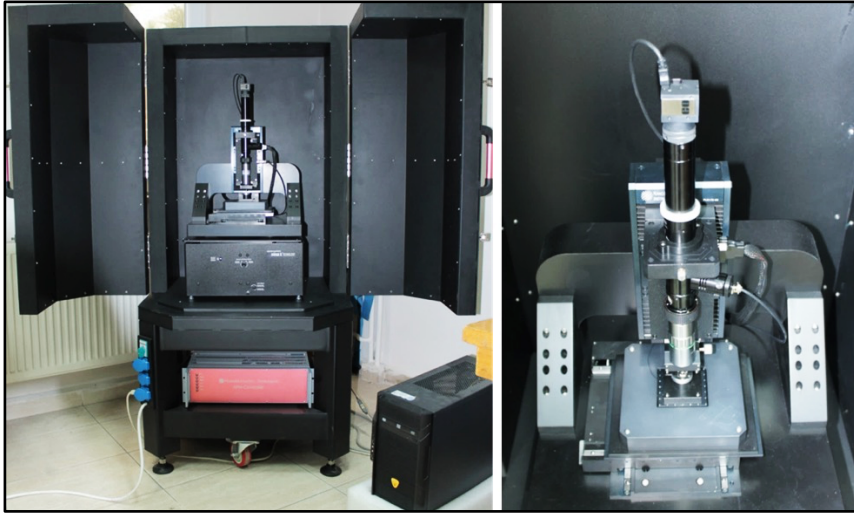


Resim 6.11. Veeco Dektak-150 profilometre sistemi

6.7.2. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), tarayıcı iğne ve incelenen numune yüzeyi arasındaki atomik etkileşimlere dayanarak yüzeyin topografik görüntüsünün elde edilebildiği bir tarama mikroskopudur. AFM sistemi, serbest ucunda atomik incelikte bir iğneye sahip cantilever, lazer, fotodiyot ve piezoelektrik tarayıcıdan oluşmaktadır. Yüzey özellikleri 100 μm ile 1 μm tarama aralığında angström mertebesindeki bir çözünürlükle incelenebilmektedir. Bu teknik, örnek yüzeyini tarayan ve bilgi toplayan cantileverın ucuna

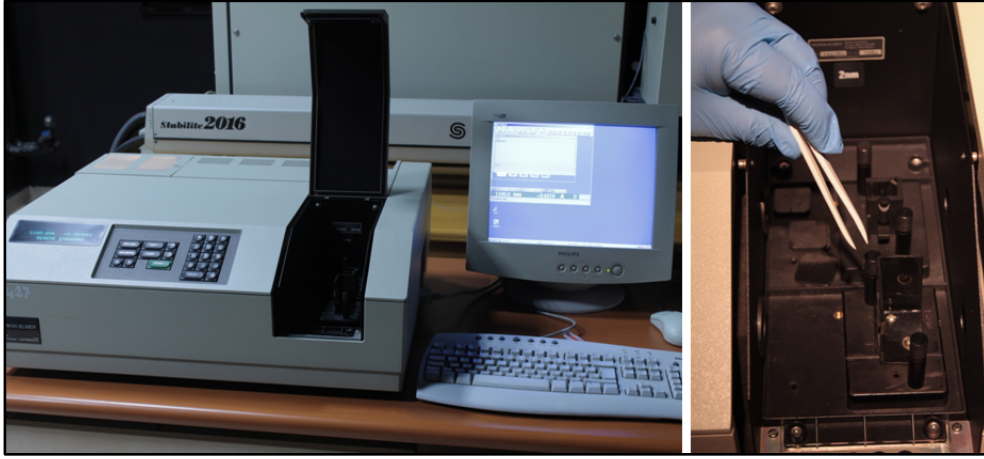
yerleştirilmiş çok ince bir iğne kullanılır. Atomik sivrilikteki bu uç ile numune yüzeyi taranmaktadır. Tarama esnasında iğne ucu ile numune yüzeyindeki atomlar arasındaki nanonewton mertebesindeki kuvvetler, cantileverın sapmasına neden olmaktadır. Bu sapma ölçülerek numune yüzeyinin topografisi ve morfojik görüntüsü elde edilir. AFM görüntüleri yardımıyla incelenen yüzeyin yüzey topografisi, morfolojisi, pürüzlülüğü ve tanecik boyutu belirlenebilir. Tez çalışmasında güneş hücreleri yüzeyine kaplanan yansımaya önleyici filmlerin yüzey görüntüleri, Gazi-FOTONİK'te bulunan NanoMagnetics marka AFM sistemi (Resim 6.12) kullanılarak elde edildi.



Resim 6.12. NanoMagnetics AFM sistemi

6.7.3. Morötesi-görünür bölge (UV-Vis) spektrometresi

UV-Vis spektroskopisinde morötesi (UV), görünür (Vis) ve yakın kızılötesi (NIR) spektral bölgelerdeki fotonlar kullanılmaktadır. Elektromanyetik spektrumun UV-Vis-NIR bölgesindeki fotonların gönderildiği malzemede moleküller, elektronik geçişlere uğrar. Fotonların bir kısmı soğurulur, bir kısmı yansır bir kısmı ise geçer. Gönderilen optik sinyal, numuneden geçer ve dedektör aracılığıyla elektrik sinyaline dönüştürülerek bilgisayara aktarılır. Böylece malzemenin optik spektrumları elde edilir. UV-Vis spektrometresi, ışık kaynağı, monokromatör, numune tutucu ve algılayıcı dedektörden oluşmaktadır. Sistem, analiz edilen malzemenin optik geçirgenliği (T), soğurması (A) veya yansıtıcılığının (R) incelenmesi amacıyla kullanılmaktadır.

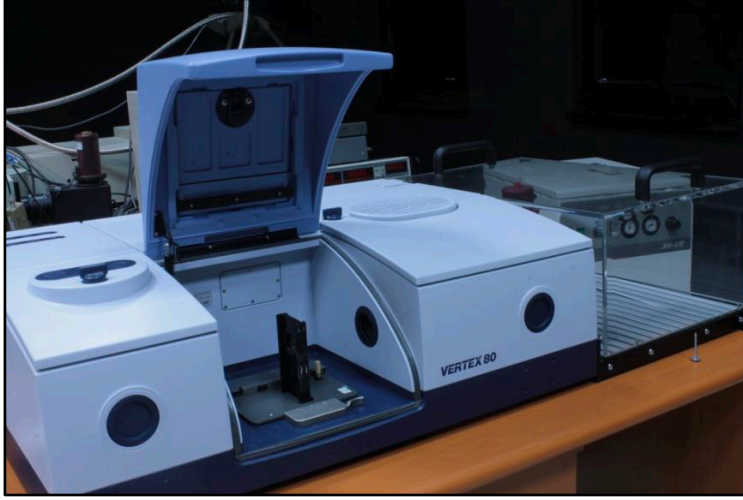


Resim 6.13. Perkin Elmer Lambda 2S UV-Vis spektrometresi

Tez kapsamında, yansıma önleyici filmlerin optik özellikleri, Gazi-FOTONİK'te bulunan Perkin Elmer Lambda 2S marka UV-Vis spektrometresinde (Resim 6.13) gerçekleştirilen optik geçirgenlik ve yansıtıcılık ölçümleri ile belirlendi. Bu sistem, 200-1100 nm dalgaboyu aralığında ölçüm alabilmektedir. Sistemde 200-340 nm ve 340-1100 nm arasındaki dalgalımlarını tarayan Döteryum ve Halojen lamba, iki ayrı numune tutucu ve Si dedektör bulunmaktadır.

6.7.4. Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektrometresi

Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, malzemelerin kimyasal bağ analizlerinde kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem ile moleküler bağ analizi yapılarak; katı, sıvı, gaz veya çözelti halindeki organik ya da inorganik malzemelerin yapısındaki fonksiyonel gruplar, yapıdaki bağların durumu ve bağlı atomların türü belirlenebilir. Diğer spektroskopik tekniklerde olduğu gibi kızılötesi spektroskopisinde de malzemede bulunan atom ve moleküllerin elektromanyetik ışınlımla etkileşimi temel alınmaktadır. FTIR tekniğinde, temel olarak bir malzeme üzerine düşürülen kızılötesi bölgedeki fotonların, malzeme tarafından dalgaboyunun bir fonksiyonu olarak soğurma miktarı ölçülmektedir. Sistem, malzemenin optik geçirgenlik ve yansıtıcılık ölçümlerini gerçekleştirebilmektedir.



Resim 6.14. Bruker Vertex 80 FTIR sistemi

Tez kapsamında kullanılan yansıma önleyici malzemelerin 1330-1800 nm dalgaboyu aralığındaki optik geçirgenlik ve yansıtıcılık ölçümlerinde Gazi-FOTONİK'te bulunan Bruker marka Vertex 80 model FTIR spektrometresi sistemi (Resim 6.14) kullanıldı. Sistemde HeNe lazer kaynağı, hava soğutmalı ve yüksek enerjili DLTGS dedektör, Broadband MCT dedektör ve NIR bölgede çalışan bir InGaAs dedektör bulunmaktadır. Vertex 80 FTIR sistemi, 1330-25000 nm dalgaboyu aralığında ölçüm alabilmektedir.

6.8. Güneş Hücresi Aygıt Karakterizasyonu

Fotolitografi, metalizasyon ve yansıma önleyici kaplama oluşturulması süreçlerinin ardından tüm fabrikasyon adımları tamamlanmış güneş hücrelerinin aygıt çıktı parametrelerinin belirlenmesi ve elektriksel performanslarının analiz edilmesi gerekmektedir. Güneş hücreleri, güneş ışınımını kullanarak enerji ürettiğinden bu hücrelerin elektriksel karakterizasyonlarıyla ilgili güneş spektrumuna kalibre edilmiş güneş simülatörleri ile akım-gerilim ($I-V$) ölçümleri alınarak gerçekleştirilmektedir. Güneş hücreleri için bir diğer önemli analiz kuantum verimliliklerinin belirlenmesidir. Kuantum verimliliği, güneş spektrumundaki fotonların ne kadarının fotoakıma dönüştürülebildiğinin bir göstergesidir. Ayrıca özellikle çok eklemlili hücrelerde her bir eklemin ürettiği akım ve aralarındaki akım uyumunun belirlenmesinde de oldukça etkili olan bir analiz tekniğidir.

Bu tez çalışmasında üretilen güneş hücresi aygıtlarının karakterizasyonu, güneş simülatörü altında akım-gerilim ölçümleri ve kuantum verimliliği ölçümleri ile gerçekleştirildi.

6.8.1. Akım-gerilim (I - V) ölçüm sistemi

Tez kapsamında üretilen güneş hücrelerinin akım-gerilim (I - V) ölçümleri, Gazi-FOTONİK'te bulunan Keithley 4200-SCS yarıiletken karakterizasyon sistemi (Resim 6.15) kullanılarak gerçekleştirildi. Sistemin maksimum gücü 1 A-20 W ve minimum gücü ise 100 mA-2 W olarak ayarlanabilmektedir. I - V eğrisi ve hesaplanacak elektriksel parametreler sisteme entegre yazılım tarafından işlenmektedir. Numune tutucu ölçüm istasyonu, I - V testleri yapılacak hücreden kontak alınabilmesi için 4 ayrı test bağlantı noktasına ve altın uçlu yaylı kontak pimlere (numuneye zarar vermeyecek şekilde) sahiptir. Ölçüm istasyonu karanlık ve aydınlık I - V ölçümüne imkan vermektedir.

Güneş hücrelerinin performans analizi için AM0 ve AM1.5 spektrumlarını sağlayabilen Newport Oriel Sol3A güneş simülatörü kullanılmaktadır. Bu güneş simülatörü, AM1.5 spektrumu için 1 güneş altındaki ışınım yoğunluğu 1000 W/m^2 ve AM0 spektrumu için ise 1367 W/cm^2 olacak şekilde kalibre edilmiştir. Güneş simülatörü altında alınan I - V ölçümlerinde farklı gerilimlere karşı akım değerleri kaydedilerek I_{sc} , V_{oc} , I_{max} , V_{max} , P_{max} , FF ve η gibi güneş hücresi parametreleri belirlenmektedir.



Resim 6.15. Keithley 4200-SCS I - V sistemi ve Newport Oriel Sol3A güneş simülatörü

6.8.2. Kuantum verimliliği (QE) ölçüm sistemi

Güneş hücrelerinin önemli bir parametresi de kuantum verimliliğidir. Güneş hücresinin performans ölçüsü olarak kuantum verimliliği, hücrenin aktif alanı üzerine düşen foton

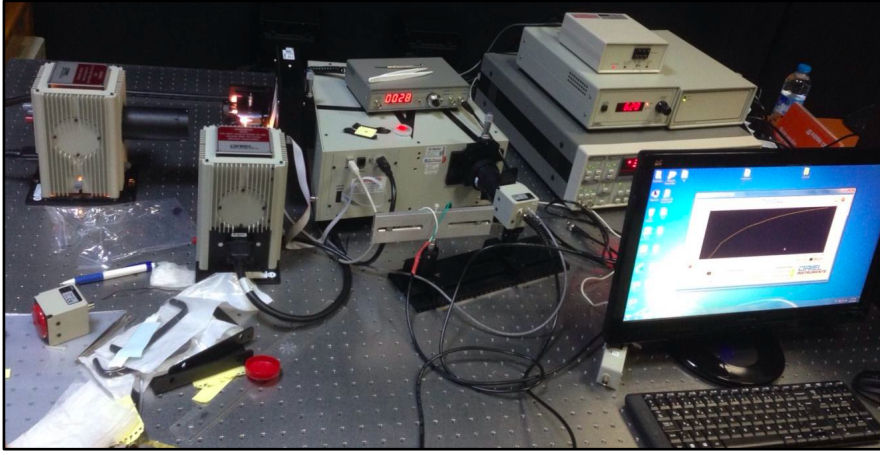
sayısına göre oluşan fotoakım ya da elektron sayısı şeklinde tanımlanabilir. Güneş hücresine düşen optik gücün fotoakıma dönüşüm verimliliği, harici kuantum verimliliği (EQE) olarak ifade edilir ve gelen ışınımın fotoakıma dönüştürdüğü taşıyıcıların sayısı ile orantılı bir niceliktir. EQE, dalgaboyuna karşılık hücrenin oluşturduğu akım yoğunluğunun ve bu dalgaboyundaki fotonlardan yüzde kaçının fotoakıma katkı sağladığının belirlenmesini sağlar. Ayrıca çok eklemlı güneş hücrelerinde akım uyumunun belirlenmesi için her bir hücre ekleminin akım yoğunluğu tespit edilebilmektedir.

Kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), EQE ölçüm sonuçlarından faydalanılarak aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$J_{sc} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} q\phi(\lambda)QE(\lambda)d\lambda \quad (6.8)$$

Burada q birim elektrik yükü, $QE(\lambda)$ ölçülen kuantum verimliliği, $\phi(\lambda)$ standart AM1.5G spektrumundaki foton akısını ifade etmektedir [172].

Tez kapsamında üretilen güneş hücrelerinin kuantum verimlilikleri Resim 6.16'da verilen ve Gazi-FOTONİK'te bulunan Newport QEPVSI-B spektrometre sistemi ile gerçekleştirildi. Işık kaynağı olarak, döteryum lamba (160-380 nm) ve tungsten halojen lamba (240-2500 nm) bulunmaktadır. Sistemde, 200-1100 nm aralığında kalibre edilmiş Si ve 800-1800 nm aralığında çalışan InGaAs dedektör kullanılmaktadır. Spektral bölgeleri ayırmak için 100-500 nm, 500-1000 nm ve 1000 nm üzeri için optik filtreler bulunmaktadır. Bilgisayar kontrollü ve diğer gerekli elektronik bileşenlere sahip fotometre kullanılarak dalgaboyuna karşılık EQE değerlerini ölçmek mümkündür.



Resim 6.16. Gazi-FOTONİK kuantum verimliliği ölçüm sistemi



7. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde, yapılan deneysel çalışmalar sonucu elde edilen bulgular ve değerlendirilmelere yer verildi. İlk olarak, Bölüm 6.5’de belirlenen parametreler ışığında yapılan yansıma önleyici kaplamalar ve bu kaplamaların optik, morfolojik ve elektriksel performans özellikleri üzerindeki etkileri tartışıldı. Ayrıca, tüm fabrikasyon adımları tamamlanan 17 cm² alanlı prototip hücrelerin uzay kalifikasyon test sonuçları, bu bölümde sunulan bulgular arasındadır. Bu bölüm içerisinde son olarak, uzay kalifiye güneş hücrelerinin uzay ortamındaki performans test sonuçları ve son değerlendirmelere yer verildi.

7.1. Yansıma Önleyici Katman Üretimi ve Karakterizasyonu

Bölüm 6.5’de, tez çalışmasında kullanılan GaInP/GaAs/Ge güneş hücre yapısı için en uygun kırılma indisine sahip tek ve çok katmanlı ARC’lere yönelik bilgiler verilmişti. Bu bilgiler ve Çizelge 6.7’de verilen parametreler ışığında Ta₂O₅ tek-katmanlı, SiO₂/Ta₂O₅ ve Al₂O₃/TiO₂ çift-katmanlı ve SiO₂/Al₂O₃/TiO₂ üç-katmanlı ARC yapıları güneş hücresi yüzeyine kaplanarak optik, morfolojik ve elektriksel performans analizleri gerçekleştirildi. Kaplamalar, eş-püskürtme ve magnetron püskürtme sistemlerinde optik geçirgenlik ölçümü için cam alttaşlar ve ayrıca, optik yansıtıcılık, yüzey pürüzlülüğü ve elektriksel performans etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla ise 3 cm x 2 cm boyutlu hücreler üzerine yapıldı. Optik analizler, 300-1100 nm dalgaboyu aralığı için UV-Vis spektrometre, 1330-1800 nm aralığı için ise FTIR spektrometre yardımıyla gerçekleştirildi. Yüzey görüntüleri ve yüzey pürüzlülükleri, AFM sistemi kullanılarak elde edildi. ARC’nin hücre performansı üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi, kaplama öncesi ve kaplama sonrası AM1.5G spektrumu altında yapılan *I-V* ölçümleri ile gerçekleştirildi. Ayrıca ARC’nin performans üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde kuantum verimliliği ölçümleri kullanıldı. Aşağıda sunulan ARC denemeleri ve elde edilen bulgular sonucunda belirlenen en uygun ARC tasarımı 17 cm² alanlı prototip hücrelere kaplanarak güneş hücresi fabrikasyon adımları tamamlandı.

7.1.1. Ta₂O₅ tek-katman ARC üretimi ve karakterizasyonu

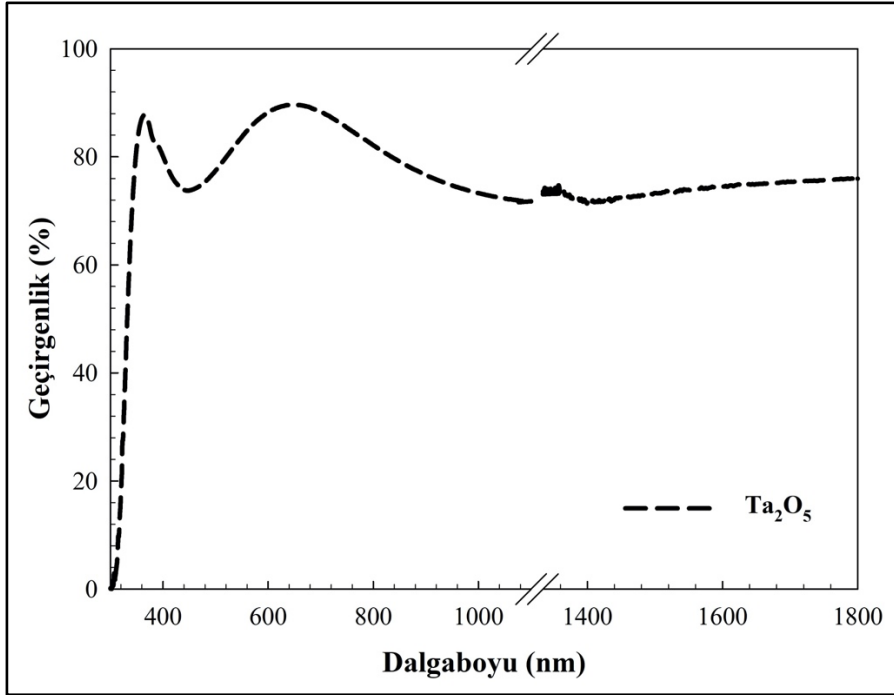
Tez çalışmasında kullanılacak yansıma önleyici malzemelerden biri olarak uygun kırılma indisine, yüksek mekanik dayanıma ve radyasyon direncine sahip Ta₂O₅ oksit bazlı bileşiği

seçildi. Tek-katman olarak Bölüm 6.5’de tasarlanan Ta₂O₅ ince filmi, 70 nm kalınlığa sahip olacak biçimde metalizasyonu tamamlanan 3 cm x 2 cm güneş hücresi ve cam alttaş üzerine kaplandı. Kaplama işlemi, Nanovak NVTs-500 eş-püskürtme sisteminde, 2 inç çaplı Ta₂O₅ seramik hedef (saflık:% 99,995) kullanılarak gerçekleştirildi. Kaplama parametreleri Çizelge 7.1’de verildi.

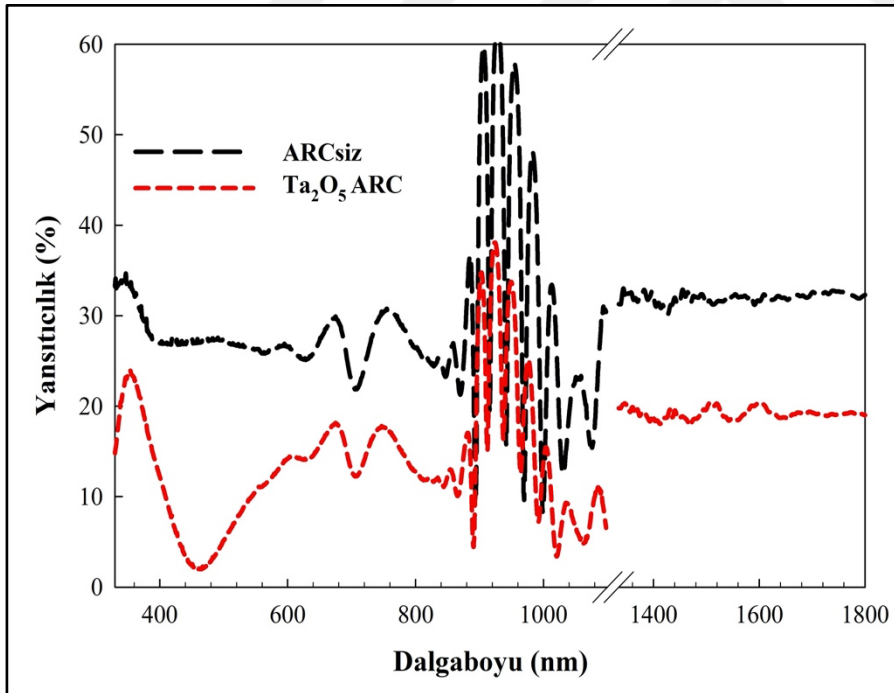
Çizelge 7.1. Ta₂O₅ tek-katmanlı yansıma önleyicinin kaplama parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>Değer</i>
<i>P_{base} (Torr)</i>	5,2x10 ⁻⁷
<i>RF Gücü (W)</i>	80
<i>Ar basıncı (mTorr)</i>	10
<i>Alttaş Sıcaklığı (°C)</i>	Oda sıcaklığı
<i>Kaplama Hızı (Å/sn)</i>	0,4
<i>Dönme Hızı (rpm)</i>	5

Güneş hücresi yüzeyine kaplanan filmin optik geçirgenliği, hücre içerisine ne kadar ışığın geçebildiğini gösterdiğinden oldukça önemlidir. Kaplanan filmin yansıtıcılığı azaltması kadar optik geçirgenliği de arttırması yani soğuruculuğunun az olması gerekmektedir. Böylece hücre içerisine daha fazla foton girebilir ve daha fazla fotoakım üretilebilir. Ta₂O₅ tek-katman ARC’nin optik geçirgenliği, cam alttaş üzerine kaplanan filmin UV-Vis ve FTIR ölçümleri ile belirlendi. Farklı dalgaboyu bölgelerini (300-1100 ve 1330-1800 nm) tarayan sistemlerle alınan geçirgenlik ölçümlerinin birleştirilmesiyle elde edilen optik geçirgenlik spektrumu Şekil 7.1’de verildi. Ta₂O₅ ince filmin geçirgenlik spektrumu incelendiğinde, güneş hücresinin soğurma bölgesi olan 300-1800 nm dalgaboyu aralığında ortalama % 76,05’lik optik geçirgenliğe sahip olduğu görülmektedir. GaInP üst hücrenin soğurma bölgesinde (300-700 nm) optik geçirgenlik yaklaşık % 76,80’dir. Orta hücre (700-900 nm) ve alt hücre (900-1800 nm) soğurma bölgelerinde ise optik geçirgenlik sırasıyla % 82,29 ve % 73,78’dir. Ortalama % 76,05 optik geçirgenliğe sahip tek-katman Ta₂O₅ filminin güneş hücreleri için uygulanabilir olduğu düşünülmektedir.



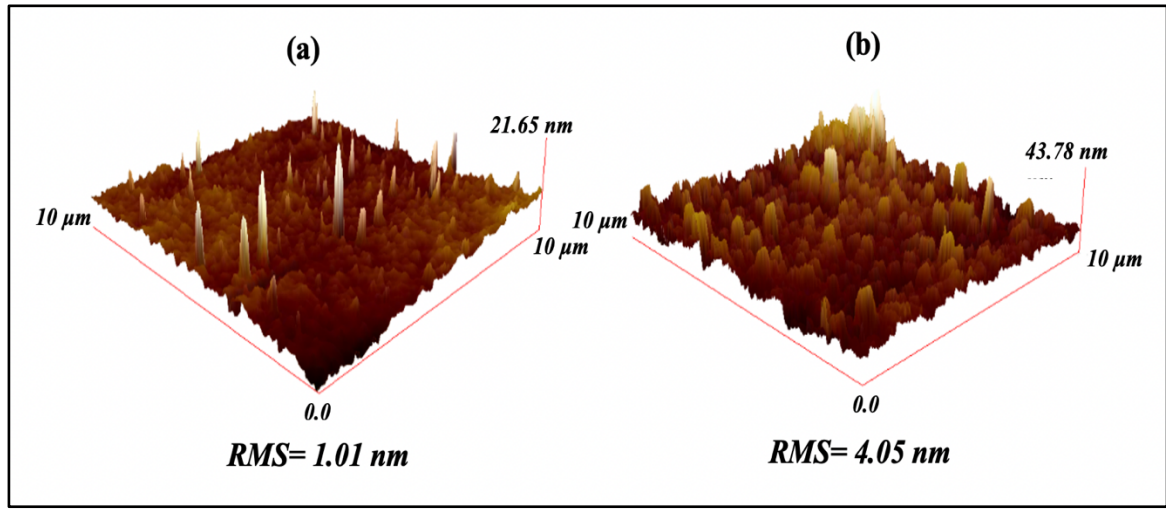
Şekil 7.1. Ta_2O_5 tek-katmanlı yansıtma önleyici filmin optik geçirgenlik spektrumu



Şekil 7.2. Ta_2O_5 tek-katmanlı yansıtma önleyici filmin optik yansıtıcılık spektrumu

Fabrikasyonu tamamlanmış güneş hücresi yüzeyine kaplanan tek-katmanlı Ta_2O_5 yansıtma önleyici filmin yansıtıcılık spektrumu Şekil 7.2’de verildi. Şekil 7.2’de görüldüğü gibi yansıtma önleyici kaplanmadan önce 300-1800 nm dalgaboyu aralığında GaInP/GaAs/Ge güneş hücresi ortalama % 31,02 yansıtıcılığa sahiptir. Ta_2O_5 ARC, hücrenin ortalama

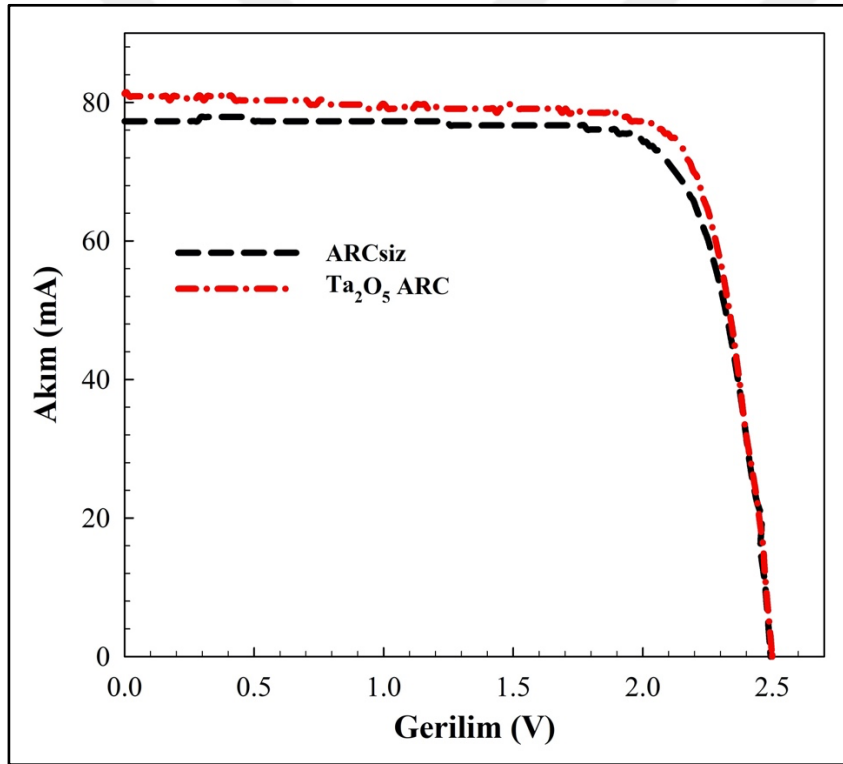
yansıtıcılığını % 16,65'e indirmiştir. Bu durum, tek-katman Ta_2O_5 filmin ortalama yansıtıcılıkta % 46,32'lik bir azalma yarattığını göstermektedir. Teorik olarak hesaplanan (% 14,49) ve deneysel olarak elde edilen (% 16,65) ortalama yansıtıcılık değerlerinin, deneysel sistemlerin hata sınırları içerisinde birbiriyle uyumlu olduğu düşünülmektedir. Ortalama yansıtıcılık değerleri 300-700 nm dalgaboyu aralığında % 11,90, 700-900 nm aralığında % 14,05 ve 900-1800 nm aralığında ise % 18,67'dir. Aynı zamanda yapılan kaplama, 440-480 nm dalgaboyu bölgesinde yansıtıcılığı % 2'lere düşürerek özellikle üst hücrenin soğurma bölgesinde etkili olmaktadır.



Şekil 7.3. Güneş hücresinin Ta_2O_5 tek-katmanlı ARC a) öncesi b) sonrası AFM görüntüsü

Güneş hücresi yüzeyinin Ta_2O_5 kaplaması öncesi ve sonrası 2 metal kontak ızgarası arasından alınan $10 \times 10 \mu m^2$ tarama alanındaki 3 boyutlu yüzey görüntüleri Şekil 7.3'de verildi. GaAs kep tabakasının kimyasal olarak aşındırılması ile elde edilen AlInP pencere katmanının yüzey pürüzlülüğü (Şekil 7.3.a) AFM görüntülerinin analizi yardımıyla 1,01 nm olarak bulundu. Epitaksiyel filmlerin pürüzlülükleri ile uyumlu olan bu düşük yüzey pürüzlülüğü, yüzey yansımalarına neden olarak yansıtıcılığın artmasına neden olmaktadır. Yansıma önleyici malzemeler yardımıyla yüzeyi pürüzlendirmek, yansıtıcılığı azaltmada kullanılan yöntemlerden bir tanesidir. Tek-katmanlı Ta_2O_5 kaplaması, yüzey pürüzlülüğünü 4,05 nm'ye yükseltmiştir. Artan yüzey pürüzlülüğü, ışığın yüzeydeki saçılmalarını arttırdığından yansıtıcılığın azalmasına neden olmaktadır. Ayrıca Şekil 7.3.b, Ta_2O_5 filmin hücre yüzeyine homojen biçimde kaplandığını göstermektedir [40].

Yansımaya önleyici kaplamanın hücre performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla AM1.5G ışınımı altında I - V ölçümleri gerçekleştirildi. 6 cm^2 aktif alana sahip GaInP/GaAs/Ge güneş hücresinin Ta_2O_5 kaplaması öncesi ve sonrası I - V eğrileri Şekil 7.4’de verildi. Kaplama öncesi hücre verimi % 25,12 iken, tek-katman Ta_2O_5 kaplaması hücre verimini % 26,47’ye yükseltmiştir. ARC hücre içerisine giren foton sayısında artışa neden olduğundan fotoakımda artış beklenmektedir. Azalan yansımaya kayıpları, $77,30 \text{ mA}$ olan I_{sc} değerini kaplama sonrası $81,50 \text{ mA}$ ’e yükseltmiştir. Yansımaya önleyicinin yarattığı pasivasyon etkisi, yüzey rekombinasyonlarını azalttığından V_{oc} değerinde artış meydana gelmiştir. Çizelge 7.2’de görüldüğü gibi tek-katman Ta_2O_5 ARC, hücre performansında yaklaşık % 5,37 artışa neden olmaktadır.

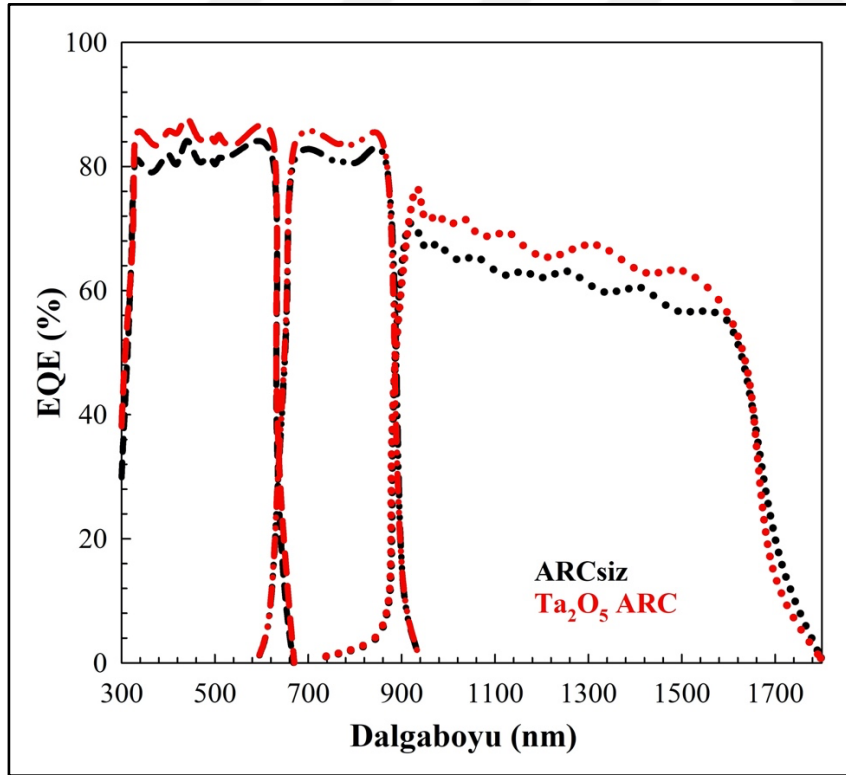


Şekil 7.4. Üç eklemlili güneş hücresinin Ta_2O_5 kaplaması öncesi ve sonrası I - V eğrileri

Çizelge 7.2. Güneş hücresinin Ta_2O_5 ARC öncesi ve sonrası elektriksel parametreleri

	$I_{sc} \text{ (mA)}$	$V_{oc} \text{ (V)}$	$I_{max} \text{ (mA)}$	$V_{max} \text{ (V)}$	FF	$Ac \text{ (cm}^2\text{)}$	$\eta \text{ (\%)}$
ARCsiz	77,30	2,48	73,10	2,06	0,77	6	25,12
$\text{Ta}_2\text{O}_5 \text{ ARC}$	81,50	2,51	74,90	2,12	0,78	6	26,47

Harici kuantum verimliliği (EQE) analizi, yansımaya önleyici kaplamanın güneş hücresinin elektriksel performansı üzerindeki etkisinin gözlenmesinde oldukça önemlidir. Yansımaya önleyici kaplama öncesi ve sonrası üç eklemli güneş hücresi için her bir alt hücrenin EQE ölçüm sonucu Şekil 7.5’de verildi. Ayrıca her bir alt hücrenin ARC öncesi ve sonrası EQE değerleri ile EQE verilerinden hesaplanan akım yoğunlukları (J_{sc}) Çizelge 7.3’de verildi. GaInP üst hücrenin ARC öncesi EQE değeri 500 nm dalgaboyunda % 80 iken, Ta₂O₅ ARC ile bu değer % 87’ye çıkmıştır. GaAs orta hücrenin EQE değeri 800 nm dalgaboyunda % 78’den % 83’e yükselmiştir. Ta₂O₅ ARC, Ge alt hücrenin EQE değerini ise % 65’den % 71’e çıkartmıştır. ARC öncesi net fotoakım, Ge alt hücre tarafından sınırlanmaktadır ve net J_{sc} 13,01 mA’dır. Yansımaya kayıplarının azalması ile birlikte Ge alt hücrenin artan fotoakımı nedeniyle hücrenin net J_{sc} değeri 13,82 mA’e yükselmiştir. Görüldüğü gibi, özellikle net fotoakımı sınırlayan Ge alt hücrenin soğurma bölgesinde yansımaya kayıplarının azaltılması, hücre performansının artırılmasında kritik öneme sahiptir. Elde edilen EQE ölçüm sonuçları, $I-V$ sonuçları ile uyumludur. EQE analizi ile elde edilen net J_{sc} değeri ile $I-V$ ölçümünden elde edilen I_{sc} değerleri birbirine oldukça yakındır.



Şekil 7.5. Güneş hücresinin Ta₂O₅ kaplaması öncesi ve sonrası kuantum verimliliği

Çizelge 7.3. Üç eklemlı güneş hücresinin ARC öncesi ve sonrası EQE ve J_{sc} değeri

<i>Alt Hücre</i>	<i>EQE (%)</i>			<i>J_{sc} (mA/cm²)</i>		
	<i>GaInP</i>	<i>GaAs</i>	<i>Ge</i>	<i>GaInP</i>	<i>GaAs</i>	<i>Ge</i>
<i>ARCsiz</i>	80,13	78,11	65,01	13,32	13,18	13,01
<i>Ta₂O₅ ARC</i>	87,03	83,24	71,15	14,15	14,02	13,82

7.1.2. SiO₂/Ta₂O₅ çift-katman ARC üretimi ve karakterizasyonu

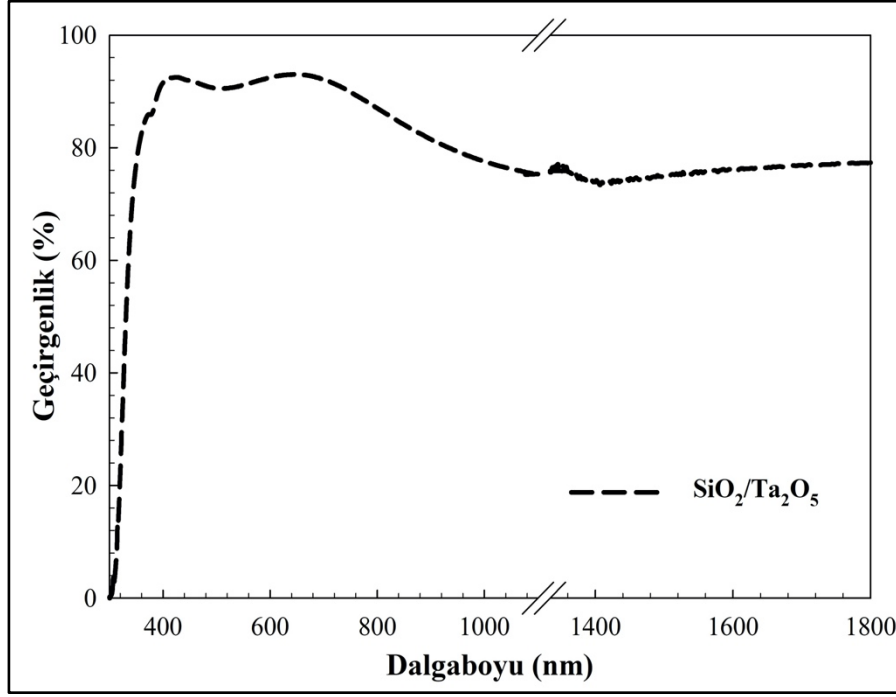
Tez çalışmasında kullanılan bir diğer yansıma önleyici tasarım, çift-katmanlı SiO₂/Ta₂O₅ ince film yapısıdır. Bölüm 6.5’de tasarlanan SiO₂/Ta₂O₅ filmi, 70 nm Ta₂O₅ ve üzerine 100 nm SiO₂ olacak biçimde 3 cm x 2 cm boyutlu metalizasyonu tamamlanmış güneş hücresi ve cam alttaş üzerine kaplandı. Kaplama işlemi, Nanovak NVTs-500 eş-püskürtme sisteminde, 2 inç çaplı Ta₂O₅ ve SiO₂ seramik hedefler (safılık:% 99,995) kullanılarak gerçekleştirildi. Kaplama parametreleri Çizelge 7.4’de verildi.

Çizelge 7.4. SiO₂/Ta₂O₅ çift-katmanlı yansıma önleyicinin kaplama parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>Ta₂O₅ Kaplaması</i>	<i>SiO₂ Kaplaması</i>
<i>P_{base} (Torr)</i>	1,5x10 ⁻⁶	4,3x10 ⁻⁶
<i>RF Gücü (W)</i>	80	150
<i>Ar basıncı (mTorr)</i>	10	3
<i>Alttaş Sıcaklığı (°C)</i>	Oda sıcaklığı	Oda sıcaklığı
<i>Kaplama Hızı (Å/sn)</i>	0,4	0,3
<i>Dönme Hızı (rpm)</i>	5	5

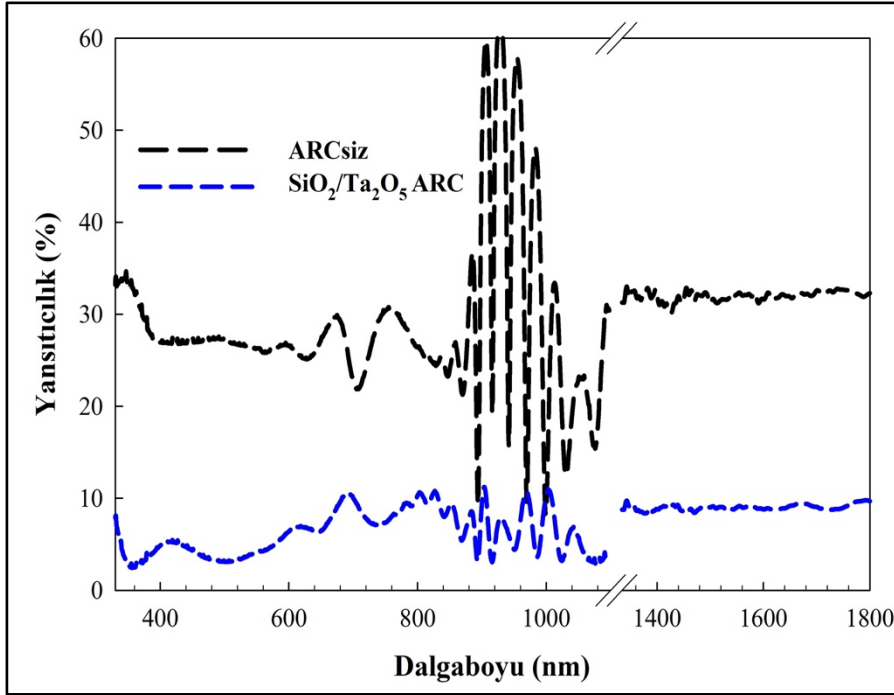
SiO₂/Ta₂O₅ çift-katman ARC’nin optik geçirgenliği, cam alttaş üzerine kaplanan filmin UV-Vis ve FTIR ölçümleri ile belirlendi. Geçirgenlik ölçümlerinin birleştirilmesiyle elde edilen optik geçirgenlik spektrumu Şekil 7.6’da verildi. Geçirgenlik spektrumu incelendiğinde, SiO₂/Ta₂O₅ ince filmin güneş hücresinin soğurma bölgesi olan 300-1800 nm dalgaboyu aralığında ortalama % 80,30 optik geçirgenliğe sahip olduğu görülmektedir. Ta₂O₅ üzerine kaplanan SiO₂ katmanı, optik geçirgenliği % 76,05’den % 80,30’a yükseltmiştir. GaInP üst hücrenin soğurma bölgesinde (300-700 nm) optik geçirgenlik yaklaşık % 84,10’dur. Orta

hücre (700-900 nm) ve alt hücre (900-1800 nm) soğurma bölgelerinde ise optik geçirgenlik sırasıyla % 86,96 ve % 76,29'dur. Ta₂O₅ üzerine kaplanan 100 nm SiO₂, optik geçirgenliği arttırarak hücre içerisine girebilecek foton sayısında artışa neden olmaktadır. Elde edilen sonuç, çift-katmanın tek-katmana göre optik performansı daha yüksek bir film oluşturduğunu göstermektedir.

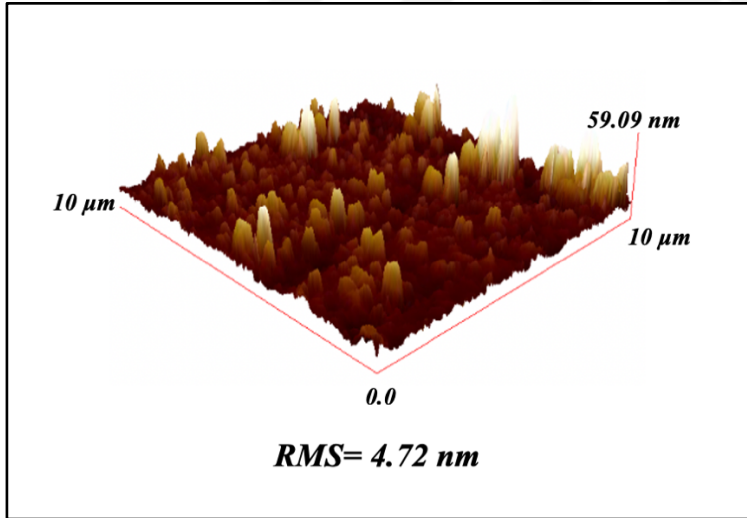


Şekil 7.6. SiO₂/Ta₂O₅ çift-katmanlı yansıtıcı önleyici filmin optik geçirgenlik spektrumu

Güneş hücresi yüzeyine kaplanan çift-katmanlı SiO₂/Ta₂O₅ yansıtıcı önleyici filmin yansıtıcılık spektrumu Şekil 7.7'de verildi. 300-1800 nm dalgaboyu aralığında ortalama % 31,02 yansıtıcılığa sahip olan GaInP/GaAs/Ge güneş hücresi, SiO₂/Ta₂O₅ ARC sonrası % 7,95'e düşen yansıtıcılığa sahiptir. Bu durum, çift-katman SiO₂/Ta₂O₅ filmin ortalama yansıtıcılıkta % 74,37'lik bir azalma yarattığını göstermektedir. Ta₂O₅ üzerine kaplanan SiO₂ katmanı yansıtıcılığı önemli ölçüde azaltmıştır. Çift-katmanlı tasarım için teorik olarak hesaplanan (% 6,01) ve deneysel olarak elde edilen (% 7,95) ortalama yansıtıcılık değerlerinin, deneysel sistemlerin hata sınırları içerisinde birbiriyle uyumlu olduğu düşünülmektedir. Ortalama yansıtıcılık değerleri 300-700 nm dalgaboyu aralığında % 6,00, 700-900 nm aralığında % 8,30 ve 900-1800 nm aralığında ise % 9,30'dır. Yapılan kaplama, özellikle üst hücrenin soğurma bölgesindeki yansıtıcılığın azaltılmasını sağlamaktadır.



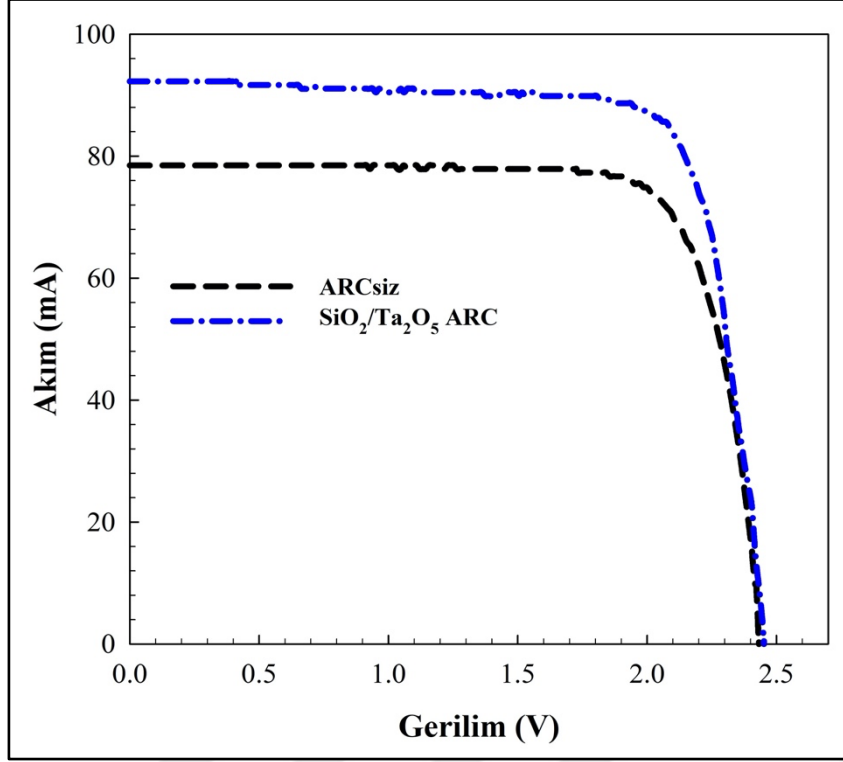
Şekil 7.7. $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ çift-katmanlı yansımaya önleyici filmin optik yansıtıcılık spektrumu



Şekil 7.8. Güneş hücresinin $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ ARC sonrası AFM görüntüsü

Güneş hücresi yüzeyinin $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ kaplaması sonrası 2 metal kontak ızgarası arasından alınan $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ tarama alanındaki 3 boyutlu yüzey görüntüsü Şekil 7.8’de verildi. Çift-katmanlı $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ kaplaması, yüzey pürüzlülüğünü $4,72 \text{ nm}$ ’ye yükseltmiştir. Ta_2O_5 üzerine kaplanan SiO_2 filmi, $4,05 \text{ nm}$ olan yüzey pürüzlülüğünün $4,72 \text{ nm}$ ’ye artmasına neden olmuştur. Artan yüzey pürüzlülüğü, ışığın yüzeydeki saçılmalarını arttırdığından yansıtıcılığın azalmasına neden olmaktadır. Bu durum, $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ ARC’nin Ta_2O_5 ARC’ye

göre daha düşük yansıtıcılık göstermesi anlamına gelmektedir. Ayrıca, Şekil 7.8, $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ filmin hücre yüzeyine homojen biçimde kaplandığını göstermektedir.

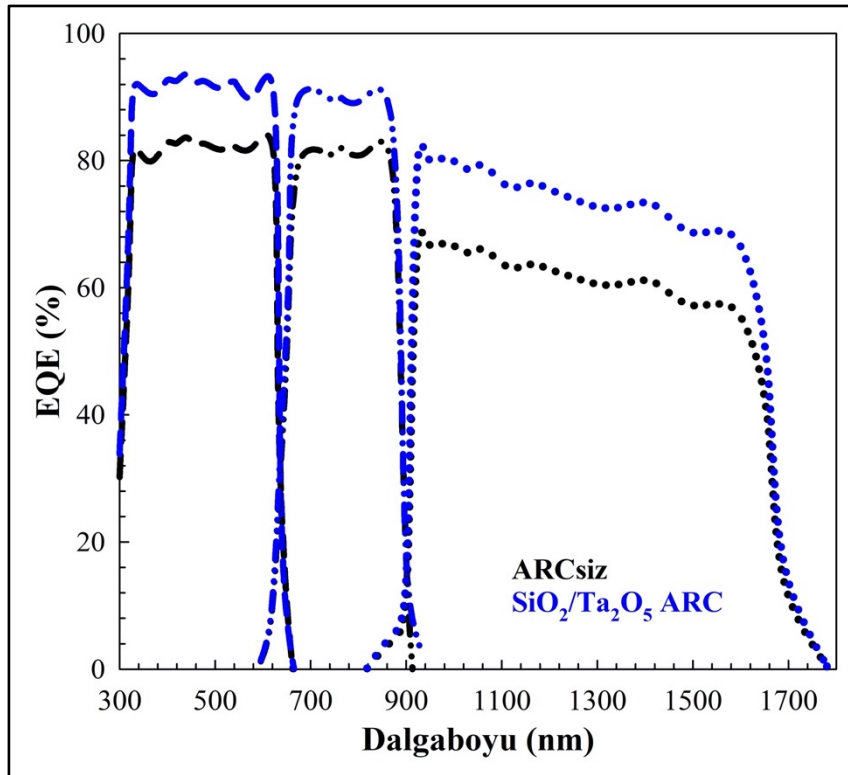


Şekil 7.9. Üç eklemlı güneş hücresinin $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ kaplaması öncesi ve sonrası I - V eğrileri

$\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ ARC'nin hücre performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla AM1.5G ışınlımı altında I - V ölçümleri gerçekleştirildi. 6 cm^2 aktif alana sahip GaInP/GaAs/Ge güneş hücresinin $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ kaplaması öncesi ve sonrası I - V eğrileri Şekil 7.9'da verildi. Kaplama öncesi hücre verimi % 25,55 iken, çift-katman ARC hücre verimini % 30,27'ye yükseltmiştir. Ta_2O_5 üzerine kaplanan 100 nm SiO_2 , optik yansıtıcılığı Şekil 7.7'de görüldüğü gibi azaltmıştır. Azalan yansıma kayıpları, 78,50 mA olan I_{sc} değerini kaplama sonrası 92,90 mA'e yükseltmiştir. Yansıma önleyicinin yarattığı pasivasyon etkisi, yüzey rekombinasyonlarını azalttığından V_{oc} değerinde artış meydana gelmiştir. Çizelge 7.5'de görüldüğü gibi çift-katman $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ ARC, hücre performansında yaklaşık % 18,47 artışa neden olmaktadır. Tek-katman Ta_2O_5 ile kıyaslandığında çift-katmanlı $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ ARC, optik özellikler üzerinde daha fazla iyileşmeye neden olduğundan hücre performansında da kayda değer bir iyileşme yaratmıştır.

Çizelge 7.5. Güneş hücresinin $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ ARC öncesi ve sonrası elektriksel parametreleri

	$I_{sc} \text{ (mA)}$	$V_{oc} \text{ (V)}$	$I_{max} \text{ (mA)}$	$V_{max} \text{ (V)}$	FF	$A_c \text{ (cm}^2\text{)}$	$\eta \text{ (\%)}$
ARCsiz	78,50	2,48	73,70	2,08	0,78	6	25,55
$\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ ARC	92,90	2,50	85,10	2,13	0,79	6	30,27

Şekil 7.10. Güneş hücresinin $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ kaplaması öncesi ve sonrası kuantum verimliliği

Yansımaya önleyici kaplama öncesi ve sonrası üç eklemlili güneş hücresi için her bir alt hücrenin EQE ölçüm sonucu Şekil 7.10'da verildi. Ayrıca her bir alt hücrenin ARC öncesi ve sonrası EQE ve bu verilerinden hesaplanan J_{sc} değerleri Çizelge 7.6'da verildi. GaInP üst hücrenin ARC öncesi EQE değeri 500 nm dalgaboyunda % 81 iken, $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ ARC ile bu değer % 92'ye çıkmıştır. GaAs orta hücrenin EQE değeri 800 nm dalgaboyunda % 80'den % 88'e yükselmiştir. Çift-katmanlı ARC, Ge alt hücrenin EQE değerini ise % 67'den % 79'a çıkartmıştır. Yansımaya önleyici kaplama öncesi güneş hücresinin net J_{sc} değeri 13,15 mA'dir. Yansımaya kayıplarının azalması ile birlikte Ge alt hücrenin artan fotoakımı nedeniyle hücrenin net J_{sc} değeri 15,50 mA'e yükselmiştir. Elde edilen EQE ölçüm sonuçları, $I-V$ sonuçları ile uyumludur. EQE analizi ile elde edilen net J_{sc} değeri ile $I-V$ ölçümünden elde

edilen I_{sc} değerleri birbirine oldukça yakındır. Ta_2O_5 üzerine kaplanan SiO_2 , yansıtıcılığı azaltmakla birlikte $GaInP/GaAs/Ge$ güneş hücresinin kuantum verimliliğini de arttırmıştır. Bu durum uygun malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan çok katmanlı yansıma önleyicilerin performans iyileştirmesi üzerindeki etkisini göstermektedir.

Çizelge 7.6. Üç eklemli güneş hücresinin ARC öncesi ve sonrası EQE ve J_{sc} değerleri

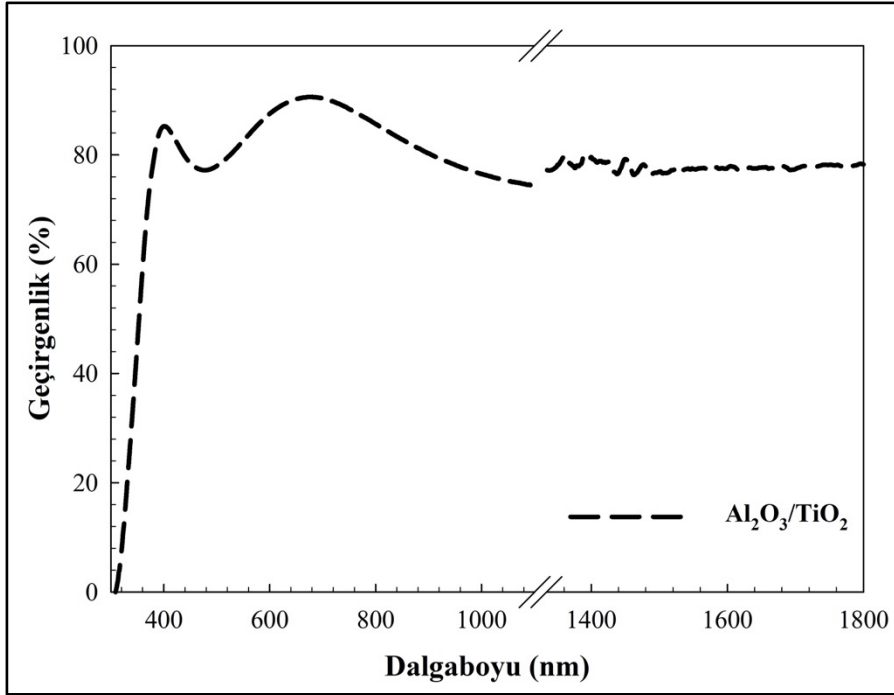
<i>Alt Hücre</i>	<i>EQE (%)</i>			<i>J_{sc} (mA/cm²)</i>		
	<i>GaInP</i>	<i>GaAs</i>	<i>Ge</i>	<i>GaInP</i>	<i>GaAs</i>	<i>Ge</i>
<i>ARCSiz</i>	81,32	80,20	67,05	13,65	13,40	13,15
<i>SiO₂/Ta₂O₅ ARC</i>	92,06	88,23	79,26	16,32	16,15	15,50

7.1.3. Al_2O_3/TiO_2 çift-katman ARC üretimi ve karakterizasyonu

Bir diğer çift-katmanlı yansıma önleyici tasarımı, literatürde üç eklemli güneş hücrelerinde yaygın olarak kullanılan Al_2O_3/TiO_2 ince film yapısıdır. Tez çalışması kapsamında, Bölüm 6.5’de tasarlanan Al_2O_3/TiO_2 filmi, 55 nm TiO_2 ve üzerine 80 nm Al_2O_3 olacak biçimde 3 cm x 2 cm boyutlu metalizasyonu tamamlanmış güneş hücresi ve cam alttaş üzerine kaplandı. Kaplama işlemi, BesTec magnetron püskürtme sisteminde, 4 inç çaplı TiO_2 ve Al_2O_3 seramik hedefler kullanılarak gerçekleştirildi. Kaplama parametreleri Çizelge 7.7’de verildi.

Çizelge 7.7. Al_2O_3/TiO_2 çift-katmanlı yansıma önleyicinin kaplama parametreleri

<i>Parametre</i>	<i>TiO₂ Kaplaması</i>	<i>Al₂O₃ Kaplaması</i>
<i>P_{base} (mbar)</i>	$2,0 \times 10^{-7}$	$2,4 \times 10^{-8}$
<i>P_{kaplama} (mbar)</i>	$4,1 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-3}$
<i>RF Kaplama Gücü (W)</i>	150	150
<i>Ar Gaz Akışı (sccm)</i>	15	5
<i>Alttaş Sıcaklığı (°C)</i>	Oda sıcaklığı	Oda sıcaklığı
<i>Kaplama Hızı (Å/sn)</i>	0,4	0,3
<i>Hedef alttaş mesafesi (mm)</i>	90	90
<i>Kalınlık (Å)</i>	550	800

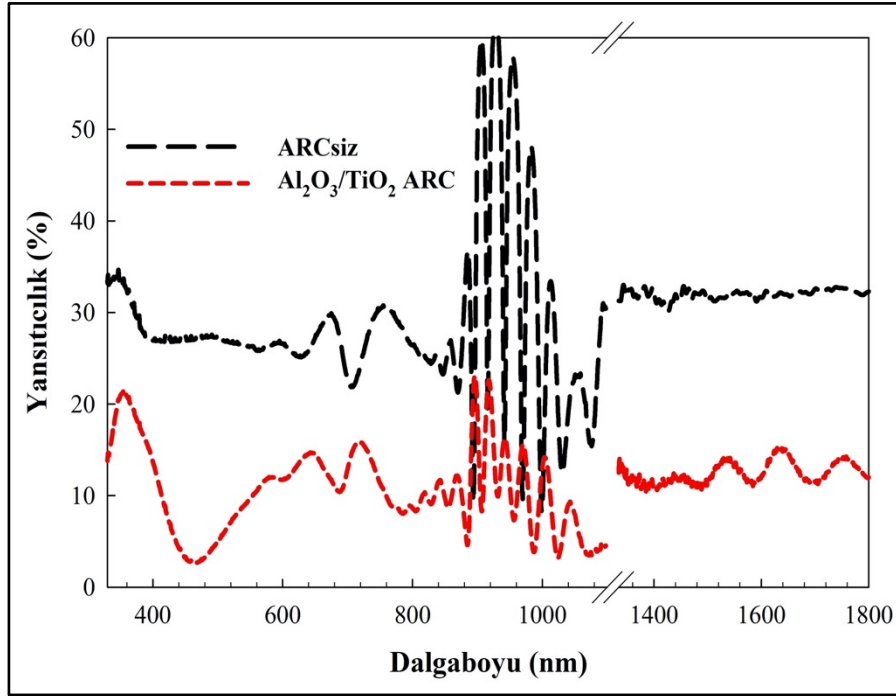


Şekil 7.11. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ çift-katmanlı yansımaya önleyici filmin optik geçirgenlik spektrumu

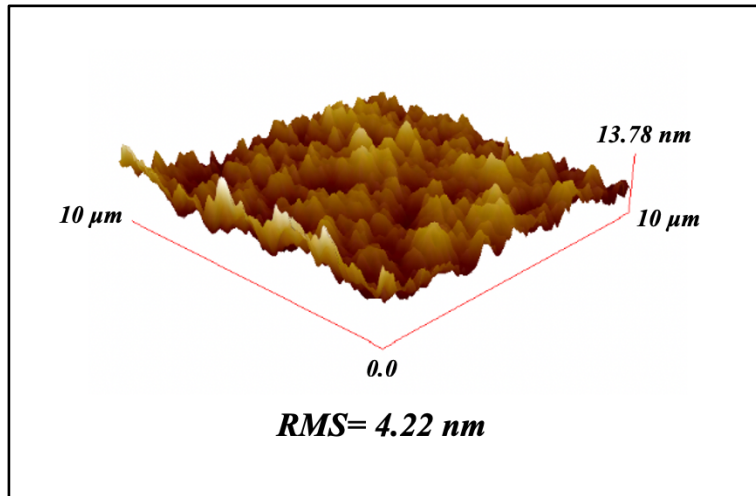
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ çift-katman yansımaya önleyici filmin optik geçirgenliği, cam alttaş üzerine kaplanan filmin UV-Vis ve FTIR ölçümleri ile belirlendi. Çift-katmanlı ARC'nin deneysel olarak elde edilen optik geçirgenlik spektrumu Şekil 7.11'de verildi. Geçirgenlik spektrumu incelendiğinde, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ince filmin güneş hücresinin soğurma bölgesi olan 300-1800 nm dalgaboyu aralığında ortalama % 77,66 optik geçirgenliğe sahip olduğu görülmektedir. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC, tez çalışmasında uygulanan bir diğer tasarım olan $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ çift-katmanlı ARC'ye göre daha düşük optik geçirgenliğe sahiptir. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ince filmin, GaInP üst hücrenin soğurma bölgesinde yaklaşık % 73,95 optik geçirgenliği bulunmaktadır. Orta hücre ve alt hücre soğurma bölgelerinde ise optik geçirgenlik sırasıyla % 85,56 ve % 77,53'dür. Elde edilen sonuç, $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ çift-katmanın $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ çift-katmana göre optik performansı daha yüksek bir film oluşturduğunu göstermektedir.

Güneş hücresi yüzeyine kaplanan çift-katmanlı $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ yansımaya önleyici filmin yansıtıcılık spektrumu Şekil 7.12'de verildi. 300-1800 nm dalgaboyu aralığında ortalama % 31,02 yansıtıcılığa sahip olan GaInP/GaAs/Ge güneş hücresi, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC sonrası yansıtıcılığını % 11,50'ye düşürmüştür. Bu durum, çift-katman $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ filmin ortalama yansıtıcılıkta % 62,93'lük bir azalma meydana getirdiğini göstermektedir. Ortalama yansıtıcılık değeri, bu çalışmada kullanılan bir diğer çift-katmanlı ARC olan $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ yapısına göre daha yüksektir. Bu durum, çift-katmanlı ARC tasarımında $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ ince

film yapısının $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ yapısına göre daha uygun olduğunu göstermektedir. Ortalama yansıtıcılık değerleri, GaInP üst hücrenin soğurma bölgesi olan 300-700 nm dalgaboyu aralığında % 11,30, 700-900 nm aralığında % 11,09 ve alt hücrenin soğurma bölgesi olan 900-1800 nm aralığında ise % 11,90'dır. Yapılan kaplama, özellikle üst hücrenin soğurma bölgesindeki yansıtıcılığın azaltılmasını sağlamaktadır. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ çift-katmanlı ARC, % 2'lik yansıtıcılıkla 440-500 nm aralığında yüksek optik performans göstermektedir.

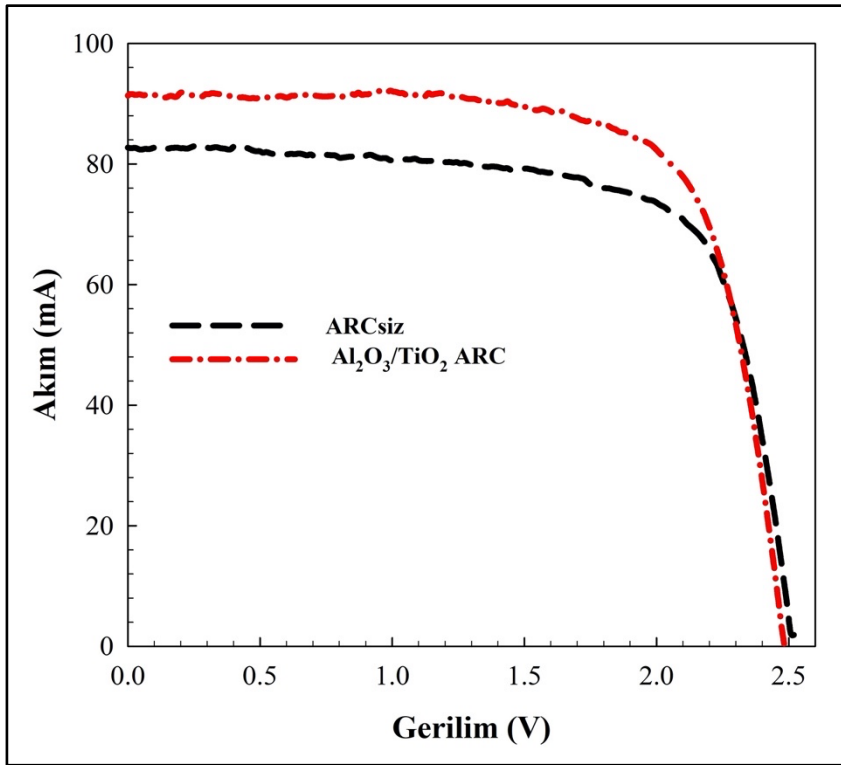


Şekil 7.12. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ çift-katmanlı yansıma önleyici filmin optik yansıtıcılık spektrumu



Şekil 7.13. Güneş hücresinin $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC sonrası AFM görüntüsü

Güneş hücresi yüzeyinin $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ kaplaması sonrası 2 metal kontak ızgarası arasından alınan $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ tarama alanındaki 3 boyutlu yüzey görüntüsü Şekil 7.13’de verildi. Çift-katmanlı $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ kaplaması, yüzey pürüzlülüğünü 4,22 nm’ye yükseltmiştir. Çift-katmanlı bir diğer tasarım olan $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ ince filmine göre yüzey pürüzlülüğü daha azdır. Daha düşük yüzey pürüzlülüğü, ışığın yüzeyden daha fazla geri yansımaya neden olarak yansıtıcılığı arttırmaktadır. Bu durum, $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ ARC’nin $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC’ye göre daha düşük yansıtıcılık göstermesi anlamına gelmektedir. Ayrıca, Şekil 7.13, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ince filmin hücre yüzeyine homojen biçimde kaplandığını ve düzgün yüzey morfolojisine sahip olduğunu göstermektedir.



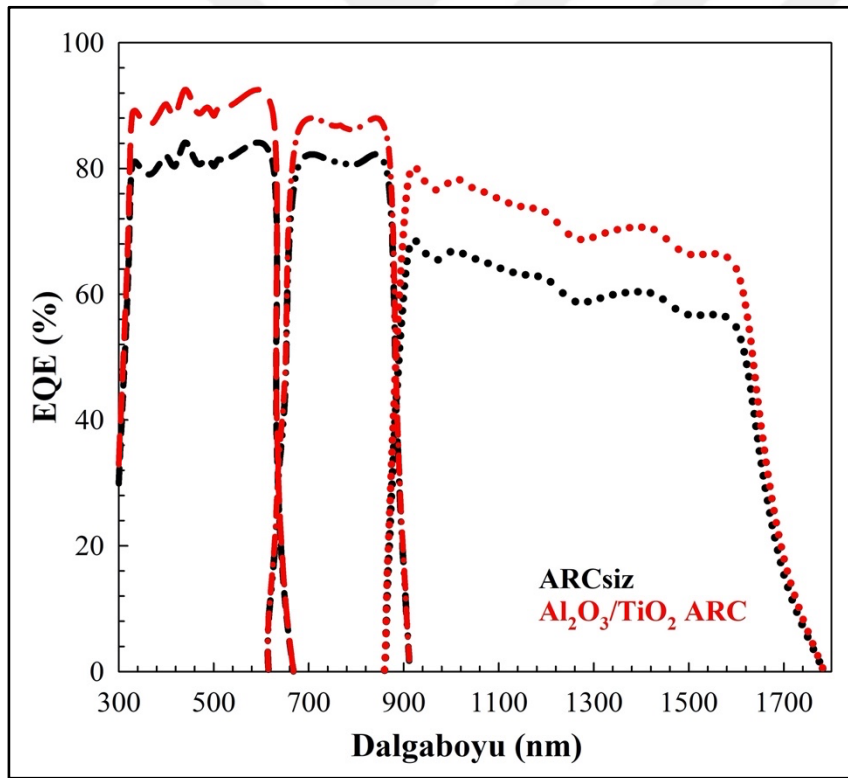
Şekil 7.14. Üç eklemlili güneş hücresinin $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ kaplaması öncesi ve sonrası I - V eğrileri

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ çift-katmanlı ARC’nin hücre performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla AM1.5G ışınımı altında I - V ölçümleri gerçekleştirildi. 6 cm^2 aktif alana sahip GaInP/GaAs/Ge güneş hücresinin $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ kaplaması öncesi ve sonrası I - V eğrileri Şekil 7.14’de verildi. Ayrıca, hesaplanan elektriksel çıktı parametreleri Çizelge 7.8’de sunuldu. Kaplama öncesi % 24,85 olan hücre verimi $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC sonrası % 27,46’ya yükseldi. Çizelge 7.8’de görüldüğü gibi çift-katman $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC, hücre performansında yaklaşık % 10,51 artışa neden olmaktadır. $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ ve $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ çift-katmanlı yansıma

önleyicilerin hücrenin elektriksel performansı üzerindeki etkisi karşılaştırıldığında, $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ ARC tasarımının daha verimli olduğu görülmektedir. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC kullanılarak azaltılan yansıma kayıpları, 82,70 mA olan I_{sc} değerini kaplama sonrası 91,50 mA'ye yükselmiştir. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ince filmi, üç eklemli güneş hücrelerinde yansıma önleyici olarak kullanılabilecek malzemelerden biridir.

Çizelge 7.8. Güneş hücresinin $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC öncesi ve sonrası elektriksel parametreleri

	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	I_{max} (mA)	V_{max} (V)	FF	Ac (cm ²)	η (%)
ARCsiz	82,70	2,50	71,90	2,07	0,72	6	24,85
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC	91,50	2,48	82,80	2,00	0,73	6	27,46



Şekil 7.15. Güneş hücresinin $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ kaplaması öncesi ve sonrası kuantum verimliliği

Yansıma önleyici kaplama öncesi ve sonrası üç eklemli güneş hücresi için her bir alt hücrenin EQE ölçüm sonucu Şekil 7.15’de verildi. Ayrıca her bir alt hücrenin ARC öncesi ve sonrası EQE ölçümlerinden hesaplanan J_{sc} değerleri Çizelge 7.9’da sunuldu. GaInP üst hücrenin ARC öncesi EQE değeri 500 nm dalgaboyunda % 79 iken, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC ile bu

değer % 89'a çıkmıştır. GaAs orta hücrenin EQE değeri 800 nm dalgaboyunda % 81'den % 86'ya yükselmiştir. Çift-katmanlı ARC, Ge alt hücrenin % 66 olan EQE değerini ise % 78'e çıkartmıştır. Yansıma önleyici kaplama öncesi güneş hücresinin net J_{sc} değeri 13,02 mA'dır. Yansıma kayıplarının azalması ile birlikte Ge alt hücrenin artan fotoakımı nedeniyle hücrenin net J_{sc} değeri 15,30 mA'e yükselmiştir. $I-V$ ve EQE ölçümlerinden elde edilen akım değerleri sistemlerin hata sınırları içerisinde birbirleriyle uyumludur. Çift-katmanlı Al_2O_3/TiO_2 ve SiO_2/Ta_2O_5 ARC'ler kıyaslandığında, SiO_2/Ta_2O_5 yansıma önleyici filmin güneş hücresinin elektriksel özelliklerini daha fazla iyileştirdiğinden daha performanslı bir ARC olduğu görülmektedir. İki ARC tasarımının kuantum verimliliği sonuçları da yapılan yorumu desteklemektedir.

Çizelge 7.9. Üç eklemli güneş hücresinin ARC öncesi ve sonrası EQE ve J_{sc} değerleri

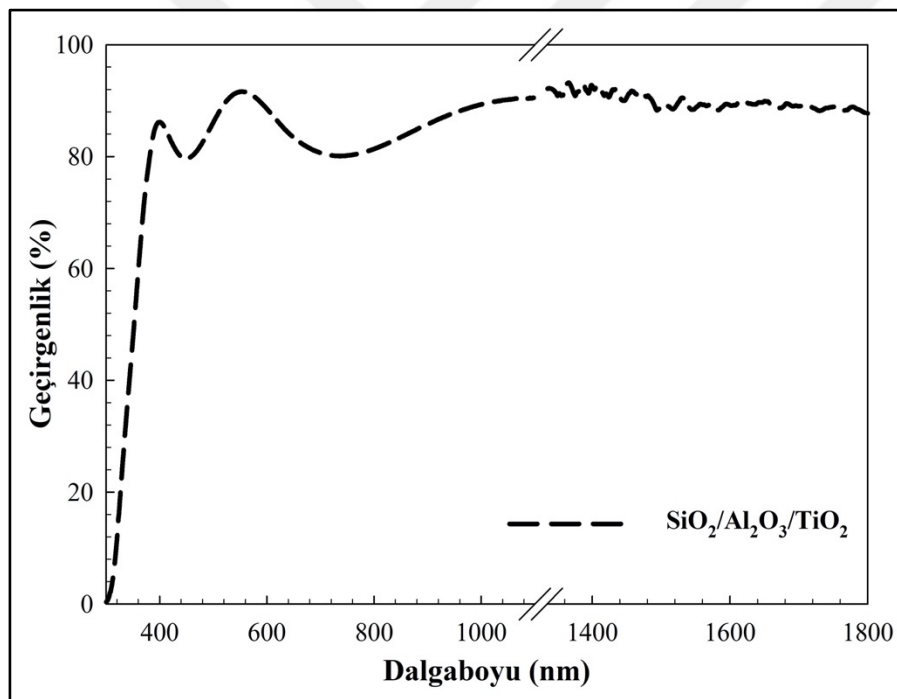
Alt Hücre	EQE (%)			J_{sc} (mA/cm ²)		
	GaInP	GaAs	Ge	GaInP	GaAs	Ge
ARCsiz	79,98	81,02	66,41	13,54	13,43	13,02
Al_2O_3/TiO_2 ARC	89,41	86,87	78,04	15,85	15,80	15,30

7.1.4. $SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$ üç-katman ARC üretimi ve karakterizasyonu

Üç eklemli GaInP/GaAs/Ge güneş hücresi üzerine kaplanan uygun yansıma önleyici tasarımlardan bir diğeri, üç-katmanlı $SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$ ince film yapısıdır. Uygun kırılma indisli yapısı nedeniyle Bölüm 6.5'de tasarlanan $SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$ filmi, 55 nm TiO_2 üzerine 80 nm Al_2O_3 ve en üstte 120 nm SiO_2 olacak biçimde 3 cm x 2 cm boyutlu metalizasyonu tamamlanmış güneş hücresi ve cam alttaş üzerine kaplandı. SiO_2 katmanının Al_2O_3/TiO_2 çift-katmanlı filmin optik özelliklerini iyileştirmesi beklenmektedir. Ayrıca, Bölüm 6.5'de tasarlanan üç-katmanlı ARC, teorik olarak en iyi sonuç veren tasarım olmuştur. Deneysel olarak da üç eklemli güneş hücresinin performansını en fazla arttıran ARC olması beklenmektedir. $SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$ kaplama işlemi, BesTec magnetron püskürtme sisteminde, 4 inç çaplı TiO_2 , Al_2O_3 ve SiO_2 seramik hedefler kullanılarak gerçekleştirildi. Kaplama parametreleri Çizelge 7.10'da verildi.

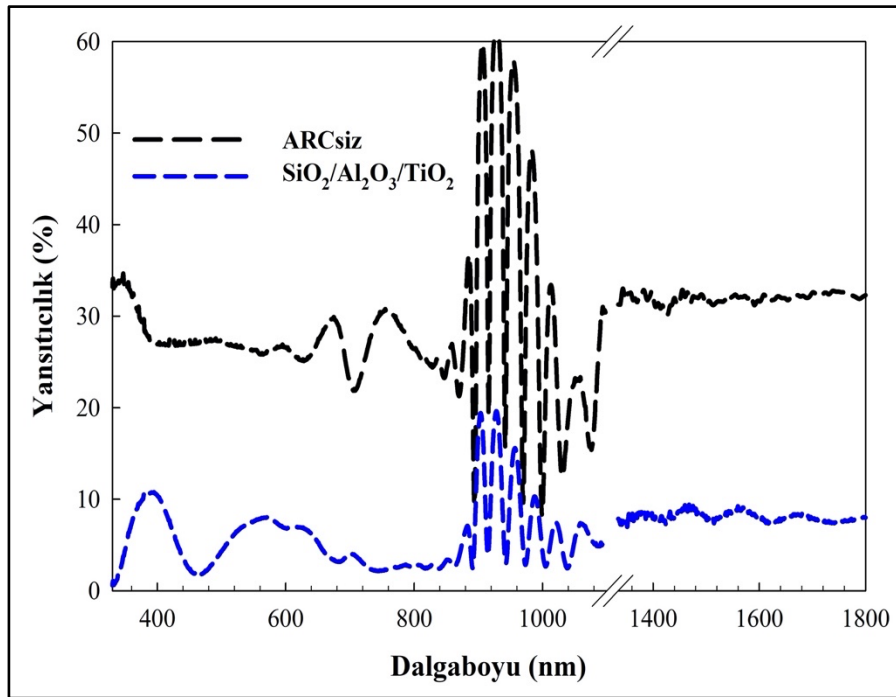
Çizelge 7.10. SiO₂/Al₂O₃/TiO₂ üç-katmanlı yansımaya önleyicinin kaplama parametreleri

Parametre	TiO ₂ Kaplaması	Al ₂ O ₃ Kaplaması	SiO ₂ Kaplaması
P_{base} (mbar)	$2,0 \times 10^{-7}$	$2,4 \times 10^{-8}$	$1,7 \times 10^{-7}$
$P_{kaplama}$ (mbar)	$4,1 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-3}$
RF Kaplama Gücü (W)	150	150	100
Ar Gaz Akışı (sccm)	15	5	10
Alttaş Sıcaklığı (°C)	Oda sıcaklığı	Oda sıcaklığı	Oda sıcaklığı
Kaplama Hızı (Å/sn)	0,4	0,3	0,7
Hedef alttaş mesafesi (mm)	90	90	90
Kalınlık (Å)	550	800	1200

Şekil 7.16. SiO₂/Al₂O₃/TiO₂ yansımaya önleyici filmin optik geçirgenlik spektrumu

Üç-katmanlı SiO₂/Al₂O₃/TiO₂ ARC'nin optik geçirgenliği, cam alttaş üzerine kaplanan filmin UV-Vis ve FTIR ölçümleri ile belirlendi. Geçirgenlik ölçümlerinin birleştirilmesiyle elde edilen optik geçirgenlik spektrumu Şekil 7.16'da verildi. SiO₂/Al₂O₃/TiO₂ ince filmin optik geçirgenliği incelendiğinde, 300-1800 nm dalgaboyu aralığında ortalama % 84,52 optik geçirgenliğe sahip olduğu görülmektedir. Al₂O₃/TiO₂ üzerine kaplanan SiO₂ katmanı, optik geçirgenliği % 77,66'dan % 84,52'ye yükseltmiştir. Üç-katmanlı filmin kullanıldığı güneş

hücresinde GaInP üst hücrenin soğurma bölgesinde optik geçirgenlik yaklaşık % 78,45'dir. 700-900 nm ve 900-1800 nm soğurma bölgelerinde ise optik geçirgenlik sırasıyla % 81,99 ve % 89,68'dir. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ üzerine kaplanan 120 nm SiO_2 , optik geçirgenliği arttırarak hücre içerisine girebilecek foton sayısında artışa neden olmaktadır. SiO_2 katmanı özellikle 900-1800 nm dalgaboyu bölgesinde geçirgenliğe etki etmektedir. Elde edilen sonuç, üç-katmanlı $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC'nin en yüksek optik geçirgenliğe sahip film olduğunu göstermektedir. Bu özelliği nedeniyle elektriksel parametrelerde en fazla artış bu kaplamada beklenmektedir.

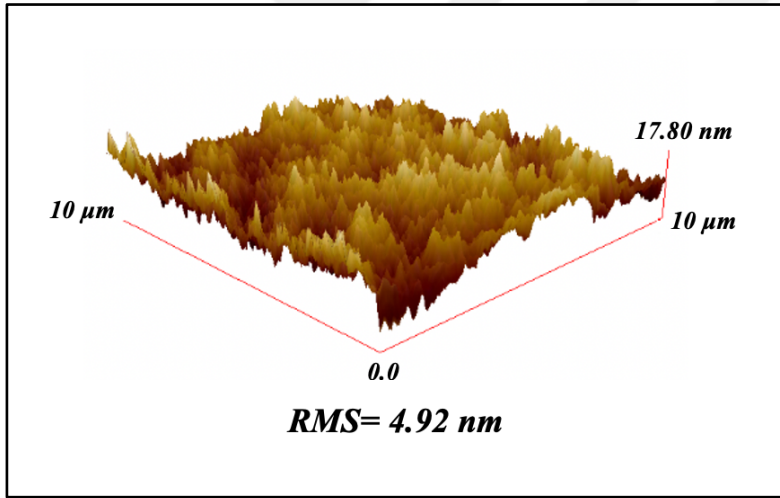


Şekil 7.17. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ yansıtıcı filmin optik yansıtıcılık spektrumu

Güneş hücresi yüzeyine kaplanan üç-katmanlı $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ yansıtıcı filmin yansıtıcılık spektrumu Şekil 7.17'de verildi. GaInP/GaAs/Ge güneş hücresi 300-1800 nm dalgaboyu aralığında ortalama % 31,02 yansıtıcılığa sahipken, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC sonrası yansıtıcılık % 6,97'ye düşmüştür. Bu durum, üç-katman $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ filmin ortalama yansıtıcılıkta % 77,53'lük bir azalma meydana getirdiğini göstermektedir. Ortalama yansıtıcılık değeri, bu çalışmada kullanılan diğer ARC yapılarına göre daha düşüktür. Bu durum, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC tasarımının GaInP/GaAs/Ge üç eklemli güneş hücresi için daha uygun olduğunu göstermektedir. Ortalama yansıtıcılık değerleri, 300-700 nm dalgaboyu aralığında % 5,77, 700-900 nm aralığında % 3,35 ve 900-1800 nm aralığında ise % 8,10'dur. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ filmi özellikle 900-1800 nm bölgesinde yansıtıcılığın azaltılmasında etkili olmuştur. Ortalama % 6,97 yansıtıcılığa sahip olan $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$

yansıma önleyici filmi teorik hesaplama sonucuyla uyumlu biçimde en düşük yansıtıcılığa sahip ARC'dir. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC, tez çalışmasının 17 cm^2 alanlı prototip hücrelerinde kullanılmak için en önemli adaydır.

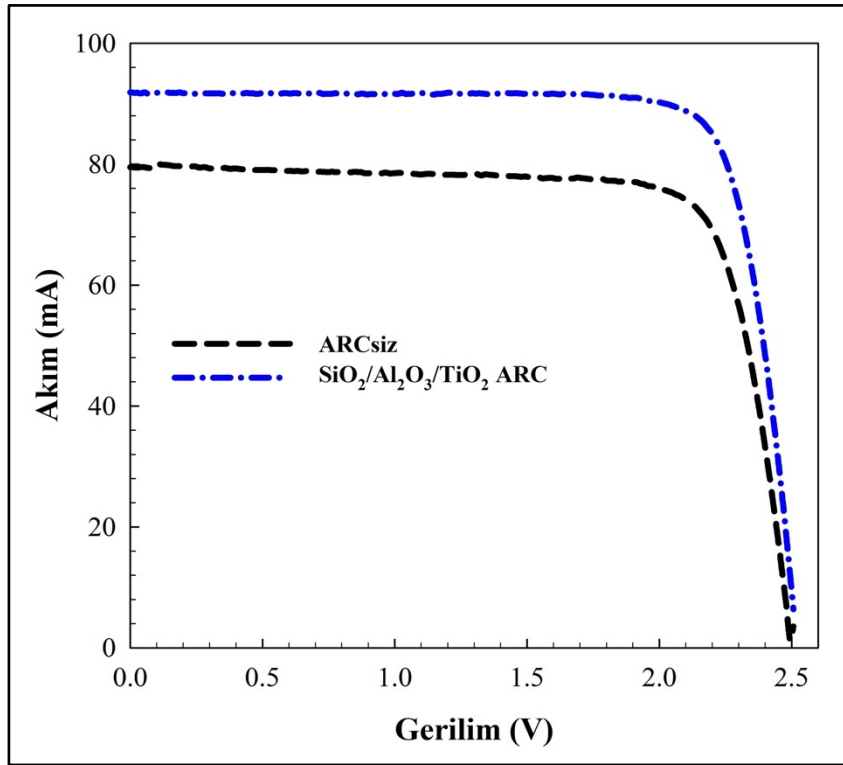
Güneş hücresi yüzeyinin $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ kaplaması sonrası 2 metal kontak ızgarası arasından alınan $10 \times 10 \text{ }\mu\text{m}^2$ tarama alanındaki 3 boyutlu yüzey görüntüsü Şekil 7.18'de verildi. Üç-katmanlı $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ kaplaması, yüzey pürüzlülüğünü $4,92 \text{ nm}$ 'ye yükseltmiştir. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ince filmi, en yüksek yüzey pürüzlülüğüne sahip olan filmidir. Daha yüksek yüzey pürüzlülüğü, ışığın yüzeydeki saçılmalarını arttırdığından yansıtıcılığın azalmasına neden olmaktadır. Bu durum, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC'nin diğer ARC'lere göre daha düşük yansıtıcılık göstermesi anlamına gelmektedir. Elde edilen deneysel sonuçlar bu durumu doğrulamaktadır. Ayrıca, Şekil 7.18, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ince filmin hücre yüzeyine homojen biçimde kaplandığını göstermektedir.



Şekil 7.18. Güneş hücresinin $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC sonrası AFM görüntüsü

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC'nin hücre performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla AM1.5G ışınımı altında $I-V$ ölçümleri gerçekleştirildi. 6 cm^2 aktif alana sahip GaInP/GaAs/Ge güneş hücresinin $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ kaplaması öncesi ve sonrası $I-V$ eğrileri Şekil 7.19'da verildi. Ayrıca, hesaplanan elektriksel çıktı parametreleri Çizelge 7.11'de sunuldu. ARC kaplama öncesi hücre verimi % 25,95 iken, üç-katman $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ kaplaması hücre verimini % 31,30'a yükseltmiştir. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ üzerine kaplanan 120 nm SiO_2 , optik yansıtıcılığı Şekil 7.17'de görüldüğü gibi azaltmıştır. Azalan yansıma kayıpları, $79,51 \text{ mA}$ olan I_{sc} değerini kaplama sonrası $91,87 \text{ mA}$ 'e yükseltmiştir. Yansıma önleyicinin

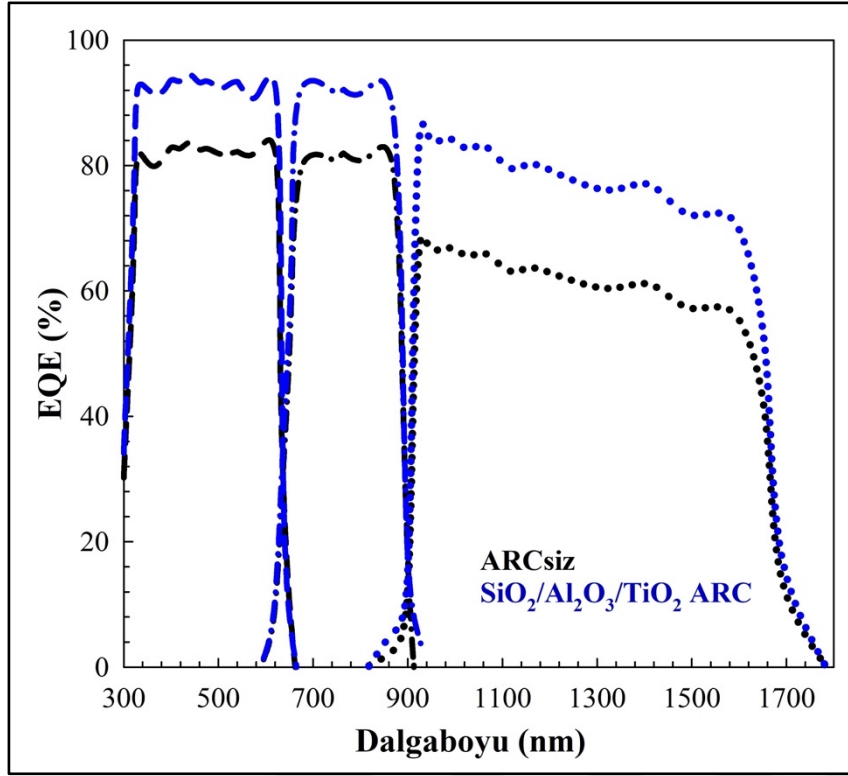
yarattığı pasivasyon etkisi, yüzey rekombinasyonlarını azalttığından V_{oc} değerinde artış meydana gelmiştir. Çizelge 7.11’de görüldüğü gibi üç-katman $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC, hücre performansında yaklaşık % 20,62 artışa neden olmaktadır. Bu tez çalışmasında yapılan tek-katman Ta_2O_5 , çift-katman $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ ve $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ yansıma önleyicileri ile kıyaslandığında $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ üç-katmanlı ARC’nin en yüksek performans artışı sağlayan kaplama olduğu görülmektedir.



Şekil 7.19. Güneş hücresinin $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ kaplaması öncesi ve sonrası I - V eğrileri

Çizelge 7.11. Hücrenin $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC öncesi ve sonrası elektriksel parametreleri

	$I_{sc} (mA)$	$V_{oc} (V)$	$I_{max} (mA)$	$V_{max} (V)$	FF	$A_c (cm^2)$	$\eta (\%)$
<i>ARCSiz</i>	79,51	2,50	73,43	2,12	0,78	6	25,95
<i>$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC</i>	91,87	2,52	87,20	2,16	0,81	6	31,30



Şekil 7.20. Hücrenin $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ kaplaması öncesi ve sonrası kuantum verimliliği

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ yansımaya önleyici kaplama öncesi ve sonrası üç eklemlili güneş hücresi için her bir alt hücrenin EQE ölçüm sonucu Şekil 7.20’de verildi. Ayrıca her bir alt hücrenin ARC öncesi ve sonrası EQE ve EQE verilerinden hesaplanan J_{sc} değerleri Çizelge 7.12’de verildi. GaInP üst hücrenin ARC öncesi EQE değeri 500 nm dalgaboyunda % 82 iken, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ARC ile bu değer % 92’ye çıkmıştır. GaAs orta hücrenin EQE değeri 800 nm dalgaboyunda % 80’den % 92’ye yükselmiştir. Üç-katmanlı ARC, Ge alt hücrenin EQE değerini ise % 67’den % 80’e çıkartmıştır. Yansımaya önleyici kaplama öncesi güneş hücresinin net J_{sc} değeri 13,30 mA’dır. Yansımaya kayıplarının azalması ile birlikte Ge alt hücrenin artan fotoakımı nedeniyle hücrenin net J_{sc} değeri 15,62 mA’e yükselmiştir. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ üzerine kaplanan SiO_2 , yansıtıcılığı azaltmakla birlikte GaInP/GaAs/Ge güneş hücresinin kuantum verimliliğini de arttırmıştır. Kuantum verimliliğini en fazla arttıran üç-katmanlı $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ince filmin, GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücreleri için en uygun ARC tasarımı olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.12. Üç eklemlı güneş hücresinin ARC öncesi ve sonrası EQE ve J_{sc} değeri

Alt Hücre	EQE (%)			J_{sc} (mA/cm ²)		
	GaInP	GaAs	Ge	GaInP	GaAs	Ge
ARCsiz	82,27	80,30	67,82	13,80	13,42	13,30
SiO ₂ /Al ₂ O ₃ /TiO ₂ ARC	92,40	92,50	80,05	16,38	16,51	15,62

7.2. Güneş Hücresi Uzak Kalifikasyon Testleri

Büyütme, fotolitografi, metalizasyon ve yansıma önleyici kaplamanın oluşturulmasının ardından üretimi tamamlanan 17 cm² alana sahip güneş hücrelerinin uzak kalifiye niteliği kazanabilmesi için çeşitli testlerden geçmesi gerekmektedir. Uzak kalifiye güneş hücrelerinin uzak şartlarına uygunluğu, yapılan çeşitli testler ile belirlenmektedir. Bu testler hakkında Bölüm 4.3.1 ve 4.3.2’de ayrıntılı bilgiler verilmiştir. Birçok ticari uzak kalifiye güneş hücresi üreticisi, ürünlerini bu standartlara göre test etmektedir. Kullanılan en yaygın standartlardan bir tanesi, ECSS-E-ST-20-08C Rev.1’de belirtilen standartlardır [151]. Tez çalışması kapsamında yapılan kalifikasyon testlerinde, ECSS-E-ST-20-08C Rev.1’den yararlanıldı. Ayrıca, elde edilen test sonuçlarının değerlendirilmesinde bu standardın yanı sıra ticari ürün olarak satılan uzak kalifiye güneş hücrelerinin test sonuçları kullanıldı.

Bu çalışmada gerçekleştirilen kalifikasyon testleri şunlardır: Fiziksel inceleme testleri (görsel inceleme, boyut-ağırlık ve kontak homojenliği), elektriksel performans testi, tutunma (bant) testi, ters beslem testi, elektron radyasyon testi, proton radyasyon testi, vakum-termal döngü testi ve nem testi.

7.2.1. Fiziksel inceleme testleri

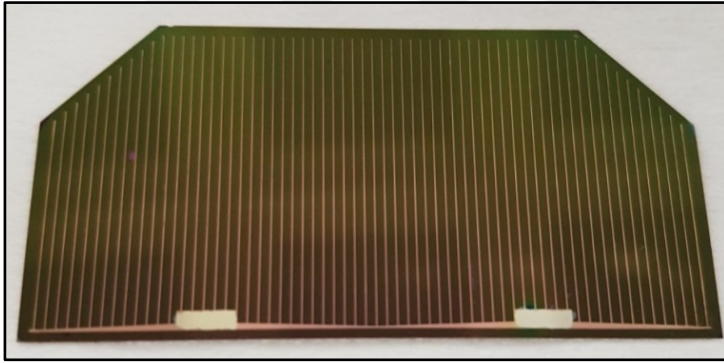
Fiziksel inceleme testleri, görsel inceleme, boyut ve ağırlık ile kontak homojenliği testlerini içermektedir. ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.1 maddesinde belirtilen görsel inceleme testi, hücre yüzeyindeki gözlemlenebilir kusurlara ilişkin gereksinimleri ve kalifikasyon için gerekli sınırları belirtmektedir. Aynı standardın 7.5.2 maddesinde açıklanan boyut ve ağırlık testi, üretilen hücrelerin boyut ve ağırlıklarının birbiriyle ve yapılan tasarımla uyumlu

olduğunu doğrulamak amacıyla yapılmaktadır. Bir diğer önemli parametre olan metal kontak homojenliği ise, hücre yüzeyindeki metal kontak kalınlıklarının aynı olduğunu doğrulamak amacıyla yapılmaktadır. Yapılan fiziksel inceleme testleri aşağıda maddeler halinde sunuldu.

Görsel inceleme testi

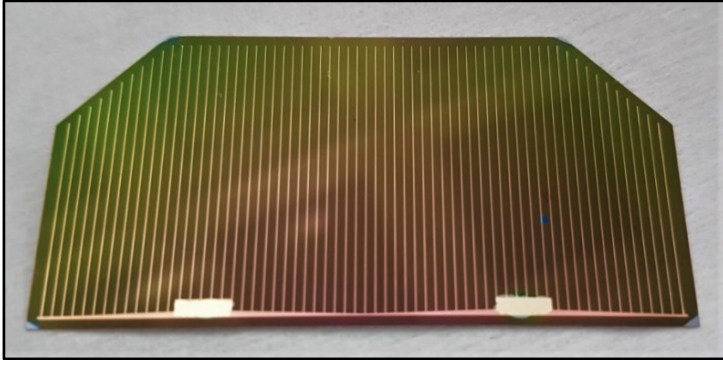
Görsel inceleme testi, ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.1 maddesine göre gerçekleştirildi. Bu test için 2 adet hücre seçildi. Gözlenebilir kusurlar belirlendi ve standartta belirtilen sınırlar içerisinde olup olmadığı değerlendirildi. Test sonuçları aşağıda sunuldu.

SSC-009 kodlu hücre: Hücrede kırık, çatlak, delik vb. fiziksel kusur bulunmamaktadır. Yüzeyde kalkan/kopan metal kontak ızgarası ve kontak pedi yoktur. Yansıma önleyici kaplamanın yüzeyde oluşturduğu bir miktar lekelenme mevcuttur. Ancak bu lekelenmeler toplam alanın % 2'sinden az olduğu için standart gereği kabul edilebilir niteliktedir.



Resim 7.1. SSC-009 kodlu hücrenin ön yüzey görüntüsü

SSC-014 kodlu hücre: Hücrede kırık, çatlak, delik vb. fiziksel kusur bulunmamaktadır. Yüzeyde kalkan/kopan metal kontak ızgarası ve kontak pedi yoktur. Yansıma önleyici kaplamanın yüzeyde oluşturduğu bir miktar lekelenme mevcuttur. Ancak bu lekelenmeler toplam alanın % 2'sinden az olduğu için standart gereği kabul edilebilir niteliktedir.



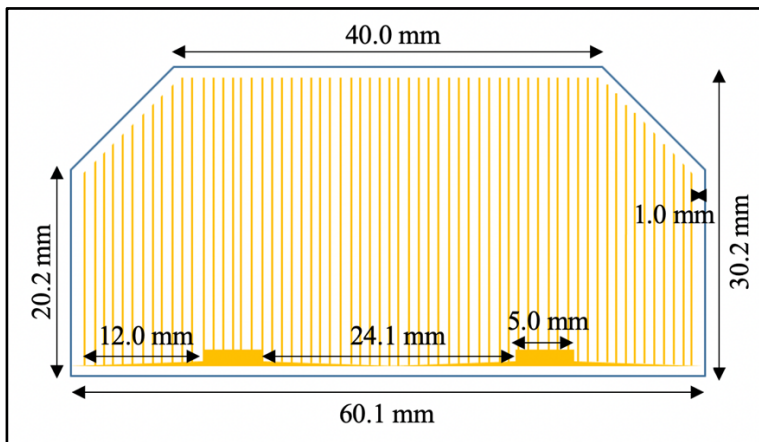
Resim 7.2. SSC-014 kodlu hücrenin ön yüzey görüntüsü

Görsel inceleme testi gerçekleştirilen 2 hücrenin bu test adımından hata sınırları içerisinde başarıyla geçtiği görülmektedir.

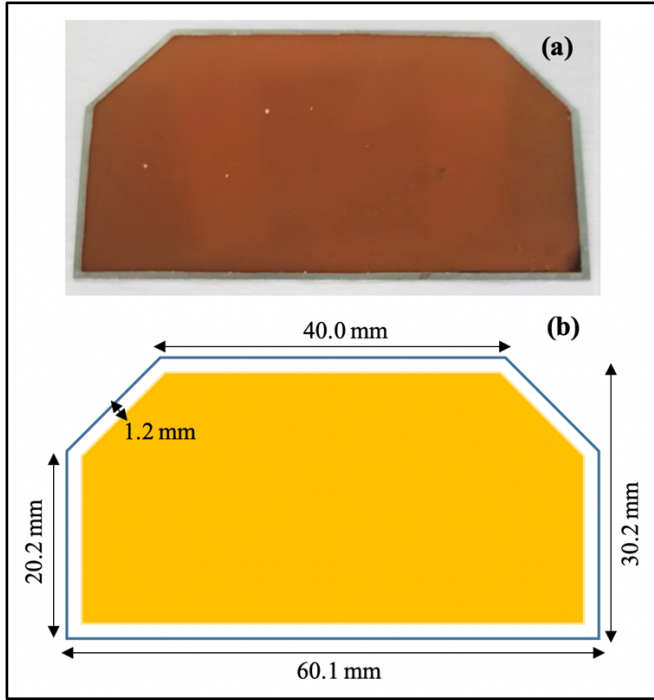
Boyut ve ağırlık testi

Hücrelerin boyut ve ağırlık testi, ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.2 maddesine göre gerçekleştirildi. Ağırlık ölçümleri için hassas terazi kullanıldı. Kalınlık ölçümleri ise hassas mikrometre yardımıyla yapıldı. Test sonuçları aşağıda sunuldu.

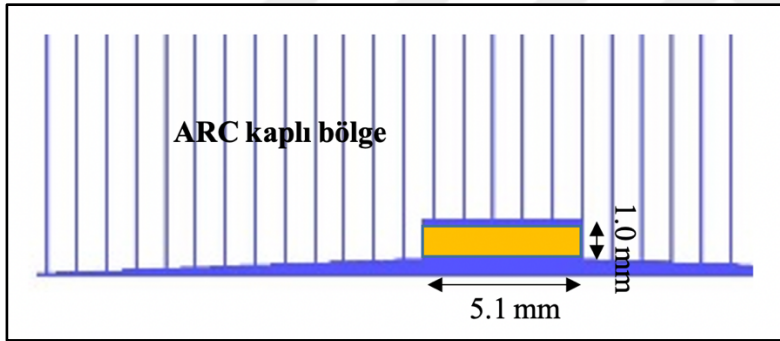
SSC-009 kodlu hücre: Hücre $185,052 \pm 0,005$ μm kalınlığa, $1,486 \pm 0,002$ g ağırlığa, yaklaşık $5,0 \pm 0,5$ μm metal kontak kalınlığına ve $35,0-75,0 \pm 0,5$ μm kontak genişliğine sahiptir. 17 cm^2 alana sahip hücrenin metal kontak alanları çıkarıldığında toplam $15,5 \text{ cm}^2$ aktif alana sahip olduğu belirlendi. Ön ve arka yüzey için hücre boyutları aşağıda sunuldu.



Resim 7.3. SSC-009 kodlu hücrenin ön yüzey boyutları

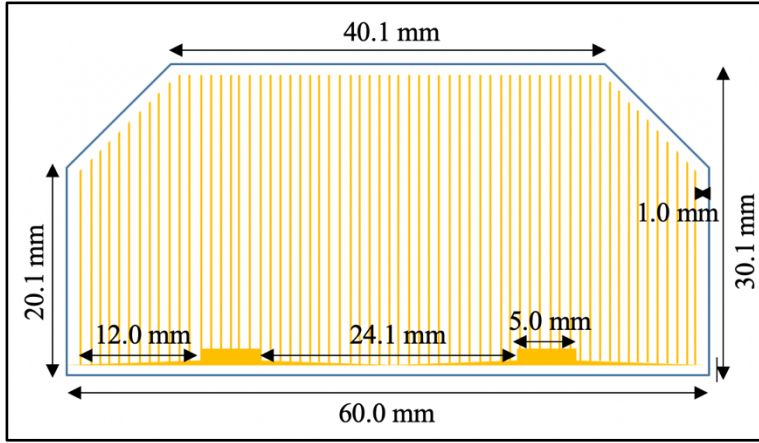


Resim 7.4. SSC-009 kodlu hücrenin a) arka yüzey görüntüsü b) arka yüzey boyutları

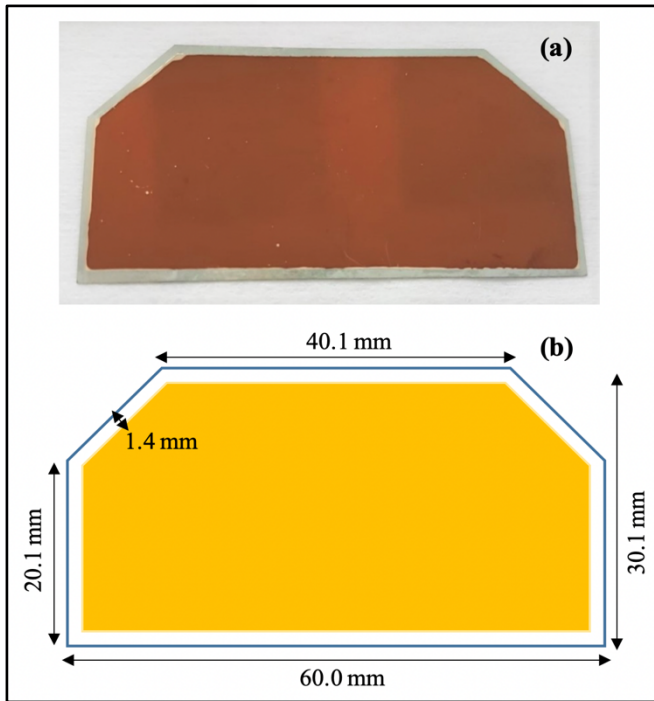


Resim 7.5. SSC-009 kodlu hücrenin kontak bölgesi boyutları

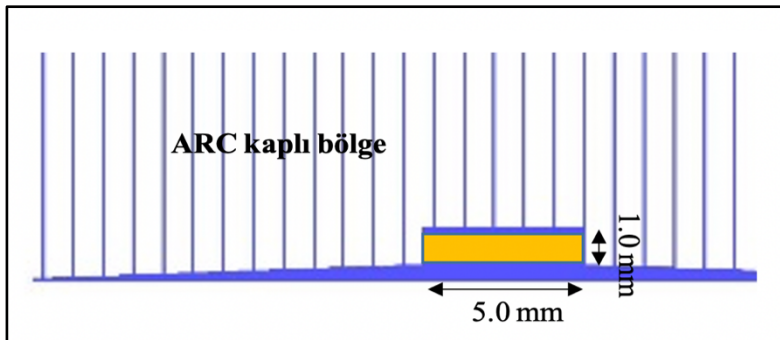
SSC-014 kodlu hücre: Hücre $184,863 \pm 0,005 \mu\text{m}$ kalınlığa, $1,395 \pm 0,002 \text{ g}$ ağırlığa, yaklaşık $5,0 \pm 0,5 \mu\text{m}$ metal kontak kalınlığına ve $35,0-75,0 \pm 0,5 \mu\text{m}$ kontak genişliğine sahiptir. 17 cm^2 alana sahip hücrenin metal kontak alanları çıkarıldığında toplam $15,5 \text{ cm}^2$ aktif alana sahip olduğu belirlendi. Ön ve arka yüzey için hücre boyutları aşağıda sunuldu.



Resim 7.6. SSC-014 kodlu hücrenin ön yüzey boyutları



Resim 7.7. SSC-014 kodlu hücrenin a) arka yüzey görüntüsü b) arka yüzey boyutları



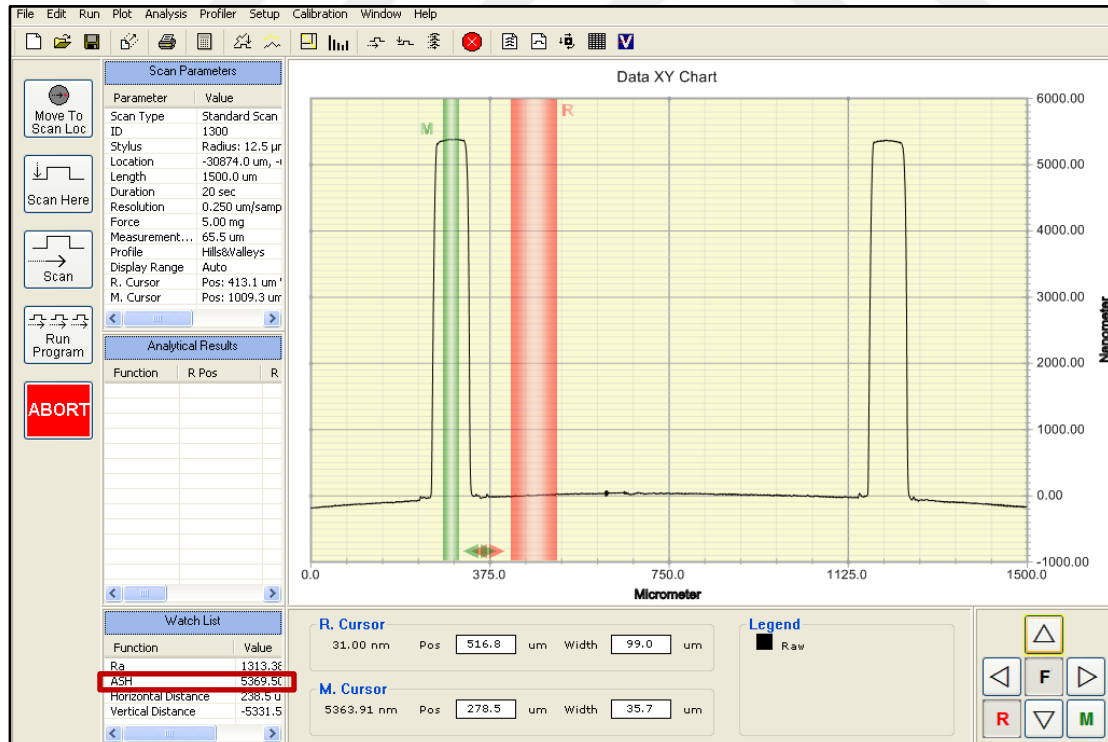
Resim 7.8. SSC-014 kodlu hücrenin kontak bölgesi boyutları

Boyut ve ağırlıkları test edilen güneş hücrelerinin hata sınırları içerisinde aynı özelliklere sahip olduğu ve yapılan tasarıma uygun üretildikleri görülmektedir. Bu durum üretim sürecinin tekrarlanabilir olduğunu göstermektedir. Test sonuçlarına göre, üretilen hücrelerin standartlara uygun olduğu düşünülmektedir.

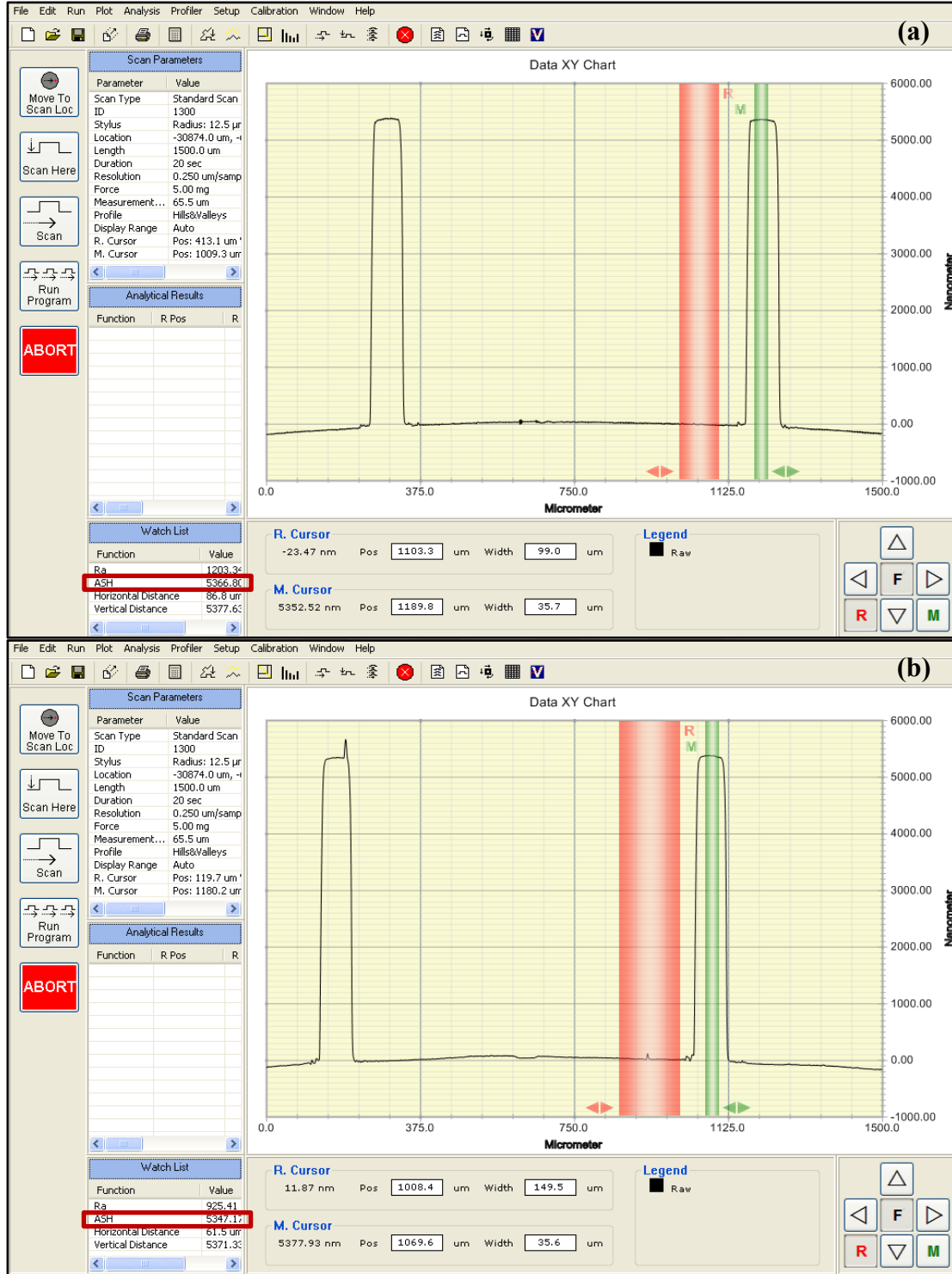
Kontak homojenliği testi

Kontak homojenliği testi için Veeco Dektak-150 stylus tipi profilometre sistemi kullanıldı. Hücrelerin sağ ve sol uçlarından ve orta bölgesinden iki metal kontak ızgarasının kalınlıkları ölçüldü. Kontak kalınlıklarının homojenliği değerlendirildi.

SSC-009 kodlu hücre: Hücrenin profilometre ölçüm sonuçları aşağıda sunuldu. Hücre yaklaşık 5,36 μm kontak kalınlığına sahiptir. Farklı bölgelerden alınan ölçümlerin birbirleriyle uyumlu olduğu ve $\pm 0,02 \mu\text{m}$ sapma meydana geldiği görülmektedir. Sonuçlar metal kontak kalınlığının homojen olduğunu doğrulamaktadır.

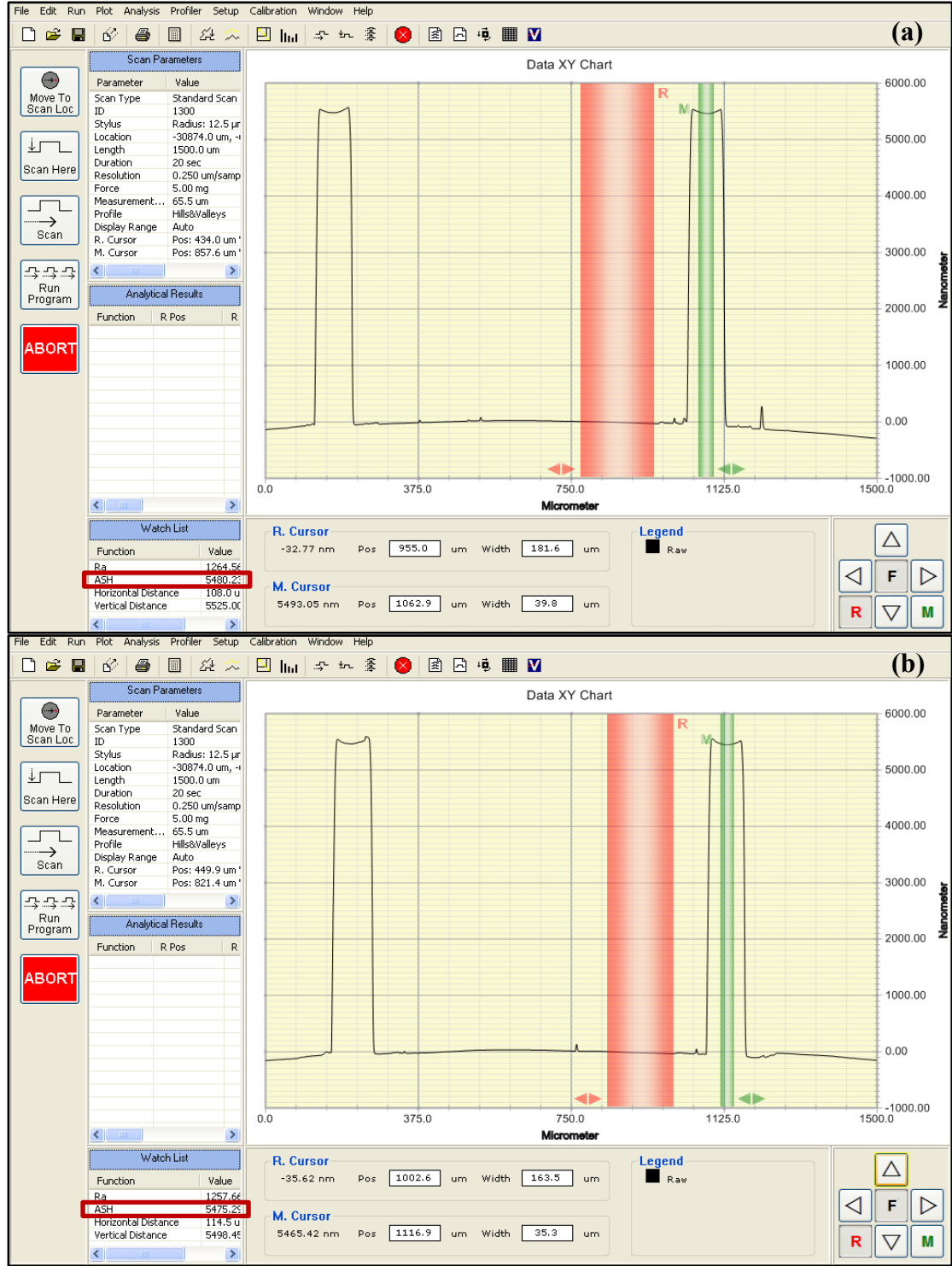


Resim 7.9. SSC-009 kodlu hücrenin sağ iki kontak ızgarasının profilometre ölçümü

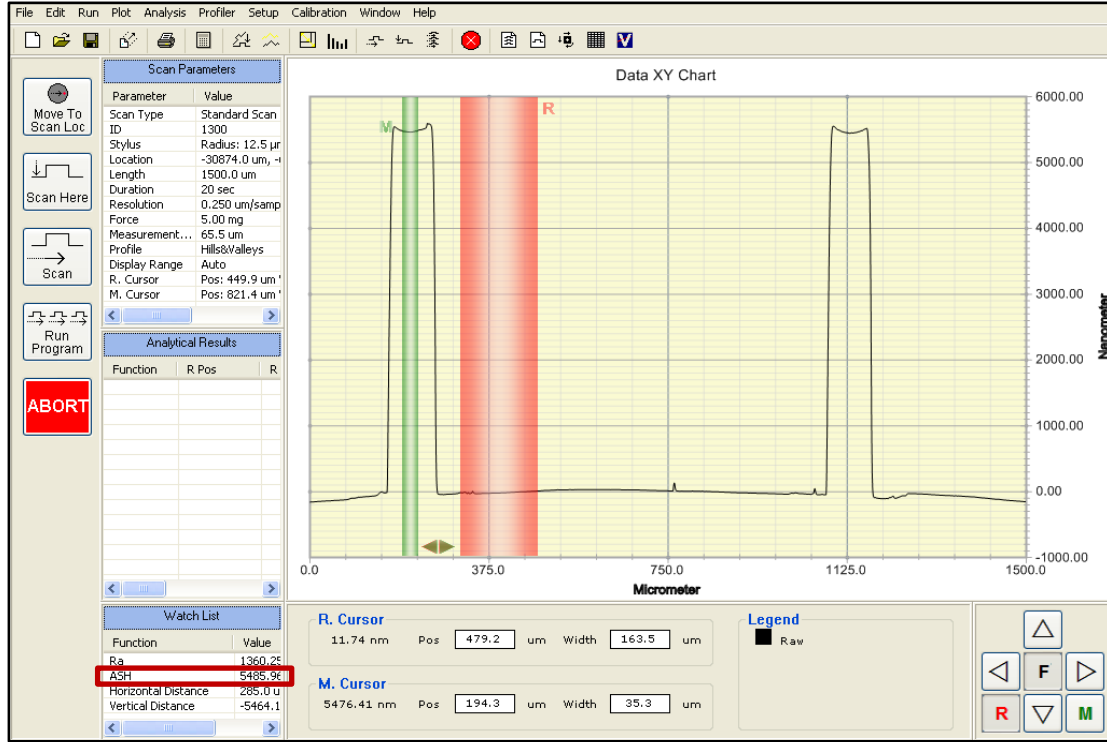


Resim 7.10. Hücrenin a) orta b) sol iki kontak ızgarasının profilometre ölçümleri

SSC-014 kodlu hücre: Hücrenin profilometre ölçüm sonuçları aşağıda sunuldu. Hücre yaklaşık 5,48 μ m kontak kalınlığına sahiptir. Farklı bölgelerden alınan ölçümlerin birbirleriyle uyumlu olduğu ve $\pm 0,01$ μ m sapma meydana geldiği görülmektedir. Sonuçlar metal kontak kalınlığının homojen olduğunu doğrulamaktadır.



Resim 7.11. SSC-014 hücresinin a) sağ b) orta iki kontak ızgarasının profilometre ölçümleri



Resim 7.12. SSC-014 kodlu hücrenin sol iki kontak ızgarasının profilometre ölçümü

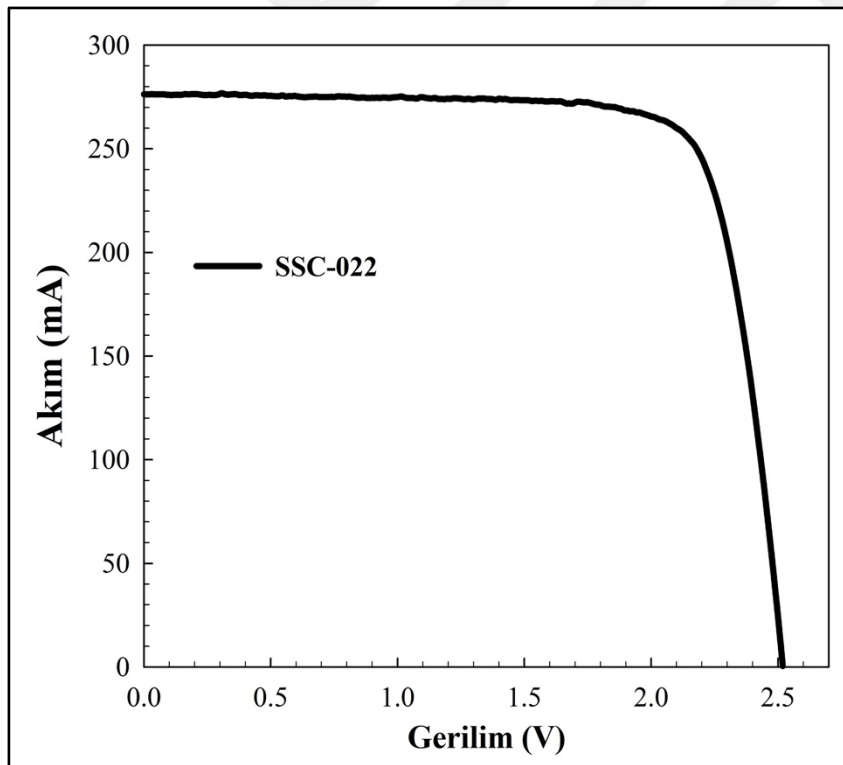
7.2.2. Elektriksel performans testi

Test edilen hücrelerin I_{sc} , V_{oc} , I_{max} , V_{max} , FF ve η gibi elektriksel parametrelerinin belirlenmesi için elektriksel performans testleri gerçekleştirildi. Hücrelerin elektriksel performans testleri, ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.3 maddesine göre yapıldı. Bu çalışmada kalifikasyon test işlemleri gerçekleşen tüm güneş hücrelerinin elektriksel ölçümlerinde bu standartta belirtilen şartlardan yararlanıldı. Ancak güneş simülatörü olarak AM1.5G (100 mW/cm²) ışınımı sağlayan sistem kullanıldı. Her bir uzay kalifikasyon testinin öncesinde ve sonrasında gerçekleştirilen elektriksel performans testinde uygulanan adımlar aşağıda sunuldu.

- 1) Test edilecek güneş hücresinin test öncesi elektriksel parametreleri belirlendi. Hücrelerin AM1.5G ışınması altındaki $I-V$ ölçümleri, ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.3 maddesine göre oda sıcaklığında (25±5 °C) gerçekleştirildi. Ölçüm hassasiyeti için 500 farklı voltaj noktasından ölçüm alınarak akım değerleri dijital olarak kaydedildi ve grafiğe dönüştürüldü. Ayrıca, elektriksel çıktı parametreleri (V_{oc} , I_{sc} , V_{max} , I_{max} , FF , η) hesaplanarak çizelge haline getirildi. Hesaplamalarda hücre aktif alanı, metal kontak alanlarının çıkartılmasıyla elde edilen 15,5 cm² olarak alındı.

- 2) Seçilen güneş hücresinin kalifikasyon testi gerçekleştirildi.
- 3) Test edilen güneş hücresinin test sonrası elektriksel parametreleri belirlendi. Hücrelerin AM1.5G ışması altındaki $I-V$ ölçümleri, ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.3 maddesine göre oda sıcaklığında (25 ± 5 °C) gerçekleştirildi ve 500 farklı voltaj noktasından ölçüm alınarak akım değerleri dijital olarak kaydedilerek grafik haline getirildi. Ayrıca, elektriksel çıktı parametreleri hesaplanarak ilgili çizelgeye not edildi. Hesaplamalarda hücre aktif alanı, metal kontak alanlarının çıkartılmasıyla elde edilen $15,5 \text{ cm}^2$ olarak alındı.
- 4) Kalifikasyon testi öncesi ve sonrası elektriksel parametreler kıyaslandı ve sonuçlar değerlendirildi.

Elektriksel performans testi gerçekleştirilen SSC-022 kodlu hücrenin $I-V$ eğrisi Şekil 7.21’de, hesaplanan elektriksel parametreleri ise Çizelge 7.13’de verildi.



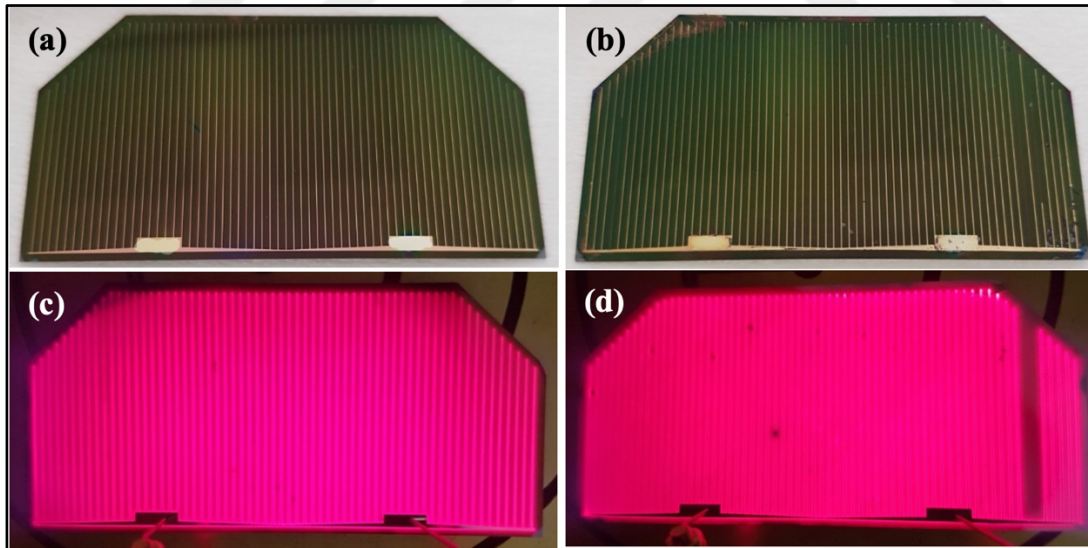
Şekil 7.21. SSC-022 kodlu hücrenin elektriksel performans testi sonucu

Çizelge 7.13. SSC-022 kodlu güneş hücresinin elektriksel performans parametreleri

<i>Hücre Kodu</i>	<i>I_{sc} (mA)</i>	<i>V_{oc} (V)</i>	<i>I_{max} (mA)</i>	<i>V_{max} (V)</i>	<i>FF</i>	<i>Ac (cm²)</i>	<i>η (%)</i>
SSC-022	276,31	2,52	258,21	2,12	0,79	15,5	35,36

7.2.3. Tutunma (bant) testi

Tutunma (bant) testi, metal kontakların ve yansıma önleyici kaplamanın yüzeydeki tutunumunun değerlendirilmesi ve dayanıklılığının doğrulanması amacıyla yapılmaktadır. Bu çalışmada gerçekleştirilen test işlemi, ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.8 maddesine uygun biçimde yapıldı. Test için ilgili standardın 7.5.8.2.c maddesinde belirtilen özelliklere sahip 3M Scotch 313 bant kullanıldı. Bant testi öncesi ve sonrası hücre görselleri Resim 7.13.a ve b’de verildi. Ayrıca hücrelerin bant testi öncesi ve sonrası elektrolüminesans (EL) ölçümlerine ait görüntüler Resim 7.13.c ve d’de sunuldu.



Resim 7.13. Güneş hücresinin bant testi a) öncesi b) sonrası yüzey görüntüsü (c) öncesi (d) sonrası EL görüntüsü

Bant testi sonuçları incelendiğinde, hücrenin 3 metal kontak ızgarasında kopma olduğu görülmektedir. EL sonuçlarına göre akım taşımayan 2 adet kontak ızgarası bulunmaktadır. Toplayıcı kontaklarda ve yansıma önleyici kaplamada ise kalkma/kopma yoktur. Sonuçlar ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.8.2.d maddesine göre değerlendirildiğinde, yüzeyde

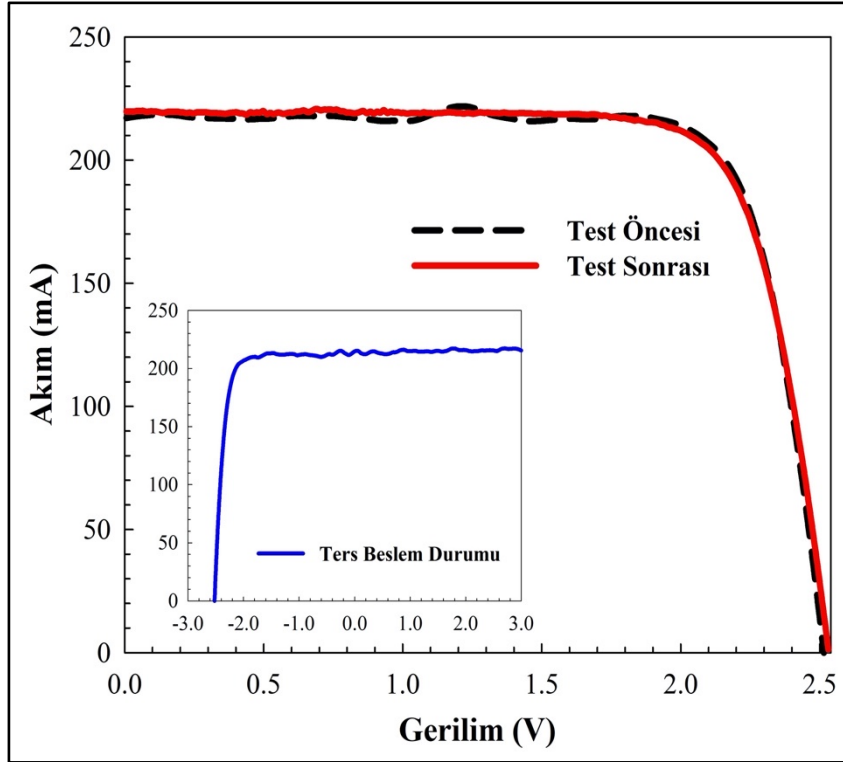
oluşan kusurların kapladığı alan toplam alanın % 5'inden küçük olduğundan sonuçlar kabul edilebilir niteliktedir. Oluşan nokta kusurların çapı 0,25 mm'den azdır. Ayrıca kopan/kalkan metal ızgara sayısı ≤ 3 olduğundan standardın 7.5.8.2.d maddesi gereği kabul edilebilir niteliktedir. Bant testi sonuçlarına göre üretilen hücrelerin metal kontak ve yansıma önleyici kaplamalarının standartlara uygun olduğu ve testten geçtiği söylenebilir.

7.2.4. Ters beslem testi

Ters beslem testinin amacı, güneş hücresinin ters beslenmesi durumunda hücre performansında meydana gelebilecek değişimin izlenmesidir. Test işlemi, ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.16 maddesine uygun biçimde yapıldı. Düz ve ters beslem altındaki hücre AM1.5G ışımaya maruz bırakıldı. Bu kalifikasyon test adımı için fabrikasyon işlemleri tamamlanmış SSC-014 kodlu hücre seçildi. Aşağıdaki test adımları izlenerek, ters beslem durumunda çalıştırılan hücrenin elektriksel parametreleri, test öncesi değerleri ile kıyaslandı.

- 1) İlk olarak, test edilecek güneş hücresinin ters beslem testi öncesi elektriksel parametreleri, Bölüm 7.3.2'de belirtilen elektriksel performans test adımları kullanılarak belirlendi. Elektriksel çıktı parametreleri hesaplanarak Çizelge 7.14'e not edildi.
- 2) Güneş hücresinin pozitif ve negatif kontakları yer değiştirilerek (ters beslem durumu) güç kaynağına bağlandı. AM1.5G ışımada -3 V ile +3 V aralığında voltaj uygulanarak akım değerleri not edildi.
- 3) Ters beslem testi sonrası güneş hücresinin elektriksel parametreleri, Bölüm 7.3.2'de belirtilen elektriksel performans test adımları kullanılarak belirlendi. Elektriksel çıktı parametreleri hesaplanarak Çizelge 7.14'e kaydedildi.
- 4) Test öncesi ve sonrası veriler kıyaslanarak değerlendirildi.

Çizelge 7.14 incelendiğinde, hücrenin elektriksel parametrelerinin test sonrasında bir miktar değiştiği görülmektedir. Test öncesi % 28,10 olan verimlilik değeri ters beslem testi sonrası % 27,74'e düştü. Bu durum yaklaşık % 1'lik bir verim kaybına karşılık gelmektedir. Benzer değişim diğer elektriksel parametrelerde de görülmektedir. ECSS-E-ST-20-08C standardı elektriksel parametrelerde $\leq$ % 2'lik bir değişimi kabul etmektedir. Buna göre ters beslem durumu sonrası elektriksel özelliklerindeki değişimi standartlara uygun olan güneş hücresinin ters beslem testinden başarıyla geçtiği söylenebilir.



Şekil 7.22. SSC-014 kodlu hücrenin ters beslem testi öncesi ve sonrası I - V eğrileri

Çizelge 7.14. SSC-014 kodlu hücrenin ters beslem test sonuçları

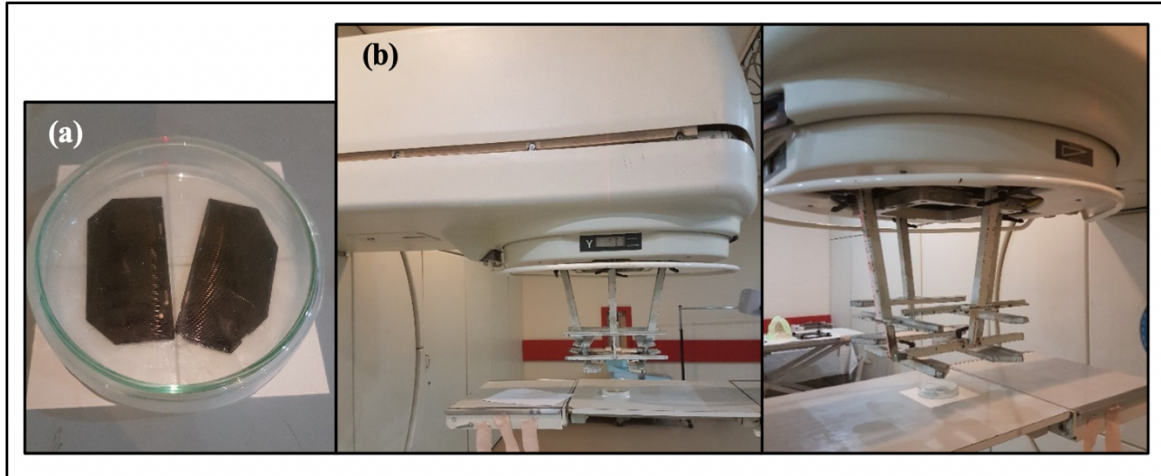
Hücre Kodu	SSC-014					
Parametre	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	I_{max} (mA)	V_{max} (V)	FF	η (%)
Test Öncesi	217,61	2,46	205,19	2,12	0,81	28,10
Ters Beslem Durumu	216,87	2,52	200,24	2,15	0,79	27,73
Test Sonrası	219,78	2,53	204,91	2,10	0,77	27,74

7.2.5. Elektron radyasyon testi

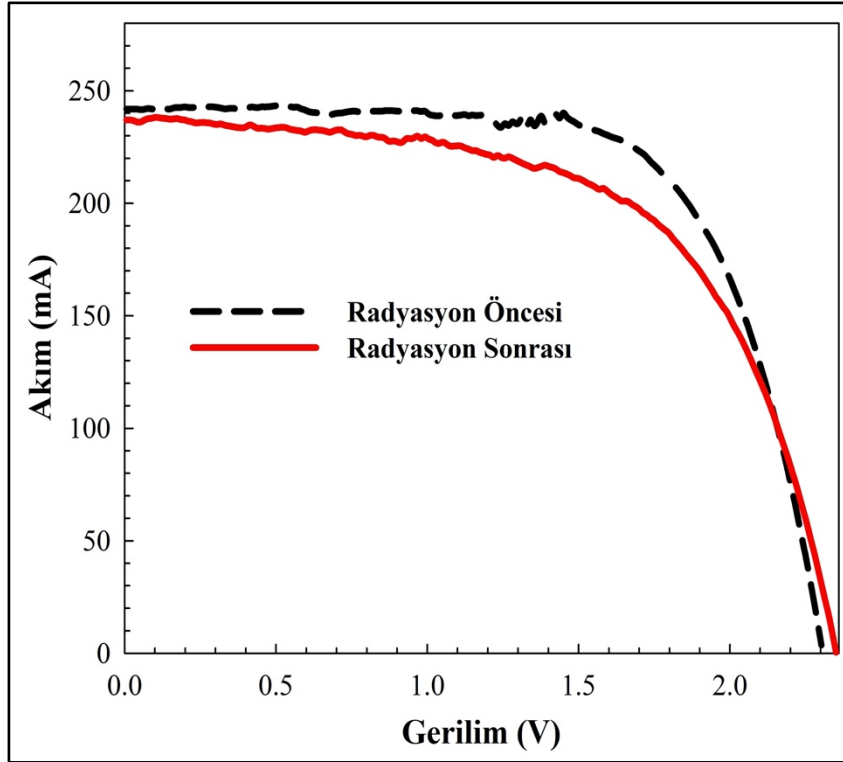
Bu testin amacı, güneş hücrelerinin uzayda faaliyet göstereceği yörüngede maruz kalacağı, uzay ortamında bulunan elektronların neden olduğu, radyasyonun hücre performansı üzerindeki etkisini izlemektir. Bu kalifikasyon test adımı için fabrikasyon işlemleri tamamlanmış SSC-001 ve SSC-015 kodlu 2 adet hücre seçildi. Aşağıdaki test adımları izlenerek test edilen hücrelerin elektriksel parametreleri, test öncesi değerleri ile

kıyaslanarak üretilen hücrenin elektron radyasyonuna dayanımı ve kalifiye niteliği belirlendi.

- 1) Öncelikle, test edilecek güneş hücrelerinin elektron radyasyon maruziyeti öncesi elektriksel parametreleri, Bölüm 7.3.2’de belirtilen elektriksel performans test adımları kullanılarak belirlendi. Elektriksel çıktı parametreleri hesaplanarak Çizelge 7.15 ve 7.16’ya not edildi.
- 2) Güneş hücreleri, elektron radyasyon maruziyeti sırasında oluşabilecek oksidasyonu engellemek amacıyla ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.13.2 maddesine göre, bağlantı kısımları hava sızdırmayacak biçimde kapatılarak yüksek saflıkta azot gazı doldurulmuş cam petri kapları içerisine Resim 7.14.a’da görüldüğü gibi yerleştirildi ve 20 ± 10 °C’de tutuldu.
- 3) Elektron ışınlama işlemi, Gazi Üniversitesi Hastanesi Radyasyon Onkolojisi Anabilim Dalında bulunan General Electric Saturne 43 lineer hızlandırıcı sistemi (Resim 7.14.b) kullanılarak gerçekleştirildi. Işınlama işleminde; 100 cm kaynak-malzeme mesafesi, 150×150 mm² ışınlama alanı, 3 MeV elektron enerjisi, 1×10^{16} e/cm² elektron akısı ve 58 mGy radyasyon dozu parametreleri kullanıldı.
- 4) Elektron radyasyon maruziyeti sonrası güneş hücrelerinin elektriksel parametreleri, Bölüm 7.3.2’de belirtilen elektriksel performans test adımları kullanılarak belirlendi. Elektriksel çıktı parametreleri hesaplanarak Çizelge 7.15 ve 7.16’ya kaydedildi.
- 5) Elektron radyasyon testi sonrası fiziksel inceleme testi sonuçları yine Çizelge 7.15 ve 7.16’da belirtilen kısımda sunuldu.



Resim 7.14. a) Cam petri kabı içerisine yerleştirilen ve azot ortamında tutulan hücreler b) General Electric Saturne 43 lineer hızlandırıcı sistemi



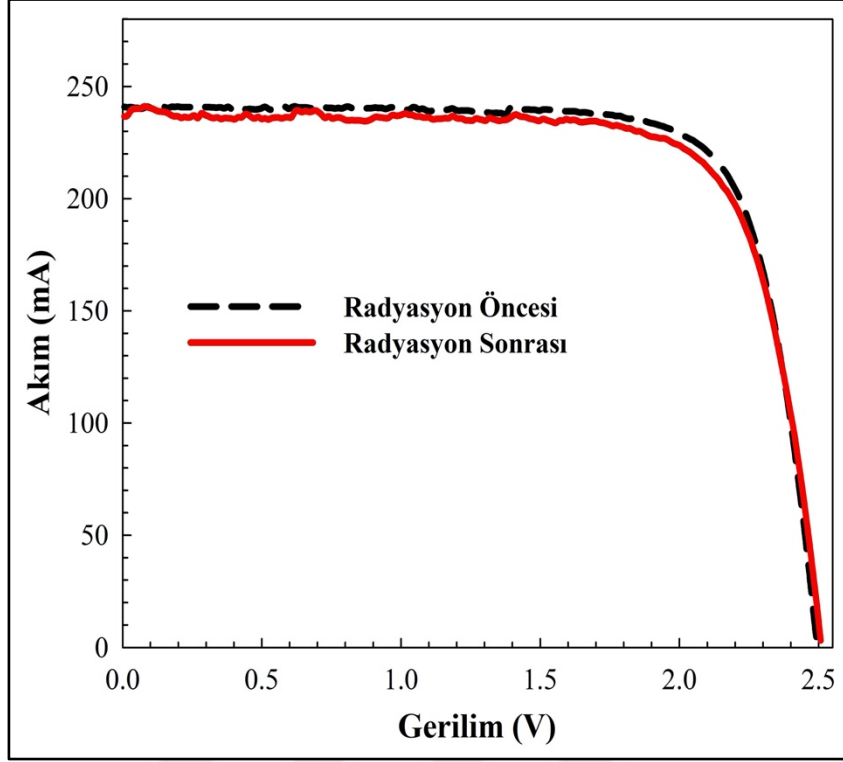
Şekil 7.23. SSC-001 kodlu hücrenin elektron radyasyon testi öncesi ve sonrası I - V eğrileri

Çizelge 7.15. SSC-001 kodlu hücrenin elektron radyasyon test sonuçları

Hücre Kodu	SSC-001					
Radyasyon Parametreleri	$I_{sc} (mA)$	$V_{oc} (V)$	$I_{max} (mA)$	$V_{max} (V)$	FF	$\eta (%)$
0	241,87	2,30	220,54	1,73	0,68	24,56
3 MeV $1 \times 10^{16} e/cm^2$	236,99	2,35	192,40	1,75	0,60	21,72
Görsel Muayene Sonucu	Radyasyon maruziyeti öncesi ve sonrası hücre görselleri kıyaslandığında herhangi bir kalkma/kopma vb. görsel kusur bulunmamaktadır.					

Çizelge 7.15 ve 7.16'nın incelenmesi, üretilen üç eklemli güneş hücrelerinin uzay ortamında karşılaşacakları elektron radyasyonundan ne kadar etkileneceklerinin anlaşılması için oldukça önemlidir. ECSS-E-ST-20-08C standardının elektron radyasyon test prosedürünü açıkladığı 7.5.13 bölümü, uygulanacak elektron enerjisinin 1 MeV olması gerektiğini bildirmektedir. Ancak bu çalışmada ışınlama amacıyla kullanılan sistemin limitleri nedeniyle 3 MeV enerjiye sahip elektronlar kullanılmıştır. Daha yüksek enerjiye sahip

elektronların kullanımı avantaja çevrilerek, standarttan daha zor şartlardaki uzay ortamında testin gerçekleşmesi sağlanmıştır.



Şekil 7.24. SSC-015 kodlu hücrenin elektron radyasyon testi öncesi ve sonrası I - V eğrileri

Çizelge 7.16. SSC-015 kodlu hücrenin elektron radyasyon test sonuçları

Hücre Kodu	SSC-015					
Radyasyon Parametreleri	$I_{sc} (mA)$	$V_{oc} (V)$	$I_{max} (mA)$	$V_{max} (V)$	FF	η (%)
0	240,85	2,48	222,72	2,09	0,78	29,97
$3 MeV$ $1 \times 10^{16} e/cm^2$	236,58	2,51	215,95	2,09	0,76	29,06
Görsel Muayene Sonucu	Radyasyon maruziyeti öncesi ve sonrası hücre görselleri kıyaslandığında herhangi bir kalkma/kopma vb. görsel kusur bulunmamaktadır.					

Çizelge 7.15 ve 7.16 incelendiğinde, yüksek enerjili elektron bombardımanı nedeniyle hücre yapısında meydana gelen kusurlar elektriksel özellikleri etkilemiştir. Oluşan yapısal kusurların neden olduğu tuzak seviyeleri, elektron-hol çiftlerini tuzaklayarak beklenildiği gibi fotoakımda azalmaya neden olmuştur. Bu nedenle her iki hücrenin de I_{sc} ve I_{max} değerlerinde azalma gözlemlendi. Benzer şekilde hücrenin idealliğinin bir göstergesi olan FF

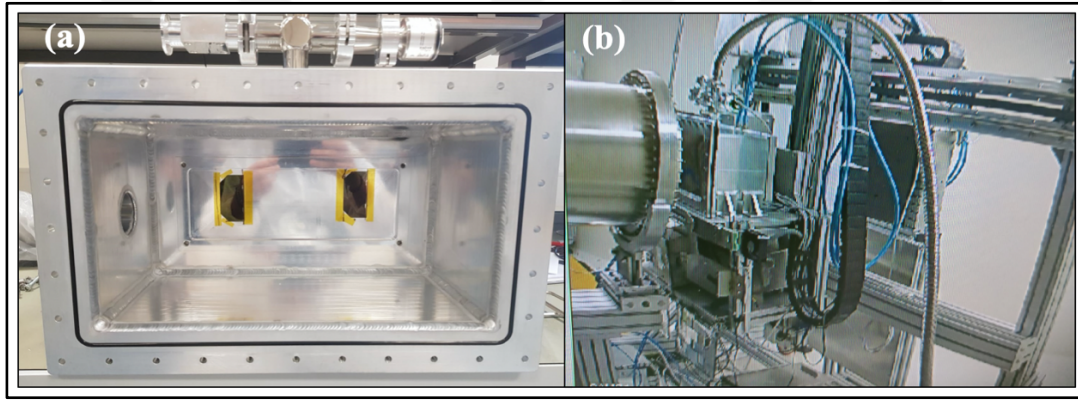
değeri, her iki hücrede de azaldı. V_{oc} değerlerinde ise, bir miktar artış gözlemlendi. Güneş hücrelerinin en önemli değerlendirme parametresi olan enerji dönüşüm verimlilikleri kıyaslandığında ise, her iki hücrenin verimliliklerinin beklenildiği gibi azaldığı belirlendi. SSC-001 kodlu hücrenin test öncesi % 24,56 olan verimlilik değeri, elektron radyasyonu sonrası % 21,72'ye düştü. Bu durum, elektron radyasyon testi sonucunda hücre verimliliğinin yaklaşık % 11 oranında azaldığını göstermektedir. SSC-015 kodlu hücrenin verimliliği ise elektron radyasyon maruziyeti sonucunda % 29,97'den % 29,06'ya düştü. Bu sonuç yaklaşık % 3'lük bir değişime karşılık gelmektedir. ECSS-E-ST-20-08C standardı yaklaşık % 10'luk bir verim değişimini kabul etmektedir. Ayrıca, ticari uzay kalifiye güneş hücresi üreticileri, piyasaya sürdükleri ürünlerinde yaklaşık % 10'luk bir verim kaybı bildirmektedir. Bu bilgiler ışığında, tez çalışması kapsamında üretilen ve elektron radyasyon testi sonucunda yaklaşık % 10 ve altında verim kaybına uğrayan güneş hücrelerinin elektron radyasyon testinden başarıyla geçtiği söylenebilir. Ayrıca, test şartları göz önüne alındığında hücrelerin daha yüksek enerjili elektronlara maruz kalmasına rağmen standartlara uygun sonuçlar vermesinin, üretilen hücrelerin uzay kalifiye niteliğini arttırdığı düşünülmektedir.

7.2.6. Proton radyasyon testi

Proton radyasyon testi, uzay ortamında bulunan protonların neden olduğu radyasyonun hücre performansı üzerindeki etkisini izlemek amacıyla yapılmaktadır. Bu kalifikasyon test adımı için fabrikasyon işlemleri tamamlanmış SSC-053 kodlu hücre kullanıldı. Aşağıdaki test adımları izlenerek test edilen hücrelerin elektriksel parametreleri, test öncesi değerleri ile kıyaslanarak üretilen hücrenin proton radyasyonuna dayanımı ve kalifiye niteliği belirlendi.

- 1) Öncelikle, test edilecek güneş hücresinin proton radyasyon maruziyeti öncesi elektriksel parametreleri, Bölüm 7.3.2'de belirtilen elektriksel performans test adımları kullanılarak belirlendi. Bu test aşamasında AM0 ($136,7 \text{ mW/cm}^2$) ışınımı sağlayan optik filtrenin kullanıldığı güneş simülatörü kullanıldı. Elektriksel çıktı parametreleri hesaplanarak Çizelge 7.17'ye not edildi.
- 2) Proton radyasyon maruziyeti sırasında oluşabilecek oksidasyonu engellemek amacıyla güneş hücresi, Resim 7.15.a'da görülen, bağlantı kısımları hava sızdırmayacak biçimde kapatılmış vakum haznesine yerleştirildi ve vakuma alındı. Hücre test sırasında 20 ± 10 °C'de tutuldu.

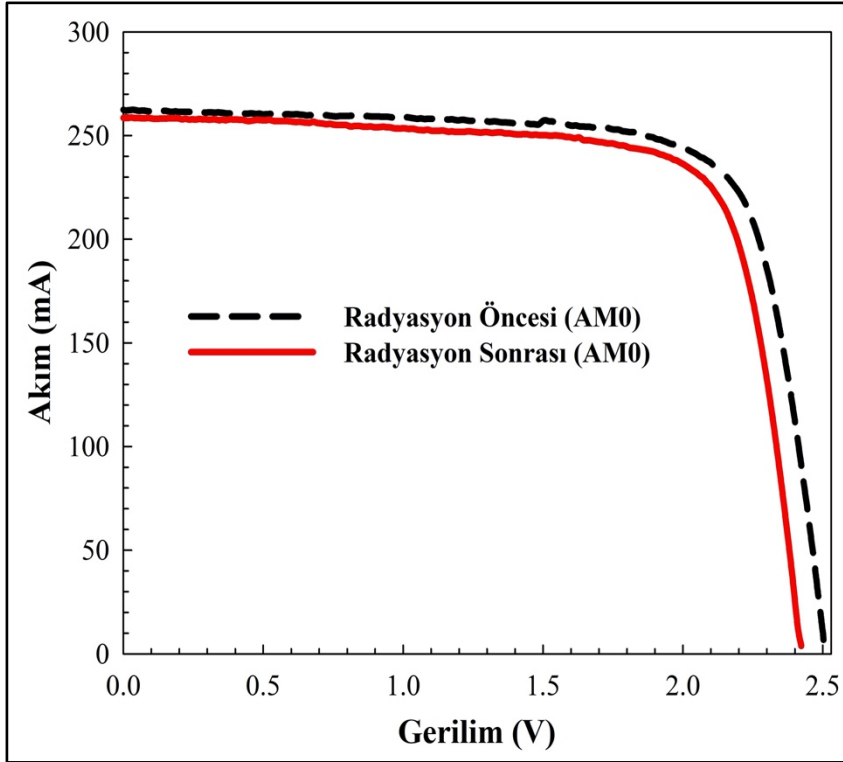
- 3) Proton ışınlama işlemi, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) SANAEM-Proton Hızlandırıcı Tesisinde, ODTÜ-SDH iş birliği ile Resim 7.15.b’de gösterilen sistem kullanılarak gerçekleştirildi. Işınlama işleminde, 15 MeV proton enerjisi, $3,19 \times 10^{11} \text{ p/cm}^2$ proton akısı ve 0,154 mRad radyasyon dozu parametreleri kullanıldı.
- 4) Proton radyasyon maruziyeti sonrası güneş hücrelerinin elektriksel parametreleri, Bölüm 7.3.2’de belirtilen elektriksel performans test adımları kullanılarak AM0 ışınlamı altında belirlendi. Elektriksel çıktı parametreleri hesaplanarak Çizelge 7.17’ye kaydedildi.
- 5) Proton radyasyon testi sonrası fiziksel inceleme testi sonuçları yine Çizelge 7.17’de belirtilen kısımda sunuldu. Ayrıca güneş hücresinin proton radyasyon testi sonrası EL görüntüsü Resim 7.16’da verildi.



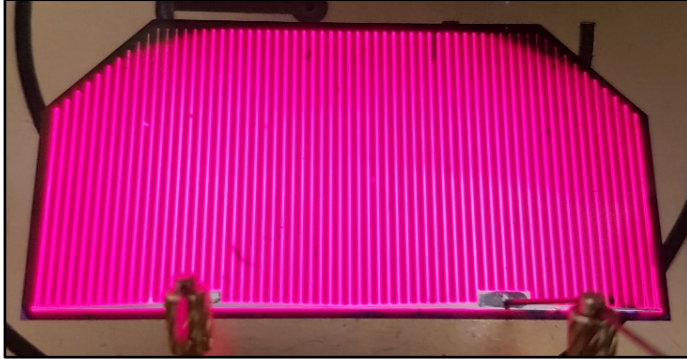
Resim 7.15. a) Vakum haznesine yerleştirilen güneş hücresi, b) radyasyon test düzeneği

Çizelge 7.17. SSC-053 kodlu hücrenin proton radyasyon test sonuçları

Hücre Kodu	SSC-053					
Radyasyon Parametreleri	$I_{sc} (mA)$	$V_{oc} (V)$	$I_{max} (mA)$	$V_{max} (V)$	FF	$\eta (%)$
0	262,18	2,51	233,11	2,13	0,76	23,48
15 MeV $3,19 \times 10^{11} \text{ p/cm}^2$	258,55	2,41	229,39	2,07	0,76	22,45
Görsel Muayene Sonucu	Radyasyon maruziyeti öncesi ve sonrası hücre görselleri kıyaslandığında herhangi bir kalkma/kopma vb. görsel kusur bulunmamaktadır.					



Şekil 7.25. SSC-053 kodlu hücrenin proton radyasyon testi öncesi ve sonrası I - V eğrileri



Resim 7.16. SSC-053 kodlu hücrenin proton radyasyon testi sonrası EL görüntüsü

Çizelge 7.17 incelendiğinde, güneş hücresinin elektriksel parametreleri, yüksek enerjili proton bombardımanı nedeniyle hücre yapısında meydana gelen kusurlar nedeniyle değişmiştir. Yapısal kusurların neden olduğu tuzak seviyeleri, elektron-hol çiftlerini tuzaklayarak beklenildiği gibi fotoakımda azalmaya neden olmuştur. Bu nedenle hücrenin I_{sc} ve I_{max} değerleri azaldı. Yasak enerji seviyesinde oluşan yeni kusur seviyeleri nedeniyle V_{oc} değeri 2,51 V'dan 2,41 V'a düştü. Güneş hücresinin test öncesi ve sonrası enerji dönüşüm verimlilikleri kıyaslandığında ise, beklenildiği gibi bir azalma gözlemlendi. SSC-053 kodlu hücrenin test öncesi AM0 ışınımında % 23,48 olan verimlilik değeri, proton radyasyonu sonrası % 22,45'e düştü. Bu durum, proton radyasyon testi sonucunda hücre

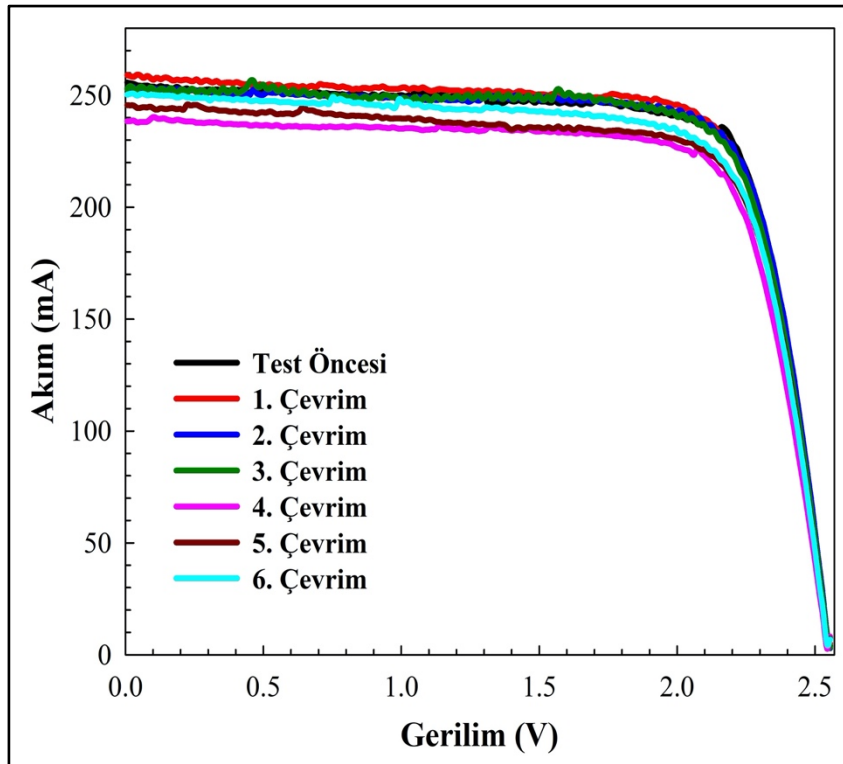
verimliliğinin yaklaşık % 4,39 oranında azaldığını göstermektedir. ECSS-E-ST-20-08C standardı yaklaşık % 10'luk bir verim değişimini kabul etmektedir. Ayrıca, ticari uzay kalifiye güneş hücresi üreticileri, piyasaya sürdükleri ürünlerinde yaklaşık % 10'luk bir verim kaybı bildirmektedir. Bu bilgiler ışığında, tez çalışması kapsamında üretilen ve proton radyasyon testi sonucunda yaklaşık % 4 verim kaybına uğrayan güneş hücresinin proton radyasyon testinden başarıyla geçtiği söylenebilir.

7.2.7. Vakum-termal döngü testi

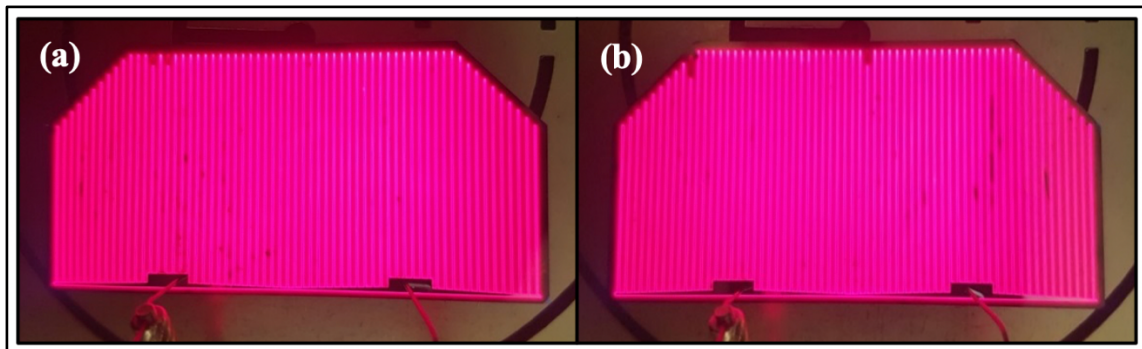
Yörüngedeki sıcaklık değişiminin hücre üzerindeki fiziksel etkilerinin incelenmesi amacıyla vakum-termal döngü testi yapılmaktadır. Bu kalifikasyon test adımı için fabrikasyon işlemleri tamamlanmış SSC-020 kodlu hücre seçildi. ECSS-E-ST-20-08C standardının 5.5.3.7.3a maddesine göre vakum-termal döngü testi 4 ile 10 kez arasında tekrar edilmeli ve her çevrim sonunda elektriksel parametreler test edilmelidir. Aşağıdaki test adımları izlenerek, vakum ortamında ve -80 ile +100 °C sıcaklık aralığında 6 ardışık termal döngü maruz bırakılarak test edilen hücrenin elektriksel parametreleri, test öncesi değerleri ile kıyaslandı. Böylece, üretilen hücrenin uzay ortamındaki sıcaklık değişimine dayanımı ve kalifiye niteliği belirlendi.

- 1) İlk olarak, test edilecek güneş hücresinin vakum-termal döngü testi öncesi elektriksel parametreleri, Bölüm 7.3.2'de belirtilen elektriksel performans test adımları kullanılarak belirlendi. Elektriksel çıktı parametreleri hesaplanarak Çizelge 7.18'e not edildi.
- 2) Güneş hücresi, termal döngü testi için vakum ortamı ($< 10^{-5}$ mbar) ve sıcaklık kontrolü sağlanabilen, elektriksel ve ısı yalıtımlı, sıvı azot ile soğutulabilen ve kontrollü ısıtma için gerekli düzeneğe sahip Kryostat'a yerleştirildi.
- 3) Sistem hava sızdırmaz biçimde kapatıldıktan sonra vakumlanarak yaklaşık 10^{-5} mbar'lık bir vakum ortamı sağlandı.
- 4) Yeterli vakum değerine ulaşıldığında, oda sıcaklığında bulunan hücre -80 ± 5 °C'ye 5 °C/dk adımla düşürüldü. Sıcaklık -80 °C'ye ulaşıldığında sistem tekrar 5 °C/dk adım ile $+100 \pm 5$ °C'ye ısıtıldı. Hücre, 5 °C/dk hızla 25 ± 5 °C'ye getirilerek, bulunduğu vakum ortamı yüksek saflıktaki kuru azot gazı kullanılarak atmosfer basıncına eşitlendi. Hücre elektriksel ölçümler için sistemden çıkartıldı.

- 5) Termal döngüden çıkan hücrenin elektriksel parametreleri, Bölüm 7.3.2’de belirtilen elektriksel performans test adımları kullanılarak belirlendi. Elektriksel çıktı parametreleri hesaplanarak Çizelge 7.18’e kaydedildi.
- 6) Bu termal döngü süreci, ECSS-E-ST-20-08C standardının 5.5.3.7.3a maddesine uygun şekilde 6 kez tekrarlandı. Ayrıca her çevrimin sonunda elektriksel parametreler ölçülerek Çizelge 7.18’e kaydedildi.
- 7) Fiziksel inceleme testi sonuçları Çizelge 7.18’de belirtilen kısımda sunuldu. Ayrıca güneş hücresinin vakum-termal döngü testi öncesi ve sonrası EL görüntüsü Resim 7.17’de verildi.



Şekil 7.26. SSC-020 kodlu hücrenin vakum-termal döngü testi öncesi ve sonrası I - V eğrileri



Resim 7.17. Vakum-termal döngü testi a) öncesi b) sonrası elektrolüminesans görüntüleri

Çizelge 7.18. SSC-020 kodlu hücrenin vakum-termal döngü test sonuçları

Hücre Kodu	SSC-020					
Çevrim	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	I_{max} (mA)	V_{max} (V)	FF	η (%)
0	255,70	2,54	235,18	2,17	0,79	32,94
1	259,04	2,54	236,28	2,13	0,77	32,53
2	253,04	2,54	233,28	2,16	0,78	32,49
3	252,85	2,54	233,79	2,13	0,78	32,19
4	238,39	2,54	226,52	2,07	0,76	30,31
5	245,62	2,54	222,56	2,13	0,76	30,65
6	250,27	2,54	225,21	2,13	0,76	31,02
Görsel Muayene Sonucu	Vakum-termal döngü testi öncesi ve sonrası hücre görselleri kıyaslandığında herhangi bir kalkma/kopma vb. görsel kusur bulunmamaktadır.					

Çizelge 7.18 incelendiğinde, vakum-termal döngü testinin hücrede meydana getirdiği termal stres nedeniyle elektriksel özelliklerde değişim olduğu görülmektedir. Termal döngü, hücrenin V_{oc} değeri üzerinde değişim yaratmazken I_{sc} , I_{max} ve V_{max} değerleri döngü sayısı arttıkça azaldı. Hücrenin verim ve FF değerleri de, beklenildiği gibi artan çevrim sayısı ile birlikte bir miktar azaldı. Test öncesi % 32,94 olan verimlilik değeri 6 termal çevrim sonunda % 31,02’ye düştü. Bu durum yaklaşık % 6’lık bir verim kaybına karşılık gelmektedir. ECSS-E-ST-20-08C standardı yaklaşık % 10’luk bir verim değişimini kabul etmektedir. Ayrıca belirtilen standarda göre, hücrenin kalifikasyonu için test sonrasında 7.5.1 maddesinde belirtilen fiziksel inceleme testinden geçmesi ve hücrede kısa devre durumunun olmaması gerekmektedir. Testi gerçekleştirilen hücrenin vakum-termal döngü testi sırasında oluşan termal stresler sonucunda herhangi bir fiziksel zarar görmediği ve kısa devre durumunun olmadığı ayrıca belirlendi. Hücrenin test öncesi ve sonrası elektrolüminesans görüntüleri Resim 7.17’de sunuldu. Bu bilgiler ışığında, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen vakum-termal döngü testi sonucunda yaklaşık % 6 verim kaybına uğrayan ve fiziksel kusur meydana gelmeyen güneş hücresinin bu testten başarıyla geçtiği söylenebilir.

7.2.8. Nem ve sıcaklık testi

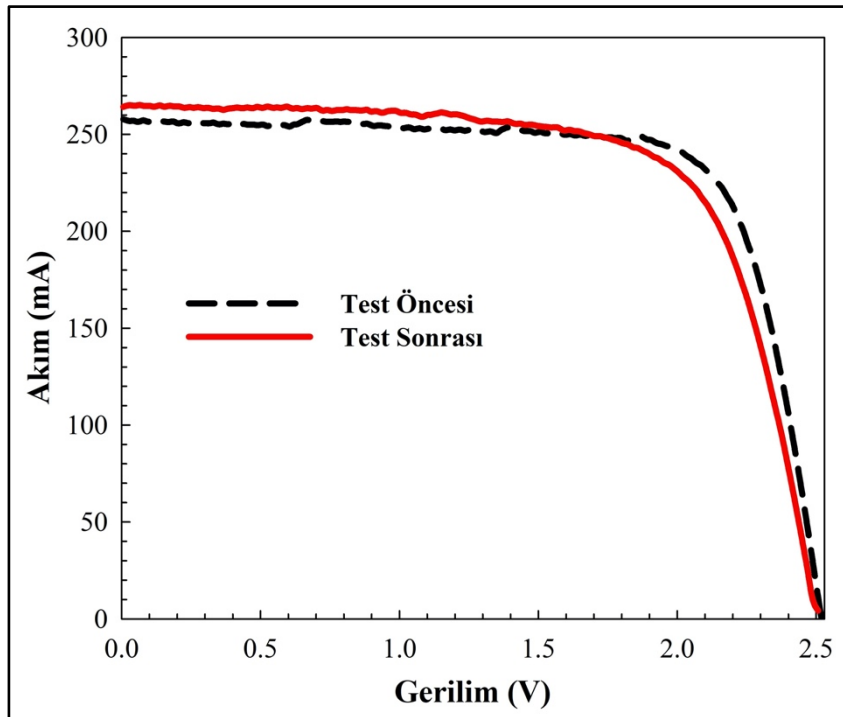
Nem ve sıcaklık testi, nemli bir ortam içerisinde hücre yüzeyindeki metal kontakların ve yansıma önleyici kaplamanın stabilitesini izlemek amacıyla kullanılan hızlandırılmış bir raf ömrü testidir. Hücrelerin saklama ömrü boyunca kalabilecekleri yüksek nemli ortamdan ne kadar etkileneceğinin tanımlanması amacıyla yapılmaktadır. Bu kalifikasyon test adımı için fabrikasyon işlemleri tamamlanmış SSC-018 kodlu hücre seçildi. Bu çalışmada gerçekleştirilen nem testi, ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.7.2 (HT2) maddesine uygun biçimde yapıldı. Aşağıdaki test adımları izlenerek, 95 °C sıcaklık ve > % 90 nem ortamında 24 saat bekletilen hücrenin elektriksel parametreleri, test öncesi değerleri ile kıyaslandı.

- 1) Test edilecek güneş hücresinin nem ve sıcaklık testi öncesi elektriksel parametreleri, Bölüm 7.3.2’de belirtilen elektriksel performans test adımları kullanılarak belirlendi. Elektriksel çıktı parametreleri hesaplanarak Çizelge 7.19’a not edildi.
- 2) Güneş hücresi, Gazi-FOTONİK’te tasarlanan sistem (Resim 7.18) içerisine yüzeyinde sıvı birikimi olmayacak biçimde yerleştirildi. Sistemin ortam sıcaklığı ve nem değeri anlık olarak görüntülenebilmektedir. Nem ortamını sabit tutabilmek amacıyla sistem sıkıca kapatıldı.
- 3) ECSS-E-ST-20-08C standardının 7.5.7.2.2 maddesine göre, ortam sıcaklığı 95°C, ortam nemi ise > % 90 olacak şekilde ayarlandı. Hücre sabit nem ve sıcaklık ortamında 24 saat boyunca bekletildi.
- 4) Nem ve sıcaklık testinden çıkan hücrenin elektriksel parametreleri, Bölüm 7.3.2’de belirtilen elektriksel performans test adımları kullanılarak belirlendi. Elektriksel çıktı parametreleri hesaplanarak Çizelge 7.19’a not edildi.
- 5) Fiziksel inceleme testi sonuçları yine Çizelge 7.18’de belirtilen kısımda sunuldu. Ayrıca nem ve sıcaklık testi öncesi ve sonrası hücre görselleri Resim 7.19’da verildi.



Resim 7.18. Nem ve sıcaklık testinin gerçekleştirildiği sistem

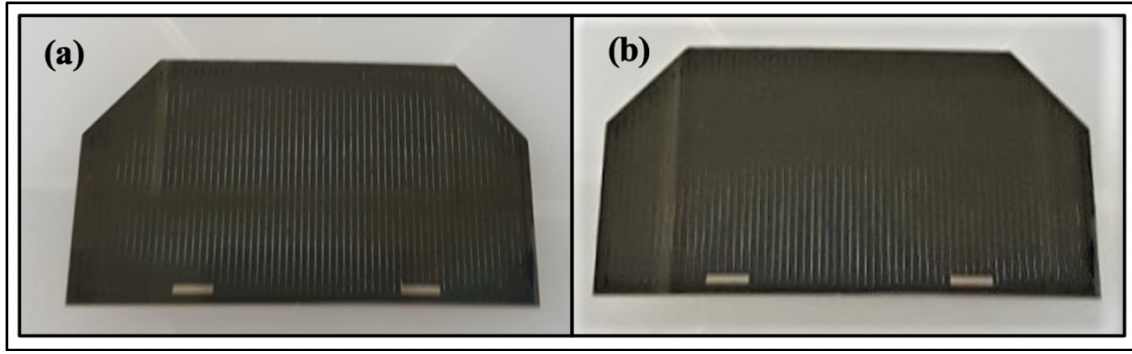
Çizelge 7.19 incelendiğinde, hücrenin verim değerinin test sonrası bir miktar azaldığı görülmektedir. Test öncesi % 31,60 olan verimlilik değeri nem ve sıcaklık testi sonrası % 29,92'ye düştü. Bu durum yaklaşık % 5'lik bir verim kaybına karşılık gelmektedir. ECSS-E-ST-20-08C standardı verimdeki azalma için bir kabul sınırı belirtmemektedir. Ancak, nem ve sıcaklık ortamında metal kontaklarda ve yansıma önleyici kaplamada deformasyon oluşmaması gerektiğini bildirmektedir. Hücrenin test öncesi ve test sonrası fiziksel inceleme testi sonuçları ışığında test edilen hücrenin nem ve sıcaklık testinden geçtiği söylenebilir.



Şekil 7.27. SSC-018 kodlu hücrenin nem ve sıcaklık testine ait $I-V$ eğrileri

Çizelge 7.19. SSC-018 kodlu hücrenin nem ve sıcaklık test sonuçları

Hücre Kodu	SSC-018					
Test Parametreleri	$I_{sc} (mA)$	$V_{oc} (V)$	$I_{max} (mA)$	$V_{max} (V)$	FF	$\eta (%)$
Test Öncesi	258,26	2,51	234,80	2,09	0,76	31,60
95 °C, >%90 nem	264,45	2,50	231,20	2,00	0,70	29,92
Görsel Muayene Sonucu	Nem ve sıcaklık testi öncesi ve sonrası hücre görselleri kıyaslandığında herhangi bir kalkma/kopma vb. görsel kusur bulunmamaktadır.					



Resim 7.19. Nem ve sıcaklık testi a) öncesi b) sonrası hücre görselleri

Çizelge 7.20. Güneş hücresi kalifikasyon test sonuçları

<i>Kalifikasyon Testi</i>	<i>Test Sonucu</i>	<i>Sonuç</i>
<i>Fiziksel İnceleme Testleri</i>	Fiziksel kusur yok, tasarlanan boyutlarda, aynı özellikli üretim	TESTİ GEÇTİ ✓
<i>Tutunma (Bant) Testi</i>	< 3 ızgara kopması/kalkması	TESTİ GEÇTİ ✓
<i>Ters Beslem Testi</i>	Verimde % 1 değişim	TESTİ GEÇTİ ✓
<i>Elektron Radyasyon Testi</i>	Verimde % 11 ve % 3 değişim, fiziksel kusur yok	TESTİ GEÇTİ ✓
<i>Proton Radyasyon Testi</i>	Verimde % 4 değişim, fiziksel kusur yok	TESTİ GEÇTİ ✓
<i>Vakum-Termal Döngü Testi</i>	Verimde % 6 değişim, fiziksel kusur yok	TESTİ GEÇTİ ✓
<i>Nem ve Sıcaklık Testi</i>	Fiziksel kusur ve kısa devre yok	TESTİ GEÇTİ ✓

7.3. Güneş Hücrelerinin AM0 Işınımı Altındaki Performans Testleri

Büyütme, litografi, metalizasyon ve $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ yansımaya önleyici kaplama işlemleri tamamlanan 17 cm^2 alanlı prototip güneş hücrelerinin kalifikasyon testleri, elektriksel parametrelerin ve fiziksel özelliklerin değişimini gözlemlemek amacıyla yapıldı. Bu testler sırasında AM1.5G (100 mW/cm^2) ışınımı sağlayan güneş simülatörü kullanılarak test öncesi ve sonrası elektriksel parametreler değerlendirildi.

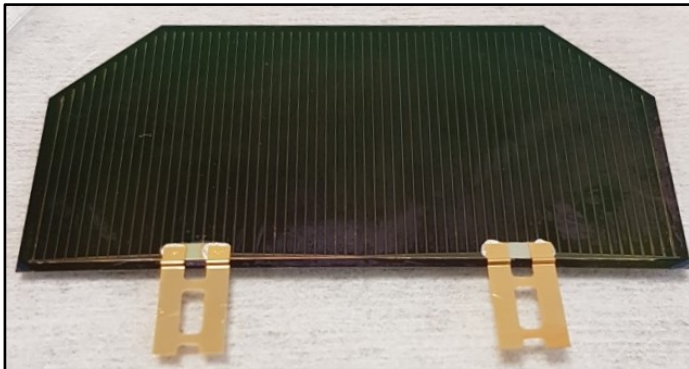
Uzay kalifiye güneş hücrelerinin kullanılacağı uzay ortamındaki elektriksel parametrelerinin belirlenmesi için ise AM0 ($136,7 \text{ mW/cm}^2$) ışınımı sağlayan optik filtrenin takıldığı güneş

simülatörü kullanıldı. Test edilen hücrelerin elektriksel parametreleri, Bölüm 7.3.2’de belirtilen elektriksel performans test adımları kullanılarak belirlendi. Üretilen güneş hücrelerinin AM0 ışınımı altındaki ölçümlerine ait $I-V$ eğrileri Şekil 7.28’de sunuldu. Güneş hücrelerinin uzay ortamındaki elektriksel çıktı parametreleri (V_{oc} , I_{sc} , V_{max} , I_{max} , FF , η) hesaplanarak Çizelge 7.21’de verildi.

Çizelge 7.21. Üretilen güneş hücrelerin AM0 ışınımı altındaki elektriksel parametreleri

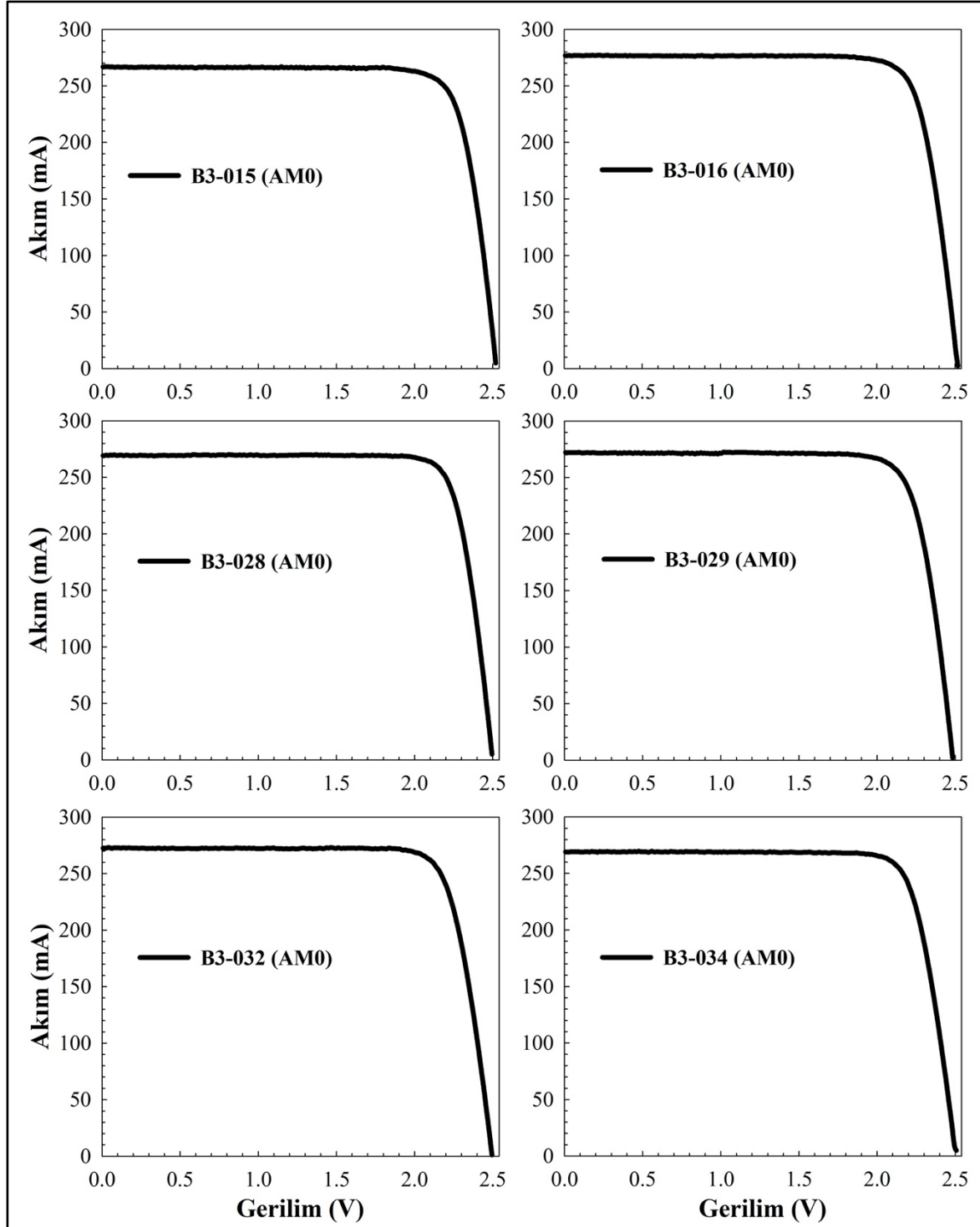
Hücre Kodu	I_{sc} (mA)	V_{oc} (V)	I_{max} (mA)	V_{max} (V)	FF	Ac (cm ²)	η (%)
B3-015	266,76	2,52	255,45	2,15	0,82	15,5	25,87
B3-016	276,82	2,51	262,13	2,16	0,82	15,5	26,71
B3-028	269,25	2,50	259,38	2,15	0,83	15,5	26,28
B3-029	272,07	2,48	259,93	2,10	0,81	15,5	25,74
B3-032	272,54	2,50	260,85	2,11	0,81	15,5	25,97
B3-034	269,08	2,50	258,76	2,11	0,81	15,5	25,76

Çizelge 7.21 incelendiğinde, tez çalışması kapsamında üretilen hücreler arasından seçilen 6 adet 15,5 cm² aktif alana sahip GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücresinin AM0 ışınımı altındaki verimlilik değerlerinin % 25,74 ile 26,71 aralığında olduğu görülmektedir. Elde edilen bu verimlilik değerleri, tezin ana hedefi olan yaklaşık % 25 verime ve uzay kalifiye niteliklere sahip prototip güneş hücresi üretilmesine ulaşıldığını açıkça ifade etmektedir. Üretilen uzay kalifiye güneş hücrelerinden kontak ped bağlantıları yapılmış ve uydu güneş paneli montajına hazır hale getirilmiş bir prototip hücre Resim 7.20’de verildi.



Resim 7.20. Kontak bağlantıları yapılmış panel montajına hazır uzay kalifiye güneş hücresi

AM0 ışıını altında yaklaşık % 27, AM1.5G ışıınında ise yaklaşık % 35 verime sahip olan güneş hücrelerinin, ülkemiz adına uzay uygulamalarında için bir ilk olmakla birlikte yeryüzü uygulamaları için de ülkemiz yenilenebilir enerji çalışmalarında önemli bir gelişme olduğu düşünülmektedir.



şekil 7.28. Üretilen güneş hücrelerinin AM0 ışıını altında I - V grafikleri



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, güneş hücresi üretim teknolojisinde kazanılan tecrübenin uzay uygulamalarında kullanılabilecek nitelikteki III-V grubu üç eklemlili güneş hücrelerinin üretimine aktarılması ve böylece % 25 verime ve uzay kalifiye niteliklere sahip güneş hücresi üretilmesi hedeflendi. Bu kapsamda, GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücre yapısının tasarlanması, tasarlanan hücre yapısının MBE tekniği ile büyütülmesi, fotolitografi, metalizasyon ve yansıma önleyici kaplamaların optimize edilmesi, optimize edilmiş parametre ve tasarımlarla hücre fabrikasyonunun gerçekleştirilmesi, uzay şartlarına dayanım testleri ve uzay ortamındaki aygıt çıktı parametrelerinin analiz edilmesi planlandı.

Tez çalışmasının ilk adımında güneş hücre yapısının tasarımına yönelik çalışmalar yapıldı. Hücre tasarımının ana bileşenleri olan aktif hücre katman kalınlıkları, taşıyıcı yoğunlukları, tünel diyot, pencere katman ve BSF kalınlıklarının belirlenmesinde, Gazi-FOTONİK bünyesinde yapılan ve yaklaşık 10 yıllık bir bilgi birikimine dayanan çalışmalar referans alındı. Bu çalışmalarda yapılan kalibrasyonlar, karakterizasyon sonuçları ve tasarımlardan yararlanıldı. GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücre yapısı, Gazi-FOTONİK bünyesinde bulunan katı kaynaklı V80H MBE sistemi kullanılarak p-Ge (100)-[111] 6° yönelimli alttaş üzerine büyütüldü. Tasarlanan hücrenin büyütülmesinde kullanılan adımlar, önceki güneş hücresi büyütme çalışmalarından faydalanılarak gerçekleştirildi.

Yüksek verime sahip güneş hücresi üretiminde, iyi nitelikli kristal büyütmenin yanında litografi, metalizasyon ve yansıma önleyici kaplama oluşturulması süreçlerini içeren aygıt fabrikasyonunun etkisi oldukça fazladır. Büyütülen güneş hücre yapısının tasarlanan boyutlarda dilimlenmesinin ardından, sırasıyla fotolitografi, metalizasyon ve yansıma önleyici kaplama oluşturulması süreçlerinin son ürünü olarak güneş hücresi aygıtı elde edildi. Özellikle fotolitografi işlem adımlarının optimize edilmesi, düzgün litografi ve ardından yapılacak metalizasyonun kalitesini etkilemektedir. Bu nedenle prototip hücre boyutu olan 17 cm² alana sahip hücrelerin litografi işlemlerinden önce 3 cm x 2 cm boyutunda kesilmiş 6 cm² alanlı hücreler üzerinde deneme çalışmaları yapıldı. Deneme çalışmaları yardımıyla yaklaşık 10 µm fotorezist kalınlığına ulaşılacak döndürme hızının, homojen kaplama için döndürme süresinin, fotorezistin yüzeydeki düzgün tutunumu için ilk tavlama sıcaklığı ve süresinin, pozlama süresinin, desen geliştirme çözeltisinin oranı

ve bu çözeltide beklenmesi gereken sürenin belirlenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirildi. Yapılan optimizasyon çalışmalarının ardından, belirlenen parametreler kullanılarak 17 cm² alanlı prototip hücrelerin fotolitografi işlemi tamamlandı.

Güneş hücresinin arka metal kontak ve fotolitografi sonrası ön ızgara metal kontak yapısı, metalizasyon işlemi ile oluşturuldu. 6 cm² alana sahip hücreler kullanılarak yapılan deneme çalışmalarının ardından, tez çalışmasında büyütülen GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücre yapısı için tutunma testinden geçebilecek dayanımda, düşük seri ve kontak direncine sahip, yüksek sıcaklık tavlama sırasında difüzyonu düşük olan AuNiGe (20 nm)/Ag (5 µm)/Ti (20 nm) çok katmanlı metalizasyon yapısının en uygun tasarım olduğu belirlendi. Fotolitografi işlemleri tamamlanan 17 cm² alanlı hücre dilimleri üzerine Gazi-FOTONİK bünyesinde bulunan sistemler yardımıyla tasarlanan metalizasyon yapısı kaplandı. Ön ve arka yüzey metalizasyon işleminin ardından ohmik kontak oluşturulması ve yüzey tutunumunun artırılması amacıyla hücreler RTA sisteminde, 10⁻⁶ mbar vakum ortamında 300 °C’de 90 saniye boyunca tavlandı.

Fotolitografi ve metalizasyon işlemlerinin ardından güneş hücresi fabrikasyonunun bir diğer adımı olan yansıma önleyici katman oluşturulmasına geçildi. GaInP/GaAs/Ge güneş hücresinin yansıtıcılığını azaltabilecek uygun kırılma indisine sahip Ta₂O₅ tek-katmanlı, SiO₂/Ta₂O₅ ve Al₂O₃/TiO₂ çift-katmanlı ve SiO₂/Al₂O₃/TiO₂ üç-katmanlı yansıma önleyici filmler için teorik yansıtıcılık analizi yapıldı. Güneş hücresinin soğurma bölgesi olan 300-1800 nm dalgaboyu aralığında en düşük yansıtıcılık % 3,50 ile SiO₂/Al₂O₃/TiO₂ üç-katmanlı ARC tasarımında elde edildi. Tasarlanan ince film yapıları, 3 cm x 2 cm boyutlu metalizasyon işlemleri tamamlanmış güneş hücresi parçaları ve cam alttaşlar üzerine eş-püskürtme ve magnetron püskürtme sistemleri kullanılarak kaplandı. Filmlerin 300-1800 nm dalgaboyu aralığında optik geçirgenlik ve yansıtıcılık ölçümleri gerçekleştirildi. Yüzey morfolojileri, yüzey görüntüleri ve pürüzlülük analizleri, AFM ölçümleri ile belirlendi. Yansıma önleyici kaplamanın hücre performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla 6 cm² alanlı hücrelerin AM1.5G ışınımı altında *I-V* ölçümleri gerçekleştirildi. Kuantum verimliliği analizleri ile her bir alt hücrenin ARC öncesi ve sonrası EQE değerleri ile EQE verilerinden hesaplanan akım yoğunlukları belirlendi.

Cam alttaş üzerine kaplanan yansıma önleyici filmlerin optik geçirgenlik spektrumları, 300-1100 nm aralığında UV-Vis, 1330-1800 nm aralığında ise FTIR ölçümlerinin

birleştirilmesiyle elde edildi. Ta_2O_5 ince filmi 300-1800 nm dalgaboyu aralığında ortalama % 76,05 optik geçirgenliğe sahipken, SiO_2/Ta_2O_5 filmin geçirgenliği % 80,30 olarak belirlendi. Optik geçirgenlik değerleri Al_2O_3/TiO_2 ve $SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$ filmleri için ise sırasıyla % 77,66 ve % 84,52'dir. Güneş hücresi yüzeyine kaplanan filmin optik geçirgenliği, hücre içerisine ne kadar ışığın geçebildiğini gösterdiğinden oldukça önemlidir. Kaplanan filmin yansıtıcılığı azaltması kadar optik geçirgenliği de arttırması gerekmektedir. Optik geçirgenlik değerleri incelendiğinde, 300-1800 nm dalgaboyu aralığında en yüksek optik geçirgenliğe sahip olan $SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$ üç-katmanlı ARC yapısının en uygun tasarım olduğu belirlendi.

Yansıma önleyici kaplamaların en önemli işlevi, güneş hücresi yüzeyinde meydana gelen yaklaşık % 30'luk yansıma kayıplarını azaltmak ve böylece üretilen fotoakımı arttırmaktır. $GaInP/GaAs/Ge$ güneş hücresi, ARC öncesi 300-1800 nm aralığında yaklaşık % 31,02 yansıtıcılığa sahiptir. Ta_2O_5 ARC, güneş hücresinin optik yansıtıcılığını %16,65 düşürmüştür. SiO_2/Ta_2O_5 , Al_2O_3/TiO_2 ve $SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$ çok-katmanlı ARC'ler kullanılarak elde edilen ortalama yansıtıcılık değerleri sırasıyla % 7,95; %11,50 ve % 6,97'dir. Güneş hücresinin yansıtıcılığını % 31,02'den % 6,97'ye düşüren $SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$ yansıma önleyici filmi, teorik hesaplama sonucuyla uyumlu biçimde en düşük yansıtıcılığa sahip ARC'dir. Elde edilen optik analiz sonuçları, $SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$ yansıma önleyici filmin tez çalışmasının 17 cm^2 alanlı prototip hücrelerinde kullanılabilecek en performanslı film olduğunu göstermektedir.

Güneş hücresi yüzeyine kaplanan yansıma önleyici filmlerin yüzey görüntüleri AFM sistemi kullanılarak elde edildi. Yüzey görüntüleri yardımıyla hesaplanan yüzey pürüzlülükleri, Ta_2O_5 , SiO_2/Ta_2O_5 , Al_2O_3/TiO_2 ve $SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$ filmleri için sırasıyla 4,05; 4,72; 4,22 ve 4,92 nm olarak belirlendi. Ayrıca elde edilen yüzey görüntüleri, yapılan kaplamaların yüzeyde homojen bir film oluşturduğunu göstermektedir. Yüksek yüzey pürüzlülüğü, ışığın yüzeydeki saçılmalarını arttırdığından yansıtıcılıkta azalmaya neden olmaktadır. AFM ve optik yansıtıcılık ölçüm sonuçları birbiriyle tutarlı biçimde, yüksek pürüzlülüğe sahip $SiO_2/Al_2O_3/TiO_2$ ARC'nin düşük yansıtıcılığa sahip olduğunu göstermektedir.

Yansıma önleyici kaplamanın hücrenin elektriksel performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi amacıyla 6 cm^2 aktif alana sahip hücrelerin AM1.5G ışınımı altında $I-V$ ölçümleri gerçekleştirildi. Ta_2O_5 ARC, hücre verimini % 25,12'den % 26,47'ye yükseltti.

ARC öncesi % 25,55 olan hücre verimliliği, $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$ çift-katmanlı ARC ile % 30,27'ye çıktı. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ince filmi ise, hücre verimliliğini % 27,46'ya yükseltti. Optik geçirgenlik ve yansıtıcılıkta olduğu gibi elektriksel özelliklerde de en büyük gelişme $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ üç-katmanlı ARC kullanılarak elde edildi. % 25,95 olan hücre verimliliği, üç-katmanlı ARC sonrası % 31,30'a çıktı. Elde edilen sonuçlar, Ta_2O_5 , $\text{SiO}_2/\text{Ta}_2\text{O}_5$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ ve $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ yansıma önleyici filmlerin hücre performansında sırasıyla % 5,37; % 18,47; % 10,51 ve % 20,62 artış meydana getirdiğini göstermektedir. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ üç-katmanlı ARC'nin en yüksek performans artışı sağlayan kaplama olduğu $I-V$ sonuçlarından da görüldü.

Harici kuantum verimliliği (EQE) analizi, yansıma önleyici kaplamanın güneş hücresinin elektriksel performansı üzerindeki etkisinin gözlenmesinde oldukça önemlidir. Yansıma önleyici kaplama öncesi ve sonrası üç eklemlili güneş hücresi için her bir alt hücrenin EQE ölçüm sonucu analiz edildi. ARC öncesi GaInP üst hücre yaklaşık % 80, GaAs orta hücre % 78, Ge alt hücre ise yaklaşık % 65 kuantum verimliliğine sahiptir. Yapılan yansıma önleyici kaplamalar, her bir alt hücrenin EQE değerini arttırmıştır. Özellikle toplam fotoakımı sınırlayan Ge alt hücrenin akım yoğunluğunun artması, elektriksel özelliklerde baskın etki yaratmıştır. GaInP, GaAs ve Ge alt hücrelerin EQE değerlerini sırasıyla % 92; % 92 ve % 80'e yükselten $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ üç-katmanlı ARC yapısı, kuantum verimliliği ve eklemlerin ürettiği fotoakımı en fazla arttıran ARC oldu. Elde edilen sonuçlar ışığında, GaInP/GaAs/Ge üç eklemlili güneş hücre yapısının optik, morfolojik ve elektriksel özelliklerinde en büyük iyileşmeyi yaratan üç-katmanlı ARC yapısı, 17 cm² alanlı prototip hücreler üzerine kaplanarak güneş hücresi fabrikasyon adımları tamamlandı.

Tasarım, büyütme ve fabrikasyon adımlarının sonucunda elde edilen GaInP/GaAs/Ge güneş hücrelerinin uzay şartlarına dayanımının incelendiği kalifikasyon testleri gerçekleştirildi. Test sonuçlarının uluslararası standartlar ve ticari olarak satılan ürünler ile uyumu incelenerek, üretilen üç eklemlili güneş hücrelerinin uzay kalifiye niteliği belirlendi. Ayrıca üretilen güneş hücrelerinin AM0 ışınımı altındaki elektriksel analizleri gerçekleştirilerek uzay ortamındaki performans parametreleri belirlendi.

Standartlara uygun biçimde gerçekleştirilen kalifikasyon testlerinin sonuçları, uzay kalifiye niteliklere sahip güneş hücrelerinin üretiminin başarıldığını göstermektedir. Fiziksel inceleme testleri, hücrelerin metal kontak alanlarının (1,5 cm²) çıkarılmasıyla elde edilen

15,5 cm² aktif alana, yaklaşık 5 µm metal kontak kalınlığına, 185 µm toplam kalınlığa ve 1,4 g ağırlığa sahip olduğunu gösterdi. Ayrıca oluşan fiziksel kusurların standartta belirtilen kriterlere uyduğu görüldü. Bant testi sonuçları, kalkan/kopan 3 adet metal kontak ızgarasına sahip hücrenin testten geçtiğini gösterdi. Uygulanan ters beslem testi ile, üretilen hücrelerin ters beslenmesi durumunda yaklaşık % 1’lik bir verim kaybına uğradığı belirlendi. Gerçekleştirilen elektron ve proton radyasyon testleri, üretilen güneş hücrelerinin uzay ortamında maruz kalacağı yüksek enerjili elektron ve proton radyasyonundan en az şekilde etkileneceğini ve standarda uygun şekilde % 10’un altında performans kaybına uğrayacağını gösterdi. Termal-vakum döngü testi ile -80 ile +100 °C arasında termal döngüye maruz bırakılan hücrede yaklaşık % 6’lık bir verim kaybı meydana geldiği görüldü. Üretilen hücreler, yapılan tüm testlerden kısa devre durumu ve fiziksel kusur meydana gelmeden geçti.

Tez çalışmasında üretilen GaInP/GaAs/Ge üç eklemlı güneş hücrelerinin AM0 ışınımı altındaki verimlilik değerlerinin % 25,74 ile 26,71 aralığında olduğu görüldü. Elde edilen bu verimlilik değerleri, tezin ana hedefi olan yaklaşık % 25 verime ve uzay kalifiye niteliklere sahip prototip güneş hücresi üretilmesine ulaşıldığını göstermektedir. Kontak bağlantıları tamamlanan bir adet prototip hücre, uydu güneş paneli montajına hazır hale getirilerek son ürün elde edildi. Bu çalışmada üretilen, AM0 ışınımı altında yaklaşık % 27, AM1.5G ışınımında ise yaklaşık % 35 verime ulaşabilen güneş hücrelerinin, uzay uygulamaları için ülkemiz adına bir ilk olmasının yanı sıra, yeryüzü uygulamaları için de ülkemiz yenilenebilir enerji çalışmalarına önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu çalışmadan elde edilen sonuç, tecrübe ve bilgi birikiminin ülkemizin uzay sanayisi uygulamalarına katkı sağlamasının yanında ülkemiz için uzay kalifiye nitelikte güneş hücresi üretiminde bir ilk olmasının haklı gururunu yaşamaktayız.



KAYNAKLAR

1. Wai, R.J., Member, S., Wang W.H., and Lin, C.Y. (2008). High-performance stand-alone photovoltaic generation system. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(1), 240-250.
2. Ataşer, T. (2017). *İki Eklemlı $Ga_xIn_{1-x}P/GaAs$ Güneş Hücrelerinin Tasarımı, Epitaksiyel Büyütülmeleri ve Hücre Fabrikasyonu*, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 1-38.
3. Dinçer, F. (2011). Türkiye’de güneş enerjisinden elektrik üretim potansiyeli- Ekonomik analizi ve AB ülkeleri ile karşılaştırmalı değerlendirme. *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 14(1), 8-15.
4. Birol, F. (2017). *Key World Energy Statistics 2017*. International Energy Agency (IEA), Washington: US, 1-97.
5. Özen, Y. (2015). *III-V Grubu Güneş Hücresi Geliştirilmesi ve Prototip Yoğunlaştırıcılı Fotovoltaik Modül Üretimi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-74.
6. Mohammed, S.S. (2011). Modeling and simulation of photovoltaic module using MATLAB/Simulink. *International Journal of Chemical and Environmental Engineering*, 2(5), 350-355.
7. Kumar, A., Kumar, K., Kaushik, N., Sharma, S. and Mishra, S. (2010). Renewable energy in India: current status and future potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(8), 2434-2442.
8. Sims, R.E.H., Rogner, H.H. and Gregory, K. (2003). Carbon emission and mitigation cost comparisons between fossil fuel, nuclear and renewable energy resources for electricity generation. *Energy Policy*, 31(13), 1315-1326.
9. Capuano, L. (2018). *International Energy Outlook 2018 (IEO2018)*, Washington: US Energy Information Administration (EIA), 1-21.
10. Kannan, N. and Vakeesan, D. (2016). Solar energy for future world: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1092-1105.
11. Acaroğlu, M. (2003). *Alternatif enerji kaynakları*, İstanbul: Atlas Yayınları, 3-175.
12. Adefarati, T. and Bansal, R.C. (2019). Reliability, economic and environmental analysis of a microgrid system in the presence of renewable energy resources. *Applied Energy*, 236, 1089-1114.
13. Asar, T. (2009). *GaInP ve InGaAs Kuantum Kuyulu Güneş Pillerinin (QWSC) Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-24.

14. Ebhota, W.S. and Jen, T.C. (2020). Fossil fuels environmental challenges and the role of solar photovoltaic technology advances in fast tracking hybrid renewable energy system. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 7(1), 97-117.
15. Yılmaz, M. (2012). Türkiye'nin enerji potansiyeli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi açısından önemi. *Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi*, 4(2), 33-54.
16. Nakir, İ. (2007). *Fotovoltaik Güneş Panellerinde GTS ve MGTS Kullanarak Verimliliğin Arttırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1-10.
17. Celik, A.N. (2006). Present status of photovoltaic energy in Turkey and life cycle techno-economic analysis of a grid-connected photovoltaic-house. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(4), 370-387.
18. Bube, R.H. and Fahrenbruch, A.L. (1981). Photovoltaic effect. *Advances in Electronics and Electron Physics*, 56, 163-217.
19. Fonash, S. (2010). *Solar cell device physics*, Oxford: Elsevier, 1-46.
20. Tanabe, K. (2009). A review of ultrahigh efficiency III-V semiconductor compound solar cells: Multijunction tandem, lower dimensional, photonic up/down conversion and plasmonic nanometallic structures. *Energies*, 2(3), 504-530.
21. Luque, A. and Hegedus, S. (Editors). (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering* (Second Edition), UK: John Wiley&Sons, 314-376.
22. Easton, R.L. and Votaw, M.J. (1959). Vanguard I IGY satellite (1958 beta). *Review of Scientific Instruments*, 30(2), 70-75.
23. Cao, M., Zhang, T., Liu, Y., Yu, W. and Ming, M. (2019). A performance degradation model of solar cells in an on-orbit resource satellite based on peak currents. *Solar Energy*, 189, 26-34.
24. Yu, Z., Jiajia, S., Tizhao, L., Min, L. and Heying, W. (2019). *AM0 space solar cell calibration method based on GEO satellite*. 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), 1562-1566.
25. İdare, B. (2018). *Uzay Teknolojilerinde Kullanılan Çok Eklemlili Güneş Hücrelerinin Performanslarının Yansıma Önleyici Özellikli Mikro Lens Dizileri ile Geliştirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 1-36.
26. Shenai, K. (2007). Spacecraft power systems design to minimize electro-magnetic interference (EMI) effects. *PIERS Proceedings*.
27. Lee, J., Kim, E. and Shin, K.G. (2013). *Design and management of satellite power systems*. IEEE 34th Real-Time Systems Symposium, 97-106.

28. Bekhti, M. and Bensaada, M. (2020). Solar arrays and battery power sources conceptual design for low earth orbit microsatellites. *Engineering and Applied Sciences*, 5(3), 66-70.
29. Keser, Ö.F., Yenisoy, A. ve İdare, B. (2017). Development of space qualified microlens arrays for solar cells used on satellite power systems. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(4), 627-635.
30. Shin, G.H., Kim, D.G., Kwon, S.J., Lee, H.S. and Toyota, H. (2019). Simulation and ground test for the solar array using GaInP/GaAs/Ge cells for space verification. *Journal of the Korean Physical Society*, 74(11), 1079-1084.
31. Boyer, J.T., Lepkowski, D.L., Chmielewski, D.J., Derkacs, D., Kerestes, C., Stavrides, A. and Grassman, T.J. (2019). *Development and characterization of III-V/Si multijunction photovoltaics for space application*. IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2822-2825.
32. Azur Space. (2019). 32 % *Quadrupole Junction GaAs Solar Cell (QJ Solar Cell 4G32C-Advanced)*, Heilborn: AZUR Space Solar Power GmbH, 1-2.
33. Spectrolab. (2019). *XTE-SF Space Qualified Triple Junction Solar Cell*, California: Spectrolab Inc., 1-2.
34. Kınacı, B. (2013). *III-V Grubu Güneş Hücre Yapılarının Epitaksiyel Büyütülmesi ve Karakterizasyonu*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-20.
35. Geisz, J.F., Kurtz, S., Wanlass, M.W., Ward, J.S., Duda, A., Friedman, D.J., Olson, J.M., McMahon, W.E. and Kiehl, J.T. (2007). High-efficiency GaInP/GaAs/InGaAs triple-junction solar cells grown inverted with a metamorphic bottom junction. *Applied Physics Letters*, 91(2), 023502.
36. Shahrjerdi, D., Bedell, S.W., Ebert, C., Bayram, C., Hekmatshoar, B., Fogel, K., Lauro, P., Gaynes, M., Gokmen, T., Ott, J.A. and Sadana, D.K. (2012). High-efficiency thin-film InGaP/InGaAs/Ge tandem solar cells enabled by controlled spalling technology. *Applied Physics Letters*, 100(5), 053901.
37. Kim, J.H., Choi, E.Y., Kim, B.J., Han, E. and Park, N. (2019). Stability enhancement of GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells using Al₂O₃ moisture-barrier layer. *Vacuum*, 162, 47-53.
38. Wen, Y., Wang, Y., Watanabe, K., Sugiyama, M. and Nakano, Y. (2012). Enhanced carrier escape in MSQW solar cell and its impact on photovoltaics performance. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2(2), 221-226.
39. Slobodskyy, A., Slobodskyy, T., Ulyanenkova, T., Doyle, S., Powalla, M., Baumbach, T. and Lemmer, U. (2010). In-depth analysis of the CuIn_{1-x}Ga_xSe₂ film for solar cells, structural and optical characterization. *Applied Physics Letters*, 97(25), 251911.

40. Sertel, T., Ozen, Y., Baran, V. and Ozcelik, S. (2019). Effect of single-layer Ta₂O₅ and double-layer SiO₂/Ta₂O₅ anti-reflective coatings on GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cell performance. *Journal of Alloys and Compounds*, 806, 439-450.
41. National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2020). *Best Research-Cell Efficiency Chart, Photovoltaic Research*, US: NREL, 1-5.
42. Neamen, D.A. (2012). *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles* (Fourth Edition), New York: McGraw-Hill Companies, 1-660.
43. Sertel, T. (2016). *Seyreltik Azotlu p-n Eklem Yapılarının MBE Tekniği ile Büyütülmesi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-12.
44. Dikici, M. (2012). *Katıhal Fiziği* (İkinci Baskı), Ankara: Seçkin Yayıncılık, 305-310.
45. Sze, S.M. and Ng, K.K. (2007). *Physics of Semiconductor Devices* (Third Edition), US: John Wiley&Sons, 7-740.
46. Cömert Sertel, B. (2020). *Metal Katkılı TiO₂ İnce Filmlerin Geliştirilmesi ve Sensör Uygulamaları*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-9.
47. Boylestad, R. and Nashelsky, L. (1998). *Electronic Devices and Circuit Theory* (Seventh Edition), New Jersey: Prentice-Hall, 3-42.
48. Seeger, K. (2004). *Semiconductor Physics: An Introduction* (Ninth Edition), Berlin: Springer-Verlag, 10- 32.
49. Besler, B. (2007). *Elektrokimyasal Büyütme ile Üretilen ZnO'nun Katodik Potansiyel Değişimine Bağlı Olarak Kristalografik ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 3-17.
50. Borazan, H. (2007). *Yarıiletkenlerde Kinetik Olayların Deneysel Araştırma Yöntemleri*, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van, 10-21.
51. Erol, A. ve Balkan, N. (2015). *Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları* (İkinci Baskı), Ankara: Seçkin Yayıncılık, 13-323.
52. Streetman, B.G. and Banerjee, S.K. (2006). *Solid State Electronic Devices* (Sixth Edition), New Jersey: Prentice-Hall, 1-167.
53. Colinge, J.P. and Colinge, C.A. (2011). *Yarıiletken Devre Elemanları Fiziği*. (Çev. S. Tüzemen ve S. Tekmen). Ankara: Nobel Akademik Yayınevi. (Eserin orijinali 2005'de yayımlandı). 15-88.
54. Çetin, S.Ş. (2010). *GaAsP/GaAs ve InGaN/GaN p-n Eklem Yapılarının Optik ve Yapısal Özelliklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-25.

55. Aydın, C. (2010). *Metal Oksit Katkılı Yarıiletken Malzemelerin Üretilmesi ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 8-14.
56. Uluadaoğlu, E. (2008). *Co, Mn, Nd katkılı SiO₂ ve SiO₂-TiO₂ İnce Filmlerin Elde Edilmesi ve Optik Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 4-22.
57. Shackelford, J.F. (2005). *Introduction to Materials Science for Engineers* (Sixth Edition), New Jersey: Pearson Education, 623-665.
58. Singh, J. (2003). *Electronic and Optoelectronic Properties of Semiconductor Structures*, U.K: Cambridge University Press, 46-62.
59. Hecht, J. (2008). *Understanding Lasers: An Entry Level Guide* (Third Edition), New Jersey: IEEE Press, 270-300.
60. Sarı, H. (2008). *2008-2009 Güz Dönemi Optoelektronik Dersi*, Ders Notu, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü, Ankara.
61. Kasap, S. and Capper, P. (2017). *Handbook of Electronic and Photonic Materials* (Second Edition), Switzerland: Springer International Publishing, 1-14, 725-740.
62. Li, T., Mastro, M. and Dadgar, A. (2011). *III-V Compound Semiconductors: Integration with Silicon-Based Microelectronics*, New York: CRC Press, 1-90.
63. Oura, K., Lifshits, V.G., Saranin, A.A., Zotov, A.V. and Katayama, M. (2003). *Surface Science: An Introduction*, Berlin: Springer-Verlag, 377-382.
64. Hudait, M.K., Lin, Y., Palmisiano, M.N., Tivarus, C., Pela J.P. and Ringel, S.A. (2004). Comparison of mixed anion, InAs_yP_{1-y} and mixed cation, In_xAl_{1-x}As metamorphic buffers grown by molecular beam epitaxy on (100) InP substrates. *Journal of Applied Physics*, 95(8), 3950-3560.
65. Çat, Y. (2013). *Katkısız ve Katkılı (Sb) Ge Tek Kristallerin Büyütülmesi, Yapısal ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-6.
66. Baran, V. (2013). *Czochralski Tekniğiyle Katkısız ve Sb Katkılı Ge Tek Kristallerinin Büyütülmesi ve Elektriksel Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 13-14.
67. Ullah, S. (2017). *Optical Control and Detection of Spin Coherence in Multilayer Systems*, Doktora Tezi, Sao Paulo Üniversitesi Fizik Enstitüsü, Sao Paulo/Brezilya, 9-11.
68. Anspaugh B.E. (1996). *GaAs Solar Cell Radiation Handbook*, California: National Aeronautics and Space Administration, 1-20.

69. Blakemore, J.S. (1982). Semiconducting and other major properties of gallium arsenide. *Journal of Applied Physics Letters*, 53(10), 123-181.
70. Adachi, S. (2009). *Properties of Semiconductor Alloys: group-IV, III-V and II-VI semiconductors*, U.K: John Wiley&Sons, 1-42.
71. Haas, A.W., Wilcox, J.R., Gray, J.L. and Schwartz, R.J. (2011). Design of a GaInP/GaAs tandem solar cell for maximum daily, monthly, and yearly energy output. *Journal of Photonics for Energy*, 1, 1-23.
72. Quaschnig, V. (2005). *Understanding Renewable Energy Systems*, US: Carl Hanser Verlag, 1-40.
73. Öztürk, H.H. (2008). *Güneş Enerjisi ve Uygulamaları*, İstanbul: Birsen Yayınevi, 2-237.
74. Akgün, A. (2006). *Mikrodenetleyici Tabanlı Güneş Enerjisinden Elektrik Enerjisi Üretim Sisteminin Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-14.
75. Karamanav, M. (2007). *Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 1-15.
76. Hankins, M. (2010). *Stand-Alone Solar Electric Systems: The expert handbook for planning, design and installation*, London: Earthscan, 1-40.
77. Şen, Z. (2008). *Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques: Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy*, London: Springer-Verlag London, 47-90.
78. Huang, X., Han, S. Huang W. and Liu, X. (2013). Enhancing solar cell efficiency: the search for luminescent materials as spectral converters. *Chemical Society Reviews*, 42, 173-201.
79. Herron, J.A., Kim, J., Upadhye, A.A., Huber, G.W. and Maravelias, C.T. (2015). A general framework for the assessment of solar fuel technologies. *Energy& Environmental Science*, 8(1), 126-157.
80. İnternet: Air Mass (AM). Web: <https://www.enlitechology.com/show/air-mass-am1-5g-am1-5d-306249.htm>, 20 Eylül 2020 'de alınmıştır.
81. Iqbal, M. (1983). *An Introduction to Solar Radiation*, Toronto: Academic Press, 1-50.
82. Goetzberger, A., Knobloch, J. and Voss, B. (1998). *Crystalline Silicon Solar Cells*, U.K: John Wiley&Sons, 1-45.
83. İnternet: Standard Solar Spectra. <https://www.pveducation.org/pvcdrom/appendices/standard-solar-spectra>, 20 Eylül 2020'de alınmıştır.

84. Henry, C.H. (1980). Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells. *Journal of Applied Physics*, 51(8), 4494-4500.
85. Trupke, T. and Würfel, M.A. (2002). Improving solar cell efficiencies by up-conversion of sub-band-gap light. *Journal of Applied Physics*, 92(7), 4117-4122.
86. Das, N., Wongsodihardjo, H. and Islam, S. (2015). Modeling of multi-junction photovoltaic cell using MATLAB/Simulink to improve the conversion efficiency. *Renewable Energy*, 74, 917-924.
87. Cotal, H., Fetzer, C. Boisvert, J., Kinsey, G., King, R., Hebert, P., Yoon, H. and Karam, N. (2009). III–V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics. *Energy Environmental Science*, 2, 174-192.
88. Fraas L.M and Partain L.D. (2010). *Solar Cells and Their Applications*, Canada: John Wiley&Sons, 1-100, 395-420.
89. Özen, Y., Akın, N., Kınacı, B. and Özçelik, S. (2015). Performance evaluation of a GaInP/GaAs solar cell structure with the integration of AlGaAs tunnel junction. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 137, 1-5.
90. Güler, S. (2020). *Characterization and Contact Resistivity Studies of ITO Thin Films for Use in Silicon Heterojunction Solar Cells*, Yüksek Lisans Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-30.
91. Erdiñç, A.K. (2020). *Katıhal Perovskite Güneş Hücrelerinde Yük Transfer Mekanizmalarının Açıklanması*, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 1-20.
92. Gordon, I., Cernel, L., Van Gestel, D., Beaucarne, G. and Poortmans, J. (2007). 8% efficient thin-film polycrystalline-silicon solar cells based on aluminum-induced crystallization and thermal CVD. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 15(7), 575-586.
93. Powalla, M., Paetel, S., Ahlswede, E., Wuerz, R., Wessendorf, C.D. and Friedlmeier, T.M. (2018). Thin-film solar cells exceeding 22% solar cell efficiency: An overview on CdTe-, Cu (In, Ga) Se₂-, and perovskite-based materials. *Applied Physics Reviews*, 5(4), 041602.
94. Lee, T.D. and Ebong, A.U. (2017). A review of thin film solar cell technologies and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1286-1297.
95. Fortes, M., Belfar, A. and Garcia-Loureiro, A.J. (2018). Efficiency increase of a-Si:H solar cells with optimized front and back contact textures. *Optik*, 158, 1131-1138.
96. Fahrner, W.R. (2013). *Amorphous silicon crystalline silicon heterojunction solar cells*, Berlin: Springer-Verlag, 1-20.
97. Akman, E., Akın, S., Karanfil, G. and Sönmezoğlu, S. (2013). Organik güneş pilleri. *Trakya University Journal of Engineering Sciences*, 14(1), 1-30.

98. Gürlek, A.K. (2019). *MOCVD ile Üretilen İnce Film CdTe Güneş Hücresi ve Mini Modül Fotovoltaik Cihazlarının Performans Karakterizasyonu ve Scaps Modellemesi*, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 1-17.
99. Yılmaz, P. (2019). *Alüminyum ve Cam Tabanlar Üzerine CIGS(Cu-In-Ga-Se) Güneş Hücresi Absorbans Tabakasının (P Tabakası) Solvothermal ve Elektro Kaplama Yöntemleriyle Sentezlenmesi*, Doktora Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 1-30.
100. Ramanujam, J., Bishop, D.M., Todorov, T.K., Gunawan, O., Rath, J., Nekovei, R., Artegiani, E. and Romeo, A. (2020). Flexible CIGS, CdTe and a-Si: H based thin film solar cells: A review. *Progress in Materials Science*, 110, 100619.
101. Akçay, N. (2017). *Cu₂ZnSnS₄ İnce Film Güneş Hücrelerinin Geliştirilmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 37-60.
102. Shin, D., Saparov, B. and Mitzi, D.B. (2017). Defect engineering in multinary earth-abundant chalcogenide photovoltaic materials. *Advanced Energy Materials*, 7(11), 1602366 (1-29).
103. Barkhouse, D.A.R., Gunawan, O., Gokmen, T., Todorov, T.K. and Mitzi, D.B. (2011). Device characteristics of a 10.1% hydrazine-processed Cu₂ZnSn(S₂,S)₄ solar cell. *Progress in Photovoltaics : Research and Applications*, 20(1), 6-11.
104. Bag, S., Gunawan, O., Gokmen, T., Zhu, Y., Todorov, T.K. and Mitzi, D.B. (2012). Low band gap liquid-processed CZTSe solar cell with 10.1% efficiency. *Energy & Environmental Science*, 5(5), 7060-7065.
105. Queisser, W. and Shockley, H.J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *Journal of Applied Physics*, 32(3), 510-519.
106. Wei W., Winkler, M.T., Gunawan, O., Gokmen, T., Todorov, T.K., Zhu, Y. and Mitzi, D.B. (2014). Device characteristics of CZTSSe thin-film solar cells with 12.6% efficiency. *Advanced Energy Materials*, 4(7), 1301465 (1-5).
107. Escoubas, L., Simon, J.J., Le Rouzo, J. and Bermudez, V. (2013). Innovative approaches in thin film photovoltaic cells. in *Optical Thin Films and Coatings* (pp. 596-630), Woodhead Publishing.
108. Lee, C.P. and Ho, K.C. (2018). Poly (ionic liquid)s for dye-sensitized solar cells: a mini-review. *European Polymer Journal*, 108, 420-428.
109. Rasi, D.D.C. and Janssen, R.A. (2019). Advances in solution-processed multijunction organic solar cells. *Advanced Materials*, 31(10), 1806499.
110. Kusuma, J., Balakrishna, R.G., Patil, S., Jyothi, M.S., Chandan, H.R. and Shwetharani, R. (2018). Exploration of graphene oxide nanoribbons as excellent electron conducting network for third generation solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 183, 211-219.

- 111.Öksel, C., Koç, Y., Yağlı, H. and Koç, A. (2018). Kuantum noktalı güneş hücreleri. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(2), 174-182.
- 112.İçli, K.Ç. (2018). *Production of Inorganic Charge Selective Layers for Mesoscopic Perovskite Solar Cells*, Doktora Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 7-30.
- 113.Rashidi, M. and Asgari, A. (2020). The structural effects on performance of a lateral AlGaAs/GaAs quantum well solar cell. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 41, 100799.
- 114.Loferski J.J. (1956). Theoretical considerations governing the choice of the optimum semiconductor for photovoltaic solar energy conversion. *Journal of Applied Physics*, 27, 777-784.
- 115.Markvart, T. and Castaner, L. (2005). *Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation*, U.K: Elsevier, 1-25.
- 116.Geisz, J.F., France, R.M., Schulte, K.L., Steiner, M.A., Norman, A.G., Guthrey, H.L., Young, M.R., Song, T. and Moriarty, T. (2020). Six-junction III-V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration. *Nature Energy*, 5(4), 326-335.
- 117.Green, M.A., Emery, K., Hishikawa, Y., Warta, W. and Dunlop, E.D. (2017). Solar cell efficiency tables (version 49). *Progress in Photovoltaics: Research Applications*, 25, 3-13.
- 118.Ikeri, H.I., Onyia, A.I. and Asogwa, P.U. (2019). Investigation of optical characteristics of semiconductor quantum dots for multi junction solar cells applications. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8(10), 3531-3535.
- 119.Olsen, G.H., Ettenberg, M. and D'Aiello, R.V. (1978). Vapor-grown InGaP/GaAs solar cells. *Applied Physics Letters*, 33(7), 606-608.
- 120.Garcia, I, Rey-Stolle, I. and Algora, C. (2012). Performance analysis of AlGaAs/GaAs tunnel junctions for ultra-high concentration photovoltaics. *Journal of Applied Physics Letters*, 45(4), 045101.
- 121.Nayak, P.P., Dutta, J.P. and Mishra, G.P. (2015). Efficient InGaP/GaAs DJ solar cell with double back surface field layer. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(3), 325-335.
- 122.Singh, K.J. and Sarkar, S.K. (2012). Highly efficient ARC less InGaP/GaAs DJ solar cell numerical modeling using optimized InAlGaP BSF layers. *Optical and Quantum Electronics*, 43(1-5), 1-21.
- 123.Siyu, L. and Xiaosheng, Q. (2011). AlGaAs/GaAs tunnel junctions in a 4-J tandem solar cell. *Journal of Semiconductors*, 32(11), 1-4.

124. Wheeldon, J.F., Valdivia, C.E., Walker, A.W., Kolhatkar, G., Jaouad, A., Turala, A., Riel, B., Masson, D., Puetz, N., Fafard, S., Ares, R., Aimez, V., Hall, T.J. and Hinzer, K. (2011). Performance comparison of AlGaAs, GaAs and InGaP tunnel junctions for concentrated multijunction solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19(4), 442-452.
125. Pla, J., Barrera, M. and Rubinelli, F. (2007). The influence of the InGaP window layer on the optical and electrical performance of GaAs solar cells. *Semiconductor Science and Technology*, 22(10), 1122-1130.
126. Saylan, S., Milakovich, T., Hadi, S.A., Nayfeh, A., Fitzgerald, E., A. and Dahlem, M. S. (2015). Multilayer antireflection coating design for GaAs_{0.69}P_{0.31}/Si dual-junction solar cells. *Solar Energy*, 122, 76-86.
127. Bouhafs, D., Moussi, A., Chikouche, A. and Ruiz, J.M. (1998). Design and simulation of antireflection coating systems for optoelectronic devices: Application to silicon solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 52(1-2), 79-93.
128. Wu, D.S., Lin, C.C., Chen, C.N., Lee, H.H. and Huang, J.J. (2015). Properties of double-layer Al₂O₃/TiO₂ antireflection coatings by liquid phase deposition. *Thin Solid Films*, 584, 248-252.
129. Hirst, L.C. and Ekins-Daukes, N.J. (2011). Fundamental losses in solar cells. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 19(3), 286-293.
130. Shivaganaik H and Jangamshetti S.H. (2011). *Modeling and analysis of multi-junction solar cells*. Proceedings of the International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology, 174-179.
131. Singh, P. and Ravindra, N.M. (2012). Temperature dependence of solar cell performance-an analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 101, 36-45.
132. Yamaguchi, M., Takamoto, T. and Araki, K. (2006). Super high-efficiency multi-junction and concentrator solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(18-19), 3068-3077.
133. Yamaguchi, M., Takamoto, T., Araki, K. and Ekins-Daukes, N. (2005). Multi-junction III-V solar cells: current status and future potential. *Solar Energy*, 79(1), 78-85.
134. Feng, S.W., Lai C.M., Tsai, C.Y. and Tu, L.W. (2014). Numerical simulations of the current-matching effect and operation mechanisms on the performance of InGaP/Si tandem cells. *Nanoscale Research Letters*, 9(1), 1-10.
135. Braun, A., Szabo, N., Schwarzburg, K., Hannappel, T., Katz, E.A. and Gordon, J.M. (2011). Current-limiting behavior in multijunction solar cells. *Applied Physics Letters*, 98(22), 223506.
136. Bertness, K.A., Kurtz, S.R., Friedman, D.J., Kibbler, A.E., Kramer, C. and Olson, J.M. (1994). 29.5%-efficient GaInP/GaAs tandem solar cells. *Applied Physics Letters*, 65(8), 989-991.

137. Wang, X. and Wang, Z.M. (2014). *High-Efficiency Solar Cells: Physics, Materials and Devices*, Switzerland: Springer, 597-625.
138. Azur Space. (2010). 28 % *Triple-Junction GaAs Solar Cell (TJ Solar Cell 3G28C)*. Heilborn: AZUR Space Solar Power GmbH, 1-2.
139. Lou, Y., Luo, H., Hu, T., Li, H. and Fu, J. (2013). Toxic effects, uptake, and translocation of Cd and Pb in perennial ryegrass. *Ecotoxicology*, 22(2), 207-214.
140. Murphy, D.M. (2001). *The Scarlet Solar Array: Technology Validation and Flight Results*, Hampton: National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, 1-10.
141. Kouzehkonani, O.T. (2014). *Production of Hydrogenated Amorphous Silicon Based Antireflection Coatings and Investigation of Optical Properties*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-20.
142. Myers, M.G., Wolford, D.S., Prokop, N.F., Krasowski, M.J., Parker, D.S., Cassidy, J.C., Spina, D.C. (2016). *NASA glenn research center solar cell experiment onboard the international space station*. IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2592-2595.
143. Wernham, D. (2011). Optical coatings in space, in *Advances in Optical Thin Films IV. International Society for Optics and Photonics*, 8168, 81680F.
144. Anwar, A., Elfiky, D., Hassan, G., Albona, M. and Marchetti, M. (2015). Outgassing Effect on Spacecraft Structure Materials. *International Journal of Astronomy, Astrophysics and Space Science*, 2(4), 34-38.
145. Keser, Ö.F., Yenisoy, A., and İdare, B. (2016). *Development of anti-reflective micro lens arrays for multi junction solar cells used on satellite platforms*. 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES), Antalya.
146. Grard, R.J.L. (1973). *Photon and Particle Interactions with Surfaces in Space*, Holland: Dr. Reidel Publishing, 3-120.
147. Camp, C.D. and Tung, K.K. (2007). Surface warming by the solar cycle as revealed by the composite mean difference projection. *Geophysical Research Letters*, 34(14), L14703.
148. Owens, M.J. and Forsyth, R.J. (2013). The heliospheric magnetic field. *Living Reviews in Solar Physics*, 10(1), 35.
149. Pellicori, S.F., Martinez, C.L., Hausgen, P. and Wilt, D. (2014). Development and testing of coatings for orbital space radiation environments. *Applied Optics*, 53(4), A339-A350.
150. The American Institute of Aeronautics and Astronautics. (2015). *Qualification and Quality Requirements for Space Solar Cells (AIAA S-111A-2015)*. U.S: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1-25.

151. European Space Agency. (2012). *European Cooperation for Space Standardization (ECSS) Space Engineering: Photovoltaic Assemblies and Components*. Netherlands: ESA, 1-197.
152. Yonezu, H. (2002). Control of structural defects in group III-V-N alloys grown on Si. *Semiconductor Science and Technology*, 17(8), 762-768.
153. Kroemer, H. (1987). Polar-on-nonpolar epitaxy. *Journal of Crystal Growth*, 81(1-4), 193-204.
154. Petroff, P.M. (1986). Nucleation and growth of GaAs on Ge and the structure of antiphase boundaries. *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena*, 4(4), 874-877.
155. Herman, M.A. and Sitter H. (1996). *Molecular Beam Epitaxy: Fundamentals and Current Status* (Second Edition), Berlin: Springer-Verlag, 1-265.
156. VG Semicon. (2000). *V80H-10 Molecular Beam Epitaxy System Operator's Manual*, East Grinstead: VG-Semicon, 1-100.
157. May, G.S and Spanos C.J. (2006). *Fundamentals of Semiconductor Manufacturing and Process Control*, New Jersey: John Wiley&Sons, 60-70.
158. Dill, F.H. (1975). Optical lithography. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 22(7), 440-444.
159. CESI S.p.A. (2020). Triple-Junction Solar Cell for Space Applications (CTJ30), Italy: CESI S.p.A, 1-2.
160. Gao, L., Gstöttner, J., Emling, R., Balden, M., Linsmeier, C., Wiltner, A., Hansch, W. and Schmitt-Landsiedel, D. (2004). Thermal stability of titanium nitride diffusion barrier films for advanced silver interconnects. *Microelectronic Engineering*, 76(1-4), 76-81.
161. Hong, C.Y., Peng, Y.C., Chen, L.J., Hsieh, W.Y. and Hsieh, Y.F. (1999). Improvement of morphological stability of Ag thin film on a TiN layer with a thin interposing metal layer. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 17(4), 1911-1915.
162. von Seefeld, H., Cheung, N.W., Maenpaa, M. and Nicolet, M.A. (1980). Investigation of titanium-nitride layers for solar-cell contacts. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 27(4), 873-876.
163. Liebl, H.J. and Herzog, R.F. (1963). Sputtering ion source for solids. *Journal of Applied Physics*, 34(9), 2893-2896.
164. Schroder, D.K. (2006). *Semiconductor Material and Device Characterization*, New Jersey: John Wiley&Sons, 653-671.

165. Başköse, Ü.C. (2016). *Yansıtıcı ve Yansıma Önleyici Optik İnce Film Malzemelerin Üretimi Analiz ve Test Süreçleri*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 7-18.
166. Valdivia, C.E., Desfonds, E., Masson, D., Fafard, S., Carlson, A., Cook, J. and Hinzer, K. (2008). *Optimization of antireflection coating design for multijunction solar cells and concentrator systems*. Photonics North 2008, International Society for Optics and Photonics, 7099, 709915.
167. Bernal-Correa, R., Morales-Acevedo, A., Mora, A. P., Monsalve, J. M. and Lopez, M. L. (2015). Design of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ triple junction solar cells with anti-reflective coating. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 37, 57-61.
168. Troparevsky, M.C., Sabau, A.S., Lupini, A.R. and Zhang, Z. (2010). Transfer-matrix formalism for the calculation of optical response in multilayer systems: from coherent to incoherent interference. *Optics Express*, 18(24), 24715-24721.
169. Zhan, F., Li, Z., Shen, X., He, H. and Zeng, J. (2014). Design multilayer antireflection coatings for terrestrial solar cells. *The Scientific World Journal*, 2014, 1-5.
170. İnternet: Reflectance Calculator. <https://www.filmetrics.com/reflectance-calculator>, 20 Eylül 2020'de alınmıştır.
171. Homier, R., Jaouad, A., Turala, A., Valdivia, C.E., Masson, D., Wallace, S.G. and Aimez, V. (2012). Antireflection coating design for triple-junction III–V/Ge high-efficiency solar cells using low absorption PECVD silicon nitride. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2(3), 393-397.
172. Ataser, T., Sonmez, N.A., Ozen, Y., Ozdemir, V., Zeybek, O. and Ozcelik, S. (2018). Developing of dual junction GaInP/GaAs solar cell devices: effects of different metal contacts. *Optical and Quantum Electronics*, 50(7), 277.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : Sertel, Tunç
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi, yeri : 15.06.1990, Balıkesir
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (536) 331 08 21
 e-mail : tunc.sertel@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / İleri Teknolojiler A.B.D.	Devam Ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Fizik A.B.D.	2016
Lisans	Ankara Üniversitesi / Fizik Mühendisliği	2013
Lise	Bandırma Kemal Pireci Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi	Proje Destek Uzmanı
2014-2016	Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi	Bursiyer Araştırmacı

Yayınlar

1. Cetin, S.S., Efker, H.I., Sertel, T., Tataroglu, A. and Ozcelik, S. (2020). Electrical properties of MOS capacitor with TiO₂/SiO₂ dielectric layer. *Silicon*, 1-5.
2. Baran, V., Cat, Y., Sertel, T., Ataser, T., Sonmez, N.A., Cakmak, M. and Ozcelik, S. (2020). A comprehensive study on a stand-alone germanium (Ge) solar cell. *Journal of Electronic Materials*, 49(2), 1249-1256.

3. Sertel, T., Ozen, Y., Baran, V. and Ozcelik, S. (2019). Effect of single-layer Ta₂O₅ and double-layer SiO₂/Ta₂O₅ anti-reflective coatings on GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cell performance. *Journal of Alloys and Compounds*, 806, 439-450.
4. Sertel, T., Sonmez, N.A., Cetin, S.S. and Ozcelik, S. (2019). Influences of annealing temperature on anti-reflective performance of amorphous Ta₂O₅ thin films. *Ceramics International*, 45(1), 11-18.
5. Ozen, Y., Sertel, T., Cetin, S.S. and Ozcelik, S. (2018). Characterization of double-junction GaAsP two-color LED structure. *Journal of Electronic Materials*, 47(12), 7129-7133.
6. Sertel, T., Ozen, Y., Cetin, S.S., Ozturk, M.K. and Ozcelik, S. (2018). Structural, optical and electrical characterization of dilute nitride GaP_{1-x-y}As_yN_x structures grown on Si and GaP substrates. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(3), 1939-1946.
7. Sertel, T., Ozen, Y., Tataroglu, A., Asar, T., Cetin, S.S. and Ozcelik, S. (2017). Electrical properties of dilute nitride GaAsPN/GaPN MQW p-i-n diode. *Journal of Electronic Materials*, 46(7), 4590-4595.

Uluslararası Kongre Tebliğleri

1. Cetin, S.S., Sertel, T., Ozen, Y. and Ozcelik, S. (2018). *The Study on Growth and Characterization of Double-Junction Dilute Nitride GaAsPN Structure*, 5th International Conference on Materials Science and Nanotechnology for Next Generation (MSNG 2018), Kapadokya, Türkiye.
2. Cetin, S.S., Efker, H.I., Sertel, T., Tataroglu, A. and Ozcelik, S. (2018). *Dielectric Properties of MOS Device Based on TiO₂/SiO₂ Oxide Layer*, Seventh Bozok Science Workshop, Poster Sunumu, Bozok Üniversitesi, Yozgat, Türkiye.
3. Sertel, T., Cömert, B., Efker, H.I., Sönmez, N.A. ve Özçelik, S. (2018). *The Study on Anti-Reflective Properties of Ta₂O₅ Thin Film Deposited on Different Substrates*, I. International Light and Light-Based Technologies Workshop, Poster 19, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
4. Sertel, T., Ozen, Y., Cat, Y., Cetin, S.S. and Ozcelik, S. (2018). *The Effect of Ta₂O₅ Anti-Reflection Layer on Efficiency of Triple Junction (GaInP/GaAs/Ge) Solar Cells*, I. International Light and Light-Based Technologies Workshop, Poster 18, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
5. Sertel, T., Ozen, Y., Sonmez, N.A., Asar, T. and Ozcelik, S. (2018). *Effect of Proton Radiation on Multi Junction III-V Space Solar Cells*, I. International Light and Light-Based Technologies Workshop, Poster 48, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

6. Ozen, Y., Sertel, T., Cetin, S.S., Asar, T. and Ozcelik, S. (2018). *Study on Characterizations of Double-Junction GaAsP two-color LED Structure*, I. International Light and Light-Based Technologies Workshop, Poster 49, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
7. Sertel, T., Ozen, Y., Sonmez, N.A. and Ozcelik, S. (2018). *Fabrication of Triple-Junction Solar Cells: Effect of Anti-Reflection Coating on Device Performance*, 8. International %100 Renewable Energy Conference, Maltepe Türkan Saylan Kültür Merkezi, Sözlü Sunum, İstanbul, Türkiye.
8. Özen, Y., Sönmez, N.A., Sertel, T., Kınacı, B. ve Özçelik, S. (2017). *The Production of Multi Junction III-V Photovoltaic Devices*, Turkish Physical Society 33. International Physics Congress, Herodot Kültür Merkezi, Sözlü Sunum, Bodrum, Turkey.
9. Sertel, T., Ozen, Y., Tataroglu, A., Asar, T., Cetin, S.S. and Ozcelik, S. (2017). *Electrical Properties of Dilute Nitride GaAsPN/GaPN MQW p-i-n Diode*, Turkish Physical Society 33. International Physics Congress, Herodot Kültür Merkezi, Poster Sunumu, Bodrum, Türkiye.
10. Sertel, T., Cetin, S.S. and Ozcelik, S. (2017). *The Studies on Epitaxial Growth of Dilute Nitride III-V Semiconductors by MBE Technique*, Turkish Physical Society 33. International Physics Congress, Herodot Kültür Merkezi, Sözlü Sunum, Bodrum, Türkiye.

Ulusal Kongre Tebliğleri

1. Sertel, T., Özen, Y. ve Özçelik, S. (2018). *Termal Döngünün GaInP/GaAs/Ge Üç Eklemlili Güneş Hücresinin Verimi Üzerine Etkisi*, 20. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı, Poster 49, Bilkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
2. Özen, Y., Sertel, T., Sönmez, N.A., Kurtuluş, G., Kınacı, B., Özçelik, S. ve Özbay, E. (2017). *Üç Eklemlili Güneş Hücre Yapısının Geliştirilmesi*, 19. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı, Poster 105, Koç Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
3. Sertel, T., Özen, Y., Kurtuluş, G., Asar, T., Öztürk, M.K., Çetin, S.Ş. ve Özçelik, S. (2016). *Seyreltik Azotlu GaAsPN/GaPN Kuantum Kuyu Yapısının MBE Tekniği ile Büyütülmesi, Yapısal Elektriksel Karakterizasyonu*, 22. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Poster 93, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
4. Efkere, H.İ., Sertel, T., Çetin, S.Ş. ve Özçelik, S. (2016). *Au/TiO₂/SiO₂/n-Si MIS Yapısının Eş-Püskürtme Tekniği ile Kaplanması ve Elektriksel Özelliklerinin Tavlama Sıcaklığına Göre Değişiminin İncelenmesi*, 22. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Poster 47, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
5. Özen, Y., Sönmez, N.A., Ataşer, T., Sertel, T., Çetin, S.Ş. ve Özçelik, S. (2016). *Güneş Hücreleri için Germanyum Alttaş Geliştirilmesi*, 22. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Poster 104, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

6. Boyalı, E., Korkmaz, B., Sertel, T., Efkere, H.İ., Özen, Y., Çetin, S.Ş., Özçelik, S. ve Kasap, M. (2016). *Pt Metal Kümelerin Katkısız SnO₂ Sensör Yapılarının Algılama Özelliklerine Etkisi*, 22. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Poster 27, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
7. Akpınar, Ö., Özkök, Y., Sertel, T., Dervişoğlu, H.C., Yamçier, Ç. ve Öztürk, M.K. (2016). *Kaya Tuzunun XRD ile Yapısal Analizi*, 22. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Poster 73, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
8. Sertel, T., Özen, Y., Asar, T., Çetin, S.Ş. ve Özçelik, S. (2016). *Seyreltik Azotlu GaP_{1-x-y}As_yN_x p-n Eklem Yapıların MBE Tekniği ile Büyütülmesi, Yapısal, Optik ve Elektriksel Karakterizasyonu*, 18. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı, Poster 82, Bilkent Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
9. Çetin, S.Ş., Sertel, T., Asar, T. ve Özçelik, S. (2016). *GaP/Si Yapılarının MBE Tekniği ile Büyütülmesi ve Karakterizasyonları*, Adım Fizik Günleri V, Poster 175, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye.
10. Sertel, T., Kurtuluş, G., Boyalı, E., Asar, T., Öztürk, M.K., Çetin, S.Ş. ve Özçelik, S. (2015). *Seyreltik Azotlu GaP_{1-x}N_x ve GaP_{1-x-y}As_yN_x Yarıiletken Yapılarının MBE Tekniği ile Büyütülmesi ve Karakterizasyonu*, 21. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Poster 59, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
11. Asar, T., Sertel, T., Korkmaz, B., Özen, Y., Efkere, H.İ., Baran, V., Çat, Y., Kurtuluş, G. ve Özçelik, S. (2015). *Germanyum Alttaş Üretimi: İlk Çalışmalar*, 20. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Poster 95, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
12. Efkere, H.İ., Asar, T., Başköse, Ü.C., Korkmaz, B., Sertel, T., Çetin, S.Ş. ve Özçelik, S. (2015). *SnO₂ Yansıma Önleyici Katmanın InGaAs/GaAs Süperörgü Yapılarının Optik ve Elektriksel Özelliklerine Etkisi*, 20. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Poster 96, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye.
13. Özen, Y., Akın, N., Sertel, T., Korkmaz, B., Çetin, S.Ş., Asar, T., Kınacı, B. ve Özçelik, S. (2015). *AlGaAs Tünel Diyot Entegrasyonlu GaInP/GaAs Güneş Hücresi Yapısının Performansı Üzerine Çalışma*, 20. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı, Poster 37, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye.

Hobiler

Yüzme, Yürüyüş, Futbol, Doğa Gezileri, Bilimsel Yayınlar



GAZİ GELECEKTİR..